

II. Die Ergebnisse der Staubuntersuchungen in silikosegefährdeten Betrieben

Von

HERMANN GESSNER

Abt.-Vorstand des Gaslaboratoriums der EMPA, Zürich
Direktion Prof. Dr. P. SCHLÄPFER

mit einem Beitrag von F. DE QUERVAIN und H. BÜHLER

(Mit 46 Figuren)

Die praktischen Untersuchungen, über die im nachfolgenden berichtet wird, sind im wesentlichen von Herrn Ing. H. BÜHLER (Zürcher Arbeitsgemeinschaft für die Erforschung und Bekämpfung der Silikose) im Gaslaboratorium der EMPA durchgeführt worden; die mineralogischen Untersuchungen wurden von Herrn P.-D. Dr. F. DE QUERVAIN, Geotechnische Prüfstelle des Mineralogisch-Petrographischen Institutes der E.T.H., übernommen, während für die Behandlung medizinischer Fragen jeweils Herr Dr. J. RÜTTNER (Zürcher Arbeitsgemeinschaft) zur Verfügung stand.

A. Zielsetzung

Im gemeinsamen Aufgabenbereich des Mineralogen, des technischen Chemikers und insbesondere des Staubspezialisten sind an erster Stelle die drei folgenden Programmpunkte zu nennen:

- a) Die Untersuchung der bestehenden Staubbedingungen in den als silikosegefährlich bezeichneten Betrieben,
- b) systematische Untersuchungen über die Abhängigkeit des Staubanfalles und des Staubzustandes von Material und Bearbeitung,
- c) das Studium der Staubbekämpfung.

Die drei genannten Aufgaben seien im folgenden kurz etwas beleuchtet:

a) Untersuchung des Staubzustandes

Zur eindeutigen und vollständigen Charakterisierung eines Staubes sind folgende Angaben notwendig:

1. Die Staubkonzentration, das ist die Gesamtmenge der in der Volumeinheit der staubhaltigen Luft schwebenden festen Anteile; sie wird zweckmässig in mg oder g im m³ ausgedrückt.
2. Die Kornabstufung (Kornzusammensetzung) der Staubteilchen.
3. Die mineralogische bzw. chemische Zusammensetzung des Staubes, welche im Bereiche der verschiedenen Kornfraktionen (Fraktionen nach Korngrössen) Änderungen aufweisen kann. Die chemische Zusammensetzung der gasförmigen Anteile des Staubsystems, d. h. der Wassergehalt und etwa vorhandene luftfremde gasförmige Beimengungen in der Luft wird in silikosegefährlichen Betrieben seltener von Bedeutung sein, als dies etwa für rauchhaltige Luft oder für Staubluft chemischer Betriebe der Fall sein kann.

Da ein «Staub» in seiner Konzentration und in seiner Zusammensetzung selten über grössere Räume (insbesondere nach der Höhe) und über längere Zeiten konstant bleibt, sondern sich meistens dauernd verändert, ist es zweckmässig, nicht einfach von «Staub» zu sprechen, sondern von Staubsystem, wenn ein Staub in einem bestimmten Raum betrachtet wird, und von Staubzustand, wenn der Zustand des Staubsystems in einem bestimmten Zeitpunkt charakterisiert werden soll.

Einige immer vorhandene, durch die Natur des Aerosolzustandes gegebene Eigentümlichkeiten der Veränderungen in Stauben, die sich theoretisch erfassen lassen, werden unten eingehender besprochen.

Bei praktischen Staubuntersuchungen müssen die in allen Betrieben stets auftretenden starken Schwankungen derart erfasst werden, dass die Untersuchung einen massgebenden Mittelwert ergibt.

Der massgebende Mittelwert für die Beurteilung der Silikosegefährlichkeit eines Staubes ist diejenige Staubkonzentration und Staubzusammensetzung (nach Korngrössen und Mineralbestandteilen), die, während einer längeren Arbeitsperiode eingeatmet, die gleiche Staubaufnahme ergeben würde, wie sie in Wirklichkeit während der gleichen Zeit in dem stark schwankenden Staubzustand erfolgt.

b) Die Abhängigkeit des Staubanfalles und der Staubeigenschaften von Material und Bearbeitung

Jede Staubbildung ist vom bearbeiteten oder verarbeiteten Rohmaterial einerseits und von der Art der Bearbeitung andererseits abhängig.

Neben der speziellen Aufgabe des Mineralogen und des Chemikers, das Rohmaterial zu charakterisieren, ist eine genaue Aufnahme der Bearbeitungsbedingungen notwendig; die charakteristischen Merkmale der Bearbeitungsmaschinen (Bohrhämmer, Mühlen, Schleifereien usw.) d. h. deren Arbeitsvorgang und Werkzeugmaterial sowie die aufgewendeten Kräfte müssen ermittelt werden.

Es ist vorgesehen, systematische Versuche im Laboratorium durchzuführen, welche eine genauere Bestimmung der Bedingungen erlauben, als dies während der normalen Arbeit in irgendwelchen Betrieben der Fall ist.

Die statistische Auswertung

Die Ergebnisse der unter a) und b) genannten Untersuchungen sind mit den Befunden der medizinischen Untersuchungen zu vergleichen und statistisch auszuwerten.

Es muss möglich sein, aus einem grösseren Untersuchungsmaterial Zusammenhänge zwischen dem Staubzustand und der Gefährlichkeit eines Betriebes zu finden und die für die Silikosegefährlichkeit massgebenden Faktoren (Staubkonzentration, Korngrössen, Mineralkomponenten usw.) zu erkennen, so dass dann auf Grund einer Betriebsuntersuchung die Gefährlichkeit eines Betriebes beurteilt werden kann, bevor nach Jahren auftretende Silikosefälle die Gefahr aufdecken.

Diese Ergebnisse werden eine Präzisierung und notwendigenfalls eine Revision der heute schon gesetzlich vorgeschriebenen Prüfungen¹⁾ erlauben.

c) Das Studium der Staubbekämpfung

Die Überprüfung der Wirksamkeit der heute üblichen und teilweise vorgeschriebenen Staubbekämpfungsmassnahmen und die kritische Prüfung neuer Staubbekämpfungsmethoden im Laboratorium und im praktischen Betrieb stellt unseres Erachtens eine der wichtigsten Aufgaben im Rahmen der Silikosebekämpfung dar.

Die Durchführung von Studien in dieser Richtung kann jederzeit und vollkommen unabhängig von den Resultaten der übrigen Untersuchungen vorgenommen werden.

Die Gefahr, einmal eine Staubbekämpfungsmassnahme zu empfehlen oder vorzuschreiben in einem Betrieb, welcher sich nachträglich an sich als nicht

¹⁾ Bundesratsbeschluss über die Bekämpfung der Staublung (Silikose) im Tunnel-, Stollen- und Bergbau vom 4. 12. 1944. In diesem Bundesratsbeschluss erfolgt die Abstufung der Silikosegefährlichkeit ausschliesslich auf Grund des Quarzgehaltes des zu durchfahrenden oder zu bearbeitenden Gesteins.

oder wenig silikosegefährlich erweisen könnte, ist natürlich kein Grund, die Arbeiten in dieser Richtung nicht zu fördern.

Eine Reihe von Untersuchungen an Staubabscheidern industrieller Betriebe, die in der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt durchgeführt worden sind, zeigt, dass die Staubbekämpfung an vielen Orten noch ganz wesentlich verbessert werden kann.

Die Resultate derartiger Untersuchungen werden ebenfalls die Möglichkeit bieten, allfällige zweckmässige Ergänzungen oder Abänderungen der im oben erwähnten Bundesratsbeschluss vorgeschriebenen Vorbeugungsmassnahmen vorzuschlagen.

Im folgenden soll über einige Ergebnisse der bis heute durchgeführten Untersuchungen, wie sie sich aus dem skizzierten Arbeitsprogramm ergaben, berichtet werden.

Es zeigte sich zu Beginn der Arbeit die Notwendigkeit, einige grundlegende Eigentümlichkeiten des Staubzustandes theoretisch abzuklären und die geeignet erscheinenden Untersuchungsmethoden kritisch zu überprüfen. Es erscheint auch im folgenden zweckmässig, als Grundlage für das Verständnis der weiteren Ausführungen zunächst einen allgemeinen Überblick über die wesentlichen Staubeigenschaften und über die verschiedenen, in der Literatur beschriebenen Untersuchungsmethoden zu geben; im zweiten Teil werden die erhaltenen Untersuchungsergebnisse mitgeteilt. In einem Anhang sind einige der ausgearbeiteten und kritisch überprüften Untersuchungsmethoden näher beschrieben.

B. Grundlagen

Unter Staub versteht man ganz allgemein die Verteilung feinsten, fester Partikel in einem gasförmigen Medium, deren Teilchengrössen so gering sind, dass sie nur sehr langsam sedimentieren, also eine gewisse Zeitdauer in der Luft schwebend erscheinen.

Mit dieser Definition ordnet sich der Staub zwanglos als Gruppe in die folgende Einteilung der dispersen Systeme ein und erscheint zusammen mit Nebel und Rauch in der nächsthöheren Gruppe (Klasse) der Aerosole.

Wir unterscheiden im folgenden entsprechend den Ausführungen auf Seite 14 weiter zwischen Staubsystem, worunter wir den Staub in einem bestimmt begrenzten Raum verstehen, und, unter Berücksichtigung der Tatsache, dass sich ein Staubsystem dauernd ändert, dem Staubzustand, womit der in einem bestimmten Zeitpunkt herrschende Zustand des ins Auge gefassten Staubsystems bezeichnet wird.

Die Sedimentationsgeschwindigkeit

Die Sedimentationsgeschwindigkeit der einzelnen Teilchen ist das entscheidende Merkmal für die Beständigkeit eines Staubes. Für nahezu alle

Einteilung der dispersen Systeme nach dem Aggregatzustand der am System beteiligten Stoffe

Aggregatzustand des		Allgemeine Bezeichnung	Beispiele	
Dispersionsmittels (Medium)	dispersen Stoffes			
Fest	Fest	farbige Gläser (kolloidzerteilte Metalle und Metalloxyde in Glas)		
Fest	Flüssig			Flüssigkeitseinschlüsse in feinporigen Mineralien (Gele)
Fest	Gasförmig			feinporige Stoffe (Meerschaum, Aktivkohle)
Flüssig	Fest	Sole oder Suspensoide, Hydrosole, Organosole (kolloide Metallsole)		
Flüssig	Flüssig	Emulsoide (Ölemulsionen, Milch)		
Flüssig	Gasförmig	Schäume		
Gasförmig	Fest	Staub } Aerosole oder Schwebstoffe		
Gasförmig	Flüssig			Nebel }
Gasförmig	Gasförmig			nicht beständig, in molekulare Gasgemische übergehend

Staubprobleme in der Praxis ist die Kenntnis der Zusammenhänge zwischen Teilchengröße und Fallgeschwindigkeit ausschlaggebend.

In Fig. 1 sind die Fallgeschwindigkeiten kugelförmiger Quarzteilchen im Bereiche zwischen 0 und $12 \mu \varnothing$ dargestellt²⁾. Die Fallgeschwindigkeiten sind nach den angegebenen Formeln (STOKES, CUNNINGHAM) berechnet; sie gelten streng nur für kugelförmige Teilchen. Für natürliche Staubteilchen, die nie Kugelform aufweisen und häufig ganz erhebliche Abweichungen davon zeigen, wird der sogenannte Äquivalentradius oder Äquivalentdurchmesser angegeben.

Der Begriff des Äquivalentradius ist in der Technik der Schlämmanalyse zur Bestimmung der Teilchengrößen aus der Fallgeschwindigkeit der Teilchen heute allgemein gebräuchlich. Der Begriff ist von SVEN ODÉN geprägt worden; er deckt sich mit dem von E. SCHÖNE 1868 eingeführten Begriffe der «Körner gleichen hydraulischen Wertes»³⁾; man versteht darunter den Radius des kugelförmigen Teilchens, das die gleiche Fallgeschwindigkeit wie das nicht kugelförmige betrachtete Teilchen aufweist. Neuere Untersuchungen von ANDREASEN⁴⁾ zeigen, dass der Äquivalentradius recht gut mit dem aus Zählung und Wägung berechneten mittleren Radius, d. h. dem

²⁾ Das in der Technik übliche Zeichen \varnothing für Durchmesser wird im folgenden auch für die Teilchendurchmesser benützt.

³⁾ Vgl. H. GESSNER, Die Schlämmanalyse, S. 11 (Leipzig 1931).

⁴⁾ A. H. M. ANDREASEN, VID-Forschungsheft 399 «Die Feinheit fester Stoffe und ihre technologische Bedeutung» Berlin, Nov./Dez. 1939; ferner Kolloid-Z. 48, 175 (1929).

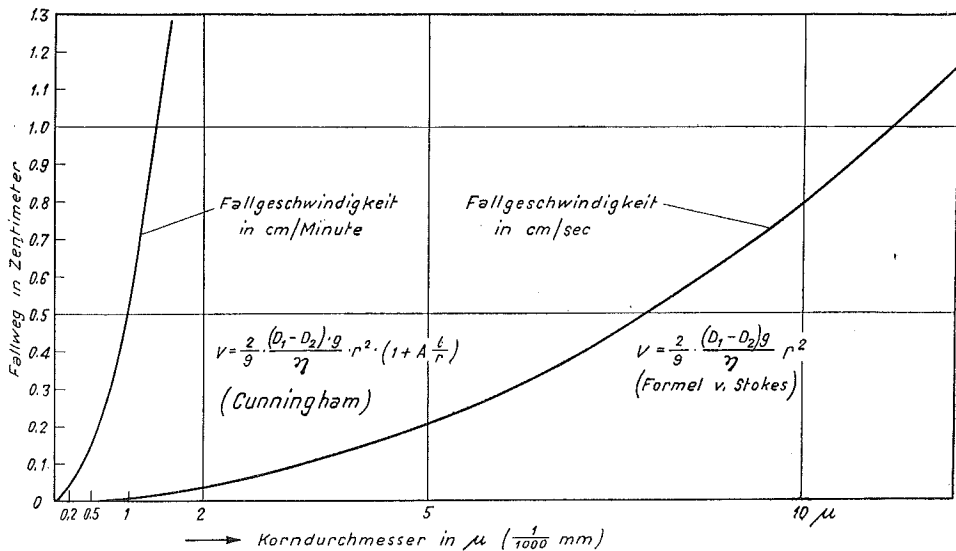


Fig. 1

Die Fallgeschwindigkeit kugelförmiger Quarzteilchen in der Luft

Die in den Formeln auftretenden Zeichen bedeuten:

V = Fallgeschwindigkeit des Teilchens in $\text{cm}\cdot\text{sec}^{-1}$

D_1 = Dichte (spezifisches Gewicht) des Teilchens ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

D_2 = Dichte des Mediums ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)

g = Erdbeschleunigung $981 \text{ cm}\cdot\text{sec}^{-2}$

μ = Viskosität (innere Reibung, Zähigkeit) des Mediums (für Luft $0,00018 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{sec}^{-1}$)

r = Teilchenradius in cm .

Die Formel von STOKES besitzt für Aerosolteilchen Gültigkeit im Bereiche von etwa $10 \mu \varnothing$ ($r = 0,0005 \text{ cm}$) bis gegen $100 \mu \varnothing^1$, für Teilchen unter $10 \mu \varnothing$ muss mit der erweiterten STOKES-Formel nach CUNNINGHAM gerechnet werden, im Zusatzfaktor der Formel bedeuten:

A = eine Konstante, 0,85

l = mittlere Weglänge der Gasmoleküle ($95 \cdot 10^{-7} \text{ cm}$).

¹⁾ Über die Gültigkeit der STOKES'schen Fallformel und Berechnung der Fallgeschwindigkeiten ausserhalb ihres Gültigkeitsbereiches vergleiche folgende Arbeiten:

L. SCHILLER, Fallversuche mit Kugeln und Scheiben, Handb. der Experimentalphysik, Bd. IV, 2. Leipzig 1932.

HUNTER ROUSE, Nomogram for the Settling Velocity of Spheres, Report of the Committee on Sedimentation, Nat. Research Council. Washington D. C. May 1937, S. 57.

K. O. PEDERSEN, in Kolloidchem. Taschenbuch, 2. Aufl., Leipzig 1944.

Radius der kugelförmigen Teilchen gleicher Masse übereinstimmt; die Abweichungen sind selten mehr als 2 %, sofern die Teilchen nicht in ausgesprochenen Tafel- oder Stäbchenformen vorliegen.

Für die Beständigkeit eines Staubes ist praktisch die Fallgeschwindigkeit und nicht der Durchmesser seiner Einzelteilchen entscheidend, so dass auch

unter diesem Gesichtspunkt die Benützung des Begriffes des Äquivalentradius bzw. des Äquivalentdurchmessers durchaus gerechtfertigt ist. Wo im folgenden von Teilchendurchmesser die Rede ist, ist damit durchweg der Äquivalentdurchmesser verstanden.

Aus den Kurven in Fig. 1 ergibt sich, dass Staubteilchen von mehr als 10μ Korndurchmesser bereits Fallgeschwindigkeiten von Zentimetern pro Sekunde aufweisen, während Teilchen um $1,5 \mu$ Durchmesser eine Fallgeschwindigkeit von ca. 1 Zentimeter in der Minute besitzen und dann die noch feineren Staubteilchen sehr langsam sedimentieren.

Das Verhalten polydisperser Staubsysteme

Der in der Industrie, auf Baustellen und im Stollenbau auftretende Staub besteht immer aus recht verschiedenen grossen Mineralpartikeln, deren Korngrössen über einen Bereich zwischen etwa $0,1$ und 100μ verteilt sind.

Die vorhandene Kornverteilung oder Kornabstufung, das ist die prozentuale oder absolute Verteilung der Staubpartikel nach Gewicht oder nach Teilchenzahl auf Fraktionen bestimmter Durchmesserbereiche, wird am zweckmässigsten in Form von Kurven dargestellt. Über die graphischen Darstellungsmethoden orientiert Figurentafel I mit den Fig. 2 — 5.

Es soll nun zunächst untersucht werden, in welcher Weise sich ein im Anfangszustand gleichmässig in einem bestimmten Raum verteiltes System bekannter Kornzusammensetzung infolge der Sedimentation der Teilchen mit der Zeit verändert.

In der Figurentafel II ist das Verhalten eines derartigen polydispersen Staubsystems dargestellt⁵⁾.

Der Staub sei im Anfangszustand (zur Zeit $t = 0$) in einem 3 m hohen Raum gleichmässig verteilt. Es werden nun die Veränderungen untersucht, die eintreten, wenn der Staub in vollkommen ruhiger Luft nur der Einwirkung der Schwerkraft unterworfen ist.

Im Anfangszustand ist die — beliebig gewählte — Kornverteilungskurve an jedem Ort im Raume gleich, sie ist in Fig. 7a dargestellt; ihr Maximum liegt bei einem Korndurchmesser von 15μ . In der obern Figurenreihe ist der Staubzustand schematisch in der Weise dargestellt, dass nur gerade die Teilchen der Kornfraktionen mit 1 , 10 und 100μ Durchmesser in ihrer Lage im Raum eingezeichnet sind, Fig. 6a ist der Anfangszustand.

Mit dem Anfangszustand ($t = 0$) beginnt jedes Teilchen mit der von seiner Grösse abhängigen Fallgeschwindigkeit zu sedimentieren. Die grössten Teilchen fallen sehr rasch; die Teilchen mit 100μ Korndurch-

⁵⁾ Polydisperse Systeme sind disperse Systeme, die im Sinne der vorangehenden Ausführungen verschiedene Korngrössen enthalten, im Gegensatz zu den monodispersen Systemen, deren disperse Anteile alle die nämliche Grösse aufweisen.

Figurentafel I

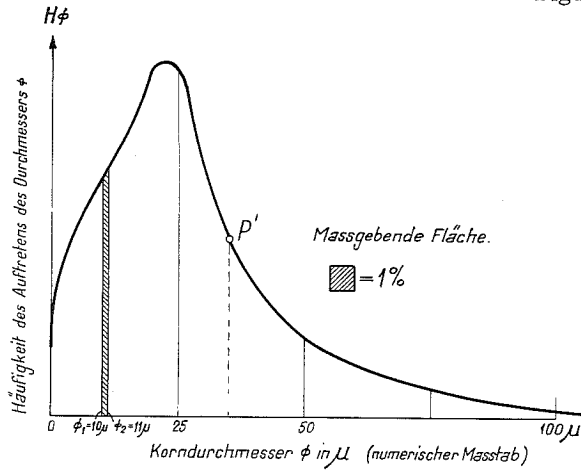


Fig. 2

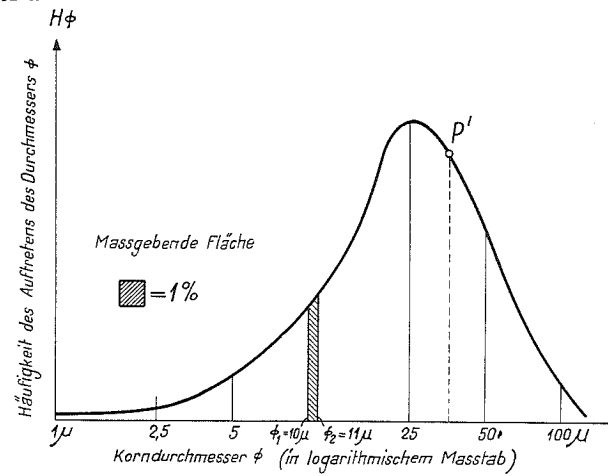


Fig. 3

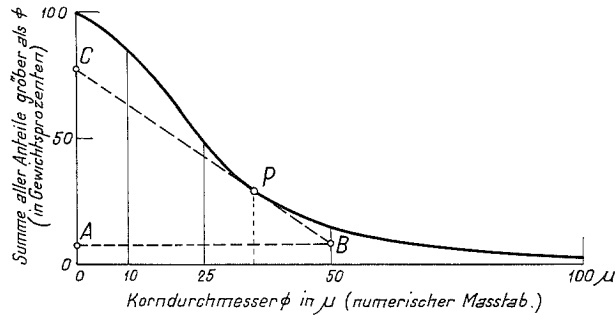


Fig. 4

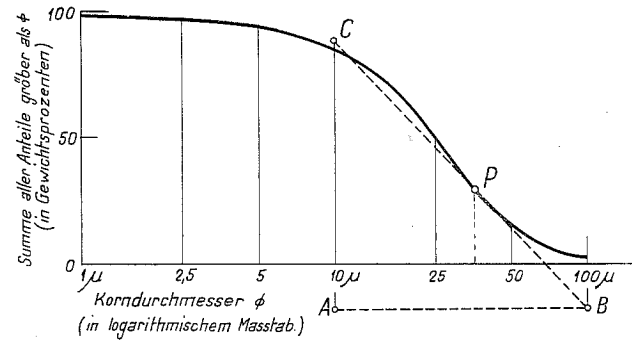


Fig. 5

Text zu Figurentafel I

In den Figuren 2—5 ist die Kornzusammensetzung ein und derselben Staubprobe nach verschiedenen Methoden graphisch zur Darstellung gebracht. Die Kornzusammensetzung des Staubes (wie sie beispielsweise aus der Schlämmanalyse erhalten wurde) ist folgende:

Anteile größer als 100 μ Korndurchmesser	Gewichtsprozent
» 100 — 50 μ	13
» 50 — 25 μ	34
» 25 — 10 μ	36
» 10 — 5 μ	9
» 5 — 2,5 μ	3
» 2,5 — 1,0 μ	2
» feiner als 1,0 μ	1
Summe (Kontrolle)	100,0 Gewichtsprozent

In der untern Figurenreihe (Fig. 4 und 5) ist die Kornabstufung als sogenannte *Summenlinie* in das Koordinatensystem eingetragen; bei dieser Darstellung wird über dem als Abszisse aufgetragenen *Korndurchmesser* \varnothing die Summe aller Kornfraktionen in Gewichtsprozenten eingetragen, die größer sind, als die Abszisse angibt.

Links (Fig. 4) ist der Korndurchmesser in numerischem Maßstabe, rechts (Fig. 5) in logarithmischem Maßstabe aufgetragen; die Darstellung in logarithmischem Maßstabe hat den Vorteil, dass die Bilder übersichtlicher werden, namentlich dann, wenn sich der Korngrößenbereich über mehrere Dezimalen erstreckt.

