

SCHRIFTENREIHE

DES VEREINS FÜR WASSER-, BODEN- UND LUFTHYGIENE
BERLIN-DAHLEM / GEGRÜNDET IM JAHRE 1902

HERAUSGEGEBEN IM AUFTRAGE DES
VEREINS FÜR WASSER-, BODEN- UND LUFTHYGIENE
VON PROF. DR. E. TIEGS

Nr. 22

Vorträge auf der Jahrestagung des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 1964 in Köln

Von

Dr.-Ing. W. Langer, Dr. rer. nat. H. Kettner



AB 36
0011

GUSTAV FISCHER VERLAG · STUTTGART

1964

03-AB36 0077

Standort: Bibliothek 2

SCHRIFTENREIHE

DES VEREINS FÜR WASSER-, BODEN- UND LUFTHYGIENE
BERLIN-DAHLEM / GEGRÜNDET IM JAHRE 1902

HERAUSGEGEBEN IM AUFTRAGE DES
VEREINS FÜR WASSER-, BODEN- UND LUFTHYGIENE
VON PROF. DR. E. TIEGS

Nr. 22

Vorträge auf der Jahrestagung des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 1964 in Köln

Von

Dr.-Ing. W. Langer, Dr. rer. nat. H. Kettner



Umweltbundesamt

2010.03301

Fachbibliothek
Umwelt

GUSTAV FISCHER VERLAG · STUTTGART

1964

DS 2040093

Alle Rechte der Übersetzung vorbehalten.
Copyright by Verein für Wasser-, Boden- und Lufthygiene, Berlin-Dahlem
Printed in Germany

Druck: A. W. Hayn's Erben, Berlin West

Die Lagerung von Stadtmüll und Industrieabfällen und ihre Gefahren für Wasser und Luft

Von

Dr.-Ing. WILHELM LANGER

Wissenschaftlicher Oberrat

beim Bundesgesundheitsamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene

Die Gefährdung unseres Grund- und Oberflächenwassers wächst nicht nur durch die bisher unsachgemäß eingelagerten Abfallprodukte, sondern auch durch die ständig weiter ansteigenden Mengen. Ihre Unterbringung ist deshalb zu einem schwerwiegenden und immer größer werdenden Problem geworden. Infolge der Zunahme der Bevölkerung und ihrer Ballung in dichtbesiedelten Räumen fehlen meist auch geeignete Flächen zur Unterbringung des Mülls. Gleichzeitig mit dieser Entwicklung steigt aber der Bedarf an Trinkwasser zur Versorgung der Bevölkerung, wodurch die Grundwasservorkommen in immer stärkerem Maße in Anspruch genommen werden müssen.

Die Statistik des Deutschen Städtetages für das Jahr 1961 erfaßte 582 Städte und Gemeinden mit 10 000 Einwohner und darüber, die insgesamt mit 31,2 Mio Einwohnern 55% der Bevölkerung der Bundesrepublik ausmachen. Eine obligatorische Müllabfuhr besteht bei 534 Gemeinden mit 30,4 Mio Einwohnern.

Die Müllabfuhr wird wöchentlich
bei 389 Gemeinden einmal,
bei 53 Gemeinden ein- bis zweimal,
bei 134 Gemeinden zweimal

durchgeführt, wobei durchschnittlich etwa ein Müllwagen auf 10 000 Einwohner kommt.

Die rund 8 Mio t Müll der 534 Gemeinden mit obligatorischer Müllabfuhr wurden 1961 beseitigt durch:

Ablagerung 97 % = 7 755 000 t,
Verbrennung 2,3% = 176 000 t in acht Verbrennungsanlagen,
Kompostierung 0,8% = 68 000 t in sechs Kompostierungsanlagen.

Wie brennend das Problem der Abfallbeseitigung für viele Gemeinden geworden ist, zeigen die noch vorhandenen Reserven an Lagerplätzen:

Es verfügten an Lagermöglichkeiten 1961 noch
147 Gemeinden für zwei Jahre,
133 Gemeinden für zwei bis sechs Jahre,

71 Gemeinden für sechs bis zehn Jahre,
77 Gemeinden für mehr als zehn Jahre.

Der durchschnittliche Müllanfall betrug:
Gewichtsmäßig rund 250 kg/Einwohner und Jahr,
volumenmäßig etwa 750 l/Einwohner und Jahr,
bei einem Raumgewicht von 340 kg/m³.

Diese mittleren Zahlenangaben nach Volumen und Gewicht für den Hausmüll schwanken selbstverständlich nicht nur je nach dem Verdichtungsgrad und der Jahreszeit innerhalb beachtlicher Grenzen, sondern weisen auch regional hinsichtlich ihrer Zusammensetzung starke Unterschiede zwischen den verschiedenen Städten auf. Sogar innerhalb einzelner Stadtgebiete lassen sich markante Qualitätsunterschiede je nach der soziologischen Struktur und Schichtung feststellen. Ganz allgemein hat aber mit dem steigenden Wohlstand und durch die erhöhten hygienischen Ansprüche der Bevölkerung der Müll mengenmäßig und in seiner Vielgestaltigkeit stark zugenommen. Aschen und Schlacken gehen durch die Umstellung auf Heizöl und Gas zwar etwas zurück, während sperrige Güter, bedingt durch die großzügigere Aussonderung der Gebrauchsgüter, die früher meist noch einer Teilverwertung zugeführt wurden, und besonders durch Pappen, Papier, Plastikhüllen und Flaschen immer mehr ansteigen.

In gleicher Weise ist auch auf dem gewerblichen und industriellen Sektor ein Anstieg der Abfallmenge zu verzeichnen, der einerseits in den erhöhten Produktionsziffern und andererseits in den hohen Löhnen zu suchen ist, die eine Auswertung der Restprodukte bzw. der Abfallstoffe unrentabel machen. Diese Industrieabfälle, die mitunter eine sehr einseitige Zusammensetzung aufweisen, können — soweit sie nicht zu einem geringeren Prozentsatz mit der Müllabfuhr erfaßt werden — mengenmäßig nur schätzungsweise beziffert werden. Man rechnet mit etwa 20 Mio m³ Industriemüll, zu dem noch 10 Mio m³ Klärschlamm kommen, die jährlich zu beseitigen sind.

Den drei Möglichkeiten der Müllbeseitigung:

Kompostierung — Verbrennung — Lagerung

könnte folgende Reihenfolge in ihrer hygienischen Bedeutung zugewiesen werden:

Müllkompostierung sollte,
Müllverbrennung kann,
Mülllagerung muß sein.

Die praktische Realität wird auch bei Vorhandensein aller Voraussetzungen stets von der bevölkerungsmäßigen und landwirtschaftlichen Struktur des Gebietes und nicht zuletzt von dem Kapitaleinsatz bestimmt werden.

Die Forschung hatte sich bisher vorwiegend mit der Müllkompostierung beschäftigt und dabei recht beachtliche Fortschritte in der Qualitätsverbesserung des Endproduktes erzielt. Im Gegensatz dazu war bisher für die Weiterentwicklung der einfach nicht wegzudenkenden Mülllagerung wenig getan worden. Dies hing wohl wohl damit zusammen, daß an der Kompostierung und der Verbrennung Industriegruppen interessiert waren, die durch neue Entwicklungen dieser Anlagen die Dinge in Fluß hielten. Bei der Mülllagerung sind aber bei der bisherigen Einbringungsmethode keinerlei zusätzliche Geräte erforderlich gewesen.

Die Kompostierung des Hausmülls ist zweifellos das natürlichste Verfahren zur Hygienisierung der organischen Bestandteile und ihrer Umwandlung in ein für die Landwirtschaft nützliches Bodenverbesserungsmittel. Dieser Müllkompost findet hauptsächlich Verwendung bei landwirtschaftlichen Betrieben, wie z. B. in Gärtnereien, Gemüse-, Wein- und Qualitätsobstbau, aber auch im allgemeinen Ackerbau und in der Forstwirtschaft sowie bei der Kultivierung von Bodenflächen findet er in steigendem Maße Anwendung.

Aus diesem Grunde ist die Absatzfrage eine der wesentlichsten Voraussetzungen für die Errichtung einer Kompostierungsanlage. Sie bedarf also eines landwirtschaftlich intensiv bewirtschafteten Hinterlandes, weil die Transportkosten bei den in Betracht kommenden Mengen einen bedeutsamen Faktor darstellen.

Die Verbrennung des Mülls ist zwar die hygienisch radikalste und vollkommenste Form der Müllbeseitigung, aber auch die kapitalintensivste für die Errichtung der Anlage. Da der Heizwert der festen Abfallstoffe in beachtlichen Grenzen nicht nur innerhalb der Jahreszeiten, sondern auch innerhalb der einzelnen Wagenladungen schwankt, ist eine wärmetechnische Ausnutzung für Heizzwecke oder Energiegewinnung immer ein Problem, wenn keine Zusatzfeuerung vorgesehen ist. Wichtig ist bei der Müllverbrennungsanlage, daß ein großer Müllanfall in engbegrenztem Raum ohne allzu große Transportentfernungen vorliegt. Bestehende Verbrennungsanlagen wurden in Städten mit 200 000 Einwohner und darüber errichtet, da ein gleichmäßiger Betrieb etwa diese Mengen erfordert. Neben der Wärmeerzeugung ist ihre Nutzung von ebenso großer Bedeutung, da auch im Sommer dafür Abnehmer vorhanden sein müssen, um die Betriebskosten auch in dieser Zeit decken zu können.