Augenfälliger und für die Charakterisierung der verschiedenen Staubsysteme besser geeignet, ist die sogenannte *Flächendarstellung* der Kornverteilungskurven, wie sie in den obern Fig. 2 und 3 angewandt ist. Die Kurven sind die Differentialfunktionen der Summenlinien. Die Menge einer Fraktion zwischen zwei Durchmessern \varnothing_1 und \varnothing_2 wird durch die Fläche zur Darstellung gebracht, welche von den beiden Ordinaten, dem herausgeschnittenen Kurvenabschnitt und der Strecke $\varnothing_1 \varnothing_2$ auf der Abszissenachse gebildet wird (vgl. das Beispiel der schraffierten Flächen in Fig. 2 und 3, welches die Kornfraktion zwischen den Durchmessern $\varnothing_1 = 10 \mu$ und $\varnothing_2 = 11 \mu$ darstellt).

Die Ordinaten entsprechen einer *Häufigkeit* (ähnlich der Wahrscheinlichkeit in Wahrscheinlichkeitsfunktionen), in welcher der zugehörige Durchmesser \varnothing im System auftritt.

Die Kornverteilungskurven der in der Praxis auftretenden Staubsysteme weisen meistens bei einem bestimmten Korndurchmesser ein ausgesprochenes Maximum auf (häufigster Korndurchmesser); oft nähern sich die Kurven bei der Darstellung in logarithmischem Maßstab einer *Gauss'schen Fehlerverteilungskurve*²⁾.

Die Kornverteilungskurven in Flächendarstellung werden am einfachsten und genauesten durch *graphische Konstruktion* aus der zunächst aufzuzeichnenden Summenlinie erhalten.

Man zieht an mehrere Punkte der Summenlinie die Tangenten und bestimmt deren Höhe über einer als *Massbasis* für die Konstruktion der Differentialfunktion gewählten Strecke. Die erhaltene Höhe ist die gesuchte Ordinate der zu konstruierenden Kurve zum Durchmesser \varnothing . Die Konstruktion ist zur Erläuterung in Fig. 4 und 5 in Punkt P durchgeführt; als Massbasis ist die Strecke AB gewählt, die Ordinate von P' ist dann gleich der Strecke AC, welche, über dem P zugehörigen \varnothing in den Fig. 2 und 3 aufgetragen, den gesuchten Punkt P' ergibt.

In gleicher Weise kann die Kornverteilung dargestellt werden, wenn an Stelle der Gewichtsanteile der Fraktionen deren Teilchenzahlen aufgetragen werden; das Gewicht der Kurven verschiebt sich alsdann mit der 3. Potenz ihrer Höhe nach links und wird im Bereiche kleiner Korngrößen unsicher.

²⁾ Vgl. H. GREEN, Journ. Franklin Inst. 192, 637 (1921).

Figurentafel II

Fig. 6

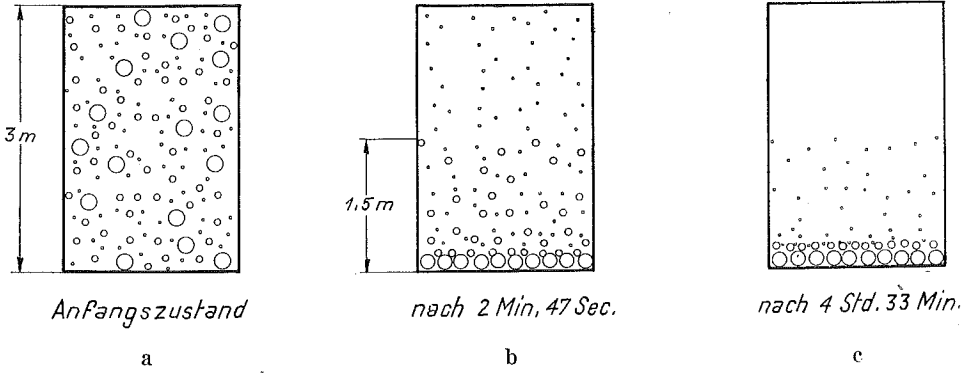


Fig. 7

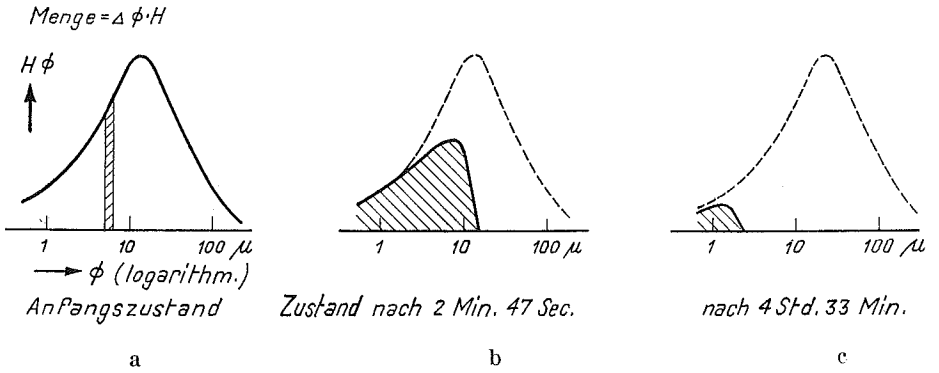
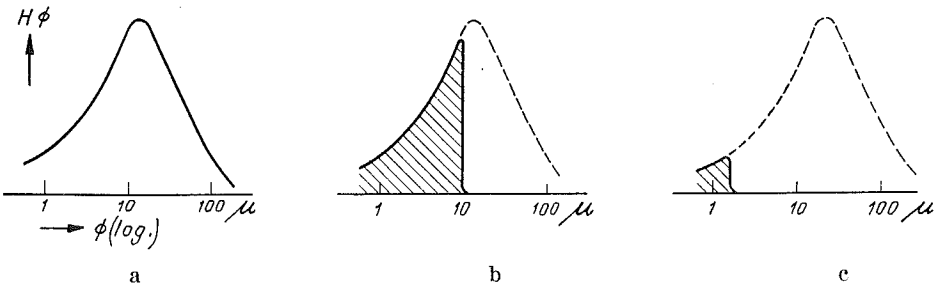


Fig. 8



messer weisen eine Fallgeschwindigkeit von ≈ 50 Zentimetern pro Sekunde auf, sind also nach 6 Sekunden vollständig aussedimentiert.

Nach 2 Minuten und 47 Sekunden hat die Fraktion mit 10μ Teilchendurchmesser eben die halbe Raumhöhe durchfallen, die untere Hälfte ist aussedimentiert (Bilderreihe b in der Mitte); die grössten in diesem Zeitpunkt gerade noch über dem Boden schwebenden Teilchen sind ca. 15μ gross; alle grösseren Teilchen sind vollkommen aussedimentiert, während sich die feineren Fraktionen um den ihrer Sedimentationsgeschwindigkeit entsprechenden Betrag abgesenkt haben, die Fraktion von 1μ Durchmesser z. B. nur um $\approx 1,5$ Zentimeter.

Die Kornverteilungskurve der im gesamten Raum noch schwebenden Staubmenge ist in der Fig. 7b dargestellt. Diese Menge ergibt — insgesamt oder für jede einzelne Fraktion berechnet — die mittlere Staubkonzentration im Raum, wenn sie auf das gesamte Raumvolumen bezogen wird.

Nach 4 Stunden und 33 Minuten sind die Teilchen mit 1μ Korndurchmesser eben um die halbe Raumhöhe sedimentiert; die entsprechende Kornverteilungskurve für die Staubmenge im ganzen Raum ist in der Fig. 7c dargestellt.

Massgebend für die Beurteilung des Staubes ist nun aber nicht die mittlere Staubkonzentration und Kornverteilung im ganzen Raum, sondern der Staubzustand in Kopfhöhe, d. h. an dem Ort, wo der Staub eingeatmet wird.

Die Konzentration in irgendeiner Höhe im Raum ist dadurch gekennzeichnet, dass alle Kornfraktionen, die noch nicht unter die kritische Höhe hinuntersedimentiert sind, in ihrer ursprünglichen Konzentration noch vorhanden sind, da ja alle Teilchen einer Fraktion mit der gleichen, von ihrer Korngrösse abhängigen Fallgeschwindigkeit sedimentieren.

Der massgebende Staubzustand

Für das gewählte Beispiel resultieren für den Zustand in 1,5 Meter Höhe (Kopfhöhe) über Boden die in der untersten Figurenreihe (8a, b und c) dargestellten Kornverteilungskurven; die Unterschiede gegenüber dem mittleren Staubzustand im ganzen Raum ergeben sich aus den Figuren eindeutig.

Für die Beurteilung der Silikosegefährlichkeit eines Staubes unter Berücksichtigung der Kornzusammensetzung zeigen die Kurven folgendes: Wenn die Staubteilchen über 10μ Korndurchmesser als nicht mehr silikosegefährlich gelten, so ist der Staubzustand zur Zeit $t = 2$ Minuten 47 Sekunden noch als genau gleich gefährlich zu beurteilen wie zur Zeit $t = 0$ (Anfangszustand), trotzdem die gesamte Staubmenge um mehr als die Hälfte abgenommen hat; die gefährlichen Fraktionen unter 10μ Korndurchmesser sind in der massgebenden Höhe noch in ihrer ursprünglichen Konzentration vorhanden.

Das Verhalten bei einem konstanten Staubanfall

Im gewählten Beispiel von Figurentafel II war angenommen, dass eine bestimmte Staubmenge im Anfangszustand gleichmässig zerteilt sei und nun, sich selbst überlassen, sedimentiere. Diese Bedingung ist in der Praxis selten erfüllt, etwa nach Sprengschüssen, durch welche der Staub gleichmässig im Raum zerteilt wird und nachher kein weiterer Staub mehr anfällt.

Viel häufiger liegt folgender Fall vor: Durch den Arbeitsprozess wird mehr oder weniger kontinuierlich Staub erzeugt, welcher sich im Raum zunächst anreichert, gleichzeitig aber zu sedimentieren beginnt, so dass sich für jede Kornfraktion ein Gleichgewichtszustand einstellen muss, in welchem gleichviel Staub aus dem Raum aussedimentiert wie frisch anfällt.

Die Verhältnisse für diesen Fall sind etwas komplizierter als im besprochenen Beispiel der Figurentafel II, sie seien an Hand der Figurenreihe 9—12 entwickelt.

Den Überlegungen wird folgende Situation (vgl. Fig. 9) zugrunde gelegt:

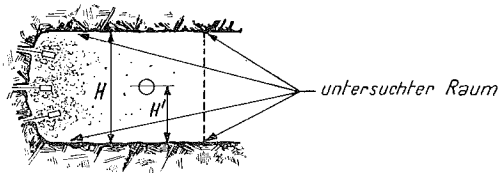


Fig. 9

Beispiel einer Situation mit kontinuierlichem Staubanfall.

Die in der Brust eines Stollens von der Höhe H angesetzten drei Bohrhämmer erzeugen einen kontinuierlichen Staubanfall von a Gramm Staub/sec; der Staub verteilt sich gleichmässig im Raum.

Eine Ventilation bzw. eine Lüfterneuerung wird nicht angenommen.

Es werden nun zunächst die Verhältnisse an einer einzelnen Kornfraktion untersucht; für alle andern Fraktionen gelten dann die gleichen Gesetzmässigkeiten, nur sind die entsprechenden Fallgeschwindigkeiten in Rechnung zu setzen.

Der anfallende Staub beginnt sofort mit der Geschwindigkeit V zu sedimentieren (schematisch in Fig. 10 dargestellt); nach der Zeit $\frac{H}{V}$ sind die zur Zeit $t=0$ (Beginn) in die obersten Luftschichten des Raumes gelangten Staubteilchen eben auf dem Boden sedimentiert, es befindet sich in diesem Zeitpunkt gerade die Hälfte des angefallenen Staubes noch in der Luft, die andere Hälfte ist sedimentiert. Bis zu dieser Zeit hat die Staubkonzentration im Raum zugenommen, von diesem Moment an bleibt sie (in bezug auf die betrachtete Kornfraktion mit der Fallgeschwindigkeit V) konstant; es fällt nun dauernd so viel Staub aus dem Raum aus, wie hineingebracht wird.

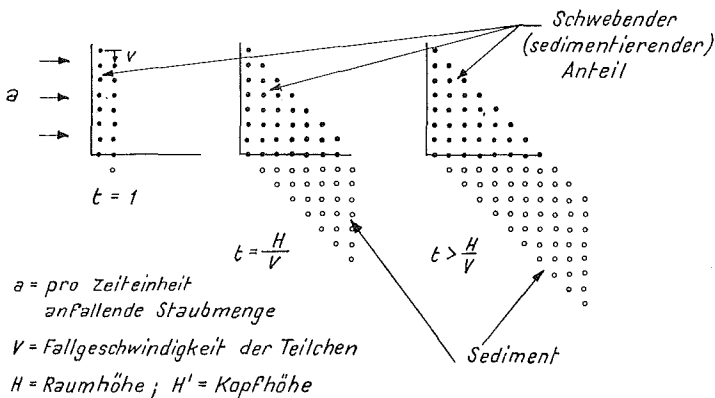


Fig. 10

Schematische Darstellung des Verhaltens einer einzelnen Kornfraktion bei kontinuierlichem Staubanfall.

Mathematisch lässt sich die Zunahme der Konzentration bis zu Zeit $t = \frac{H}{V}$, d. h. bis Konstanz erreicht ist, durch folgende Formel ausdrücken:

$$C_m = \frac{a \cdot t \left(1 - \frac{1}{2} \frac{V}{H} \cdot t\right)}{R}$$

(C_m = mittlere Konzentration der Kornfraktion mit der Fallgeschwindigkeit V im gesamten Raum.)

R = das Raumvolum,
die übrigen Zeichen sind bekannt.

Ist die Konstanz erreicht, so beträgt die mittlere Konzentration im Raum

$$C_m = \frac{1}{2} \frac{a}{V} \frac{H}{R}$$

In Fig. 11 sind die verschiedenen Staubanteile der betrachteten Fraktion, der total anfallende Staub, die ausgefallene Staubmenge und der noch schwebende (sedimentierende) Anteil als Funktion über der Zeit graphisch dargestellt und die zugehörigen Formeln angegeben.

Die massgebende Konzentration in Kopfhöhe ist durch folgende Formeln gegeben:

a) bis der Gleichgewichtszustand in Kopfhöhe H' erreicht ist:

$$C_{H'} = \frac{a t}{R};$$

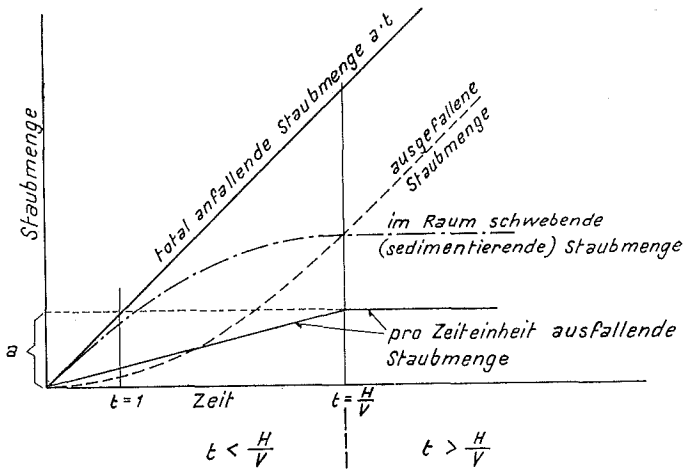


Fig. 11

Graphische Darstellung der verschiedenen Anteile einer Kornfraktion bei kontinuierlichem Staubanfall als Funktion der Zeit.

$t = 1$	Zeit	$t = \frac{H}{V}$
	$t < \frac{H}{V}$	$t > \frac{H}{V}$

ausgefallene Staubmenge		
(Sediment)		
	$S = \frac{1}{2} a \frac{V}{H} t^2$	$S = a \cdot t - \frac{1}{2} a \frac{H}{V}$

Mittlere Konzentration im Raum (Konzentrations-Zeitkurve)		
	$C_m = \frac{a t (1 - \frac{1}{2} \frac{V}{H} t)}{\text{Raumvolum}}$	$C_m = \frac{\frac{1}{2} a \frac{H}{V}}{\text{Raumvolum}}$

Massgebende Konz. in Kopfhöhe H' :		
	Für $t < \frac{H-H'}{V}$	Für $t > \frac{H-H'}{V}$
	$C_{H'} = \frac{a \cdot t}{\text{Raumvolum}}$	$C_{H'} = \frac{a \cdot \frac{H-H'}{V}}{\text{Raumvolum}}$

die konstante Konzentration in der Höhe H' ist erreicht nach der Zeit $t = \frac{H-H'}{V}$, die Konzentration bleibt:

b) $C_{H'} = \text{konst.} = \frac{a \cdot (H-H')}{R}$

Die Formeln zeigen, dass die Konzentrationen um so kleiner werden, je grösser H' angenommen wird.

Im polydispersen Staubsystem gelten die angeführten Gesetzmässigkeiten für jede einzelne Kornfraktion; ist die Kornzusammensetzung bekannt, so kann daraus die zeitliche Veränderung des Staubzustandes graphisch ermittelt werden, indem für eine Reihe von Korngrössen die Konzentrationszeitkurven⁶⁾ nach den auf Seite 25 angegebenen Formeln berechnet und aus den erhaltenen Werten die Kornverteilungskurven für bestimmte Zeiten konstruiert werden.

Das Verfahren ist in Fig. 12 durchgeführt.

Der anfallende Staub weise eine ähnliche Kornverteilungskurve auf wie der polydisperse Staub aus dem Beispiel der Figurentafel II. Die gesamte, nach 15, 30 und 60 Minuten an gefallene Staubmenge, die im Raum vorhanden wäre, wenn keine Sedimentation erfolgen würde, ist durch die gestrichelt gezeichneten Kurven dargestellt.

In Fig. 12 sind die Häufigkeitszeitkurven für die Teilchen der Fraktionen 1, 5, 10, 30 und 100 μ in das räumliche Koordinatensystem eingetragen und mit den Zeitebenen für 15, 30 und 60 Minuten zum Schnitt gebracht, die Verbindung der Schnittpunkte auf den Zeitebenen ergeben die richtigen Kornverteilungskurven für die entsprechenden Zeiten.

Die Kurven sind dadurch gekennzeichnet, dass ihre rechte Seite sehr bald keine Veränderung mehr erfährt, nachdem für die gröberen Kornfraktionen die Konzentrationskonstanz nach der Zeit $\frac{H}{V}$ erreicht ist, und dass die linke Seite, auf welcher die feinen Korndurchmesser aufgetragen sind, immer höher wird und dementsprechend sich das Maximum immer mehr nach links verschiebt.

Das Ergebnis bedeutet, dass bei einem konstanten Staubanfall über längere Zeiten eine Konzentrationsanreicherung an feinen, also gefährlichen Staubteilchen erfolgt.

Der Einfluss der Luftströmungen

Die bis jetzt dargestellten Beispiele zeigten die Staubveränderungen in ruhender Luft, es waren weder Vertikalströmungen und Verwirbelungen, noch Horizontalströmungen angenommen.

Vertikalströmungen und durch bewegte Maschinen und Menschen erzeugte Luftwirbel wirken im Sinne einer Vermischung der oberen und untern Luftschichten, die massgebende Konzentration in Kopfhöhe nähert sich damit der mittleren Konzentration im Raum. Ferner kann eine Aufwirbelung der bereits auf dem Boden sedimentierten Staubanteile

⁶⁾ Richtiger ist es in diesem Zusammenhange von Häufigkeitszeitkurven zu sprechen, da nur ein bestimmter \varnothing des ganzen Staubsystemes betrachtet wird.

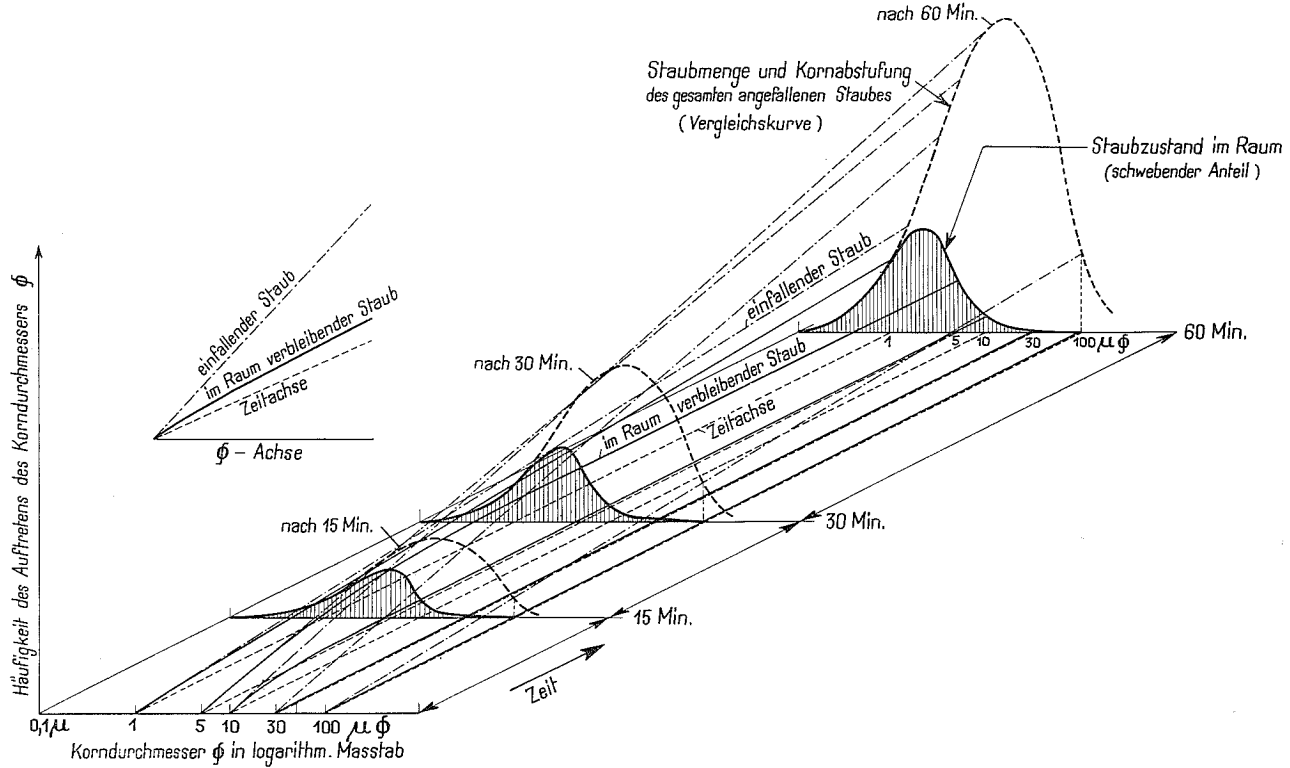


Fig. 12
 Veränderung des Staubzustandes bei kontinuierlichem Staubanfall und ungestörter Sedimentation im 3 m hohen Raum.

zustande kommen und im Sinne einer Verzögerung der beschriebenen Sedimentationsvorgänge wirken.

Bei der natürlichen und künstlichen Lüfterneuerung kommt es in der Regel zu einer Verdünnung des Staubes, indem der anfallende Staub auf die in Bewegung befindliche Luft verteilt und darin transportiert wird.

Die Sedimentation der Staubteilchen erfolgt dann unter dem Einfluss der Schwerkraft und der bewegten umgebenden Luftmasse; der daraus resultierende wirkliche Weg des Staubteilchens lässt sich rechnen, wenn die Luftströmung (d. h. deren Turbulenz- oder Laminarströmung, Geschwindigkeit und Richtung) bekannt ist.

Handelt es sich um eine horizontale Laminarströmung, wie sie z. B. bei der Belüftung eines Stollens vorhanden ist, so kann eine Fraktionierung des sedimentierenden Staubes zustande kommen, indem die groben Teilchen nach kurzem, die feinen nach langem Transportweg auf den Boden aus-sedimentieren; diese Verhältnisse sind in Fig. 13 schematisch dargestellt⁷⁾.

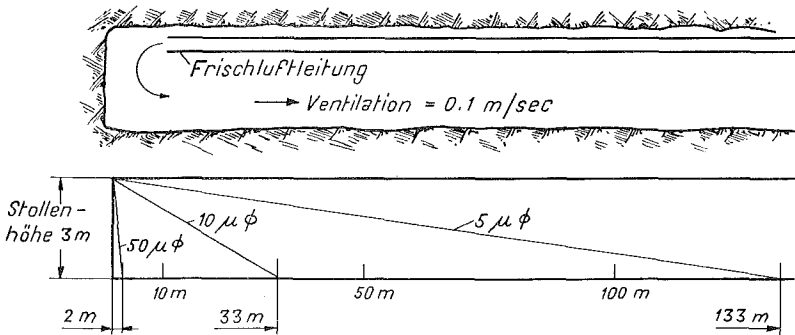


Fig. 13

Sedimentationsbereich verschiedener Korngrößen bei der Belüftung eines 3 m hohen Stollens mit einer Luftgeschwindigkeit von 0,1 m/sec.

Die Staubuntersuchung

Jede Staubuntersuchung muss an die allgemeinen Eigentümlichkeiten des Aerosolzustandes angepasst sein.

Es ist insbesondere zu berücksichtigen, dass immer sehr verdünnte Systeme vorliegen⁸⁾ und dass jedes Staubsystem dauernd Veränderungen

⁷⁾ Vom staubtechnischen Standpunkte aus erscheint das Absaugen der staubhaltigen Luft aus einem Stollen zweckmäßiger und richtiger als das Einblasen von Frischluft, wie es in Fig. 13 dargestellt und in der Praxis meistens durchgeführt wird.

Der Hauptgrund, welcher gegen das Absaugen erhoben wird, ist die Tatsache, dass gerade am eigentlichen Arbeitsort, wo der Staub entwickelt wird, die Absaugwirkung schlecht ist, indem sich dort in der Tat eine Tasche ruhender Luft sehr leicht bilden kann.

Die Frage ist in der Praxis durch Versuche genauer abzuklären.

⁸⁾ Ein Staub mit 0,2 g fester Substanz im Kubikmeter ist schon als recht dicht zu bezeichnen.

unterworfen ist, deren allgemeine Gesetzmässigkeiten zwar bekannt, aber nur unter der Annahme ganz einfacher Bedingungen, wie sie im vorangehenden Abschnitt beschrieben worden sind, rechnerisch zu erfassen sind.

Die Entnahme einer Staubprobe im Sinne eines «Musters», das nachher im Laboratorium in seinem ursprünglichen Zustande untersucht werden könnte, ist ausgeschlossen.

Die Probenahme und die Untersuchungsmethoden sind voneinander abhängig und greifen häufig ineinander über. Es muss dabei unterschieden werden zwischen

a) Einzelproben oder Momentanproben, die ein relativ kleines Volum (Kubikzentimeter oder Kubikdezimeter) aus der staubhaltigen Atmosphäre herausgreifen und meist unmittelbar anschliessend zur Untersuchung gelangen (Zählkammern, Konimeter, vgl. unten)

und

b) Proben, bei welchen die festen Anteile aus grösseren Luftmengen (Kubikmeter) abgeschieden und hernach den üblichen Untersuchungsmethoden für pulverförmige feste Stoffe unterworfen werden.

Wenn die Anreicherung über grössere Zeiträume erfolgt, so ergibt die Probe den mittleren Zustand im angesaugten Luftvolum während der Zeit der Probenahme.

Die Untersuchungsmethoden

In der nachfolgenden Tabelle 1 ist eine Übersicht über die in der Literatur beschriebenen wichtigsten Untersuchungsmethoden zusammengestellt; es seien hierzu einige Erläuterungen gegeben.

Tabelle 1

Übersicht über die Staubuntersuchungsmethoden

I. Optische Methoden.

1. Nephelometrie oder Tyndallogometrie¹⁾.

(Trübungsmessungen oder Intensitätsmessungen am seitlich aus Staubsystemen abgestreuten Licht.)

2. Ultramikroskopie²⁾

II. Sedimentationsmethoden.

1. Kleine Momentanproben in Staubkammern (Zählkammern) mit anschliessender mikroskopischer Auszählung³⁾.

2. Fraktionierte Sedimentation einer Momentanprobe durch eine staubfreie Luftschicht mit anschliessender mikroskopischer Auszählung der Kornfraktionen.

3. Sedimentproben über längere Zeiten durch Aufstellen von Wägegläsern am Boden mit anschliessender Wägung, mikroskopische Auszählung oder Schlämmanalyse der Proben unter Berücksichtigung der Sedimentationsbedingungen.

III. Aufprallgeräte.

Prinzip: Die staubhaltige Luft wird rasch gegen eine Prallfläche geblasen, wo die Teilchen haften bleiben und durch mikroskopische Auszählung usw. bestimmt werden⁶⁾.

1. Momentanproben (einige cm³): K o t z é Konimeter, O w e n s Staubzähler, Z e i s s Konimeter.
2. Kontinuierlicher Staubzähler nach H A Z A R D.
3. I m p i n g e r (Nass-Aufprallgerät) zur Anreicherung der Staubpartikel aus grösseren Luftvolumina; Impinger nach G R E E N B U R G - S M I T H⁶⁾.

IV. Filtermethoden.

Anreicherung der Staubpartikel aus grösseren Luftvolumina auf Filtermassen und anschliessende Untersuchung im Laboratorium.

1. Papierfilter, Baumwollfilter,
2. lösliche Filtermassen (Zucker, Schiessbaumwolle und dergleichen).

V. Messzyklone.

Anreicherung der Staubpartikel vermittels Zentrifugalabscheidung aus grösseren Luftvolumina.

1. Messzyklon Bauart B E W A G⁶⁾.
2. Messzyklon nach T E R L I N D E N⁷⁾.

VI. Elektrische Staubabscheider für Messzwecke⁸⁾.

VII. Kernzähler.

Niederschlagsbildung (Wasserkondensation an Keimen) in Luftproben durch adiabatische Abkühlung zur Zählung der Kondensationskeime, Kernzähler von A I T K E N⁹⁾ und dessen Modifikationen; in der praktischen Staubuntersuchung nicht verwendet.

Anmerkungen und Literaturangaben :

Zusammenfassende Übersichten über die meisten der angegebenen Methoden finden sich in B. H E Y M A N N, Die Verfahren zur quantitativen Bestimmung des Staubes in der Atemluft, Zentralblatt ges. Hyg. 24, 1 (1931) und in dem amerikanischen Werk «Industrial Dust» von P. H. D R I N K E R und T. H. H A T C H (New York und London 1936).

¹⁾ R. C. T O L M A N und E. B. V L I E T, A tyndallometer for the examination of disperse systems J. Am. Chem. Soc. 41, 304 (1919); Zeiss-Prospekt, Mess 430 m; Mess 421/V; Leitz-Prospekt «Tyndallometer» 1937.

²⁾ R. W H Y T L A W - G R A Y und H. S. P A T T E R S O N, «Smoke», London 1932 (spez. IV. Kapitel).

³⁾ Vgl. insbesondere D R I N K E R und H A T C H (l. c.), VI. Kapitel. Über die im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen entwickelten Sedimentationsmethoden vgl. den Anhang zu diesem Bericht.

⁴⁾ Vgl. an erster Stelle D R I N K E R und H A T C H (l. c.) S. 96 und die dort zitierte, teilweise schwer zugängliche Literatur.

⁵⁾ L. G R E E N B U R G und G. W. S M I T H, A new instrument for sampling aerial dust, U. S. Bur. Mines, R. J. 2392 (1922) zit. nach D R I N K E R und H A T C H.

⁶⁾ E. Z I M M E R M A N N, Messung von Flugstaub in Rauchgasen, Zeitschr. d. Vereins Deutsch. Ing. 75, 481 (1931). H. W. G O N E L L, Archiv für Techn. Messen, V, 1286 —3, Februar 1934.

⁷⁾ T E R L I N D E N, Engineering (vom 15. 9. 1933). B. B A U E R und F. R U E G G, Die messtechnische Erfassung und die Abscheidung der Flugstaubmengen im Rauchgasabzug, Mitt. a. Betrieb u. Forschung d. Fernheizkraftwerkes der E.T.H. Zürich, August 1936.

⁸⁾ P. D R I N K E R, R. M. T H O M S O N a. S. F I T C H E T, The use of electric precipitation for quantitative determinations and microscopy, J. Ind. Hyg. 5, 162 (1923). P. D R I N K E R, Alternating current precipitator for sanitary air analyses, J. Ind. Hyg. 14, 364 (1932).

⁹⁾ Collected scientific papers of J O H N A I T K E N, edited by C. G. K N O T T, Cambridge 1923. Die vollständige Literatur über Kernzähler ist zusammengestellt in der Dissertation von H. F O R S T E R, Studien über Kondensationskerne, E.T.H. Zürich 1940.

I. Die optischen Methoden zur Ermittlung des Staubzustandes einer Atmosphäre sind leider in der praktischen Staubuntersuchung sehr beschränkt anwendbar, trotzdem sie den grossen Vorteil bieten könnten, den Staub in seinem ursprünglichen, ungestörten Zustande zu untersuchen.

1. Die Nephelometrie (oder Tyndallometrie) erlaubt nur, die Intensität des seitlich aus einem Lichtstrahlenbündel abgestrahlten Lichtes zu messen, welche über die Kornzusammensetzung polydisperser Systeme nichts aussagt.

Zur Bestimmung der Gesamtkonzentration kann die Methode für Relativmessungen an monodispersen Systemen verwendet werden. Die Auswertung derartiger Messungen wird aber dadurch ausserordentlich kompliziert, weil gerade im Bereich der wichtigsten Korngrössen von $0,1-1 \mu \varnothing$ die Gesetzmässigkeiten für die Abhängigkeit des aus einem Strahlenbündel seitlich abgestrahlten Lichtes zwischen der für kolloide Systeme mit Teilchen unter $0,1 \mu \varnothing$ gültigen Formel von RAYLEIGH und den Gesetzen für die normale Reflexion und Refraktion an grobdispersen Partikeln über $1 \mu \varnothing$ in recht komplizierten Abhängigkeiten von Korn-durchmesser und Lichtwellenlänge ineinander übergehen.

Für die rasche orientierende qualitative Prüfung des Staubzustandes in einem Betriebe, insbesondere in etwas dunkeln oder wenig hellen Räumen kann das Prinzip der Tyndallometrie in der Weise angewandt werden, dass vermittels eines gewöhnlichen Spiegels ein Sonnenstrahlenbündel oder ein künstliches Lichtbündel vermittels eines Scheinwerfers durch den Raum geworfen wird, wobei sehr oft ein intensiver Tyndallkegel auftritt, wenn die Atmosphäre des Raumes in diffuser Beleuchtung klar und staubfrei erscheint (vgl. Fig. 14).

2. Die Ultramikroskopie polydisperser Staube kann im Laboratorium in ähnlicher Weise durchgeführt werden wie an flüssigen Systemen; zur Staubuntersuchung in Betrieben ist sie zu zeitraubend und zu kompliziert. Die photographische Aufnahme vermittels des Ultramikroskopes ist wegen der sehr geringen Lichtintensität der in Brownscher Bewegung befindlichen Objekte (Staubpartikel) mit den zur Verfügung stehenden Apparaturen und Lichtquellen nicht möglich.

Eine photographische Registrierung des Staubzustandes müsste an sich als sehr zweckmässige Staubuntersuchungsmethode bezeichnet werden.

II. Sedimentationsmethoden

1. Staubkammern oder Zählkammern. Die einfachste und für die praktische Staubuntersuchung recht gut geeignete Methode ist das Ansaugen einer Luftprobe von einigen Kubikzentimetern aus der zu untersuchenden Atmosphäre vermittels einer verschliessbaren Kammer, in deren Boden sich ein Objektträger befindet. Die Kammer wird an einem vor Temperatureinflüssen geschützten Ort für 24 Stunden ruhig stehen gelassen. Der auf den Objektträger sedimentierte Staub wird mikroskopisch ausgezählt.

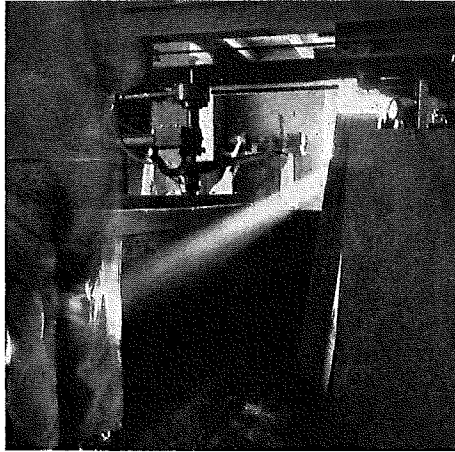


Fig. 14

Tyndallkegel. Der bei diffuser Beleuchtung im Raum nicht wahrnehmbare Staub wird im Lichtkegel deutlich sichtbar.

Eine für die vorliegenden Untersuchungen speziell entwickelte Staubzählkammer ist in Fig. 15 dargestellt; sie wird im Anhang (vgl. S. 68) ausführlich beschrieben.

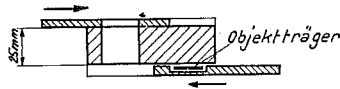


Fig. 15

Staubzählkammer (Längsschnitt), offen zur Probenahme.

Die Auszählung der Probe ergibt die in der aufgefangenen Luftprobe zur Zeit der Probenahme vorhandene Teilchenzahl, die Teilchengrößen können im Mikroskop abgesehen werden, so dass in erster Annäherung auch die Kornverteilung ermittelt werden kann.

Interessant ist, dass in vielen amerikanischen Untersuchungen sehr häufig der Staub nur durch Angabe der Teilchenzahl pro Volumeinheit gekennzeichnet wird, ohne dass die Gewichtskonzentration oder die Teilchengrößen bestimmt werden. Die Methode hat insbesondere für Silikosestaubuntersuchungen gegenüber der in Deutschland häufig zu findenden Angabe der Gewichtskonzentration ohne gleichzeitige Angabe der Korngrößen den Vorteil, dass die rasch sedimentierenden und für die Silikose wenig gefährlichen groben Teilchen zahlenmässig gar nicht ins Gewicht fallen.

Auf der andern Seite besteht bei der alleinigen Angabe der Teilchenzahlen der Nachteil, dass immer Unsicherheit darüber besteht, welche Teilchengrößen an der Grenze der Sichtbarkeit noch gezählt wurden, da

diese Grenze je nach der Leistungsfähigkeit des Mikroskops, der Beleuchtungsanordnung usw. sehr stark variieren kann.

Auf Grund unserer Erfahrungen halten wir es nach wie vor auch für Reihenuntersuchungen für unumgänglich, neben der Gewichtskonzentration oder Gesamtteilchenzahl Angaben über die Kornzusammensetzung zu machen.

Aus diesem Grunde wurde die Sedimentations-Auszählmethode in der Weise modifiziert, dass

2. die fraktionierte Sedimentation einer Momentanprobe durch eine staubfreie Luftschicht ein getrenntes Auffangen der verschiedenen Kornfraktionen auf auswechselbaren Objektträgern gestattet, welche dann getrennt zur Auszählung gelangen.

Die Apparatur ist schematisch in Fig. 16 dargestellt, eine ausführliche Beschreibung der Methode ist im Anhang gegeben (vgl. S. 72). Die Methode gestattet die Bestimmung der Kornverteilungskurven nach Teilchenzahlen, aus welcher die Verteilung nach Gewichtsprozenten und die Gesamtkonzentration berechnet werden können.

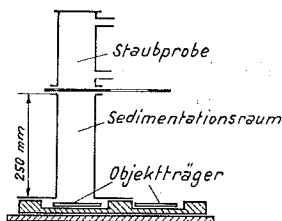


Fig. 16
Sedimentationsapparat

In den beschriebenen Methoden werden auf alle Fälle so kleine Staubproben aufgefangen, dass eine Wägung derselben vollkommen ausgeschlossen ist (das Gewicht der Proben liegt in der Größenordnung zwischen 10^{-8} bis 10^{-9} g). Mikrochemische Prüfungen der Proben auf dem Objektträger sind in ganz beschränktem Umfange möglich.

3. Sedimentproben über längere Zeiten. Eine weitere Methode, die den Vorteil allerhöchster Einfachheit aufweist, ist das Aufstellen tarierter Wägegäser auf dem Boden des auf seinen Staubgehalt zu untersuchenden Raumes während längeren Zeiten.

Die Probe ist der aus dem Staub im Raum über dem Wägegias aussedimentierte Anteil. Die Kornzusammensetzung der Probe ist durchaus nicht identisch mit der Kornzusammensetzung des Staubes in der Luft; diese muss unter Berücksichtigung der Ausführungen im vorangehenden Abschnitt (vgl. S. 19ff) aus der Kornzusammensetzung des Sedimentes, d. h. der Probe, berechnet werden, woraus dann erst die Bestimmung der Staubkonzentration möglich ist. — Das Verfahren ist nur einwandfrei, wenn die Sedimentation unter bekannten Bedingungen erfolgt; am ein-

fachsten während längeren Ruhepausen im Betrieb (Nachtruhe) ohne wesentliche Luftströmungen im Raum.

III. Aufprallgeräte

Die auf ältere Verfahren von PONCHET (1859), MARIE-DAVY und KOTZÉ (zit. nach DRINKER und HATCH l. c.) zurückgehenden Methoden beruhen alle auf dem folgenden Prinzip: die staubhaltige Luft wird durch eine Düse gegen eine in geringem Abstand (0,5 bis einige Millimeter) von der Düsenöffnung aufgestellte Prallfläche geblasen (bzw. angesaugt), wo die festen Partikel, durch ihre kinetische Bewegungsenergie aus dem seitlich abstreichenden Luftstrom ausgeschleudert, haften bleiben (vgl. Fig: 17). Entscheidend ist die Forderung, dass sehr hohe Luftgeschwindigkeiten (50—100 Meter pro Sekunde) beim Luftaustritt aus der Düse erreicht werden.

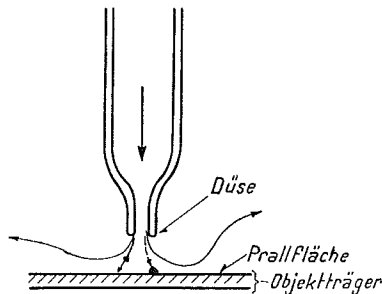


Fig. 17
Prinzip der Aufprallgeräte

Auch bei sehr hohen Luftgeschwindigkeiten bleiben die feinsten Teilchen nicht alle auf der Fläche haften, sondern werden teilweise mit dem Luftstrom fortgerissen.

Als Prallfläche wird die Oberfläche eines Objektträgers gewählt, so dass der abgelagerte Staubfleck im Mikroskop betrachtet und ausgezählt werden kann. Das Auszählen ist allerdings nur möglich, wenn der abgelagerte Staub nicht zu dicht ist.

Auf dem beschriebenen Prinzip konstruiert ist das Konimeter von Zeiss⁹⁾, welches Ansaugpumpe, Düse, drehbare Prallplatte für 30 Proben und Mikroskop in einem handlichen, tragbaren Instrument vereinigt.

Die praktische Anwendung des Zeißschen Konimeters zeigte, dass es sich um ein für eine rasche Orientierung sehr geeignetes Instrument handelt, dass es indessen kaum möglich ist, die Proben quantitativ auszuzählen. Vergleichszählungen von Konimeterproben mit denjenigen aus Staubzählkammern ergaben stets nur Bruchteile ($\frac{1}{4}$ bis $\frac{1}{10}$) der in der Kammer erhaltenen Teilchenzahlen. Für genaue Untersuchungen ist die Anwendung von Staubzählkammern unbedingt vorzuziehen.

⁹⁾ Konimeter von η κόνις, griech. (der Staub).

Bei dem unter Ziffer

- 2 angeführten kontinuierlichen Staubzähler nach Hazard handelt es sich um eine recht komplizierte Apparatur, vermittels welcher die auf ein laufendes Band angesaugten Staubproben automatisch fortlaufend photographiert werden¹⁰⁾.
- 3 Impinger (Nass-Aufprallgerät).

Bei dem in Fig. 18 dargestellten Gerät wird die staubhaltige Luft gegen den nassen Boden des mit Wasser gefüllten Gefässes angesaugt; es ist damit möglich, über längere Zeiten grössere Staubproben unter Wasser anzureichern und anschliessend zu untersuchen.

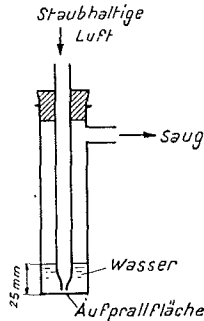


Fig. 18
Impinger

Das Gerät wird in den umfangreichen Staubuntersuchungen der südafrikanischen Minenbetriebe und vor allem in den USA an erster Stelle verwendet. Der Abscheidungsgrad der Staubteilchen hängt stark von der Ansaug- bzw. Aufprallgeschwindigkeit und Teilchengrösse ab; nach Untersuchungen von KATZ, HATCH und Mitarbeitern¹¹⁾ werden selbst bei Ausströmungsgeschwindigkeiten (aus der Düse) von 100 m/s die feinsten Teilchen unter $1 \mu \varnothing$ noch nicht vollkommen zurückgehalten.

Die notwendigen hohen Ansauggeschwindigkeiten werden durch Anwendung einer starken Saugpumpe oder geeigneter Druckluftinjektoren, die an die Kompressorenleitung angeschlossen werden, erzeugt.

Eigene Erfahrungen mit dem Impinger liegen noch nicht in dem Umfange vor, dass ein abschliessendes Urteil über seine Verwendungsfähigkeit im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen gefällt werden dürfte.

¹⁰⁾ Originallit.: W. G. HAZARD, An atmospheric dust recorder, J. FRANK. Inst. 217, 571 (1934), zit. nach DRINKER und HATCH (S. 107).

¹¹⁾ S. H. KATZ und Mitarbeiter, Comparative tests of instruments for determining atmospheric dusts, U. S. Pub. Health Bull. 144 (1925); zit. nach DRINKER und HATCH.

T. HATCH, H. WARREN und P. DRINKER, A modified form of the Greenburg-Smith impinger for field use, with a study of its operating characteristics, J. Ind. Hyg. 15, 41 (1933).

T. HATCH und C. L. POOL, The quantitation of impinger dust samples by dark-field microscopy, J. Ind. Hyg. 16, 177 (1934).

IV. Filtermethoden.

Für unsere Versuche wurde meistens die in Fig. 19 schematisch dargestellte Filtermethode verwendet. Die staubhaltige Luft wird durch ein vorgewogenes Papierfilter angesaugt (recht zweckmässig erwiesen sich die Filtermarken Schleicher-Schüll oder entsprechende Qualitäten).

Die Luftansaugung erfolgt mittels Staubsaugerventilatoren oder Druckluftinjektoren; bei einem Ansaugunterdruck von 300 mm W.-S. beträgt der Luftdurchgang ca. 3 m³/h; der Filterwiderstand nimmt dann während der Probenahme infolge Verstopfens der Poren durch die Staubpartikel zu; aus diesem Grunde muss die Luftmenge während der ganzen Probenahme kontinuierlich gemessen werden, damit nach Beendigung die gesamte durch das Filter gesaugte Luftmenge gerechnet werden kann.

Die Probe wird nach der Wägung mit dem Filter vorsichtig abgelöst und der weitem Untersuchung (Schlamm-analyse, chemische Untersuchung) unterworfen. Die Erfahrungen mit der Methode sind gut.

Erfahrungen über die Verwendung löslicher Filtermassen, wie sie an verschiedenen Orten beschrieben wird (vgl. insbesondere DRINKER und HATCH l. c.), liegen nicht vor.

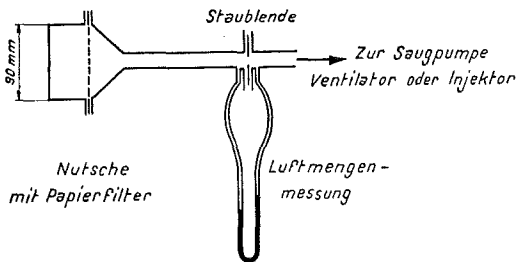


Fig. 19
Prinzip der Papierfilterprobe

V. Messzyklone.

Die Methode ist dadurch gekennzeichnet, dass die staubhaltige Luft tangential in ein Staubauffanggefäss geleitet wird, das sie nach einigen spiralförmigen Umgängen durch ein Absaugrohr in der Achse wieder verlässt, während die Staubpartikel durch die Zentrifugalbeschleunigung auf die Gefässwand ausgeschleudert und unten aufgefangen werden.

Auch bei grossen Winkelgeschwindigkeiten der Luftströmung ist die Abscheidung nur bis zu relativ groben Korngrössen noch quantitativ, während die feineren Partikel nur teilweise ausgeschleudert werden. Die Methode muss insbesondere dann angewandt werden, wenn die Verwendung von Filtern wegen hohen Temperaturen (z. B. in Rauchgasen; vgl. die Arbeit von BAUER und RUEGG, Fussnote 7 Tabelle I) nicht in Frage kommt.

Die unter VI Elektrische Staubabscheider erwähnte Methode ist der Vollständigkeit halber angeführt, ebenso die unter VII aufgeführten

Kernzähler, welche in der meteorologischen Forschung in ausgedehntem Masse, in der technischen Staubforschung indessen sozusagen keine Anwendung finden.

C. Die Ergebnisse der praktischen Untersuchungen

Die Untersuchungen gingen in erster Linie darauf hinaus, die Staubzustände in einer Anzahl verschiedenartiger Betriebe so zu erfassen, dass zum Schlusse eine vergleichende Zusammenstellung einen Überblick über die vorhandenen Bedingungen gestattet.