Im Gegensatz dazu ist eine Kompostierungsanlage weniger empfindlich gegen einen diskontinuierlichen Betrieb, doch sollen je nach Aggregat der Aufbereitung zwischen 35 000 und 100 000 Einwohner den Grundstoff liefern.

Wenn also in absehbarer Zeit diese beiden Müllbeseitigungsmethoden mehr und mehr zu einem angestrebten günstigeren Einsatzverhältnis kommen sollen, so kann dies im wesentlichen nur durch einen geeigneten Zusammenschluß von Gemeinden zu Zweckverbänden für eine gemeinsame Müllbeseitigung geschehen.

Man muß sich dabei aber immer vergegenwärtigen, daß damit das Problem der Abfallstofflagerung noch keineswegs gelöst ist, denn sowohl bei der Verbrennung als auch bei der Kompostierung verbleiben Schlacken (etwa 10%) bzw. nicht kompostierfähiges Material (etwa 20 bis 30%), wozu bei letzterem noch die Sperr- bzw. Gebrauchsgüter kommen, die gelagert werden müssen. Sie besitzen aber durch ihre einseitige Struktur gegenüber dem Rohmüll dann einerseits kaum noch eine Adsorptionsfähigkeit für die Niederschläge, und zum anderen sind die auslaugbaren Salze in ihnen konzentriert.

Die Lagerung des Mülls oder der Reststoffe wird also immer eine Tatsache bleiben, mit der wir zurecht kommen müssen, denn es wäre unrealistisch zu glauben, daß es nur eine Frage der Zeit sein wird, bis alles entweder verbrannt oder kompostiert werden wird.

Der Hausmüll, die Reststoffe sowie die Industrieabfälle werden vorwiegend zur Einebnung von natürlichen Mulden oder künstlichen Geländeeinschnitten (Kiesgruben, Steinbrüchen usw.) verwendet, um diese verunstalteten Geländeabschnitte wieder in das Landschaftsbild einzugliedern, damit sie nach einigen Jahren wieder als Grünland oder zu Bauzwecken genutzt werden können. Dies bedingt aber, daß die Grundwasserverhältnisse in diesem Gebiet nicht beeinträchtigt werden. Für jede Lagerung von Stoffen hat deshalb der

Gesetzgeber zum Schutze der Grundwasserschätze als Allgemeingut für die Bevölkerung im § 34 des am 1. März 1960 in Kraft getretenen Wasserhaushaltsgesetzes eindeutig klargestellt, daß Stoffe nur so gelagert werden dürfen, daß eine schädliche Verunreinigung oder Veränderung des Grundwassers nicht zu besorgen ist.

Es ist mit Aufgabe der Gesundheitsämter und der Wasserwerke, in dieser Hinsicht wachsam zu sein und, soweit notwendig, auch außerhalb ihres Zuständigkeitsbereiches auf Ablagerungen zu achten, die im Grundwasserzustrom der von ihnen kontrollierten Wasserwerke und Einzelbrunnen liegen.

Insbesondere bei den kleineren Wasserwerken der Gemeinden fehlt meist die Kenntnis über die Herkunft des Wassers bzw. über den Einzugsbereich. Aber es sind nicht nur die Grundwasserströme in den Kiesböden, die eine erhöhte Aufmerksamkeit in ihrem Einzugsbereich erfordern, sondern auch die genutzten Quellen können aus einem nicht mit den topographischen Einzugsgebietsgrenzen übereinstimmenden Niederschlags- bzw. Versickerungsgebiet stammen, so daß aus einem topographisch scheinbar benachbarten Einzugsgebiet verunreinigte Wässer oder Auslaugungen aus Müllkippen versickern und über eine klüftige Gesteinsader in einem anderen Einzugsgebiet austreten, dessen darüber liegender Hang bei oberflächlicher Beurteilung ein einwandfreies Wasser vermuten läßt.

Beeinträchtigung aus solchen Müllablagerungen ergeben sich

- a) bakteriologisch, wobei die Abbaufähigkeit des Untergrundes auf der Fließstrecke bzw. die Verweilzeit im Boden bis zur Wiederverwendung eine ausschlaggebende Rolle spielt. In gut filtrierenden kiesig-sandigen Böden können die von Mülldeponien stammenden mikrobiellen und bakteriellen Verunreinigungen durch die Lebensgemeinschaften im Untergrund bei einer Fließzeit im Grundwasserleiter von etwa 100 Tagen ausreichend zurückgehalten bzw. abgebaut werden.

Die Fließgeschwindigkeit beträgt im allgemeinen bei

überwiegend sandigen Böden bis zu 1 m/Tag,
in kiesigen Böden 4 bis 20 m/Tag,
in Schotterböden bis zu 100 m/Tag.

Im allgemeinen ist deshalb bei sandig-kiesigen Böden eine seuchenhygienische Gefährdung nicht zu befürchten. Bei der meist punktförmigen Infiltration aus solchen Müllagerungen ist jedoch zu berücksichtigen, daß der betroffene Grundwasserstreifen meist sehr massiv und hoch belastet wird. Deshalb kann es mit der Zeit zu einer Erschöpfung der Abbaufähigkeit des Untergrundes kommen, zumal wenn toxisch wirkende Stoffe aus Industrie oder Gewerbe dem Müll beigemischt sind. Karstiger Fels bei Steinbrüchen oder schottriger Untergrund besitzen fast keine Reinigungswirkung, so daß die bakteriellen Verunreinigungen oft viele Kilometer ohne nennenswerte Minderung durchwandern.

- b) allgemeinhygienisch, wobei es sich vorwiegend um die in Lösung gegangenen chemischen Stoffe, insbesondere um die Anreicherung der Mineralsalze, handelt. Die versickernden Salzkonzentrationen werden im Grundwasserleiter weder zurückgehalten noch abgebaut, so daß solche Salzkonzentrationsfahnen oft kilometerweit verfolgt werden können und sich nur allmählich durch den Zustrom nicht verunreinigten Grundwassers verdünnen. Das gleiche gilt auch für die Geruchs- und Geschmacksbildner, vor allem aus Lösungsmitteln und Ölen, Teerrückständen, phenolhaltigen Abfällen usw.

Die Auswirkungen von Müllkippen, die unkontrolliert und nicht sachgemäß angelegt sowie nicht verdichtet wurden, sollen an Hand einiger untersuchter Beispiele dargestellt werden. Bei all diesen Kippen wurden die Materialien aus großen Höhen in die Tiefe verfüllt, zum Teil sogar in das angeschnittene Grundwasser. Hierdurch entstehen sehr lockere Schüttungen mit großen Hohlräumen und ausgedehnten offenen Schrägflächen, die besonders gut durch die Niederschläge bzw. durch das Grundwasser ausgelaugt werden.

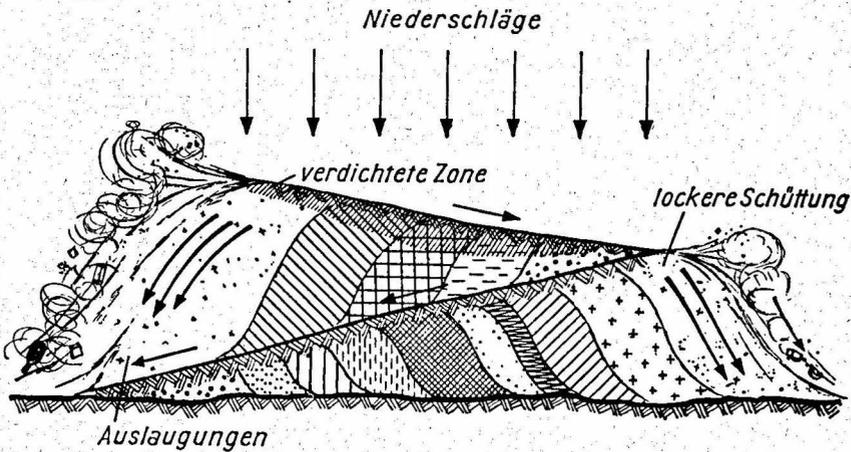


Abb. 1. Schemaskizze einer unsachgemäßen Müllagerung in Haldenform.