Herr Ing. H. BÜHLER, welchem die praktische Durchführung der Untersuchung oblag, hat dieselbe mit grosser Sorgfalt und aussergewöhnlichem Fleiss durchgeführt, wofür ihm auch an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

Es werden die Ergebnisse der in den folgenden vier Betrieben vorgenommenen Staubuntersuchungen besprochen und miteinander verglichen:

- a) Sandstrahlerei für grosse Werkstücke,
- b) Bergwerkbetrieb (Schieferbergwerk),
- c) Stollenbau in Bündnerschiefer,
- d) Staubverhältnisse in den Werkstätten (Schleifereien) eines Schieferwerkes.

a) Sandstrahlerei.

Die untersuchte Anlage ist dadurch gekennzeichnet, dass das übliche Verfahren mit einer Kabine, in welchem das Werkstück vom äusseren Raum abgeschlossen behandelt wird, während sich der Arbeiter ausserhalb der Kabine befindet, nicht angewandt werden kann. Die grossen Werkstücke (Eisenbahnwagen, Leitungsmasten und dergl.) befinden sich im gleichen Raum wie der Arbeiter, welcher den Sandstrahl führt. Er ist durch ein Frischluftgerät, bestehend aus Helm und einem über den Oberkörper reichenden Überwurf, geschützt.

Die untersuchte Anlage ist schematisch in Fig. 20 dargestellt.

Die Staubverhältnisse im Raum wurden untersucht, während ein Gittermast mit einem Sandstrahlgebläse bearbeitet wurde. Der verwendete Quarzsand dessen Kornzusammensetzung und chemische Analyse in den Fig. 21 und 22 dargestellt sind, wurde mit Druckluft von 4 Atü durch ein Mundstück von 9 mm \varnothing gegen das Objekt geschleudert; der Sandverbrauch war zur Zeit der Untersuchung ca. 1 kg/min.

Der verwendete Sand ist durch einen relativ grossen Anteil an feinem Korn (unter 0,1 mm \varnothing) gekennzeichnet. Der Staubanfall kommt folgendermassen zustande: Durch den Aufprall des Sandstrahles auf die Metalloberfläche wird ein Teil der relativ groben Sandkörner (größtes Korn 3 mm \varnothing) in feinere Partikel zertrümmert und durch den Luftstrom und die innewohnende Bewegungsenergie in die Luft geschleudert, ein Teil der Partikel rikoschettiert ohne dabei zertrümmert zu werden; zusätzlich gelangen

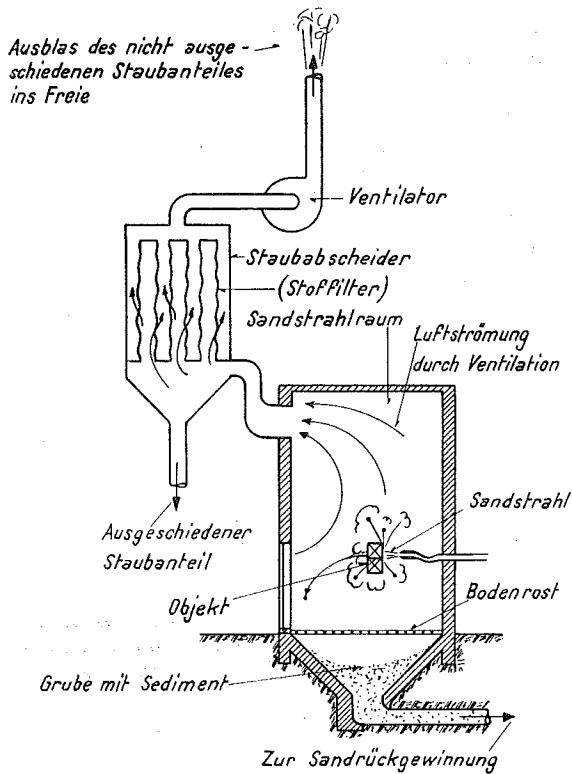


Fig. 20

Schematische Darstellung des untersuchten Sandstrahlbetriebes.

aus der Werkstückoberfläche Partikel des Farbbeleges, der Oxidhaut (Rost) und metallische Anteile in die Luft. Ein Teil des Sandstrahles, welcher nicht auf die Werkstückoberfläche auftrifft (Gitterkonstruktion), fliegt in der Strahlrichtung weiter, wobei die größeren Partikel daraus herausfallen, während die feineren in die Raumluft verwirbelt werden.

Die eigentliche Staubbildung geht in erster Linie von der auf der Aufprallstelle sich bildenden Wolke aus.

Die verschiedenen Partikel der Staubwolke verhalten sich nun grundsätzlich so, wie es im Abschnitt B Seite 24 für das Verhalten eines polydispersen Staubes bei kontinuierlichem Staubanfall geschildert worden ist, wobei allerdings die Konzentration im ganzen Raum nicht gleichmässig ist, sondern von der Wolke weg abnimmt. Die Sedimentation der Teilchen wird weiter durch den Einfluss der vorhandenen Ventilation überlagert. Die Ventilation ist in Fig. 20 schematisch eingezeichnet, die Raumluft wird oben abgesaugt, so dass die Sedimentation der größeren Partikel durch den aufsteigenden Luftstrom verlangsamt wird, während die feineren Partikel mit der Strömung nach oben gerissen werden und dann zum Staubabscheider gelangen. Da in-

dessen die Luftbewegung nicht im ganzen Horizontalquerschnitt des Raumes gleichmässig ist, kann deren Einfluss auf die Sedimentation rechnerisch nicht erfasst werden.

Es handelte sich nun darum, durch geeignete Probenahmen die Staubverhältnisse während des Sandstrahlens zu überprüfen.

Die Staubprobenahme erfolgte in der Weise, dass die aussedimentierenden groben Partikel in Wägegläser, die während des Sandstrahlens auf dem Boden aufgestellt waren, aufgefangen wurden, während gleichzeitig eine Filterprobe in der massgebenden Höhe (Kopfhöhe) angesaugt und zur Kontrolle einige Momentanproben in Zählkammern gezogen wurden.

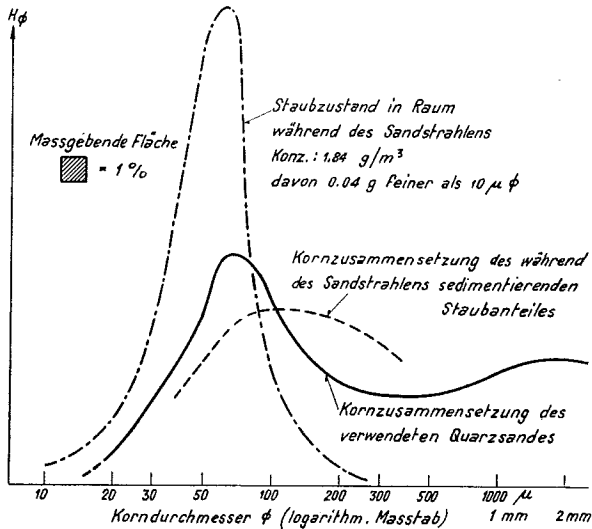


Fig. 21

Prozentuale Kornzusammensetzung der verschiedenen Staubanteile beim Sandstrahlen.

Der aus den Schlämmanalysen und den chemischen Analysen erhaltene Befund ist in den Fig. 21, 22 und 23 zur Darstellung gebracht.

Aus diesen Resultaten lässt sich der Staubzustand in der Sandstrahlerei für die Bedingungen, wie sie anlässlich der Probenahme geherrscht haben, folgendermassen beschreiben:

Die Kornzusammensetzung des verwendeten Quarzsandes ist in Fig. 21 in der ausgezogenen Kurve dargestellt, sie weist ein Kornhäufigkeitsmaximum zwischen 1 und 2 mm Korndurchmesser und ein zweites, höheres Maximum bei 65 μ auf; es handelt sich um einen wiederholt verwendeten Sand, welchem von Zeit zu Zeit frischer Grobsand zugesetzt wird; die feineren Anteile sind offenbar durch Zertrümmerung der groben Anteile beim wiederholten Gebrauch entstanden.

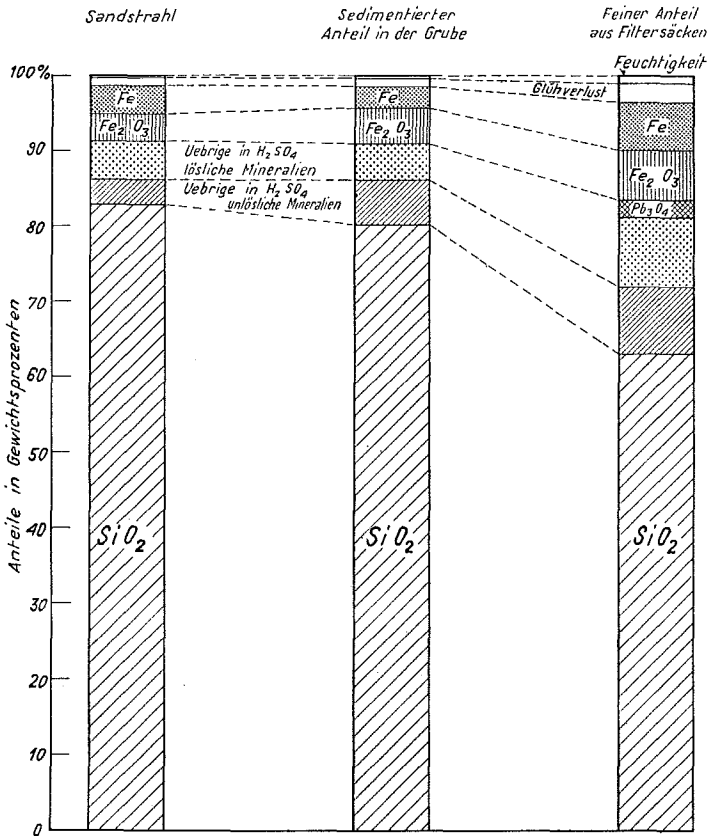


Fig. 22
Chemische Analysen der Fraktionen feiner als 70 μ .

Die Kornzusammensetzung des während des Strahlens sedimentierten Anteils ist in der gestrichelt gezeichneten Kurve dargestellt. Das Maximum der Kurve ist gegenüber der Kornzusammensetzung des ursprünglichen Sandes nach rechts, d. h. in der Richtung nach dem größeren Korndurchmesser verschoben, da die feineren Partikel während des Strahlens (Dauer der Probenahme) nur in geringen Anteilen zu sedimentieren vermögen und teilweise mit der Luftströmung zum Staubabscheider transportiert werden. Es war zu wenig Material in der Probe vorhanden, um den vollständigen Verlauf der Kurve im Bereich der groben Korndurchmesser mit Sicherheit zu ermitteln, so dass über die erfolgte Partikelzertrümmerung quantitativ nichts ausgesagt werden kann.

Die Untersuchung der in Kopfhöhe aus dem Raum angesaugten Probe ergab folgenden Befund:

Die Gesamtkonzentration (mittlere Konzentration in Kopfhöhe während der ganzen Dauer des Versuches von 15 Minuten) betrug 1,84 g/m^3 .

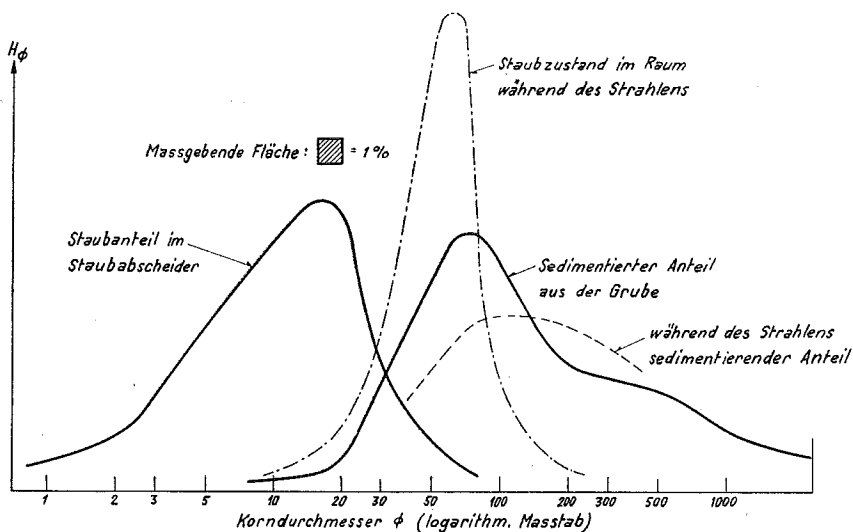


Fig. 23

Vergleich der Kornzusammensetzung des Staubzustandes mit den in der Grube und im Staubabscheider anfallenden Staubanteilen.

Die Kornzusammensetzung der Probe war:

Anteile größer als $70 \mu \varnothing$	0,368 g = 20 %
Anteile $70-50 \mu \varnothing$	0,442 g = 24 %
Anteile $50-20 \mu \varnothing$	0,92 g = 50 %
Anteile $20-10 \mu \varnothing$	0,073 g = 4 %
Anteile feiner als $10 \mu \varnothing$	0,037 g = 2 %

Die Auszählung und Auswertung der, vermittels der Zählkammern entnommenen Proben ergab:

	1.	2.	3.
Anzahl Teilchen pro cm^3	13 200/ cm^3	13 400/ cm^3	9 500/ cm^3
Mittelwert	12 000 Teilchen/ cm^3		

Aus der Gesamtstaubkonzentration von $1,840 \text{ g/m}^3$ berechnet sich unter Annahme eines spezifischen Gewichtes von 2,65 ein mittleres Teilchenvolum

$$V_m = \frac{1,840}{2,65 \cdot 12 \cdot 10^3 \cdot 10^6} = 58 \cdot 10^{-12} \text{ cm}^3$$

und daraus bei der Annahme kugelförmiger Teilchen ein mittlerer Teilchendurchmesser von

$$\varnothing_m = 1,26 \cdot \sqrt[3]{58 \cdot 10^{-12}} = 4,9 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$$

Die Kornverteilung ist als strichpunktierte Kurve in Fig. 21 eingezeichnet. Ihr Maximum liegt bei $62 \mu \varnothing$, also fast gleich wie bei der Kurve

des ursprünglichen Sandes, die gröberen Anteile haben sehr stark abgenommen, während dementsprechend die feineren Anteile zugenommen haben.

Die Kontrolle des unmittelbaren Analysenergebnisses mit der aus der sedimentierten Probe berechneten Kornzusammensetzung des Staubzustandes in Kopfhöhe ergab befriedigende Übereinstimmung.

Trotz der enorm hohen Staubkonzentration von $1,84 \text{ g/m}^3$ ist der als silikosegefährlich zu beurteilende Anteil unter 10μ Korndurchmesser relativ gering, er beträgt 37 mg/m^3 .

Der Vergleich mit den Staubzuständen anderer Betriebe folgt unten.

Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den im Betrieb anfallenden Staubfraktionen in der Grube (sedimentierter Anteil) und im Staubabscheider (durch Ventilation abgesaugter Anteil).

Die oben besprochenen Resultate aus den während einer Versuchsdauer von 15 Minuten entnommenen Proben stellen nur einen Einzelwert dar, während der in der Grube angesammelte Staub einen guten Mittelwert des über längere Betriebsperioden sedimentierten Staubanteils ergibt und der in den Filtersäcken des Staubabscheiders ausgeschiedene Staub dem Staubanteil entspricht, welcher mit der Ventilationsluft durch den Raum transportiert wird. Leider war es nicht möglich, die Probe des feinsten, im Staubabscheider nicht ausgeschiedenen Staubes zu fassen, welcher durch ein Hochkamin ins Freie abgeblasen wird; es ist somit gerade im Bereich der feinsten Anteile ein Manko vorhanden.

Die Kornzusammensetzung dieser als Mischproben aus der Grube und aus den Filtersäcken des Abscheiders entnommenen Staubanteile ist in Fig. 23 dargestellt.

Die Kornverteilungskurven der beiden Proben liegen weiter auseinander als die Kurven des während der Messung aufgefangenen sedimentierten Anteiles und des Staubzustandes im Raum. Die in den Filtersäcken abgeschiedene Probe ist wesentlich feiner als der Staubzustand in der Atmosphäre, weil nur die feineren Teilchen mit dem Luftstrom endgültig nach oben abtransportiert werden und die mittelfeinen Anteile im Korndurchmesserbereich von etwa 20 bis 50μ wieder zurückfallen.

Über das Mengenverhältnis zwischen dem in der Grube anfallenden groben Staubanteil und der in den Filtersäcken abgelagerten Fraktion konnten keine Angaben erhalten werden.

Die orientierenden chemischen Analysen wurden in der feinen Fraktion der Anteile unter $70 \mu \varnothing$ aus den Proben des ursprünglichen Sandes und aus den Ablagerungen in der Grube und im Staubabscheider vorgenommen. Die Resultate der Analysen sind in Fig. 22 dargestellt.

Der Quarzgehalt des ursprünglichen Sandes von 83 % nimmt infolge des quarzfreien oder sehr quarzarmen Materials, das aus der Werk-

stückoberfläche in den Staub gelangt, erheblich ab; der Quarzgehalt der Ablagerungen in der Grube beträgt noch 80 % und in den feinen Anteilen aus dem Staubabscheider nur noch 63 %.

Vom hygienischen Standpunkte aus bemerkenswert ist der Gehalt von 2 % Bleimennige (Pb_3O_4) im Staub aus dem Abscheider; das Material stammt aus dem Farbanstrich der Werkstücke.

b) Schieferbergwerk

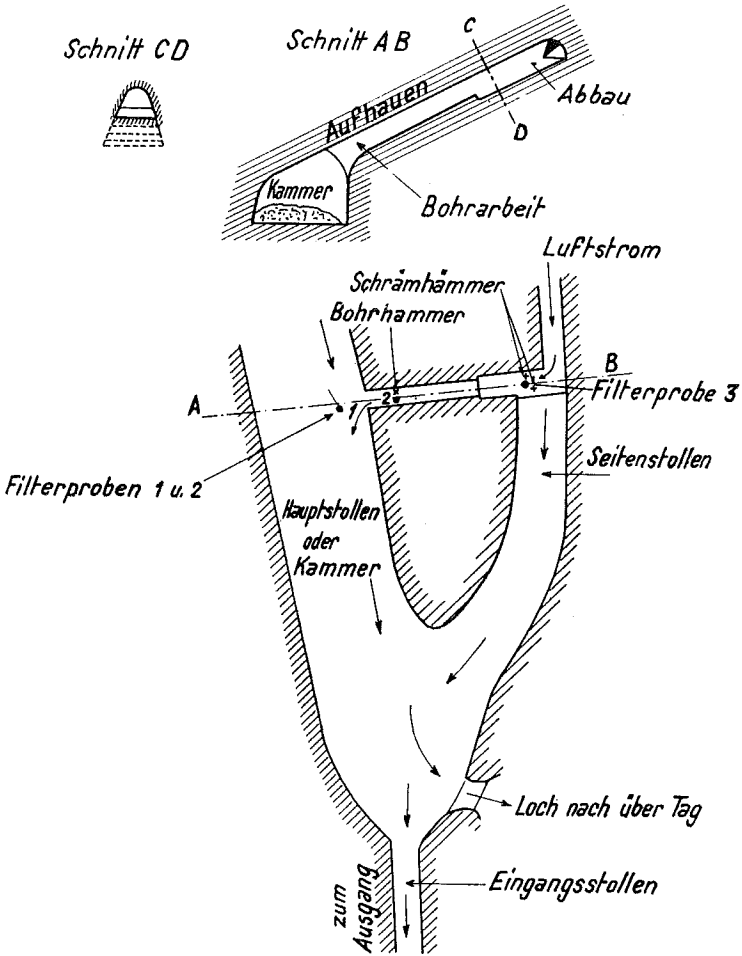


Fig. 24

Schematische Darstellung der Situation im Schieferbergwerk (ca. 1 : 1000).

Die Staubbildung beim Trockenbohren und beim Schrämen mit Pressluft.

Die allgemeine Situation der Abteilung im Schieferbergwerk, wo die Untersuchung durchgeführt wurde, ist in Fig. 24 dargestellt.

Das abgebaute Material ist petrographisch ein feinsandiger Mergelschiefer bis Kalkphyllit, dessen Schieferung mit der Schichtung parallel geht. Bereits von blossem Auge fällt auf dem Querbruch dieser Schiefer eine feine Schichtung auf. In die vorwiegend dunkle Schiefermasse schalten sich in ziemlich unregelmässigen Abständen von etwa 1 bis über 10 mm helle Lagen von < 1 bis etwa 4 mm Dicke. Unter dem Mikroskop (Fig. 25a und b) zeigen die hellen Lagen ein Grundgewebe aus Kalkspat (Korngrösse $< 0,01$ bis $0,1$ mm, die Einzelkörner oft in der Schieferung etwas gestreckt), mit eingelagerten Serizitschuppen und Quarzkörnchen. Die dunklen Lagen zeichnen sich im Dünnschliff quer zur Schieferung durch sehr zahlreiche (um 20—30 pro Millimeter) wellige, mehr oder weniger lückenhafte und sich ablösende Glimmer-(Serizit-)Züge aus, teils ziemlich grobe Einzelblättchen (bis über $0,1$ mm), teils sehr feine Schuppenaggregate ($< 0,01$ mm, mit oft feinsten dunklen, wohl kohlig-graphitischen Pigmenteinlagerungen) enthaltend. Zwischen den Glimmerlagen finden sich feine Kalkspatkörner und -aggregate in wechselnder Menge. Etwas ungleichmässig eingestreut sind eckige Quarzkörnchen, oft mit der Längserstreckung in der Schieferung. Die Korngrösse des Quarzes beträgt, soweit im Schliff feststellbar, um $0,01$ bis um $0,05$ mm, vereinzelt bis $0,1$ mm (kleinere Körner sind wegen der geringen Doppelbrechung des

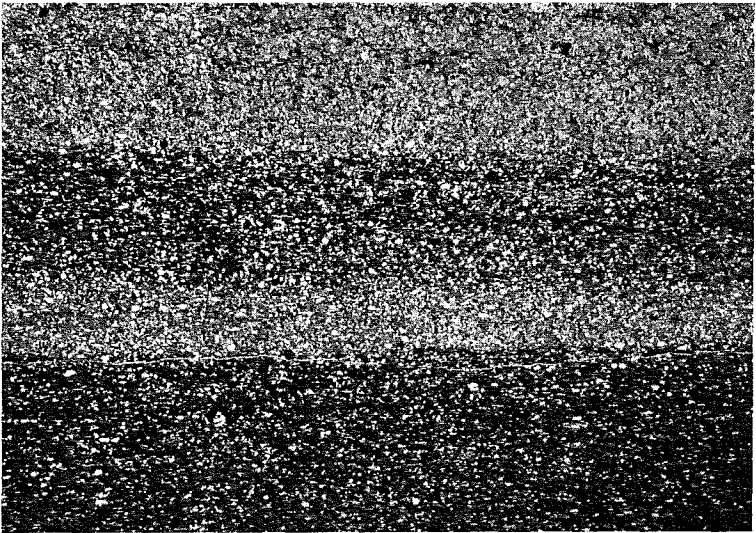


Fig. 25a

Tafelschiefer, Dünnschliffaufnahme quer zur Schieferung. Abwechselnd helle, kalkspatreiche und dunkle, serizitreiche Lagen. Helle Körnchen: teils Quarz, teils Kalkspat. Dunkle Partien: pigmentierte Glimmerlagen, auch feinste Kalkspataggregate. Vergr. 12fach.

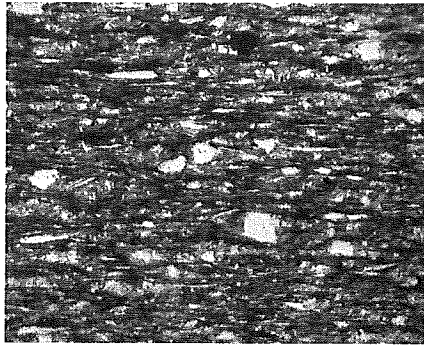


Fig. 25b

Tafelschiefer. Vergrösserte Partie aus einer serizitreichen (dunkeln) Lage. Weisse Körner: Quarz; graue, meist gestreckte Körner: Kalkspat. Deutlich die dünnen, teils pigmentierten Querschnitte von Glimmerblättchen und Glimmeraggregaten. Schwarze Körner: Pyrit. Vergr. 80fach.

Quarzes in Dünnschliffen der üblichen Dicke neben viel Serizit und Kalkspat mit der viel höhern Doppelbrechung, besonders beim letzteren, nicht mehr nachweisbar). Im Pulverpräparat des Schiefers sind Quarzkörnchen bis weit unter 0,01 mm zahlreich zu beobachten. Die Menge des im Dünnschliff erfassbaren Quarzes wird auf ca. 15—20 % geschätzt. In kleinen Mengen vorhanden sind weiter Chlorit und kleinste, meist kugelige Pyritkörnchen.