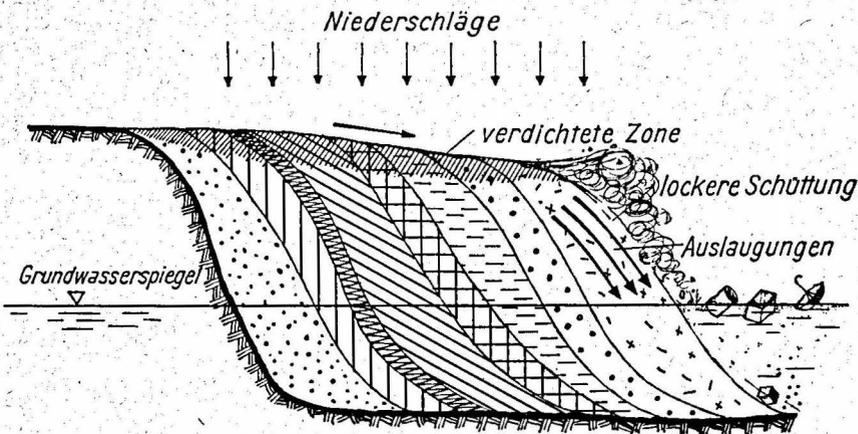
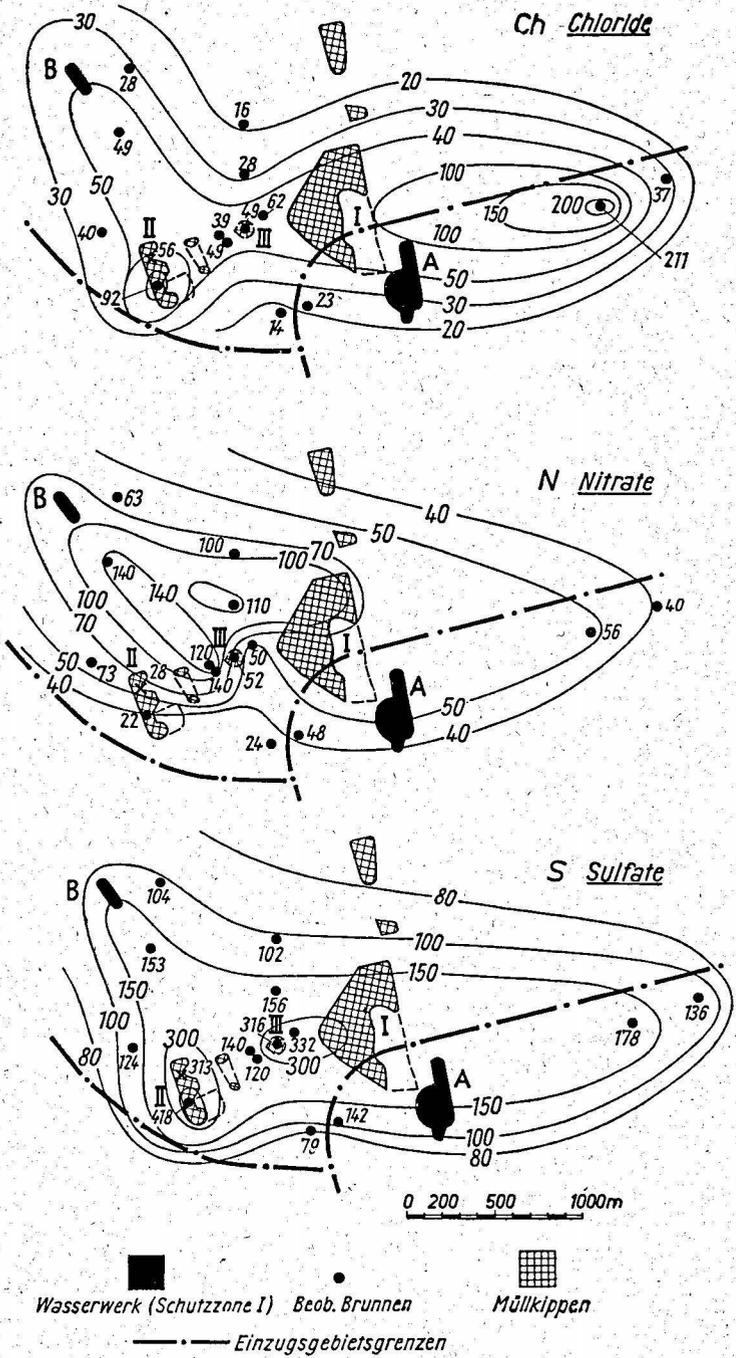


Abb. 2. Schemaskizze einer grundwasserbeeinträchtigenden Verfüllung einer Kiesgrube.

Diese lockere Lagerung begünstigt ferner die großen Müllbrände und erschwert deren Bekämpfung, da sie sich durch die Hohlräume in die Tiefe fressen und dort jahrelang in der Masse schwelen können. Selbst wenn sie ohne Rauchentwicklung nicht direkt in Erscheinung treten, weil die Gase durch die darüber liegenden Schichten gefiltert werden, sind die Geruchsbelästigungen stets sehr stark und über größere Strecken noch deutlich wahrnehmbar.



Beispiele

1. Eine ehemalige Kiesgrube, auf der unterirdischen Wasserscheide der Zuflußbereiche zweier Wasserwerke gelegen, wurde mit Industrierückständen verfüllt. Die ursprüngliche Fläche der Kiesgrube betrug etwa 24 ha und war bis zu 12 m bis knapp über den Grundwasserspiegel in das Gelände eingeschnitten. Innerhalb von 30 Jahren wurden dort etwa 1,2 Mio m³ Abfälle gelagert, so daß jetzt rund die Hälfte verfüllt ist. Zu Beginn der Verfüllung sollen größere Mengen an teerigen Rückständen und Generatorabfällen eingebracht worden sein, die sich entzündeten und jahrelang unter Erzeugung einer solchen Hitze schmolzen, daß Wasserproben aus Beobachtungsrohren nahezu kochend entnommen worden sein sollen.

Der größte Teil der Kippe liegt im Bereiche des einen Wasserwerks, in dem sich noch weitere fünf Mülldeponien befinden. Zwei davon sind besonders schwerwiegend, da die Abfälle in den tief angeschnittenen Grundwasserspiegel verkippt wurden. Da unter anderem Ölschlämme und Generatorabgänge eingebracht worden waren, mußte zur Sicherung des Grundwasservorkommens innerhalb des einen Sees ein Entlastungsbrunnen niedergebracht werden, aus dem laufend 35 m³/h abgepumpt werden, um einen Absenkungstrichter zu schaffen, der die Verunreinigungen abfängt, ehe sie mit dem Grundwasserstrom auf die Brunnenreihe weiterwandern.

Aus Analysen zahlreicher Beobachtungsbrunnen konnten Linien gleicher Konzentration für Chloride, Nitrate und Sulfate ermittelt werden, die die Hauptverunreinigungsquellen ersehen ließen. Bei solchen Untersuchungen werden oft noch andere Sachverhalte festgestellt, wie z. B. Versickerungen chloridhaltiger Industrieabwässer auf einem Betriebsgelände, die Chloridwerte von 200 mg/l im Grundwasser ergaben (Abb. 3).

Nur aus der Tatsache, daß über zwei Drittel des Zustromes aus nicht verunreinigtem Grundwasser bestehen, und den getroffenen Maßnahmen ist es zuzuschreiben, daß schwerwiegende Beeinträchtigungen bisher nicht aufgetreten sind.

2. Im Einzugsgebiet eines Wasserwerkes liegen mehrere Kiesbaggerseen, die bis zu 7 m ins Grundwasser reichen. Von diesen wurden drei als Abfallstoffdeponien genutzt. Insgesamt wurden etwa 100 000 m³ Materialien verfüllt, wovon 80% in die beiden nächstgelegenen Deponien eingebracht worden waren (Abb. 4 und 5).

Das Wasserwerk besitzt fünf Brunnen vier verschiedener Brunnentypen, die durchschnittlich bis 11 m unter Gelände reichen. Aus der unterschiedlichen Form und Gestaltung der Fassungsanlagen ergeben sich höhenmäßig verschiedenartige Zuströmungsbedingungen zu den Brunnen, so daß zwei ausschließlich Grundwasser der unteren Entnahmezone und zwei weitere vorwiegend oberflächennahes Grundwasser fördern. Hierdurch konnte das Grundwasservorkommen nach der Tiefe zu auf die Konzentrationsänderungen seiner Inhaltsstoffe untersucht werden, die sich in einem Grundwasserstreifen von nur 6 bis 7 m Stärke abspielen (Abb. 6).

Entsprechend den Wirkungslinien des jeweiligen Zuflusses und der zugehörigen Streubereiche nehmen hierbei nach der Tiefe zu

die Nitrate um das Sieben- bis Dreizehnfache zu,
die Sulfate um über die Hälfte ab, und
Eisen und Mangan gehen fast auf Null zurück.

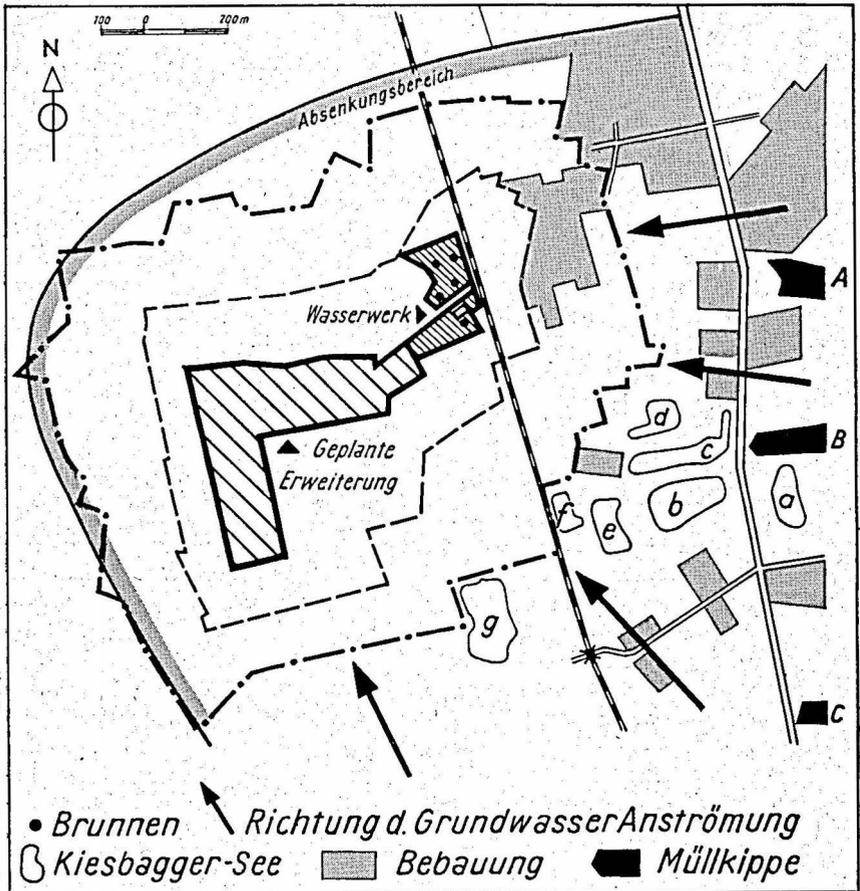


Abb. 4. Lageplan.

Die vorliegenden langjährigen Untersuchungsergebnisse zeigen im zeitlichen Verlauf durch plötzlichen Anstieg der Konzentrationen den jeweiligen Verfüllungsbeginn an und erhöhen sich dann stetig. Wenn die Tendenz weiter anhält und weitere Müllagerungen stattfinden, können die gesundheitsschädigenden Grenzwerte erreicht werden, weil keine ausreichende Verdünnung mehr vorhanden ist. Damit wird nicht nur der Betrieb, sondern auch die notwendige Erweiterung des Wasserwerks in Frage gestellt.

3. Ein ehemaliger Steinbruch war über 20 m tief kraterförmig aus einer Bergkuppe ausgebrochen worden. Vom Kraterande her wurde er verfüllt. Der augenscheinlich gesunde Fels zeigte jedoch keine angestauten Wässer, was schon zur Vorsicht hätte mahnen müssen. In der Steinbruchsohle befand sich nämlich ein kleiner Entwässerungsstollen durch die Felswand zum Nachbartal. So reicherten sich die Niederschlagswassermengen auf der Kippfläche und dem lose geschütteten Müllkegel auf einem etwa 50 m langen Versickerungsweg sehr stark mit Auslaugungsstoffen an, ehe sie über die noch unverfüllte Sohle ins Nachbartal gelangten. Im dortigen Bache verursachten

für die Ersatzwasserbeschaffung für die betroffenen Betriebe ging in die Hunderttausende.

Unterhalb von Rückstandshalden von Chemiewerken wurden sogar Konzentrationen von 1000 mg/l an Sulfaten oder Chloriden gemessen.

Aber es sind nicht nur die Abfallstofflagerungen, die solche Salzkonzentrationen hervorrufen können. Auch scheinbar harmloses Gestein, wie z. B. Bergausbruch von Bergwerken, kann — ins Grundwasser verkippt — die Sulfatgehalte auf 400 mg/l ansteigen lassen.

Diese Beispiele sollten zeigen, wie notwendig es ist, sich rechtzeitig Gedanken über die möglichen Beeinträchtigungen zu machen, die Örtlichkeit vorher zu erkunden und eine sachgemäße und kontrollierte Abfallstofflagerung durchzuführen. Es ist ein bedauerliches Zeichen, wenn z. B. für den Schutz eines geplanten Wasserwerkes in einem Gebiet von 30 km² sechzehn unsachgemäße größere Mülldeponien saniert werden müssen.

Bei der Ablagerung von Abfällen und Rückständen kommt es im wesentlichen darauf an, zu verhindern, daß Versickerungen von Auslaugungen durch die Niederschläge in das Grundwasser eindringen können. Hierdurch können sich die Eigenschaften und die Qualität des Grund- und Oberflächenwassers entscheidend verändern, was nach dem Wasserhaushaltsgesetz unzulässig ist.

Die sachgerechte Einbringung und Verfüllung des Mülls

Trotz der Intensivierung der Müllkompostierung und Müllverbrennung werden also noch große Mengen weiterhin im Gelände abgelagert werden müssen. Aber auch aus den beiden anderen Beseitigungssystemen verbleiben noch beachtliche Mengen sowohl an nicht kompostierfähigen Stoffen als auch an Schlacken, die irgendwie untergebracht werden müssen. Für alle diese Mülldeponien sind deshalb bestimmte Voraussetzungen zum Schutze des Grundwassers und der Umwelt unerlässlich.

Für den Schutz des Grund- und Oberflächenwassers kommt es im wesentlichen darauf an, die lockeren Schüttungen der Abfallprodukte aus großen Höhen zu unterbinden. Diese Lagerungsform bedingt Umsetzungsprozesse durch den ständigen Zutritt von Regen, Luftfeuchtigkeit, Kohlensäure, Sauerstoff usw., die lösliche Bestandteile mit den Niederschlägen dem Grundwasser zuführen. Das Wasser ist dabei als Steuerungsorgan der chemischen und biologischen Umsetzungen sowie als Lösungs- und Transportmittel der wesentlichste Faktor. Deshalb müssen die Niederschläge durch die Art der Müllagerung so verteilt werden, daß sie durch biologische und chemische Prozesse gebunden und verarbeitet sowie durch bodenphysikalische Eigenschaften festgehalten werden, ferner durch die Wärmeentwicklung im Müllkörper zum Großteil in Dampfform ihn wieder verlassen.

Die relativ trocken anfallenden häuslichen Abfälle und auch ein Teil der industriellen Rückstände sind im allgemeinen in der Lage, die auf sie fallenden Niederschläge zu adsorbieren, wenn die bodenphysikalischen Eigenschaften ausgenutzt werden, so daß allein schon durch die hygroskopischen und kapillaren Kräfte der überwiegende Teil des Wassers festgehalten wird. Dies erfordert eine möglichst dichte Lagerung des Mülls durch Einwalzen, wobei das unterschiedliche Adsorptionsvermögen der verschiedenen Rückstandarten (Erdaushub, Bauschutt, Aschen, Formsande, Sägespäne, Kartonagen usw.) so ausgenutzt werden müssen, daß versickernde Niederschläge gezwungen sind, die einzelnen dicht gelagerten Schichten nacheinander zu durchwandern, so daß von jeder Schicht die von ihr

optimal benötigte Wassermenge zurückgehalten wird und die Versickerung nach einer gewissen Strecke zum Stillstand kommt. Auf dieser Voraussetzung bauen sich die nachfolgenden Maßnahmen auf:

Bei der Lagerung der festen Abfallstoffe muß es deshalb Grundprinzip sein, die Rückstände von der Sohle her in dünnen horizontalen Schichten aufzubauen. Damit werden die einzelnen Müllarten weitgehend als durchgehend ausgebreitete Bänder laufend wechseln und so einen in seiner Adsorptionsfähigkeit abgestuften Müllkörper bilden. Um die Niederschläge zweckdienlich zu bewirtschaften, müssen die Müllagen schnell wechseln und rasch in die Höhe wachsen, damit der Frischmüll zeitlich den Niederschlägen nur kurzfristig ausgesetzt ist und diese besser aufnehmen kann.

Dies bedingt, das angestrebt werden muß, Müllkippen nicht an verschiedenen Stellen zu verteilen, sondern die in einem Gebiet anfallenden Mengen regional durch Zusammenfassung mehrerer Gemeinden an einer Stelle zu konzentrieren und nacheinander die verschiedenen Gruben zu verfüllen. Aus diesem Grunde müssen auch großflächige Kippen in einzelne Abschnitte durch Trenndämme aus möglichst inertem Material (Bauschutt, Erdaushub) unterteilt werden. Diese Flächen sollten auch bei großem Anfall unter einem Hektar bleiben und nur so groß angelegt werden, daß Zu- und Abfahrt, Entladung und Verteilung durch die Planierraupe gerade noch gewährleistet ist. Mit dieser Maßnahme soll erreicht werden, daß ein kleiner Raum sehr schnell bis zu seiner endgültigen Höhe verfüllt wird, die unterschiedlichen Materialien rasch abwechseln und gut verdichtet werden können.