Aus vier ältern, unter sich wenig abweichenden Teilanalysen des nutzbaren Schiefers lässt sich folgendes Mittel der Hauptkomponenten berechnen:

SiO₂ 44,9 %, Al₂O₃ 14 %, CaCO₃ 26,5 % (dazu Fe₂O₃ 3—4 %, MgO 2—3 %, FeS₂ 0,5—0,7 %, Alkalien und TiO₂ nicht bestimmt).

Daraus lässt sich folgende approximative Mengenermittlung der Hauptgemengteile durchführen:

Serizit 43 % (± 2 %, je nach dessen etwas variablen Al₂O₃-Gehalt)

Quarz 26 % (± 1 %)

Kalkspat 26 %

Dieses Analysenmittel stimmt bis auf den etwas höheren Kalkgehalt recht gut mit der nachstehend angeführten Staubanalyse aus dem Abbaustollen überein.

Die Untersuchung wurde im besonderen in dem vom Hauptstollen (Kammer) aus in der Fallrichtung vorgetriebenen Seitenstollen (sogeannter Aufbau) vorgenommen, in welchem im untern Teil ein Bohrerhammer und im obern Teil zwei Schrämhämmer, d. h. mit Pressluft betriebene Meissel zum Loslösen der Schieferplatten, in Betrieb waren.

Der Stollenquerschnitt war unten an der Stelle des Bohrerhammers ca. 4 m², oben, beim Abbau mit den Schrämhämmern, ca. 6 m².

Im Stollen herrschte zur Zeit der Probenahmen ein schwacher natürlicher Luftzug von 0,5—1 m/s stollenabwärts, so dass der anfallende Staub als Schwaden mit dieser Geschwindigkeit abgetrieben wurde.

Die Staubproben 1—3 (Filterproben) wurden an den in Fig. 24 eingezeichneten Stellen vermittlems eines an die Kompressorenleitung angeschlossenen Injektors angesaugt. Tabelle 2 gibt einen Überblick über die entnommenen Proben und über die wichtigsten Ergebnisse der Untersuchung.

Tabelle 2
Die Ergebnisse der Staubuntersuchungen im Schieferbergwerk

A. Filterproben	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3
Entnahmestelle	6 m unterhalb des Bohrhammers	2 m unterhalb des Bohrhammers	in 1 m Abstand vom Schräghammer
Beobachtung am Staubschwaden	stark verwirbelt auf den ganzen Stollenquerschnitt verteilt	kompakter, dichter Schwaden	kompakter, dichter Schwaden
Dauer der Probenahme	30 Min.	25 Min.	25 Min.
Befund:			
1. Gesamtkonzentration	8,6 mg/m ³	170 mg/m ³	192 mg/m ³
2. Kornzusammensetzung)*			
Anteile größer als 70 $\mu\phi$	~ 21 % = 1,8 mg/m ³	21,0 % = 36 mg/m ³	27,0 % = 52 mg/m ³
70—20 $\mu\phi$	~ 7 % = 0,6 »	29,3 % = 50 »	41,4 % = 79,5 »
20—10 $\mu\phi$		24,6 % = 41,5 »	15,7 % = 30,0 »
feiner als 10 $\mu\phi$ }	72 % = 6,2 »	25,1 % = 42,5 »	15,9 % = 30,5 »
B. Teilchenzahlen	Staubzählkammer, an gleicher Stelle wie Probe 3 entnommen: 8750 Teilchen/cm ³ Aus der Staubkonzentration von 192 mg/m ³ und der Teilchenzahl berechnet sich ein mittlerer Teilchendurchmesser von 2,5 μ		

*) Die Kornverteilungskurven sind in Fig. 26 dargestellt.

Die chemische Analyse einer Staubprobe, die aus dem abgelagerten Staub am Boden des Hauptstollens entnommen worden ist, ergab folgenden Befund:

- | | |
|---|----------|
| 1. Kieselsäure (SiO ₂) total | 44,4 % |
| (davon direkt abrauchbar [freie Kieselsäure ¹²⁾]) | (27,2 %) |

¹²⁾ Beim Behandeln der Probe mit Flußsäure werden neben dem Quarz im allgemeinen auch die Silikate aufgeschlossen, wobei ihre Kieselsäure abraucht, während die Basen nach dem Glühen als Oxyde (Alkalien als Sulfate [Gewichtszunahme!]) zurückbleiben. Von den Silikaten schliesst nun speziell der helle Glimmer, zu dem der Serizit gehört, durch Flußsäure schwer auf. Im vorliegenden Fall, wo nur Serizit als Silikat neben Quarz auftritt, lässt sich somit durch vorsichtiges Abrauchen die Quarzmenge in erster Annäherung bestimmen. Bei Anwesenheit weiterer Silikate versagt natürlich diese Methode.

2. Eisenoxyd (Fe_2O_3)	4,5 %
3. Tonerde + Titanoxyd ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$)	15,4 %
4. Kalziumoxyd (CaO)	12,1 %
5. Magnesiumoxyd (MgO)	2,8 %
6. Kohlensäure (CO_2)	9,8 %
7. Chemisch gebundenes Wasser + kohlige Anteile	3,3 %
8. Feuchtigkeit (H_2O 105°)	0,4 %
9. Rest (Alkalien und nicht bestimmte Anteile)	7,3 %
	100,0 %

Aus der Analyse berechnet sich die folgende rationelle Zusammensetzung der Probe nach Mineralkomponenten:

Quarz	27 %
Kalkspat	22 %
Silikate (vorherrschend Glimmer)	50 %

Die Kornverteilungskurve der untersuchten Staubproben ist in Fig. 26 dargestellt.

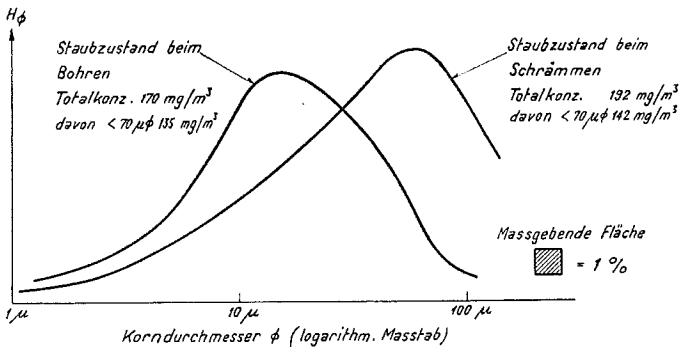


Fig. 26
Kornverteilungskurven der Proben aus dem Schieferbergwerk.

Die erhaltenen Resultate der Proben 2 und 3 sind als Einzelergebnis für den Staubzustand in unmittelbarer Umgebung des Bohr- bzw. Schrägammers zu werten, ihre Beurteilung auf Silikosegefährlichkeit erfolgt unten beim Vergleich der Ergebnisse aus den verschiedenen Betrieben untereinander.

c) Stollenbau im Bündner Schiefer

Die Verhältnisse beim Nassbohren.

Es handelt sich um den Vortrieb eines Wasserführungsstollens in Gesteinen der Bündner Schieferserie (wohl Lias), bestehend aus geschieferten, serizitführenden Kalksandsteinen, sandigen Kalkschiefern und Kalkphylli-

ten. Sie führen zur Hauptsache die gleichen Mineralbestandteile wie die vorerwähnten Schiefer: Quarz, Kalkspat, Serizit; das Mengenverhältnis ist aber viel variabler, einzelne Lagen dürften viel quarz- (bis über 50 %), andere kalkreicher sein. Ihre Struktur ist in der Regel bedeutend gröber (mittlere Korngrösse 0,05 bis 0,5 mm). Die Mikrophoto Fig. 27 zeigt einen typisch sandigen Kalkschiefer im Dünnschliff.

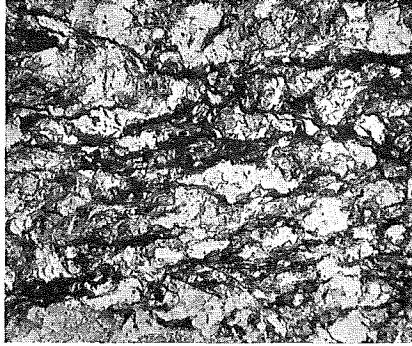


Fig. 27

Stark sandiger Bündnerschiefer. Weiss: Quarzkörner; grau: Kalkspat. Zahlreiche gewundene Aggregate von Glimmerblättchen (Vergr. ca. 30fach).

Die Staubuntersuchung wurde an der Vortriebstelle, 3,5 km unterhalb des Stolleneingangs, vorgenommen. Der Stollen war auf einen Querschnitt von $2,5 \times 2,5$ m ausgesprengt (Querschnittfläche ~ 6 m²).

Ventilation. Der Stollen wird durch Frischluftzufuhr belüftet; die Frischluftleitung endete zur Zeit der Untersuchung 23 m vor der Stollenbrust, wo gebohrt und gesprengt wurde. Die ausgeblasene Luftmenge (zur Zeit der Probenahme gemessen) betrug bei einer Ausblasgeschwindigkeit von 6,0 m/s aus dem 195 mm weiten Rohrstützen 650 m³/h. Die Frischluftmasse wird mit abnehmender Geschwindigkeit noch einige Meter weit in den freien Stollenquerschnitt hinausgeblasen und muss dann, infolge des Staus im Stollenende, zurückfliessen und im Stollen hinter der Ausblasöffnung einen sehr schwachen, mit den zur Verfügung stehenden Instrumenten nicht messbaren Luftstrom mit einer mittleren Geschwindigkeit von ca. 3 cm/s erzeugen.

Die Belüftung des eigentlichen Arbeitsortes an der Stollenbrust kann unter diesen Bedingungen nur sehr langsam erfolgen, da die Frischluftströmung bei dem 23 m betragenden Abstand von der Mündung der Frischluftzuleitung nicht bis zum Stollenende gelangt und der Luftaustausch nur durch Verwirbelung erfolgen kann.

Zur Ermittlung der Staubverhältnisse am eigentlichen Arbeitsort an der Stollenbrust wurden die folgenden Staubproben genommen:

Filterprobe Nr. 1 während einer Pause im Bohrbetrieb in Kopfhöhe in 1,5 m Abstand von der Stollenbrust; Beginn der Probenahme 10 Minuten nach Abstellen der Bohrer, Dauer 15 Minuten.

Befund der Untersuchung:

Gesamtkonzentration	17 mg/m ³
Kornzusammensetzung:	
Anteile gröber als 70 μ \emptyset	0 % = 0 mg/m ³
Anteile 70—5 μ \emptyset	57 % = 9,7 mg/m ³
Anteile feiner als 5 μ \emptyset	43 % = 7,3 mg/m ³

Eine Parallelprobe in der Staubzählkammer ergibt bei der Auszählung 17 200 Teilchen/cm³. Der mittlere Teilchendurchmesser berechnet sich daraus zu 0,9 μ .

Filterprobe Nr. 2 während des Aufladens des gelösten Materials mit dem Bagger; die Bohrhämmer ruhen. In Kopfhöhe, 10 m hinter dem Bagger (in ca. 20 m Abstand von der Stollenbrust); Dauer der Probenahme 16 Minuten.

Befund der Untersuchung:

Gesamtkonzentration	10,5 mg/m ³
Kornzusammensetzung:	
Anteile gröber als 70 μ \emptyset	0 % = 0 mg/m ³
Anteile 70—5 μ \emptyset	65,5 % = 6,9 mg/m ³
Anteile feiner als 5 μ \emptyset	34,5 % = 3,6 mg/m ³

Parallelprobe in Staubzählkammer ergibt 23 500 Teilchen/cm³. Der mittlere Teilchendurchmesser berechnet sich zu 0,7 μ .

Die äusserst geringen Materialmengen in Proben 1 und 2 gestatteten es nicht, eine vollständige Schlämmanalyse durchzuführen.

Filterprobe Nr. 3 während zwei Bohrhämmer mit Einrichtung für Nassbohrung in Betrieb sind. Die Probe wird in unmittelbarer Kopfnähe der die Bohrhämmer führenden Arbeiter genommen; Dauer 13 Minuten.

Befund der Untersuchung:

Gesamtkonzentration	114 mg/m ³
Kornzusammensetzung:	
Anteile gröber als 70 μ \emptyset	6,3 % = 7,2 mg/m ³
Anteile 70—30 μ \emptyset	29,1 % = 33,2 mg/m ³
Anteile 30—10 μ \emptyset	45,2 % = 51,5 mg/m ³
Anteile 10—5 μ \emptyset	12,3 % = 14,0 mg/m ³
Anteile feiner als 5 μ \emptyset	7,1 % = 8,1 mg/m ³

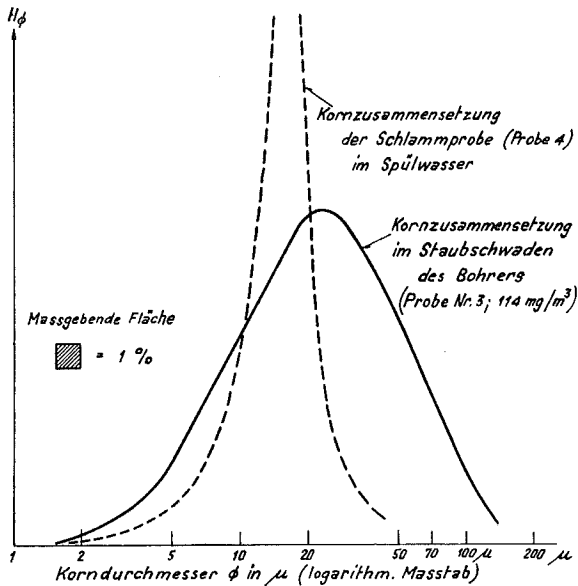


Fig. 28

Kornverteilungskurven der Proben aus dem Stollen im Bündner Schiefer (Nassbohrung).

Die Kornverteilungskurve ist in Fig. 28 dargestellt.

Die Parallelprobe in der Staubzählkammer konnte infolge einer Störung nicht ausgezählt werden.

Als Probe Nr. 4 wurde eine am Boden angesammelte Schlammprobe des mit dem Spülwasser aus den Bohrern abgeschwemmten Staubes entnommen, während zwei Bohrer in Betrieb waren.

Die Kornzusammensetzung dieser Schlammprobe war:

Anteile gröber als 70 $\mu \varnothing$	2,2 %
Anteile 70—40 $\mu \varnothing$	2,6 %
Anteile 40—20 $\mu \varnothing$	14,8 %
Anteile 20—10 $\mu \varnothing$	66,6 %
Anteile 10—4 $\mu \varnothing$	10,7 %
Anteile 4—1,3 $\mu \varnothing$	1,9 %
Anteile feiner als 1,3 $\mu \varnothing$	1,2 %
	<hr/>
	100,0 %

Die Kornverteilungskurve von Probe 4 ist in Fig. 28 als gestrichelte Kurve zur Darstellung gebracht; sie weist ein sehr steiles Maximum zwischen 15 und 20 μ Korndurchmesser auf. Es ist nicht zu entscheiden, ob es sich dabei um eine Zufälligkeit der Probenahmen handelt oder ob eine durch das Nassbohren bedingte Gesetzmässigkeit zum Ausdruck kommt.

Über die Menge des mit dem Wasser abgeschlammten Staubes kann ebenfalls nichts ausgesagt werden. Zur Abklärung der hier noch reichlich vorhandenen ungelösten Probleme ist es notwendig und in unserem Arbeitsprogramm vorgesehen, systematische Versuche in der Gaszelle mit den verschiedenen Bohrmethoden vorzunehmen.

In der Schlammprobe 4 war genügend Material vorhanden, um eine orientierende chemische Analyse durchzuführen; sie ergab folgenden

Befund: Analyse der bei 105° getrockneten Probe

1. Gesamtkieselsäure (SiO ₂)	35,6 %
(davon freier Quarz [direkt abrauchbare Kieselsäure ¹³⁾])	(25,0 %)
2. Salzsäurelösliche Anteile im Glührückstand	33,0 %
3. Salzsäureunlösliche Anteile, exkl. SiO ₂	17,5 %
4. Glühverlust (in der Hauptsache CO ₂)	13,9 %
	100,0 %

Aus der Analyse lässt sich in erster Annäherung die folgende rationelle Zusammensetzung nach Mineralkomponenten der Probe berechnen:

Quarz	25 %
Silikate	ca. 45 %
Kalkspat	ca. 30 %

Die Zusammensetzung gibt einen Mittelwert der Gesteinszusammensetzung in dem zur Zeit der Probenahme eben durchfahrenen Stollenabschnitt.

Die Beurteilung des Staubzustandes erfolgt am Schluss des Abschnittes gemeinsam mit den Resultaten der übrigen Untersuchungen.

d) Schieferwerk.

Die Staubverhältnisse in den Schieferbearbeitungswerkstätten (Schleiferei und Feilerei).

aa) Schleiferei.

In dem Raum von 150 m² Grundfläche und ca. 4 Meter Höhe und dem entsprechenden Rauminhalt von 600 m³ befinden sich folgende Schieferbearbeitungsmaschinen: 3 Schleifscheiben zum Schleifen der Plattenflächen, 2 Karborundum-Kreisfräsen.

Die Schleifscheiben arbeiten vollkommen unter Wasser, die Fräsen unter einem Wasserstrahl.

Ventilationseinrichtungen sind nicht vorhanden.

Zur Zeit der Untersuchung sind in der Werkstätte drei Mann beschäftigt; genaue Erhebungen über die im Verlauf einer längeren Arbeitsperiode verarbeiteten Materialmengen konnten nicht vorgenommen werden.

¹³⁾ Vergl. Fussnote S. 47.

Der Staubzustand.

Die Atmosphäre im Raum erscheint bei diffuser Beleuchtung durch die an allen vier Wänden vorhandenen Fenster dem Auge zunächst praktisch staubfrei, erst ein vermittels eines Spiegels durch den Raum geworfenes Sonnenlichtstrahlenbündel lässt einen deutlichen Tyndallkegel erkennen, vgl. die photographische Aufnahme, Fig. 14, Seite 33, und die Ausführungen Seite 32.

Eine Filterprobe aus der Mitte des Raumes über 50 Minuten während normaler Schleif- und Fräsarbeit gezogen, ergab einen

Gesamtstaubgehalt in der Raumluft von 25 mg/m³.

Leider liess sich aus der Probe nicht genügend Material für eine Schlämmanalyse isolieren.

Eine Parallelprobe in der Staubzählkammer ergab eine Teilchenzahl von 9750 cm⁻³; in der Probe vorherrschend sind Teilchen unter 2 μ \emptyset , daneben wenig gröbere Teilchen bis 15 μ \emptyset .

Der mittlere Korndurchmesser aus Staubgewicht, spezifischem Gewicht und Teilchenzahl berechnet, beträgt, 1,25 μ .

bb) Feilerei.

In der Werkstätte von 50 m² Grundfläche und 2,5 Meter Höhe, mit einem Rauminhalt von 125 m³, werden die halbfertigen Schieferplatten von Hand mit Bimsstein geschliffen und die Kanten vermittels Feilen abgerundet. Die Arbeit wird trocken durchgeführt. Eine Ventilationseinrichtung ist nicht vorhanden, dagegen kann durch Öffnen der Fenster an zwei einander gegenüberliegenden Wänden eine kräftige natürliche Belüftung erzielt werden, sofern die Aussentemperatur das Offenhalten der Fenster gestattet.

Zur Zeit der Untersuchung sind zwei Mann mit Schleifen und Feilen beschäftigt.

Der Staubzustand.

Die Atmosphäre im Raum erscheint dem Auge sehr schwach staubig.

Es wurden folgende Staubproben genommen: Filterprobe in einem Meter Abstand vom Arbeitsplatz des mit Schleifen der Platten beschäftigten Mannes; Entnahme in Kopfhöhe. Die Fenster des Raumes sind während der Probenahme offen; Dauer der Probenahme 30 Minuten.

Als Staubkonzentration wurden 4 mg/m³ gefunden, davon waren:

größer als 70 μ \emptyset	ca. 5 %
70—20 μ \emptyset	ca. 30 %
feiner als 20 μ \emptyset	ca. 65 %

Staubzählkammerproben.

Nr. 1. Bei der Schleifbank in der Ecke des Raumes, keine Arbeit;

Befund 14 600 Teilchen/cm³

vorherrschend sind Teilchen unter 1 μ \emptyset , vereinzelt über 5 μ \emptyset .

Nr. 2. Am gleichen Ort, während des Schleifens:

Befund 25 300 Teilchen/cm³

vorherrschend sind Teilchen unter 1 $\mu\varnothing$, selten gröber als 2 $\mu\varnothing$.

Der mittlere Korndurchmesser aus Staubgewicht (4 mg/m³) und Teilchenzahl der Staubzählkammerprobe Nr. 2 berechnet, ergibt für Staubzählkammerprobe Nr. 2 0,5 μ .

Sedimentproben in Wäggläsern.

Parallel zu den angeführten Proben wurde durch Aufstellen von Wäggläsern während 24 Stunden (davon 7 Stunden Betrieb mit Staubanfall) aus dem Raum der sedimentierende Staubanteil ermittelt.

Die Proben ergaben folgenden Befund:

	Wägglas Nr. 1 Etagère an der Wand bei der Schleifbank in 1,3 m Höhe	Wägglas Nr. 2 Etagère an der Wand neben dem offenen Fenster, 3 m von Feilbank, in 1,3 m Höhe
Höhe des Raumes über den Wäggläsern	120 cm	120 cm
Gesamtgewicht des Sedimentes	22 mg/20 cm ²	16 mg/20 cm ²
	Wägglas Nr. 1	Wägglas Nr. 2
Kornzusammensetzung:		
Anteile gröber als 70 $\mu\varnothing$	27,9 %	5,7 %
Anteile 70—30 $\mu\varnothing$	20,3 %	20,7 %
Anteile 30—10 $\mu\varnothing$	37,1 %	36,8 %
Anteile 10— 5 $\mu\varnothing$	9,1 %	24,1 %
Anteile feiner als 5 $\mu\varnothing$	5,6 %	12,7 %
Kontrolle	100,0 %	100,0 %

Die Umrechnung der Kornzusammensetzung des Sedimentes auf die Kornzusammensetzung des ursprünglichen Staubzustandes (vgl. die Ausführungen Seite 34) ist im vorliegenden Falle unsicher, weil die Schlämmanalyse des Sedimentes infolge der geringen zur Verfügung stehenden Materialmengen nicht auf den Bereich der feinsten Kornstufen um 1 $\mu\varnothing$ ausgedehnt werden konnte.

In Fig. 29 sind die Kornverteilungskurven der Sedimentprobe Nr. 2 und der daraus extrapolierte mutmassliche Verlauf der Kornzusammensetzung des Staubzustandes in der Luft zur Darstellung gebracht.

In Sedimentprobe Nr. 1 herrschen die bei der Schleifarbeit anfallenden und in nächster Nähe der Schleifbank sedimentierenden groben Anteile vor.

Zur Ergänzung der Untersuchung wurde eine Probe aus dem Staubsediment genommen, das sich auf dem horizontalen Stück des Ofenrohres 0,5 Me-

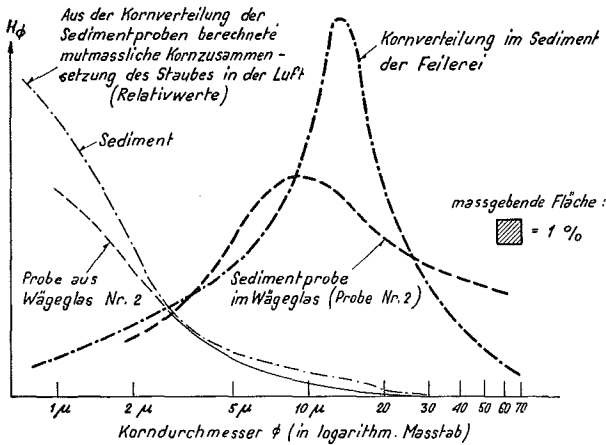


Fig. 29

Der Staubzustand in der Feilerei der Schieferbearbeitungswerkstätte.

ter unter der Decke abgelagert hatte. Es handelt sich um den seit dem Ende der Heizperiode abgelagerten Staub, aus welchem genügend Material für eine Schlämmanalyse und die chemische Untersuchung gewonnen werden konnte.

Die Schlämmanalyse gibt ein Bild über die Kornzusammensetzung des gesamten in der Werkstätte sedimentierten Staubes (vgl. Fig. 29), die Kornverteilungskurve ist durch ein bei $13 \mu \varnothing$ liegendes Maximum gekennzeichnet.