Die Sohle der Kippstelle wird in den allermeisten Fällen eine geschlossene und festgewalzte Dichtungshaut aus bindigem Boden (Lehm, Ton) benötigen, die in der Stärke von ihrer Zusammensetzung und von der Struktur des tragenden Untergrundes abhängig ist. Meist wird man mit einer Schicht von etwa 50 cm Stärke auskommen. Bei Grobkiesen und Schotterböden ist die Lehmlage stärker auszubilden. An Stelle von Lehm können auch Kunststoffolien verwendet werden, die an ihren Nähten bzw. Stoßstellen miteinander verschweißt sein müssen. Zum Schutze gegen Verletzung durch die Stapelgüter sind diese Folien zweckmäßigerweise in Feinsandschichten einzubetten, d.h. sie müssen auf einer solchen Sandschutzschicht von 10 bis 20 cm Stärke liegen und mit ihr abgedeckt werden. Wenn auch im allgemeinen eine Müllstapelung bei einwandfreier Einbringungs- und Betriebsweise die Niederschläge in sich aufzunehmen vermag, so ist gerade bei Beginn der Verfüllung, wenn zwischen den Regenmengen und der Verdunstung, Adsorption und den Umsetzprozessen noch nicht der Ausgleich in vollem Umfange eingesetzt hat, diese Sicherungsmaßnahme notwendig.

Nur in Ausnahmefällen, wenn wirklich kein bindiger Boden für eine Dichtungshaut zur Verfügung steht, kann man sich zu Beginn mit sehr dünnen und besonders sorgfältig eingewalzten Schichten (unter 1 m Stärke) behelfen, die jedoch frei von sperrigen Gütern sein müssen und einen möglichst großen Anteil an adsorptivem Material aufweisen sollen.

Bei angeschnittenem Grundwasserspiegel ist eine Verfüllung mit Erdaushub oder Bauschutt bis mindestens 1 m über den maximalen Grundwasserspiegel und eine Abdeckung dieser Auffüllung mit einer Dichtungsschicht bzw. -haut am zweckmäßigsten zum Schutze des Grundwassers (Abb. 7). Die Auskleidung der vom Grundwasser benetzten Flächen mit einer verstärkten geschlossenen Lehmschicht als Dichtungswanne scheidet an den Einbringungsschwierigkeiten und der Kontrolle der Durchführung.

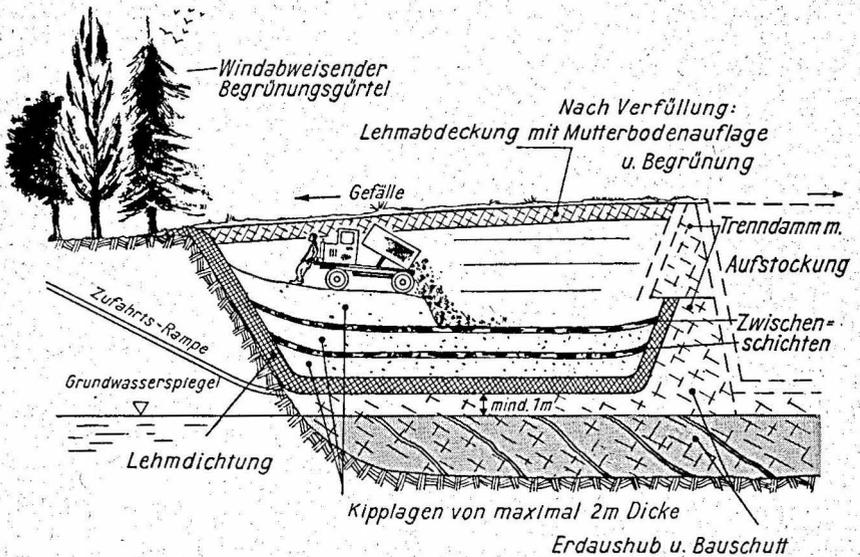


Abb.7. Verfüllung eines angeschnittenen Grundwasserspiegels.

Die aufgehenden horizontalen Müllagen sollen im lockeren Kippzustand nur eine Stärke bis maximal 2 m erreichen und einzeln eingewalzt werden, um eine sorgfältige und ausreichende Verdichtung zu ermöglichen. Sperrige Güter müssen in noch dünneren Lagen ausgebreitet werden, damit sie gut in die übrige Müllmasse eingedrückt werden können und keine Hohlräume hinterlassen. Neben der abwechselnden Schichtung der verschiedenen Müllarten sind Zwischenschichten aus inertem Material, wie Flugasche, Formsande, Bauschutt und Erdaushub, zur Steuerung der Versickerungsvorgänge sehr angebracht und dienen gleichzeitig als Brandsperre. Aus diesem Grunde sollten solche Materialien bei geringerem oder diskontinuierlichem Anfall für die Verwendung als Zwischenschichten zunächst seitlich gelagert werden, um sie zu gegebener Zeit als durchgehende Bänder einbringen zu können.

Die Ränder einer Kippgrube sollten mit der Verfüllung fortschreitend ebenfalls mit einer Schicht bindigen Bodens versehen werden, um ein seitliches Aussickern aus dem Müllkörper in den gewachsenen Boden zu verhindern; dies gilt auch für die zu verfüllende Seite eines Trenndammes. Denselben Zwecke soll auch folgende Maßnahme dienen, nämlich die Müllschichten an den Rändern etwas höher zu ziehen, damit die Niederschläge auf der Müllfläche verbleiben und nicht mit gelösten Stoffen angereichert seitlich versickern.

Nach Abschluß der Verfüllung und Erreichung des endgültigen Niveaus eines solchen kleingehaltenen Abschnitts ist die Oberfläche möglichst schnell mit einer Schicht bindigen Bodens und Mutterbodenauflage zu versehen und zu begrünen. Bei der Schlußplanierung ist zu beachten, daß das Gelände mit einem Gefälle nach den Rändern zu ausgestattet wird. (Bei Teilabschnitten ist diese Geländeüberhöhung so einzuplanen, daß die gesamte Kippgrube in ihrem Endzustand eine leicht überhöhte Geländewelle bildet, die nach allen Seiten abfällt.) Zur sicheren Ableitung von starken Niederschlägen, die von der Mutterbodendecke und der Vegetation nicht aufgenommen werden können, ist eine Überlappung der dichtenden Schicht über dem gewachsenen Boden vorzu-

sehen, um diese Regenmengen von der Kippenoberfläche weiter entfernt vom Müllkörper zur Versickerung zu bringen. Durch diese Einbringungsmethode soll ein solcher Müllkörper völlig isoliert durch eine Dichtungshaut als in sich geschlossener und abgeschirmter Fremdkörper im Untergrund ruhen, in den keine nennenswerten Feuchtigkeitsmengen mehr eindringen und mit Auslaugungsstoffen angereichert verlassen können. Die den bodenphysikalischen Eigenschaften des Mülls angepaßte Betriebsweise einer Deponie setzt jedoch den Einsatz einer Planierraupe und eine eingehende Betriebsanweisung voraus.

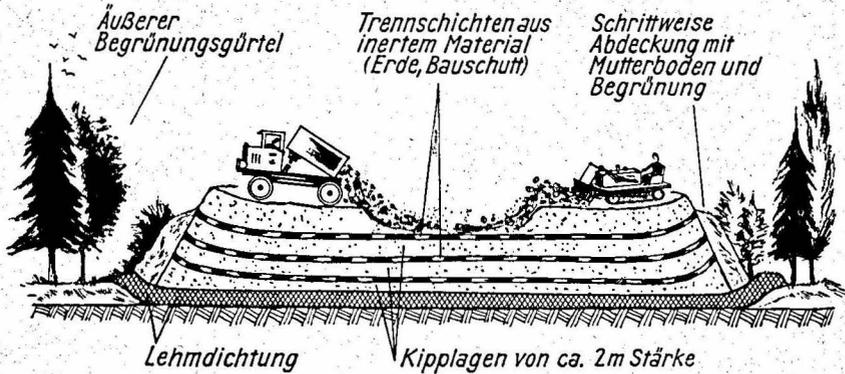


Abb. 8. Aufbau einer Müllhalde.

Müllberge (Aufschüttung in Haldenform auf ebenem Gelände) sind unter den gleichen Gesichtspunkten und Sicherungsmaßnahmen zu behandeln. Zu beachten ist jedoch, daß die Sohldichtungslage allseitig einige Meter über den Böschungsfuß der Müllhalde hinausragt. Außerdem ist die Planierung und Lehmabdeckung des endgültigen, ebenfalls gewölbten Haldenplateaus so auszuführen, daß die abfließenden Niederschläge, an einer oder mehreren Stellen zusammengefaßt, in plattenausgelegten dichten Rinnen die Böschung hinuntergeführt und weit genug vom Haldenfuß erst zur Versickerung freigegeben werden. Dies bedingt, daß allseitig ein Schutzwall aus Lehm an den Böschungskanten des Plateaus entlanggeführt wird, damit keine wild abfließenden Niederschläge die Mutterbodenauflage zerstören und in den Müllkörper eindringen können (Abb. 8).