Aus der Kornverteilungskurve lässt sich die mutmassliche mittlere, relative Kornzusammensetzung des Staubzustandes in der Luft berechnen, wenn angenommen wird, dass praktisch die gesamte Staubmenge über der Entnahmestelle im Verlaufe der langen Sedimentationszeit (April bis Ende Juli) effektiv sedimentiert sei. Die Staubpartikel waren während einer von ihrer Korngrösse, bzw. Fallgeschwindigkeit abhängigen Zeit in der Luft; die Zeit ist gleich der durch die Fallgeschwindigkeit dividierten Fallhöhe. Aus den Relativwerten $\frac{H}{V_1} : \frac{H}{V_2} \cdot \frac{H}{V_n}$ und der Kornverteilungskurve des Sedimentes wurde die in Fig. 29 dargestellte Kornverteilungskurve des Staubes erhalten.

Über die Staubkonzentration lassen sich keine sicheren Angaben machen.

Die chemische Analyse der Sedimentprobe ergibt einen guten Mittelwert über die Zusammensetzung des im Raum anfallenden Staubes; der Befund lautet:

1. Kieselsäure (SiO_2) total	55,4 %
(davon direkt abrauchbar)	(40,1 %)
2. Tonerde + Titanoxyd ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$)	9,9 %
3. Eisenoxyd (Fe_2O_3)	3,8 %
4. Calciumoxyd (CaO)	9,5 %
5. Magnesiumoxyd (MgO)	1,5 %

6. Kohlensäure (CO ₂)	7,2 %
7. Schwefelsäureanhydrid (SO ₃)	0,6 %
8. Feuchtigkeit (H ₂ O _{105°})	0,2 %
9. Nicht bestimmter Rest (Alkalien, chem. geb. H ₂ O + Bitumen)	11,9 %
	100,0 %

Aus der Analyse berechnet sich in erster Annäherung die folgende rationale Zusammensetzung des Staubes nach Mineralkomponenten:

Quarz	40 %
Kalzium- + Magnesiumkarbonat	16 %
Silikate	40 %

Die Verteilung der Mineralkomponenten auf die Kornfraktionen.

Einen recht interessanten Befund ergab die Bestimmung der chemischen Komponenten in den verschiedenen Kornfraktionen, indem es sich zeigte, dass der Kieselsäuregehalt mit abnehmender Korngrösse deutlich zurückging; die erhaltenen Zahlen sind in der folgenden Tabelle 3 zusammengestellt und in Fig. 30 graphisch zur Darstellung gebracht:

Tabelle 3
Die Verteilung der chemischen Komponenten in den Kornfraktionen

Gehalt an	Kieselsäure (SiO ₂) (Quarz + abrauchbare SiO ₂ im HCl unlösl. Rückstand)	Salzsäureunlösliche Anteile (vorherrschend Glimmer)	Salzsäurelösliche Anteile (Hauptanteil CaCO ₃ + MgCO ₃)
Mittelwert der ganzen Probe	51,3 %	19,8 %	22,9 %
Kornfraktion			
40—10 μ ø	60,0 %	17,2 %	22,8 %
10—3 μ ø	50,8 %	23,7 %	25,5 %
3—1 μ ø	48,0 %	26,9 %	25,1 %
1—0,4 μ ø	39,7 %	35,4 %	24,9 %

Anmerkung: Infolge der geringen, in den einzelnen Fraktionen zur Verfügung stehenden Mengen konnte keine vollständige Analyse durchgeführt werden; der angegebene SiO₂-Gehalt erfasst nur die im HCl-Rückstand direkt abrauchbaren Anteile.

Die Untersuchung der Proben aus der Feilerei ergibt zusammenfassend folgendes Bild:

Unter gleichen oder ähnlichen Bedingungen, wie sie zur Zeit der Probenahme geherrscht haben (Handarbeit durch zwei Mann, offene Fenster während der Arbeitszeit), entsteht im Raum ein Staub sehr geringer Konzentration

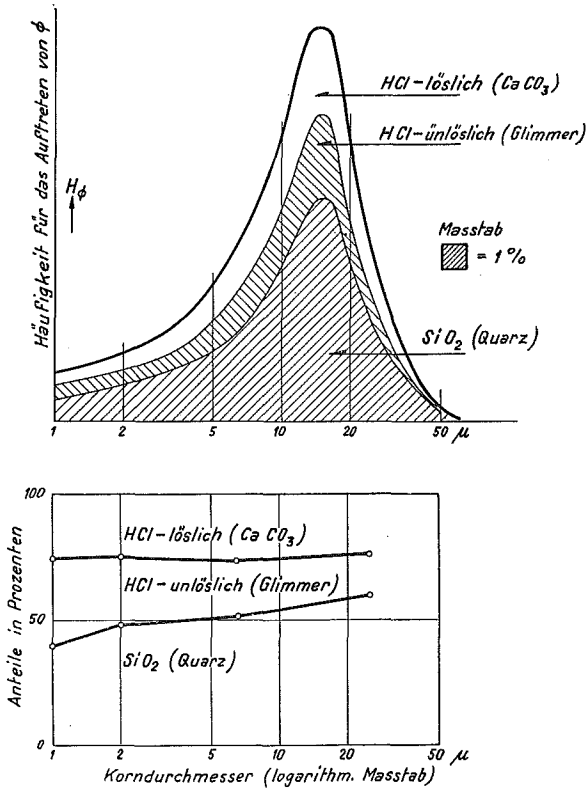


Fig. 30

Verteilung der Mineralkomponenten im Staubsediment der Feilerei (Schieferbearbeitung).

(einige mg/m^3), die Kornzusammensetzung ist sehr fein, der Hauptanteil des Staubes liegt unterhalb $5 \mu \varnothing$.

Der Befund der SiO_2 -Abnahme mit abnehmender Korngröße ist bemerkenswert; die Bestimmung der mineralischen Zusammensetzung in den verschiedenen Kornfraktionen ist für jede weitere Untersuchung vorzusehen.

Der Vergleich der Staubbedingungen in der Feilerei mit denjenigen der übrigen untersuchten Betriebe erfolgt im nächsten Abschnitt.

Vergleich und Beurteilung der Staubbedingungen in den verschiedenen untersuchten Betrieben.

In den Fig. 31a und b und den dazugehörigen Tabellen sind die wichtigsten Merkmale der Staubbedingungen, wie sie sich aus den Untersuchungen ergeben haben, zusammengestellt.

Es ist an dieser Stelle ausdrücklich zu betonen, dass es sich bei den vorliegenden Untersuchungen um einige einzelne, herausgegriffene Beispiele

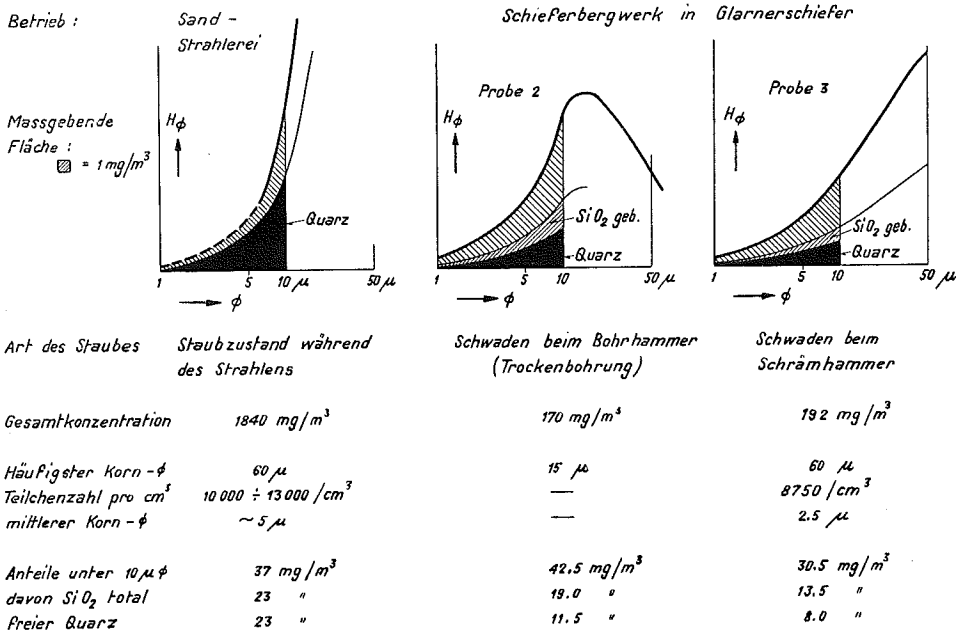


Fig. 31a

Vergleichende Darstellung des Staubzustandes in verschiedenen Betrieben.

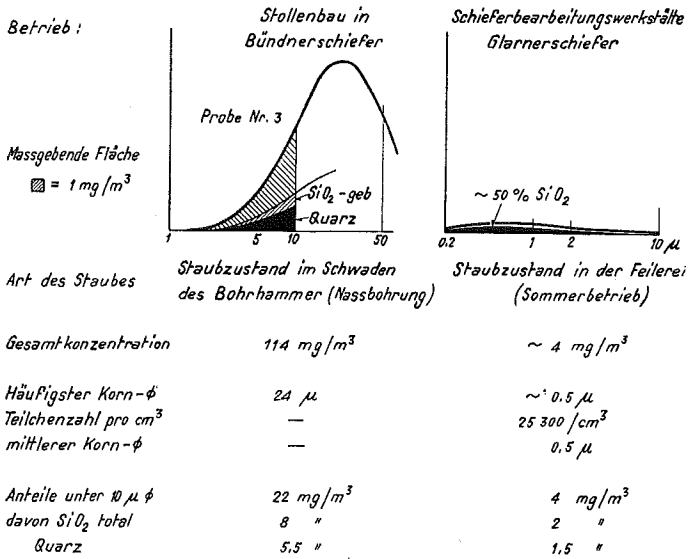


Fig. 31b

Vergleichende Darstellung des Staubzustandes in verschiedenen Betrieben.

handelt; die meisten Untersuchungen erfassen die Mittelwerte des Staubzustandes nur über die relativ kurzen Zeiten von einer Viertel- bis etwa einer Stunde, d. h. während der Dauer der Probenahme.

Über die in den einzelnen Betrieben im Verlaufe längerer Perioden auftretenden Schwankungen können keine Angaben gemacht werden. Die Resultate sind aus diesem Grunde vorsichtig auszuwerten, zu weit gehende Schlussfolgerungen, bzw. Verallgemeinerungen dürfen daraus nicht abgeleitet werden.

Die Resultate geben aber einen recht guten Überblick, gewissermassen einen Querschnitt über die in den verschiedenen Betrieben vorhandenen Bedingungen.

Der Vergleich der verschiedenen Angaben in den Tabellen von Fig. 31 ergibt folgendes:

1. Wesentlich für die Beurteilung eines Staubes in bezug auf seine Silikosegefährlichkeit erscheint uns der Staubanteil unter 10μ Korndurchmesser, dessen Kornzusammensetzung und dessen Kieselsäuregehalt.

In den Diagrammen von Fig. 31 ist die Kornverteilung dieses Anteils in gleichem Maßstabe¹⁴⁾ für den Staubzustand in den verschiedenen untersuchten Betrieben nebeneinander dargestellt und deren Gesamtkieselsäuregehalt sowie der Anteil an freiem Quarz (direkt abrauchbare Kieselsäure) eingetragen.

Die Gesamtmenge des Staubanteils unter 10μ liegt sowohl bei der Sandstrahlerei wie beim Bergwerk- und Stollenbetrieb in der Grössenordnung von 20—50 mg/m³, während er in der Schieferbearbeitungswerkstätte mit nur 4 mg/m³ wesentlich darunter liegt.

Der Gesamt-SiO₂-Gehalt des untersuchten Anteils stuft sich, entsprechend der Staubmenge und ihres SiO₂-Gehaltes, in der Reihenfolge: Sandstrahlerei — Bohrhammer Schieferbergwerk — Schrämmhammer Schieferbergwerk — Bohrhammer Stollenbau (Nassbohrer) von 23 mg SiO₂/m³ auf 8 mg ab; während der freie Quarz in der gleichen Reihenfolge von 23 mg auf 5,5 mg abnimmt. Die relative Gefährlichkeit der untersuchten Staubzustände muss in der gleichen Reihenfolge abnehmen.

2. Die Gesamtkonzentration, d. h. die alle Korngrössen umfassende Staubmenge ist in erster Linie von der Stauberzeugung abhängig; sie liegt für die verschiedenen Betriebe in verschiedenen Grössenordnungen.

Die angegebenen Zahlen beziehen sich immer auf die ungünstigsten Bedingungen im Staub (Staubbedingung in unmittelbar an der Arbeitsstelle anfallenden Schwaden), wobei im Sandstrahl ≈ 2000 mg/m³, im Stollen- bzw. Bergwerkbau 100—200 mg/m³ und in der Feilerei nur 4 mg/m³ festgestellt wurden.

¹⁴⁾ Die massgebende Flächeneinheit stellt die Menge von 1 mg Staub/m³ dar.

Die Staubkonzentrationen der in der Tabelle nicht aufgeführten Staubproben aus dem Stollen während Arbeitspausen usw. liegen um 10 bis 50 mg/m³.

3. Die Kornverteilungskurven der Gesamtproben, wie sie in den einzelnen Abschnitten dargestellt worden sind, weisen durchweg ein charakteristisches Maximum auf, das als häufigster Korndurchmesser bezeichnet worden ist; die Bezeichnung bezieht sich auf den Gewichtsanteil der Partikel mit dem angegebenen Durchmesser und nicht auf die Zahl der Teilchen.

Der häufigste Korndurchmesser, wie er in der Tabelle eingetragen ist, gibt ein Bild über die gewichtsmässige Verteilung der Kornfraktionen; je kleiner er ist, um so feiner ist ein Staub.

In den untersuchten Beispielen liegen die häufigsten Korndurchmesser zwischen 60 und 0,5 μ .

4. Die Teilchenzahlen, die durch Auszählen der Staubproben in den Staubzählkammern erhalten worden sind, zeigen nicht sehr grosse Unterschiede zwischen den ganz verschiedenen Staubbedingungen, sie schwanken zwischen 8000 und 25 000 im cm³.

Die gefundenen Zahlen liegen im gleichen Bereiche wie die Angaben aus der amerikanischen Literatur¹⁵⁾ für die «Staubklasse 5», welche den Staub «an der Staubquelle ohne Ventilation» bezeichnet.

Eine Beurteilung des Staubzustandes auf Grund der Teilchenzahl allein ist immer unsicher (vgl. S. 33).

5. Aus der Gesamtstaubkonzentration und der Teilchenzahl n lässt sich der mittlere Teilchendurchmesser

$$\left(\bar{\varnothing}_m = 1,23 \cdot \sqrt[3]{\frac{\text{Gewicht}}{\text{spez. Gew.} \times n}} \right) \text{ berechnen.}$$

Dieser Korndurchmesser liegt, da die gezählten feinen Teilchen sehr stark ins Gewicht fallen, im Korndurchmesserbereich zwischen 0,5 und 5 μ (vgl. auch die in der Tabelle nicht aufgeführten Untersuchungen der Proben 1 und 2 aus dem Stollenbau, S. 50).

Der mittlere Korndurchmesser gibt ein gutes Bild über die Kornfeinheit und lässt sich zur qualitativen Beurteilung eines Staubes heranziehen.

Die Beurteilung der Silikosegefährlichkeit eines Staubes

In Ziff. 1 des vorangehenden Abschnittes ist die relative Gefährlichkeit der untersuchten Staubzustände in der Reihenfolge der im Staubanteil unter 10 μ Korndurchmesser enthaltenen Kieselsäure festgelegt worden.

Ein absoluter Maßstab, etwa die Kieselsäuremenge, die eingeatmet oder vom Körper aufgenommen, zu einem bestimmten Stadium der

¹⁵⁾ Vgl. DRINKER and HATCH, l. c. S. 122.

Silikose führen muss, wird in der medizinischen Literatur nirgends festgelegt. Von medizinischer Seite wird bei dieser Überlegung allerdings abzuklären sein, in welchem Masse die individuellen Unterschiede die Festlegung eines solchen Maßstabes überhaupt gestatten.

Überschlagsmässig lässt sich aus den ermittelten Staubkonzentrationen bei Annahme eines mittleren Atemvolums ausrechnen, wieviel Staub bzw. Kieselsäure während einer bestimmten Atmungszeit eingeatmet wird.

Für die untersuchten Staubzustände ergeben sich bei Annahme eines mittleren Atemvolums von 20 l/min die folgenden Zahlen:

Staub- und SiO₂-Aufnahme in den untersuchten Staubzuständen bei einer Arbeitszeit von $8 \times 250 = 2000$ Stunden pro Jahr und einem Atemvolum von 1,2 m³/Std.

	Eingeatmete Menge: 2400 m ³ Luft		
	darin enthalten		
	Staubanteil feiner als 10 μ ø	Gesamt-SiO ₂	Quarz
Sandstrahlerei	89 g	55 g	55 g
Schieferwerk Bohrhammer	102 g	45,5 g	28 g
Schrämhammer	73 g	32 g	19 g
Stollenbau (Nassbohrung)	53 g	19 g	13 g
Schieferbearbeitung (Feilerei)	~ 9,5 g	~ 5 g	~ 3,5 g

Die Zahlen gelten für eine effektive Atmungsdauer von 2000 Stunden in den festgelegten Staubzuständen. In Wirklichkeit reduzieren sich die Zahlen dadurch stark, dass nur während eines Bruchteils der Arbeitszeit der angenommene Staubzustand herrscht (Unterbrüche in der Bohrarbeit).

Eine genaue Untersuchung muss neben der Staubanalyse auf eine genaue Arbeitsanalyse abstellen können.

Die durch obige Rechnung erhaltenen Zahlen liegen durchaus in der Grössenordnung der Staub- und Quarzmengen, die in den Lungen verstorbener Silikotiker gefunden werden.

Eine weitergehende Beurteilung dürfte auf Grund der heutigen Kenntnisse der Silikose noch verfrüht sein. Vom chemisch-physikalischen Standpunkte aus gesehen, erheben sich folgende Fragen:

a) In welchem Verhältnis stehen die Gefährlichkeit des freien Quarzes und die Gefährlichkeit der in Silikaten chemisch gebundenen Kieselsäure zueinander?

Wie verhalten sich die verschiedenen Silikate?

Welchen Einfluss üben die andern Staubkomponenten aus?

- b) Ist im Hinblick auf die beobachtete Wanderung des Staubkornes im menschlichen Körper die Korngröße entscheidend?
Es ist durchaus denkbar, dass eine bestimmte Korngröße am gefährlichsten ist.
- c) In welchem Umfange handelt es sich bei der Wirkung der Silikose um einen von der Oberfläche des Staubkornes ausgehenden, langsam ablaufenden Lösungsvorgang?
In diesem Falle würde als massgebender Faktor in der Beurteilung der Silikosegefährlichkeit die totale vorhandene Oberfläche der Staubzerteilung auftreten, die aus der Kornverteilungskurve berechnet werden könnte.

D. Die Staubbekämpfung

In der Einleitung (S. 15) ist das Studium der Staubbekämpfung als eine der dringlichsten und sofort vorzunehmenden Arbeiten des mineralogischen Sektors im Rahmen der Arbeitsgemeinschaft bezeichnet worden. Es kann sich nicht darum handeln, die dabei auftretenden Probleme an dieser Stelle eingehender zu besprechen; dies muss einer späteren Arbeit, in welcher über die diesbezüglichen Untersuchungen referiert wird, vorbehalten bleiben. Es soll indessen der Vollständigkeit halber ein kurzer Überblick über die Möglichkeiten der Staubbekämpfung und über die dringlichsten Untersuchungsarbeiten gegeben werden.

Grundsätzlich handelt es sich bei der Staubbekämpfung darum,

- a) durch geeignete Anordnungen an den stauberzeugenden Maschinen den Staubanfall zu reduzieren (Nassbohren, Naßschleifen usw.) und
- b) den anfallenden Staub, d. h. die staubhaltige Luft vom Standort des Arbeiters fernzuhalten oder durch Frischluftzufuhr zu ersetzen bzw. zu verdünnen. (Sandstrahlkabinen, Staubabsaugvorrichtungen, Stollenventilation.)
- ad. a) Zur Verminderung des Staubanfalles beim Bohren mit pneumatischen Hämmern wird für quarzreiches Gestein in dem S. 15 erwähnten Bundesratsbeschluss die sogenannte Nassbohrung genannt, die darin besteht, vermittels eines durch den Bohrstahl geleiteten Wasserstrahls das Bohrloch auszuspülen.
Systematische Untersuchungen über den Effekt des Nassbohrens sind eingeleitet.
- ad. b) Beim Absaugen des anfallenden Staubes muss danach getrachtet werden, die Luftansaugöffnung möglichst nahe an die Staubentstehungsstelle heranzubringen; diese Forderung ist häufig deswegen beschränkt durchführbar, weil durch die Installation der Staubabsaugvorrichtung die Arbeit an der Maschine nicht behindert werden darf.

Für Bohrhämmer bestehen zur Umgehung des Nassbohrrens und der damit verbundenen unangenehmen Wasseransammlung im Stollen Vorschläge zum Absaugen des Staubes beim Austritt aus dem Bohrloch¹⁶⁾ oder durch Ansaugen durch einen Kanal im Bohrstahl¹⁷⁾.

Eigene praktische Erfahrungen über die Wirksamkeit derartiger Massnahmen stehen uns nicht zur Verfügung.

Ist es aus irgendwelchen Gründen nicht möglich, den Staub am Entstehungsort abzusaugen, so muss der ganze Raum mit Frischluft belüftet werden¹⁸⁾. Die staubhaltige Arbeitsluft wird an irgendeiner Stelle im Raum angesaugt, während die Frischluft von aussen, in Gebäuden durch eigens dafür angebrachte Luftklappen oder durch die vorhandenen Öffnungen und Undichtigkeiten nachströmt. Umgekehrt ist es im Stollenbau üblich, den Stollen durch Einblasen von Frischluft zu belüften, wobei dann die staubhaltige Luft durch das Stollensystem langsam herausgepresst wird (vgl. Fig. 13 und die Ausführungen S. 29).

Eine Belüftung, welche die mittlere Staubkonzentration im ganzen Raum wirksam herabdrücken soll, erfordert in jedem Falle recht grosse Luftmengen; die sogenannte *Luftumwälzung*, d. h. das pro Stunde in den Raum eingepresste (oder abgesaugte) Luftvolum muss ein Mehrfaches des Raumes betragen.

Vom staubtechnischen Standpunkte aus gesehen, erscheint es richtig, bei der Raumbelüftung wie auch bei der Stollenbelüftung, die Luft nach unten anzusaugen, damit die Bewegungsrichtungen der sedimentierenden Staubteilchen und der Luftströmung einander überlagern.

Die abgesaugte staubhaltige Luft wird in der Regel durch Hochkamine ins Freie ausgeblasen; in den meisten Fällen ist es notwendig, den Hauptanteil des Staubes vorher durch sogenannte *Staubabscheider* aus der Luft zu entfernen, um eine Belästigung der Umgebung durch Staubablagerungen zu verhindern¹⁹⁾.

In den Fig. 32, 34, 35 und 37 sind die wichtigsten Typen der in der Industrie gebräuchlichsten Staubabscheider dargestellt²⁰⁾.

Die einfache *Sedimentationskammer* (Fig. 32). Der staubhaltige Luftstrom erfährt im grossen Querschnitt der Kammer eine ganz

¹⁶⁾ T. HATCH, J. W. FEHNEL, H. WARREN a. G. S. KELLEY: Application of the KELLEY trap to underground drilling operations. *J. Ind. Hyg.*, 15, 41 (1933).

¹⁷⁾ E. C. VIGLIANI e R. BRUCK, *La Medica del Lavoro*, 35 Nr. 4—5—6 (1944).
R. BRUCK, *L'Ingegnere*, No. 9, Settembre 1945.

¹⁸⁾ In grösseren Bergwerkbetrieben kann an Stelle von Frischluft (Aussenluft) staubfreie Luft aus gut bewetterten Teilen des Bergwerkes zur Verwendung kommen.

¹⁹⁾ Eine recht interessante Studie über die Staubablagerung durch das Kamin des Fernheizkraftwerkes der E.T.H. bietet die Arbeit von B. BAUER und F. RUEGG, *Mitt. aus Betrieb und Forsch. des Fernheizkraftwerkes der E.T.H.*, Zürich, August 1936.

²⁰⁾ Eine Zusammenfassung über die Wirkungsweise der verschiedenen Staubabscheider findet sich in der Arbeit von O. SCHÄRER, *Über technische Staubabscheidung und ihre physikalischen Grundlagen*; *Schweiz. Bauzeitung* 124, 53 (1944); über die in den USA gebräuchlichen Abscheidersysteme siehe DRINKER a. HATCH, l. c. S. 220 ff.

erhebliche Verminderung seiner Strömungsgeschwindigkeit, so dass die Teilchen mit grösseren Fallgeschwindigkeiten Zeit finden, in den unten befindlichen Auffangkasten auszusedimentieren; die feineren Teilchen werden mit dem Luftstrom weiter verfrachtet.

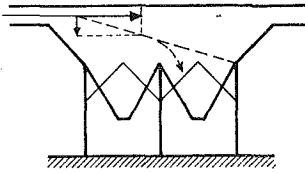


Fig. 32
Einfache Sedimentationskammer (häufig als Vorabscheider).

Die Leistungsfähigkeit solcher Sedimentationskammern ist auf die Abseidung nur sehr grober Teilchen beschränkt; häufig werden sie als Vorabscheider andern Abscheidertypen (Zyklonen, Filtern usw.) vorgeschaltet. In Fig. 33 zeigt die Kurve rechts ein Beispiel aus der Praxis.

Zyklonabscheider. Der schematisch in Fig. 34 dargestellte Abscheider wird in verschiedenen Varianten sehr häufig angewandt. Er beruht auf dem gleichen Prinzip wie der S. 37 beschriebene Messzyklon; die durch die Zentrifugalbeschleunigung auf die Innenfläche des Mantels ausgeschleuderten Staubpartikel rutschen in den Staubsilo hinunter, während die Luft, welche nur noch die feinsten Kornfraktionen enthält, durch die Mitte nach oben abgeblasen wird. Der Wirkungsgrad ist weitgehend von den herrschenden Luftgeschwindigkeiten und der Konstruktion abhängig. In

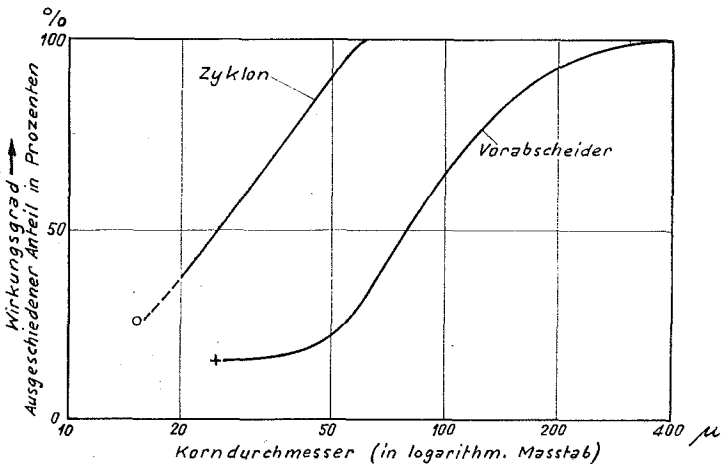


Fig. 33
Wirkungsgrad eines Zyklon-Staubabscheiders und einer Sedimentationskammer als Vorabscheider.

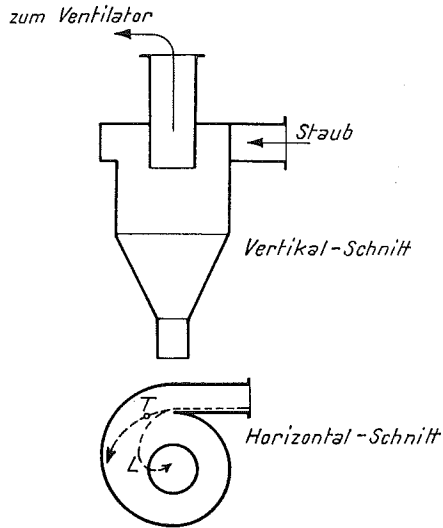


Fig. 34

Schema des Zyklon-Abscheiders

Fig. 33 zeigt die Kurve links den Wirkungsgrad eines Zyklonabscheiders aus der Praxis, welcher bis zu einem Korndurchmesser von $\infty 60 \mu 100 \%$ beträgt, für kleinere Teilchen dann aber rasch abnimmt. Es handelt sich dabei um einen Abscheider mittleren Leistungsgrades.

Staubfilter. Neben der Verwendung von kleinen Raschigringen, Stahlwolle und dergleichen als Filtermassen werden häufig Filterschläuche aus Wollgewebe und dergleichen in der in Fig. 35 schematisch dargestellten Anordnung benutzt.

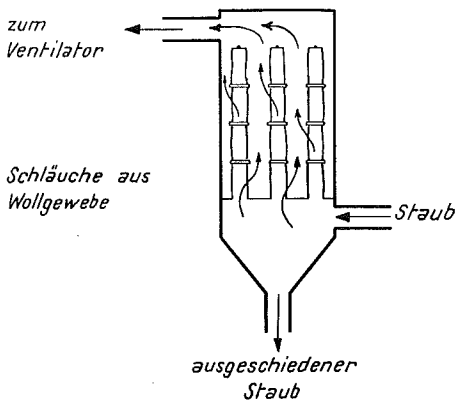


Fig. 35

Schlauchfilter

Die Abscheidung beruht bei allen diesen Konstruktionen auf einem A u f - p r a l l - und H a f t v o r g a n g der Teilchen auf den Fasern des Gewebes bzw. auf irgendwelchen Filtermassen und nicht auf einem eigentlichen Siebvorgang. Die Verwendung von Filtern mit kleineren Porenweiten als die abzuschheidenden Korndurchmesser (Siebprinzip) kommt wegen der dabei auftretenden grossen Luftwiderstände nicht in Frage.

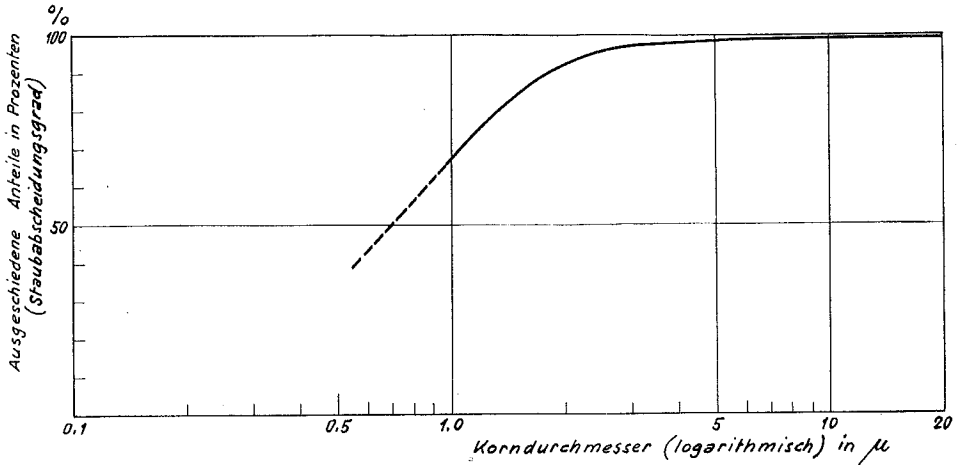


Fig. 36
Staubabscheidungsgrad des Staubfilters nach W. KAUFMANN.

Untersuchungsergebnisse über die gebräuchlichen Schlauchfilter stehen uns nicht zur Verfügung; der Wirkungsgrad ist stark von der Qualität des Filtergewebes und von dessen Gebrauchsdauer abhängig. Naturgemäss steigen die Filterwiderstände mit dem Gebrauch an.

Fig. 36 zeigt den Wirkungsgrad eines in den letzten Jahren entwickelten, recht leistungsfähigen Abscheiders nach W. KAUFMANN, welcher im Prinzip auf einem Stahlwolle-Nassfilter mit dauernder Abspülung der Filtermasse beruht. Die mit einem sehr feinen Testquarzstaub vorgenommene Prüfung des Filters im Laboratorium der EMPA ergab bis zu einer Korngrösse von 2μ einen Wirkungsgrad von nahezu 100 %.

Elektroabscheider. Ebenfalls sehr hohe Wirkungsgrade werden für die in Fig. 37 dargestellten Elektroabscheider angegeben. Sie beruhen im Prinzip darauf, dass die Staubteilchen in der Luft beim Passieren des zylindrischen Abscheiders durch eine Sprühentladung elektrisch aufgeladen und auf dem als Anode ausgebildeten Zylindermantel niedergeschlagen werden.

Eigene Untersuchungsergebnisse über den Wirkungsgrad derartiger Abscheider stehen nicht zur Verfügung.

So weit unsere Erfahrungen über die Leistungsfähigkeit der in der Praxis gebräuchlichen Staubabscheider erkennen lassen, ist deren Wirkungsgrad selten für die silikosegefährlichen Staubanteile unter 10μ Korndurchmesser noch von Belang; meistens wird nur die Abscheidung der rasch sedimentierenden Anteile über $20-50 \mu$, die nach dem Gewicht den Hauptanteil des anfallenden Staubes ausmachen, erreicht, während die feineren Teilchen ins Freie abgeblasen und mit dem Winde verfrachtet werden.

Eine «Reinigung» der Luft von silikosegefährlichem Feinstaub in dem Masse, dass die Luft nach dem Abscheider wieder zur Belüftung verwendet werden könnte, würde ganz wesentlich höhere Leistungsfähigkeiten der Staubabscheider voraussetzen. Ein derartiges Umwälzverfahren würde in Werkstätten usw. zur kälteren Jahreszeit den grossen Vorteil einer Wärmeersparnis bieten, da bei der Zufuhr von Aussenfrischluft immer sehr grosse Wärmemengen mit der Abluft weggeführt werden.

Für nicht silikosegefährliche Staubarten kommt das Umwälzverfahren mit leistungsfähigen Abscheidern heute schon durchaus in Frage. Es muss indessen im Sinne des Bundesgesetzes über Kranken- und Unfallversicherung (insbesondere des Art. 65 und des auf den 1. 1. 1948 neu in Kraft tretenden Art. 65bis) sowie des Fabrikgesetzes, die Forderung gestellt werden, dass sowohl die Staubbedingungen in den fraglichen Betrieben sowie die Leistungsfähigkeit der vorgesehenen Staubabscheider vor der endgültigen Inbetriebnahme einer kritischen Prüfung unterworfen werden.

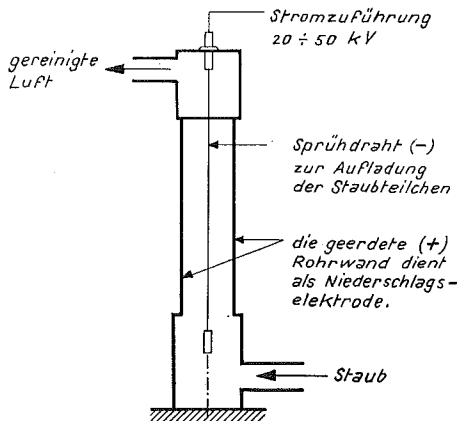


Fig. 37

Elektro-Filter, System COTTREL.

Anhang

Bericht über einige spezielle Staubuntersuchungsmethoden

Von

H. GESSNER und H. BÜHLER

Im folgenden werden einige Detailangaben über die Untersuchungsmethoden mitgeteilt, die im Verlaufe unserer Arbeiten entwickelt und angewandt worden sind.

Für die eigentliche Staubprobenahme in Betrieben erwiesen sich nur die allereinfachsten Methoden als brauchbar.

1. Die Staubzählkammer (vgl. auch die Ausführungen im allgemeinen Teil, Seite 32).

Zur raschen Entnahme kleiner Einzelproben wurden eine Anzahl der in Fig. 38 dargestellten Staubzählkammern angefertigt.

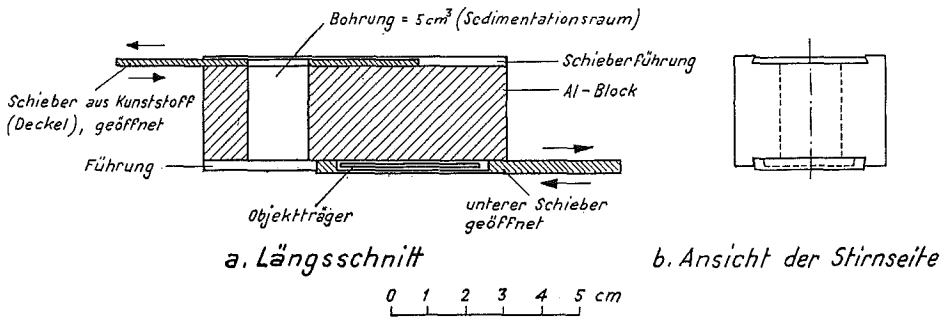


Fig. 38
Staubzählkammer

Die Kammer besteht aus einem Aluminiumblock von 80 mm Länge, 40 mm Breite und 25 mm Höhe, in welchem eine Bohrung von 16 mm \varnothing die Staubfang- und Sedimentationskammer bildet. Die Bohrung ist durch zwei in Schwalbenschwanzführungen laufende Schiebern oben und unten abschliessbar; im untern Schieber ist eine Vertiefung zur Aufnahme eines Mikroskopobjektträgers von 36×22 mm in der Weise eingelassen, dass der Objektträger bei geöffnetem Schieber durch den Aluminiumblock gegen Staubanfall aus der Atmosphäre geschützt ist und bei geschlossenem Schieber unter den Sedimentationsraum zu liegen kommt.

Die Probenahme geschieht in der Weise, dass die Kammer bei geöffneten Schiebern in der zu untersuchenden Raumluft in vertikaler Richtung leicht hin und her bewegt wird, worauf die Schieber geschlossen und die

Kammer an einem von Wärmeeinwirkung geschützten Ort einige Stunden ruhig stehen gelassen wird¹⁾).

Die Auswertung erfolgt durch systematisches Auszählen der auf den Objektträger sedimentierten Teilchen im Mikroskop.

Die mittlere Teilchenzahl pro Gesichtsfeld wird durch Zählung auf 9, 16 oder 25 symmetrisch auf dem Objektträger verteilten Stellen bestimmt. Die auftretenden Streuungen geben einen guten Überblick, ob die Probe gleichmässig, also «gut» ist oder ob sie verworfen werden muss.

Der Mittelwert der pro Gesichtsfeld erhaltenen Zahl entspricht der Zahl der im Volumen des ursprünglichen Staubes enthaltenen Teilchen, das durch die Fläche des Gesichtsfeldes und die Höhe der Sedimentationskammer gegeben ist. Für das Mikroskopobjektiv 6 mit dem Netzkular 2 beträgt dieses Volumen bei einem Durchmesser des Gesichtsfeldes von 0,323 mm und einer Kammerhöhe von 25 mm, 2,04 mm³. Die gefundene Teilchenzahl ergibt, mit 488 multipliziert, die gesuchte Teilchenzahl pro cm³ Staubluft.

Die folgende Tabelle I gibt ein Beispiel über die bei der praktischen Durchführung der Zählung auftretenden Streuungen.

Tabelle I

Die Streuungen der Einzelwerte und die mittleren Fehler der Resultate beider Auszählung der Teilchen auf dem Objektträger

Die folgenden Zählungen wurden mit dem Objektiv 6 und dem Netzkular 2 vorgenommen:

Zählung der gleichen Staubkammerprobe durch zwei Beobachter; die Zählung wurde mit dem gleichen Mikroskop, indessen mit zwei an den beiden Arbeitsplätzen verschiedenen Beleuchtungsbedingungen im Hellfeld vorgenommen.

Staubprobe aus dem Schwaden eines Bohrhammers (Nassbohrung) im Granit

Beobachter Ge					Beobachter Bü						
Reihe	1	2	3	4	5	Reihe	1	2	3	4	5
1	47	69	62	52	46	1	40	44	67	38	92
2	41	51	40	52	39	2	54	53	57	76	63
3	52	57	56	49	57	3	62	46	58	59	51
4	61	51	65	46	35	4	68	30	54	53	73
5	57	64	38	59	54	5	58	56	63	64	48

Mittelwert m

$$\frac{\sum Z}{n} = \frac{1300}{25} = 52$$

$$\frac{\sum Z}{n} = \frac{1427}{25} = 57$$

¹⁾ Nach einer Stunde hat bereits der gesamte Staubanteil der Teilchen $> 0,2 \mu$ die Kammerhöhe durchfallen.

Streuung des Einzelwertes

$$S = \sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{25}} = \pm 8,8 \text{ Teilchen} \quad \text{bzw. } \pm 12,6 \text{ Teilchen}$$

$$= \pm 17\% \text{ von } m \quad \text{bzw. } \pm 22\% \text{ von } m$$

Mittlere Fehler der Mittelwerte m

$$f_m = \frac{\sqrt{\frac{\sum \Delta^2}{(n-1)}}}{\sqrt{n}} = \pm 3,5\% \text{ von } m \quad \text{bzw. } \pm 4,6\% \text{ von } m$$

Die Abweichung der Mittelwerte der beiden Beobachter vom gemeinsamen Mittelwert beträgt

$$\frac{(m_{Ge} - m_{Bü})}{2} = \pm 2,5 \text{ Teilchen}$$

$$= \pm 4,6\% \text{ des gemeinsamen Mittelwertes.}$$

Die Abweichung liegt somit in der gleichen Grössenordnung wie der mittlere Fehler der einzelnen Mittelwerte. Die Prüfung vermittelt der Wahrscheinlichkeitsrechnung ergibt, dass die Abweichung wahrscheinlich auf einen systematischen Einfluss (verschiedene Beleuchtung oder verschiedene individuelle Empfindlichkeit der Augen) zurückzuführen ist; der Befund kann allerdings nicht als gesichert gelten, da die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten einer rein zufälligen Streuung in diesem Ausmasse noch ein Zehntel beträgt.

Eine Anzahl weiterer im gleichen Sinne geprüfter Zählreihen ergab ähnliche Streuungen der Einzelwerte zwischen 15 und 25 % der Mittelwerte, so dass der mittlere Fehler der Resultate mit dem Wert

$$m_f \approx \frac{20}{\sqrt{n}}$$

angegeben werden kann (n = die Anzahl der Einzelzählungen).

Die Methode erlaubt auch eine Schätzung der Kornverteilung, wenn die verschiedenen Teilchengrössen gesondert ausgezählt werden; als zweckmässig hat sich die Zählung folgender Fraktionen erwiesen:

1. Teilchen mit $\varnothing > 15 \mu$
2. Teilchen mit $\varnothing 15-5 \mu$
3. Teilchen mit $\varnothing < 5 \mu$

Unsicher ist — wie bereits im allgemeinen Teil, S. 33, ausgeführt worden ist — die Zählung der kleinsten Teilchen an der Grenze des optischen Auflösungsvermögens des Mikroskopes. Namentlich in Proben mit zahlreichen feinsten Teilchen wirken sich Ungleichheiten in der Beleuchtung und

auch subjektive Ermüdungserscheinungen des Auges sehr stark auf das Gesamtergebnis aus.

Eine Fehlerquelle, die darin besteht, dass fast immer nicht zum Sediment gehörige Staubteilchen auf der Netzplatte des Okulars sichtbar sind, kann in einfacher Weise eliminiert werden, indem der Objektträger ständig leicht hin und her bewegt wird und nur die Teilchen gezählt werden, welche die Bewegung mitmachen. Das Verfahren bietet den weiteren Vorteil, dass lichtschwache Teilchen in der Bewegung weniger übersehen werden als wenn sie in Ruhe sind.

Parallelproben, die zu gleicher Zeit im gleichen Raum gezogen werden, geben ein gutes Bild über die in einem Staub stets vorhandenen Schwankungen. Tabelle II zeigt die Ergebnisse von 6 Parallelproben.

Tabelle II
Streuung von sechs Parallelproben

Probe Nr.	1	2	3	4	5	6
Einzelzählungen	Zahl der Teilchen auf dem Sehfeld von 0,082 mm ²					
1	35	31	18	22	32	13
2	41	23	32	26	18	22
3	25	35	22	23	26	12
4	24	24	41	22	14	13
5	17	20	37	30	27	16
6	26	24	22	33	29	15
Σ	168	157	172	156	146	91
Mittelwert	28	26	29	26	24	15
Mittelwert aus 2 Parallelproben	27		27,5		19,5	
	Zahl der Teilchen in 1 cm ³ Luft					
Mittelwert	13 200		13 400		9 500	
Ort der Probenahme	2 m vom Gebläse		10 m vom Gebläse		6 m vom Gebläse	

Die Proben Nrn. 1—5 weisen eindeutig den gleichen Staubzustand auf, während Probe Nr. 6 herausfällt.

Die Fehlerrechnung ergibt für die Proben 1—5 eine Streuung $\left(\sqrt{\frac{\sum A^2}{n}}\right)$ der Einzelwerte von 25 %.

Die Streuung der Mittelwerte der Proben 1—5 untereinander ist mit 6,5 % etwas geringer, als die Rechnung aus der Einzelstreuung erwarten lässt.

2. Der Sedimentationsapparat zur getrennten Auszählung der Kornfraktionen

Die im allgemeinen Teil, S. 34, angeführte Apparatur sei im folgenden kurz beschrieben:

Der Apparat (vgl. Fig. 39) besteht aus zwei senkrecht übereinander angebrachten Zylindern von 50 mm \varnothing , die durch einen Schieber gegeneinander abgeschlossen werden können.

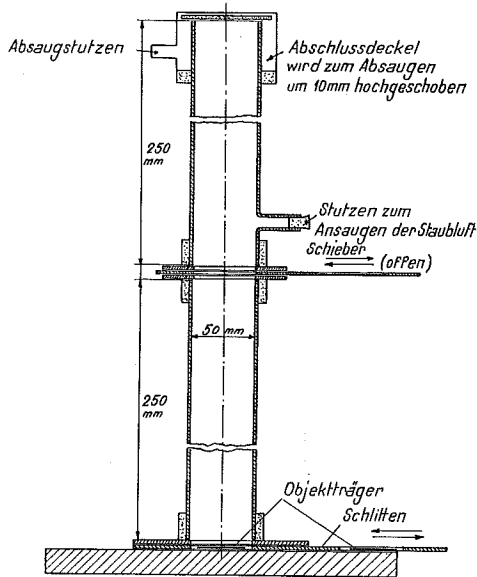


Fig. 39
Staubsedimentierapparat

Der obere Zylinder dient als Staubauffangrohr. Die staubhaltige Luft wird bei geschlossenem Schieber durch den Zylinder gesaugt; nach einiger Zeit befindet sich die staubhaltige Betriebsluft in ihrem ursprünglichen Zustand im Zylinder. Alsdann werden die beiden Stutzen (Einsaug- und Absaugstutzen) abgeschlossen und der Schieber geöffnet, so dass die beiden Zylinder miteinander in Verbindung stehen.

Die einzelnen Staubteilchen sedimentieren nun mit der von ihrer Korngrösse abhängigen Geschwindigkeit durch die staubfreie Luft des unteren Zylinders und fallen auf den unten liegenden Objektträger, welcher mittels eines Schlittens von Zeit zu Zeit ausgewechselt wird. Auf diese Weise ist es durch geeignete Wahl der Zeiten, nach welchen die Objektträger ausgewechselt werden, möglich, den Staub nach bestimmten Korngrössen getrennt aufzufangen und auf dem Objektträger mikroskopisch auszuzählen.

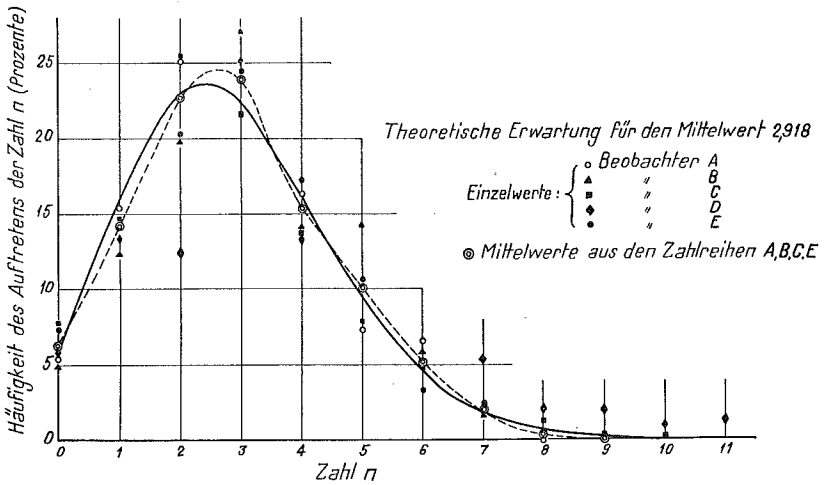


Fig. 40

Statistische Verteilung der Einzelwerte $0 \div 11$ an einer Quarzmehlfraction $1-2 \mu \phi$.
(5 Zählungen derselben Probe durch 5 Beobachter.)