Bei Steinbrüchen ist grundsätzlich festzustellen, ob sie dicht sind oder die Niederschläge auf Klüften und Spalten versickern. Eine wesentlich höhere Wasserspiegellage im Steinbruch über dem allgemeinen Grundwasserspiegel läßt im allgemeinen auf Dichtheit schließen, doch dürfen sich diese Erhebungen nicht auf eine einmalige Aufmessung stützen, sondern müssen über einen längeren Zeitraum laufend durchgeführt werden. Außerdem müssen die Niederschlagswässer aus angrenzenden Gebieten von der Müllstapelung ferngehalten und durch Gräben abgeleitet werden.

Bei Taleinschnitten, die mit Rückständen verfüllt werden sollen, müssen die Rinnsale verrohrt, und die Rohrweite muß wesentlich größer dimensioniert werden, als die maximale Niederschlagsmenge des Einzugsgebietes ergibt. Zu beachten ist ferner, daß die fugendichte Rohrleitung durch eine zusätzliche Schutzdecke aus Lehm gegen Beschädigung beim Einbringen geschützt ist (Abb. 9).

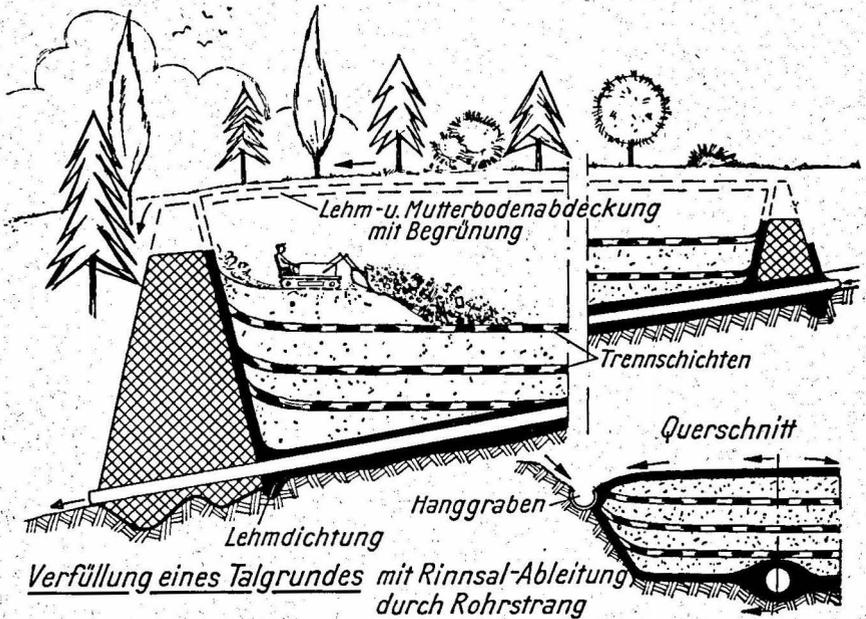


Abb. 9. Verfüllung eines Taleinschnittes.

Eine ordnungsgemäße Neuanlage einer Deponie bedarf einer rechtzeitigen Planung von mehreren Jahren vor Beschickungsbeginn nicht nur hinsichtlich ihrer Lage und der Ermittlung der geologischen und hydrogeologischen Verhältnisse, sondern auch in bezug auf den Landschafts- und Nachbarschaftsschutz. Bei der Auswahl der Örtlichkeit sind etwa in Grundwasserstromrichtung unterhalb gelegene Wasserversorgungsanlagen zu berücksichtigen. Ferner ist festzustellen, ob Räume für diese Zwecke in der langfristigen Raumplanung vorgesehen sind. Auf solche Räume sollte man nach Möglichkeit verzichten. Neben den geologischen Untersuchungen sind hydrogeologische Erhebungen (Grundwasserstandhöhen gleichen, Grundwasserströmungsrichtung) mit Hilfe von Brunnen in der näheren und weiteren Umgebung der zukünftigen Deponie zu empfehlen. Ferner kann auch eine chemische und bakteriologische Bestandsaufnahme des Grundwasserfeldes für spätere Zeiten zur Beweisführung von unschätzbarem Wert sein.

Der Nachbarschafts- und Landschaftsschutz

Bei der Festlegung der Ortslage einer Mülldeponie ist möglichst frühzeitig vor Beginn der Bekippung für einen ausreichenden Nachbarschafts- und Landschaftsschutz zu sorgen, vor allem, wenn sie sich in der Nähe von Siedlungen befinden.

Die Maßnahmen sollen hauptsächlich der Vermeidung von Staub- und Geruchsbelästigung, der Staubaufwirbelung, seines Weitertransportes sowie der Geruchsstoffverwehung durch direkten Windeinfall oder entstehende Wirbel dienen. Durch die beschriebene Einbringungsmethode werden zwar die Ursachen der Beeinträchtigung durch Staub und Geruch stark gemindert, da nur kleine offene und unverfestigte Flächen anstehen, doch sollte allein schon aus ästhetischen Gründen auf einen Anwohnerschutz nicht verzichtet werden.

Als geeignetes Mittel zur Bekämpfung dieser Beeinträchtigungsmöglichkeit hat sich immer noch ein Begrünungsgürtel erwiesen. Er kann nach Windstärke, -häufigkeit und -richtung sowie nach der Lage der Besiedlung unterschiedlich sein, soll aber die ganze Kippstelle umschließen. Da die rechtzeitige Wirksamkeit eine ziemlich geschlossene Umfriedung mit genügender Höhe und Dichte erfordert, muß möglichst frühzeitig vor der Inanspruchnahme mit der Begrünung begonnen werden. Zweckmäßig ist eine mehrreihige Bepflanzung in zueinander versetzter Anordnung mit schnellwüchsigen Bäumen, wie z. B. Pappeln, und Dichten mit buschigem Unterholz aus Strauchwerk. Durch geeignete Mischung von Laub- und Nadelbäumen kann auch den laubfreien Zeiten im Winter Rechnung getragen werden. Es empfiehlt sich, die Baumreihen so anzuordnen, daß sie nach der Kippe zu in ihrer Größe abnehmen und zusammen mit dem Unterholz dem Windangriff einen elastischen Fächer bieten, der die Winde geschmeidig nach oben lenkt und die Winkelbildung wirksamer herabsetzt als eine starre Baumkulisse oder ein Bretterzaun. Die Aufwendungen für einen solchen Begrünungsgürtel können durch den Holztertrag wieder zum Teil ausgeglichen werden.

Neben anderen betrieblichen Vorteilen wird mit der vorgenannten Einbringungsmethode die Ratten- und Ungeziefervermehrung durch die Unterbindung der Nist- und Brutmöglichkeiten infolge der starken Verdichtung (Feuchtigkeit und Luftmangel) sowie durch den ständigen Betrieb auf kleinem Raum von vornherein unterdrückt. Auch die Brandgefahr wird — mit Ausnahme an den kleinen Stirnflächen, wo sie zuweilen zwangsläufig auftritt — unterbunden, da durch die Verpressung sich keine Windzugkanäle in der Müllmasse mehr ausbilden können, die eine Ausbreitung des Herdes in die Tiefe ermöglichen.

Gleichzeitig kann aber in dem gleichen Volumen 30% mehr Müll untergebracht werden.

Der Staub der atmosphärischen Luft als Umweltfaktor

Von

Dr. HELMUT KETTNER

Wissenschaftlicher Oberrat

beim Bundesgesundheitsamt, Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene

1. Allgemeines

Unter der Vielzahl der lebensnotwendigen Vorgänge, ohne die menschliches Leben nicht existenzfähig ist, zählt die Atmung zu den wesentlichsten. Der Mensch atmet täglich etwa 12 m^3 Luft ein und kann, ohne zu atmen, kaum mehr als wenige Minuten leben. Im Vergleich hierzu kann er ohne zu trinken einige Tage und ohne zu essen sogar mehrere Tage bis einige Wochen auskommen. Diese Zahlen allein weisen bereits auf die besondere Bedeutung hin, die der Luft als Umweltfaktor zukommt. Die Luft sollte deshalb in bezug auf ihre Reinheit so beschaffen sein, daß sie der menschlichen Entwicklung nicht hinderlich ist. Diese Forderung sollte als ein Grundrecht des Menschen angesehen werden.

Fragt man sich indessen, wie rein die Luft sein muß oder sein sollte, dann werden je nach Blickwinkel recht verschiedene Meinungen vertreten. Das Verlangen nach absolut reiner Luft wäre daseinsfremd, lebt doch der Mensch seit Urbeginn seiner Existenz in einer verunreinigten Atmosphäre, deren Belastung durch natürliche Vorgänge, wie Vulkanausbrüche, Gesteins- und Bodenerosionen, kosmischen Staub, Waldbrände, Sporen und Pollen u. a. mehr, örtlich und zeitlich verschieden hoch ist und gar nicht vermieden werden kann. Während jedoch die natürlichen Vorkommnisse mit Ausnahme einiger weniger im allgemeinen keine Probleme stellen, ist es der Mensch selbst, der zur Erhaltung seines Lebens, nicht zuletzt aber auch zur Erleichterung seiner Daseinsbedingungen, sehr stark zur Verunreinigung der Luft beiträgt. Von der großen Anzahl der heute in der atmosphärischen Luft vorkommenden Schadstoffe hat neuerdings wieder der Staub an Bedeutung gewonnen, dem die folgenden Ausführungen gewidmet werden sollen.

2. Definition

Was ist Staub? Die VDI-Richtlinie 2031 (Begriffsbestimmungen) definiert diesen als „fein zerteilten Feststoff beliebiger Form, Struktur und Dichte, dessen Teilchengröße etwa zwischen 1 und $500 \mu\text{m}$ liegt“. Diese allein nach der Korngröße definierte Begriffsbestimmung umfaßt nahezu vier Zehnerpotenzen und stellt einen sehr weiten Bereich dar, der in einer neueren Richtlinie 2305 — Maximale Immissionskonzentrationen, Niederschlag inerter Stäube — in vier Fraktionen, und zwar in Grobstaub, Mittelstaub, Feinstaub und Feinststaub unterteilt wurde. Unter Grobstaub versteht man die Fraktion des Staubes von 500 bis $50 \mu\text{m}$, zum Mittelstaub zählt die Fraktion zwischen 50 und $10 \mu\text{m}$,

zum Feinstaub zählt man den Staub zwischen 10 und $0,5 \mu\text{m}$, und als Feinstaub, auch Aerosol genannt, wird schließlich die Fraktion unter $0,5 \mu\text{m}$ angesehen. Eine gewisse Berechtigung hätte auch der Wert von $40 \mu\text{m}$, da hier die Grenze der Siebfähigkeit liegt. Die internationale Normung sieht nur drei Fraktionen vor: Grobstaub 500 bis $5 \mu\text{m}$, Feinstaub 5 bis $0,5 \mu\text{m}$ und Feinststaub unter $0,5 \mu\text{m}$. Neueren Erwägungen zufolge wird diese Unterteilung auch in Deutschland eingeführt. — Es sei hier erwähnt, daß zu den Aerosolen nicht ganz korrekt auch flüssige und gasförmige atmosphärische Bestandteile gezählt werden, sofern sie nur die Bedingungen der Größe (kleiner als $0,5 \mu\text{m}$) erfüllen.

3. Eigenschaften

Die in der Luft anzutreffenden Stäube sind nicht nur in bezug auf ihre Dispersität weitestgehend verschieden, sondern auch in vielen anderen Beziehungen. Wenn der Einfachheit halber Stäube im allgemeinen so behandelt werden, als hätten sie Kugelgestalt, so darf man sich doch nicht darüber hinwegtäuschen lassen, daß gerade diese Form sehr selten anzutreffen ist; in den meisten Fällen wird es sich um unregelmäßige und deformierte Gebilde handeln, deren Habitus nur sehr schwierig zu erfassen ist. Die Größe eines Staubkorns wird meist durch seine größte lineare Ausdehnung (Siebanalyse, optische Auswertung auf Platten) gekennzeichnet, exakter definiert ist diese jedoch durch den Äquivalenzdurchmesser, der bei bekannter Dichte aus kinetischen Größen errechnet wird. Aerosole unter $0,5 \mu\text{m}$ sind auf diese Weise jedoch schlecht bestimmbar, was dieser Methode eine gewisse Grenze setzt. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften der Stäube werden maßgeblich durch den technischen Prozeß, bei dem sie entstehen, bestimmt. Sehr große Mengen Staub entstehen dort, wo Luft-sauerstoff für Verbrennungsvorgänge, wie das in Feuerungen, Zementöfen, Sinterbandanlagen u. a. der Fall ist, benötigt wird. Bei unvollständiger Verbrennung aller festen und flüssigen Brennstoffe entsteht außerdem Ruß, dessen hervorragendste Eigenschaft die schwarze Farbe und das starke Adsorptionsvermögen ist, das wiederum eng mit der sehr großen Oberfläche zusammenhängt. Gewisse Stäube, wie Bleistaub, haben ausgeprägte toxische Eigenschaften, ihr Vorkommen ist jedoch auf die Umgebung einiger weniger Betriebe beschränkt, die solche Stäube in die atmosphärische Luft emittieren. Im allgemeinen wird es sich um sogenannte inerte Stäube handeln, die streng von den toxischen unterschieden werden müssen. Die Radioaktivität der Luft ist maßgeblich an Staubteilchen gebunden. Das Gewicht der Teilchen nimmt bei gleicher Dichte mit dem Durchmesser sehr stark ab. Zur besseren Veranschaulichung, um welche Größenordnungen es beim atmosphärischen Staub geht, sei eine Tabelle zusammengestellt, die uns eine leichte Übersicht von uns geläufigen Werten bis zu den Aerosolen ermöglicht. Hierbei soll der Einfachheit halber von einem würfelförmigen Teilchen ausgegangen werden, dessen Volumen und Gewicht (bei bekannter Dichte) leicht errechenbar ist.

Das Gewicht eines kugelförmigen Teilchens ist zwar nicht unmittelbar mit einem würfelförmigen vergleichbar, wenn auch bei der Berechnung des Volumens der Radius mit der dritten Potenz, ähnlich wie die Kantenlänge beim Würfel, eingeht. Bei Berücksichtigung der Dichte von etwa 2 g/cm^3 , wie sie bei Stäuben im Mittel angenommen werden kann, kommt man allerdings zu etwa gleichen Größen. Eine kleine Kugel von 1 cm Durchmesser, die gerade in einen Würfel von 1 cm Kantenlänge hineinpaßt, wiegt, wenn wir für die Dichte einen Wert von $1,9 \text{ g/cm}^3$ einsetzen, etwa 1 g, d. h. ebenso viel wie ein Würfel der Kanten-

Tabelle 1

Kantenlänge und Gewicht eines würfelförmigen Teilchens der Dichte 1.

Kantenlänge				Gewicht			
m	cm	mm	μm	kg	g	mg	γ (μg)
1	100	1 000	1 000 000	1 000	1 000 000	1 000 000 000	1 000 000 000 000
	10	100	100 000	1	1 000	1 000 000	1 000 000 000
	1	10	10 000		1	1 000	1 000 000
		1	1 000			1	1 000
			100				1
			10				0,001
			1				0,0000001

länge 1 cm und der Dichte 1 g/cm³. Entsprechend kann aus der vorstehenden Tabelle entnommen werden, daß ein Teilchen vom ϕ 1 μm — und das sind, wie noch später auszuführen sein wird, medizinisch die wesentlichsten Teilchen — 1 millionstel Gamma wiegt. Umgekehrt wiegt eine Million Teilchen vom ϕ 1 μm — 1 γ ; eine solche Menge ist auf der heute üblichen empfindlichsten Laborwaage — der Mikrowaage — gerade noch wägbare. Diese Überlegung soll u. a. zeigen, daß neben dem Gewicht der Teilchen auch die Anzahl eine wesentliche Rolle spielt, was wiederum bei der Normung zu berücksichtigen sein wird. Schließlich können Stäube in der atmosphärischen Luft Reaktionen eingehen und als Katalysatoren bei chemisch-physikalischen Vorgängen wirken.

4. Verhalten des Staubes in der Atmosphäre, Sinkgeschwindigkeit

Sehr wesentlich ist das Verhalten des Staubes in der atmosphärischen Luft, besonders aber seine Verweilzeit, die eng mit der Sinkgeschwindigkeit verbunden ist. Letztere läßt sich auch einfacher als Habitus und Korngröße definieren, weshalb man häufig zur Charakterisierung einer Staubart diese Angabe bevorzugt. Kompakte und grobe Staubteilchen (Grobstaub), wie sie in erster Linie bei technischen Vorgängen entstehen, sedimentieren sehr schnell und fallen im wesentlichen bereits in Entfernungen bis zu etwa 3000 m von der Emissionsquelle aus, maximale Staubbiederschläge findet man unter dem Winde der Werke in Entfernungen von 300 bis 1500 m. In Entfernungen von mehr als 3000 m entspricht der Staubbiederschlag bereits dem allgemeinen, für die betreffende Landschaft charakteristischen Wert. Der Grobstaub trägt bei Messungen nach der Sedimentationsmethode sehr stark zur Belastung bei. Mittelstaub, etwa zwischen 50 und 10 μm , fällt langsam zu Boden, Feinstaub sehr langsam. Die Sinkgeschwindigkeit der Feinstaubfraktion wird bereits stark von der BROWNSchen Bewegung überlagert. Noch feinere Teilchen (Feinstaub) verhalten sich wie ein gasförmiger Stoff; sie setzen sich nicht mehr ab, erreichen aber den Boden auf Grund von Diffusions- und Massenaustauschvorgängen, die sich dauernd in der Atmosphäre abspielen.

Das Verhältnis der im Schwebestand befindlichen Staubfraktionen, und zwar der Mittelstaub zum Fein- + Feinstaub, beträgt etwa 2:1, d. h. Mittelstaub zwischen 50 und 10 μm ist in Bodennähe etwa doppelt so viel enthalten wie Fein- + Feinstaub unter 10 μm . Die nachfolgende Tabelle gibt die Sink-

geschwindigkeiten von Teilchen bei kugelförmiger Gestalt und Dichte 2 in unbewegter Luft an.