Die Versuchsergebnisse einer im Laboratorium durchgeführten kritischen Prüfung der Apparatur lauten kurz zusammengefasst folgendermassen²⁾:

- a) Die Korngrößen der Teilchen der einzelnen Fraktionen stimmen bei der Ausmessung im mikroskopischen Bild mit den erwarteten Größen gut überein.
- b) Die mikroskopische Auszählung der Teilchen von Kornfraktionen innerhalb relativ enger Grenzen ist ungleich viel leichter als beim Vorhandensein grosser und kleiner Teilchen nebeneinander. Die Zählung der feinsten Fraktionen von $1-0,4 \mu \phi$ bietet durchaus keine Schwierigkeiten.

Die Methode hat den weiteren Vorteil, dass die Grösse der kleinsten Teilchen, die eben noch ausgezählt worden sind, genau angegeben werden kann.

- c) Die Auswertung einer grösseren Zählreihe ergab recht gute Übereinstimmung der auftretenden Streuungen mit den theoretisch zu erwartenden Werten (vgl. Fig. 40).

Die bei einer systematischen Zählung auftretenden Mittelwerte sind mit einem mittleren Fehler von $\pm 3,5$ bis 5% des mittleren Wertes behaftet.

Die praktische Anwendung der Methode bei der Staubuntersuchung in Betrieben ist dadurch häufig erschwert, dass der Apparat, unmittelbar nachdem die Probe gezogen ist, für die Sedimentation mindestens

²⁾ Ein ausführlicher Bericht über diese Versuche wurde in einem internen Bericht niedergelegt, welcher allfälligen Interessenten zur Verfügung gestellt werden kann.

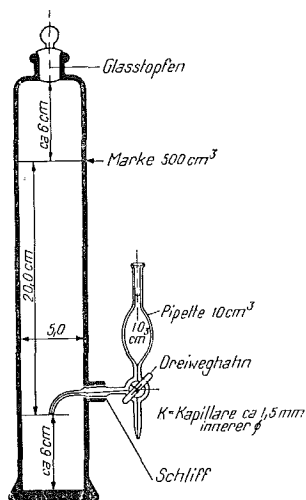


Fig. 41
Pipettapparat nach ESENWEIN

24 Stunden an einem ruhigen, vor Wärmeeinflüssen geschützten Orte stehen gelassen und bedient werden muss.

Es ist im weiteren darauf aufmerksam zu machen, dass nur die Kornzusammensetzung einer relativ kleinen Momentanprobe erhalten wird.

3. Die Schlämmanalyse von Staubproben

Die Erfahrung zeigte, dass die Untersuchung der aus einem grösseren Luftvolumen auf dem Papierfilter aufgefangenen Staubproben mittels einer geeigneten Methode der Schlämmanalyse als sicherstes Verfahren für die Ermittlung der Staubzusammensetzung bezeichnet werden kann.

a) Die Schlämmanalyse grösserer Proben, mit Mengen über 5 g, kann mit irgendeiner der bekannten Schlämm-Methoden durchgeführt werden³⁾.

Als recht zweckmässig erwies sich die Pipett-Methode. Im Rahmen unserer Untersuchung wurde durchweg mit dem in der EMPA entwickelten Pipettapparat nach ESENWEIN⁴⁾ geschlämmt.

Fig. 41 zeigt den Apparat. Aus der im Standzylinder in Wasser aufgeschlämmten Staubprobe wird von Zeit zu Zeit ein aliquoter Anteil abpipettiert, eingedampft und gewogen. Die Proben enthalten jedesmal nur noch die aliquoten Anteile der Fraktionen in ihrem ursprünglichen Mengenverhältnis.

³⁾ Vgl. H. GESSNER, Die Schlämmanalyse, 1931.

⁴⁾ Eine Beschreibung des Apparates findet sich in G. WIEGNER und H. PALLMANN, Anleitung zum quantitativen agrilkulturchemischen Praktikum, II. Aufl. Bornträger 1938, S. 148; in GESSNER «Die Schlämmanalyse» ist der Apparat von ESENWEIN noch nicht beschrieben, dagegen die Pipettmethode an sich und die älteren Apparate.

nis, deren Teilchen kleiner sind als die Teilchen, die in der Zeit bis zum Abpipettieren der Probe gerade durch die ganze Höhe der Suspension bis zur Pipettenspitze zu sedimentieren vermochten.

b) Die Schlämmanalyse kleinster Proben. Die auf dem Filter aufgefangenen Staubproben reichen meistens für eine normale Schlämmanalyse nicht aus; häufig wiegt die Staubprobe weniger als 100 mg. Es musste also eine Methode entwickelt werden, welche die Untersuchung von sehr kleinen Staubproben noch erlaubte; dabei waren folgende Überlegungen wegleitend:

Wenn nur sehr kleine Gesamtproben für die Untersuchung zur Verfügung stehen, so muss eine Methode angewandt werden, bei welcher die ganze Probe in Fraktionen getrennt wird und der gesamte Anteil der Fraktionen zur Wägung gelangt. Im weiteren musste mit relativ kleinen Flüssigkeitsmengen auszukommen sein; einfache Schlämmszylinder- oder Spülmethode kamen aus diesem Grunde nicht in Betracht.

Es wurde der in Fig. 42, 43 und 44 dargestellte Apparat entwickelt⁵⁾. Er beruht auf dem gleichen Prinzip wie die oben beschriebene Sedimentationsmethode zur Fraktionierung der Staubproben durch eine leere Luftschicht; es wird indessen mit flüssigen Dispersionsmitteln gearbeitet. Die in Wasser aufgeschlämmte Probe wird einer etwas schwereren Flüssigkeit überschichtet, durch welche die Teilchen entsprechend ihrer verschiedenen Grösse verschieden rasch nach unten sedimentieren, wo sie getrennt aufgefangen werden.

Im Prinzip geht die Methode auf ein 1899 von CLAUSEN⁶⁾ vorgeschlagenes und später von KÜHL⁷⁾ für die Kornanalyse von Zementen verwendetes Verfahren zurück. Praktische Anwendung fand das Verfahren dann in der Zentrifugiermethode nach MARSHALL⁸⁾.

Der Apparat (vgl. Fig. 42) besteht aus einem Sedimentierrohr, welches oben und unten durch einen Hahn abgeschlossen werden kann. Über dem obern Hahn befindet sich das Einfüllrohr zur Aufnahme der suspendierten Probe. Im untern Hahn sind einander gegenüber zwei napfförmige Vertiefungen eingebohrt (in der Folge als Nöpfe bezeichnet), die als Auffangkammern für die sedimentierenden Fraktionen dienen. Aus den Nöpfen führt je eine Bohrung seitlich heraus; die Bohrung ist, wenn der Napf nach oben steht, durch das Hahngehäuse abgeschlossen, während sie für den untern Napf (Stellung nach unten) mit der Zuleitung für die Spülflüssigkeit

⁵⁾ Der Apparat wird in der feinmechanischen Werkstätte MATTMÜLLER, Gockhausen-Zürich, hergestellt.

⁶⁾ CLAUSEN, *Illustr. Landw. Zeitung* vom 29. November 1899 (Berlin).

⁷⁾ H. KÜHL, *Tonindustrie-Zeitung* 50, 1358 (1927); 53, 1247 (1929); *Zement* 15, 867 (1926); vgl. auch H. GESSNER, *Die Schlämmanalyse*, S. 73 ff.

⁸⁾ C. E. MARSHALL, *Proc. Roy Soc. London*, (A) 126, 427 (1930); *J. Soc. chem. Ind.* 50, 444 und 457 (1931); vgl. auch H. GESSNER in *Kolloidchem. Taschenbuch, Dispersoidanalyse*, II. Aufl. Leipzig 1944, S. 392 ff.

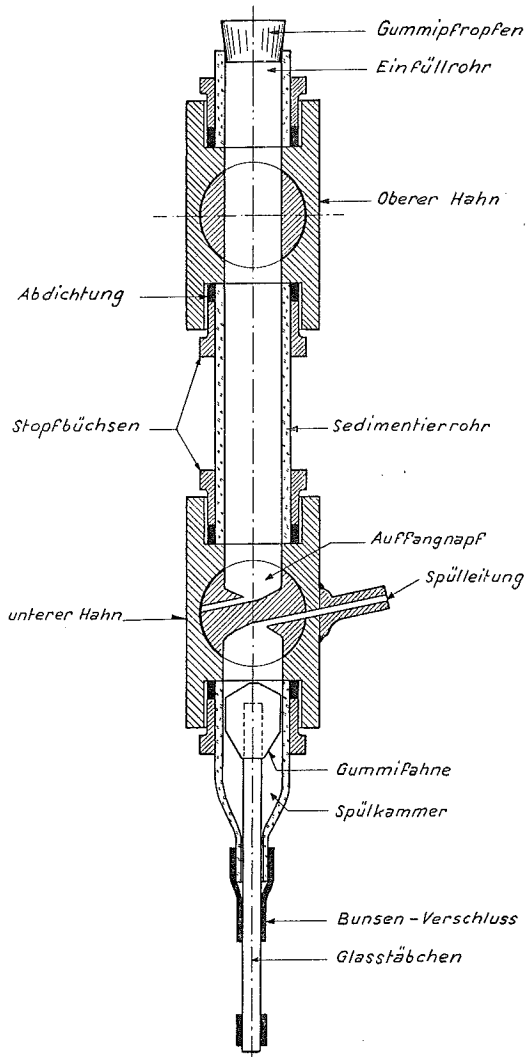


Fig. 42

Schlammapparat zur Untersuchung kleinster Proben (Längsschnitt, Maßstab 1:2).

in Verbindung steht. Durch Öffnen des Hahns in der Spülflüssigkeitsleitung und des Spülkammerablasses kann der untere Napf jeweils ausgespült werden, während die folgende Fraktion in den oberen Napf hineinsedimentiert. Es erwies sich dabei als notwendig, die an den Wänden und auf dem Boden haftenden Teilchen der feinen Fraktionen mittels einer an einem Glasstab durch die Abschlussöffnung von unten eingeführte, dreh- und verschiebbare Gummifahne auszureiben.

Der Glasstab dient gleichzeitig mit dem darüber gezogenen Schlauchstück als **Bunsenverschluss** zum Ablassen des Inhaltes aus der Spülkammer.

Der innere Durchmesser des Einfüllrohres beträgt 14,5 mm, die Bohrung des obern Hahnes, dann das Sedimentierrohr und schliesslich die Näpfe wurden jeweils um 0,5 mm weiter gewählt, um das Anhaften der sedimentierenden Teilchen an den Wänden auf ein Minimum zu beschränken.

Die Durchführung der Schlämmanalyse geht folgendermassen vor sich:

Der ganze Apparat wird vom Einfülltrichter aus vollständig mit der schweren Sedimentationsflüssigkeit gefüllt⁹⁾ und durch wiederholtes Drehen des untern Hahns dafür Sorge getragen, dass sich keine Luftblasen mehr im Apparat befinden. Nun wird die Flüssigkeit so weit abgelassen, dass das Einfüllrohr über dem obern Hahn leer ist und der obere Hahn geschlossen. Der obere Auffangnapf im untern Hahn steht in Verbindung mit dem Sedimentationsraum.

Das Einfüllen der Probe in den Apparat erfolgt am zweckmässigsten in der Weise, dass die nach den allgemeinen Regeln der Schlämmanalyse vorbereitete Probe von 25—100 mg in ∞ 5 cm³ Wasser in einer beidseitig mit einem Gummistopfen verschlossenen Einfüllpipette (vgl. Fig. 44) am besten etwas vorgewärmt, gut geschüttelt und dann in das Einfüllrohr entleert wird. Das genaue Gewicht der Einwaage kann ermittelt werden, indem die trockene Staubprobe vor deren Aufschlammung in die Einfüllpipette eingewogen wird, welche nach dem Einfüllen mit dem anhaftenden Resten der Probe getrocknet und zurückgewogen wird. Unbedingt notwendig ist die Ermittlung der Einwaage nicht, da sich dieselbe am Schluss der Analyse aus den Resultaten ergibt (vgl. unten).

Proben in Suspension (Impingerproben usw.) werden vorteilhaft vor der Schlämmanalyse nicht eingetrocknet, sondern direkt analysiert.

Unmittelbar nach dem Eingiessen der Proben in das Einfüllrohr wird dasselbe mit einem Gummistopfen verschlossen, der obere Hahn geöffnet und die Zeit abgestoppt. Nach der Zeit, in welcher die erste (gröbste) Fraktion sedimentiert ist¹⁰⁾, wird (bei geschlossenem Hahn in der Spül-

⁹⁾ Als Sedimentationsflüssigkeit dient nach dem Vorschlage von MARSHALL (l. c.) eine konzentrierte Harnstofflösung. Die spezifischen Gewichte und Viskositäten der verwendeten Lösungen sind in der folgenden Tabelle gegeben.

Harnstoffkonzentr. g im Liter	Spez. Gewicht	Viskosität	
		bei 15 °	bei 20 °
0 (Wasser)	1,000	0,0115	0,0101
225	1,056	0,0129	0,0118
450	1,112	0,0166	0,0151

¹⁰⁾ In der Regel wurden als gröbste Fraktion die Anteile $> 40 \mu$ gewählt, deren Fallzeit für die 11,0 cm zu durchfallende Höhe in einer Harnstofflösung von 45 % ca. 120 sec beträgt.

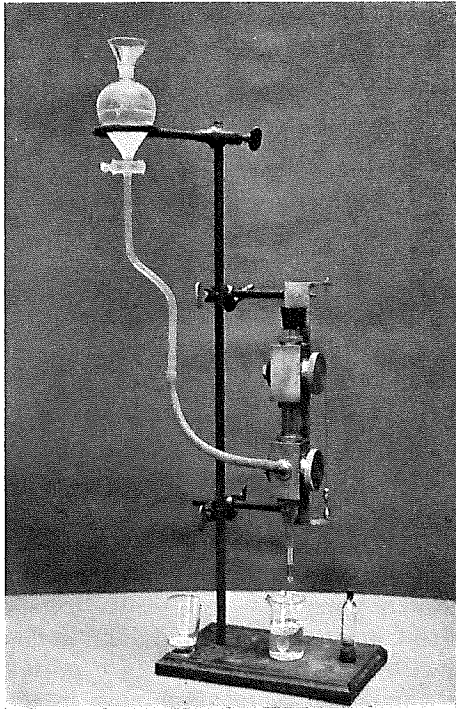


Fig. 43

Schlammapparat zur Untersuchung kleiner Proben, Gesamtansicht.

leitung!) der untere Hahn vorsichtig um 180° gedreht, so dass die zweite Fraktion in den zweiten, nun oben stehenden Napf sedimentiert. Die erste Fraktion wird aus dem untern Napf mit Harnstofflösung (gleicher Dichte wie im Sedimentierrohr) ausgespült, indem der Hahn in der Spüleleitung geöffnet und durch einen Druck auf den Bunsenverschluss der Abfluss durch den Stutzen nach unten freigegeben wird. Die abfliessende Suspension der ersten Fraktion wird in einem Becherglas aufgefangen. Für die feineren Fraktionen ist es notwendig, die Kammer und den Napf vermittle der Gummifahne auszureiben und die Spülung einige Male zu wiederholen.

Die abgeflossene Fraktion wird durch ein vorgewogenes Glasfilter abfiltriert, mit warmem Wasser ausgewaschen, getrocknet und gewogen.

Die nächsten Fraktionen werden in der gleichen Weise isoliert; als zweitletzte, praktisch noch gut zu bestimmende Fraktion kann bis zu einer Korngrösse von $0,7 \mu$ gegangen werden, deren Sedimentationszeit allerdings zirka drei Tage beträgt, während welcher Zeit keine messbaren Temperaturänderungen auftreten sollen.

Der nach dem Ablassen der zweitletzten Probe im Apparat verblei-

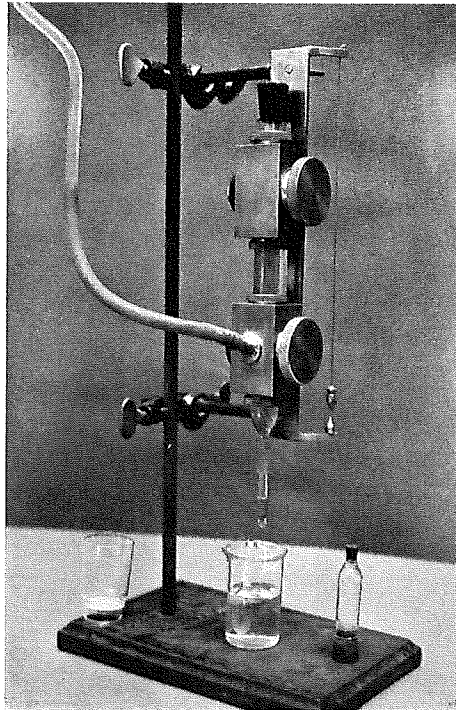
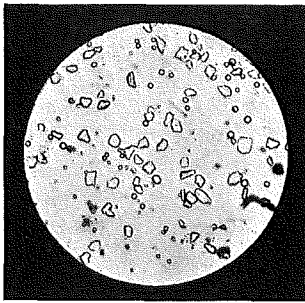


Fig. 44
Detailansicht des Schlammapparates

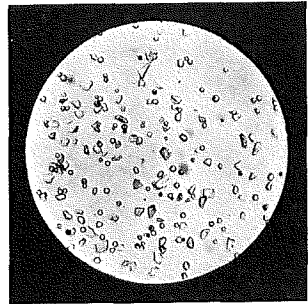
bende Rest enthält die feinsten Anteile; man lässt den gesamten Inhalt des Apparates vorsichtig auslaufen und fängt ihn in einem Becherglas auf. Häufig enthält er noch etwas gröbere Anteile, die irgendwo an den Wänden haften geblieben sind und nicht zur Fraktion gehören. Man trennt die Fraktion von den allfälligen groben Verunreinigungen, indem man die Probe während 12 bis 24 Stunden sedimentieren lässt, die überstehende Suspension (die den Hauptanteil der feinen Fraktion enthält) durch einen Glasfilter filtriert und bestimmt, während man das Sediment mit Wasser noch einmal aufschlämmt und die Operation noch ein- bis zweimal wiederholt, bis sich das Gewicht der filtrierten Fraktion asymptotisch dem nun richtigen Wert genähert hat.

Für die Berechnung der Kornzusammensetzung wird die Summe der Fraktionen gleich 100 % gesetzt; die auftretende Differenz zwischen der Einwaage (sofern diese bekannt war) und der erhaltenen Summe entspricht den eingetretenen Verlusten durch Haftenbleiben der Teilchen an den Wänden usw.

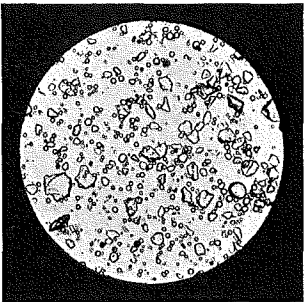
In der folgenden Tabelle sind zwei Analysenbeispiele zusammengestellt; die darin auftretenden Verluste liegen um 5 % der Einwaage.



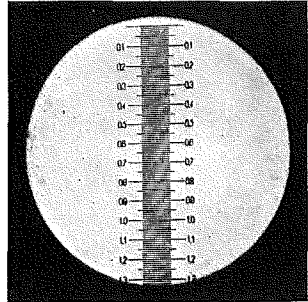
Fraktion $> 40 \mu$



20–40 μ



Ursprüngliche Probe



Maßstab

Fig. 45

Mikroaufnahmen der Fraktionen $> 40 \mu$ und 20–40 μ im Vergleich mit der ursprünglichen Probe, Vergr. 25fach.

Tabelle III

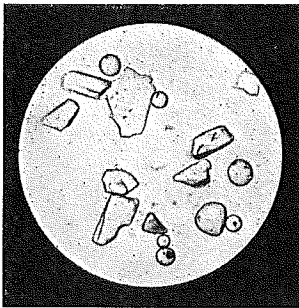
Erstes Beispiel: Schlämmanalyse eines Quarzmehls.

Fraktionen \varnothing in μ	Fallzeit	Gewicht g	Anteil in %	
			der Einwaage	der Summe der Fraktionen
> 40	2 min 03 sec	0,0084		11,7
40–20	8 min 13 sec	0,0150		21,0
20–10	32 min 52 sec	0,0183		25,6
10–3,8	3 h 15 min	0,0169		23,7
3,8–1,1	45 h 40	0,0106		14,8
$< 1,1$	—	0,0023		3,2
Total	—	0,0715	94,6	100,0
Verlust	—	0,0041	5,4	—
Einwaage	—	0,0756	100,0	—

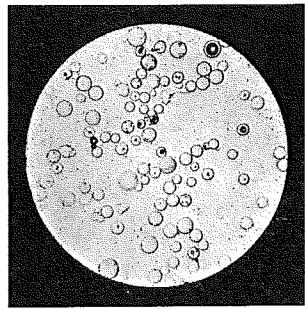
Zweites Beispiel: Schlämmanalyse einer Staubprobe aus der Lunge eines verstorbenen Silikotikers.

Fraktionen Ø in μ	Fallzeit	Gewicht g	Anteil in %	
			des Totals	der Summe der Fraktionen
> 10	33 min 04 sec	0,0005		1,9
10—5	2 h 12 min	0,0017		6,4
5—1,8	17 h 23 min	0,0060		22,6
1,8—1,1	44 h 48 min	0,0073		27,6
1,1—0,75	98 h	0,0067		25,3
< 0,75	—	0,0043		16,2
Total*)	—	0,0265	95,7	100,0
Waschware	—	0,0012	4,3	—
Gesamttotal	—	0,0277	100,0	—

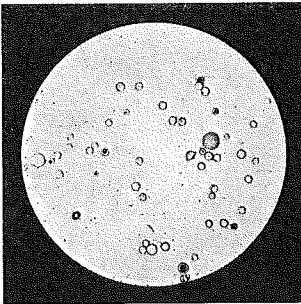
*) Die Probe gelangte nass, ohne Vortrocknung zur Analyse; die Verluste, das heisst die in den Fraktionen nicht bestimmten Anteile werden durch Ausspülen des ganzen Apparates nach der Analyse erhalten.



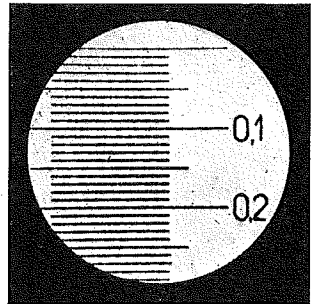
Fraktion 20—40 μ



10—20 μ



5—10 μ



Maßstab

Fig. 46

Mikroaufnahmen der Fraktionen 20—40, 10—20 und 5—10 μ in 100facher Vergrößerung

Die Reinheit der Fraktionen.

Zur kritischen Prüfung der Kornfeinheit der Fraktionen wurden kleine Glaskugeln geschlämmt. Die Glaskugeln waren in der Weise dargestellt worden, dass feines Glaspulver mit dem Luftstrom durch die Gebläseflamme gegen eine Wasseroberfläche geblasen wurde, wo die flüssigen Glastropfen in Kugelform erstarrten.

Die Fig. 45 und 46 zeigen die Glaskugelfraktionen in sehr guter Übereinstimmung mit den errechneten Werten.

Die Streuungen.

In Tabelle IV sind die Resultate von drei Parallelanalysen des gleichen Quarzmehls zusammengestellt.

Die Streuung der Einzelbestimmung beträgt darin 9,5 %, woraus sich der mittlere Fehler eines Resultates (Mittelwert) von zwei Parallelbestimmungen, wie sie in der Regel durchgeführt werden, zu $\pm 7\%$ des Mittelwertes berechnet.

Tabelle IV.

Streuungen von drei parallelen Schlämmanalysen eines Quarzmehles.

Proben Nr.	1	2	3	Mittelwert	Streuung der Einzelwerte im Mittel $\left(\sqrt{\frac{\sum d^2}{n}}\right)$
	Anteil in %				
Einwaage	96 mg	76 mg	81 mg		
Fraktion ϕ in μ					
> 40	16,3	11,7	16,3	14,8	2,1
40—20	19,1	21,0	23,5	21,2	1,8
20—10	22,3	25,6	23,0	23,6	1,4
10—4	23,3	22,7	17,7	21,2	2,6
< 4	19,0	19,0	19,5	19,2	0,3
	100,0	100,0	100,0	100,0	—

Berechnung der Streuungsverhältnisse.

Die Streuung der Einzelwerte $\left(\sqrt{\frac{\sum d^2}{n}}\right)$

in Prozenten der Mittelwerte $S = 9,5\%$.

Der mittlere Fehler des Einzelwertes

$$\left(\frac{\sum d^2}{(n-1)}\right) \quad f = \pm 9,9\%$$

Der mittlere Fehler einer Doppelbestimmung (Mittelwertes von zwei Parallelbestimmungen). $f_m = \pm 7,0\%$.

Der mittlere Fehler der Mittelwerte aus obiger Tabelle (drei Parallelbestimmungen) $= \pm 5,7\%$.