Tabelle 2
Sinkgeschwindigkeit von kugelförmigen Teilchen der Dichte 2 in Luft.

Bezeichnung	Teilchengröße ϕ in μm	Sinkgeschwindigkeit in mm/s
Grobstaub	500 — 50	3000 — 150
Mittelstaub	50 — 10	150 — 6
Feinstaub	10 — 0,5	6 — 0,02
Feinststaub	0,5 — 0,1	0,02 — 0,002

5. Verhalten des Staubes bei der Atmung

Der Mensch saugt mit einem Atemzug, der etwa 3 Sekunden dauert, etwa 450 cm^3 Luft an, je Sekunde also 150 cm^3 . Bei einer durchschnittlichen Oberfläche der Nasenöffnungen von rund $0,75 \text{ cm}$ errechnet sich die Ansauggeschwindigkeit zu etwa 200 cm/s . Dies bedeutet aber, daß unsere Nase in der Lage ist, aus der atmosphärischen Luft noch Teilchen der Größe von $50 \mu\text{m}$ und darüber anzusaugen. Die ganz groben Teilchen werden bereits in der Nase abgeschieden; die Wirkungsweise der Nasenabscheidung ist eine Überlagerung von Zyklon- und Impingerwirkung. Feinere Teilchen gelangen in den weiteren Atemtrakt, wo sie, wiederum auf Grund ihrer Korngröße und Strömungsgeschwindigkeit, selektiv abgeschieden werden. Im oberen, dem Bronchialbereich, werden sich entsprechend den dort herrschenden Bedingungen (1 bis 2 m/s bei einem Durchmesser der Kanäle von rund $0,2$ bis 2 cm) aus der in der Nase nicht abgeschiedenen Fraktionsmischung vorwiegend die noch in der Atemluft verbliebenen größeren Teilchen von über $5 \mu\text{m}$ abscheiden; als Ursache der Abscheidung kann hier Aufprall (Impingerwirkung) und Schwerkraft angenommen werden. Das dem Bronchialbereich anschließende, sehr stark verzweigte Kanalnetz der Bronchioli mit einem Durchmesser von $0,2$ bis 2 mm und einer Länge von rund 80 m absorbiert bereits eine große Menge auch des feinen Staubes. Die wesentlichste Bedeutung kommt jedoch der Abscheidung im eigentlichen Alveolarbereich der Lunge zu: der hier abgeschiedene Staub umfaßt die kleinsten Teilchen, die vorwiegend durch Diffusionskräfte an die Wandungen herangetragen werden, wo sie haften bleiben. Die Ablagerungen der Teilchen in den einzelnen Strecken des Atemtraktes erfolgen selbstverständlich nicht ganz exakt, gewisse Überlagerungen der Fraktionen erfolgen in allen aneinandergrenzenden Bereichen. Nur ein geringer Teil des eingeatmeten Staubes, und zwar nahezu ausschließlich ganz kleine Teilchen unter $1 \mu\text{m}$, werden wieder ausgeschieden, das Gros lagert sich in der beschriebenen Weise im Atemtrakt ab.

Sehr wesentliche Bedeutung muß der Reinigung der Luft, d.h. der Abscheidung und dem Austragen des Staubes durch den menschlichen Körper beigemessen werden, die bereits in der Nase beginnt. Würde eine solche Reinigung nicht erfolgen, würden Lungen erwachsener Menschen wahrscheinlich mit einigen Gramm Staub belastet sein, die sich dort im Laufe von Jahren kumuliert hätten. — Der der Nase anschließende Bronchialbereich und ein Teil der Bronchioli ist mit Flimmerhärchen versehen, die eine stete Auf- und Abwärtsbewegung, etwa 1000- bis 2000mal je Minute, ausführen. Durch diese Bewegung wird eine

Schleimschicht, in der der abgeschiedene Staub enthalten ist, mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,2 bis 3 cm je Sekunde nach außen befördert, der hier abgelagerte Staub wird in wenigen Stunden bis zu drei Tagen aus dem Körper herausgetragen. — Im Alveolarbereich fehlen die Flimmerhärchen und die Schleimschicht. Der hier deponierte Staub wird zum Teil von Alveolarzellen umhüllt und mit diesen bei der ständigen Bewegung der Lunge in den Transportmechanismus des Bronchialbereiches, in dem die erwähnten Flimmerhärchen wirksam sind, ruckweise befördert. Ein anderer Teil, besonders der feinere Staub, gelangt in das eigentliche Lungengewebe, wo er gespeichert oder auf dem Lymphwege in die Blutbahn weiterbefördert wird. Im Gegensatz zum Alveolarbereich erfolgt die Reinigung im Lungengewebe nur sehr langsam, der hier abgelagerte Staub kann über Jahre liegen bleiben.

In der letzten Zeit ist man, besonders durch Arbeiten von CARTWRIGHT und NAGELSMIDT, zu der Erkenntnis gekommen, daß als gefährlichster Staub der des Fraktionsbereichs um $1\ \mu\text{m}$ mit einer Schwankungsbreite von 0,5 bis $1,5\ \mu\text{m}$ anzusehen ist.

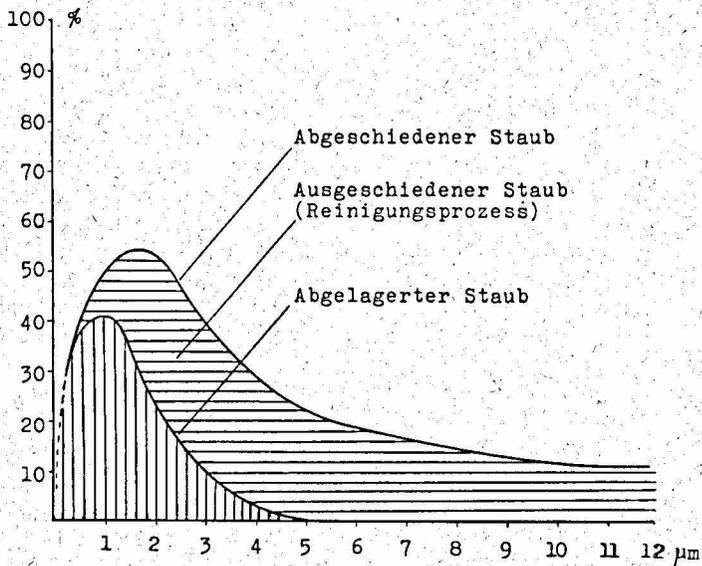


Abb. 1. Abscheidung und Ablagerung von mit der Atemluft in die Lungen gelangtem Staub.

Dem Diagramm ist u. a. zu entnehmen, daß Teilchen größer als $5\ \mu\text{m}$ in den Lungen kaum oder gar nicht vorzufinden sein werden. Auf Grund dieser Erkenntnis hat man auch den Wert von $0,5\ \mu\text{m}$ als oberen Grenzwert für Feinstaub festgelegt. Das deutliche Maximum der Ablagerung um $1\ \mu\text{m}$ geht aus der Kurve klar hervor. Staub unter $0,1\ \mu\text{m}$ stellt, obwohl in mancher Beziehung (z. B. als Kondensationskerne) von großer Bedeutung, hygienisch kein besonderes Problem dar, da er im Atemtrakt gar nicht zur Abscheidung gelangt.

Die wesentlichen Eigenschaften, aus denen sich weitere Schlüsse ergeben werden, seien einer besseren Übersicht wegen nochmals in Tabelle 3 zusammengefaßt.

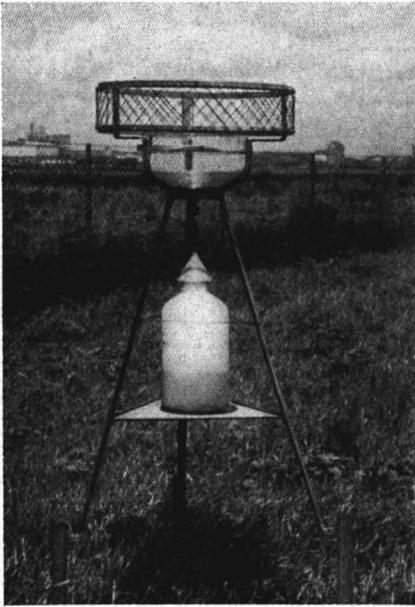
Tabelle 3
Eigenschaften einzelner Staubfraktionen.

	Grobstaub		Feinstaub			Feinstaub (Aerosol)	
	←	→	←	→	→	←	→
Teilchengröße in μm	500	50	10	5	1	0,5	0,1
Sinkgeschwindigkeit in Luft, mm/s	3000	150	6	1,5	0,07	0,02	0,002
Schwebestaub	—————						··→
Lungengängig					————— ···→		
Ablagerung	Nase		Bronchialbereich		Alveolarbereich		
Gefährlicher Bereich					×		

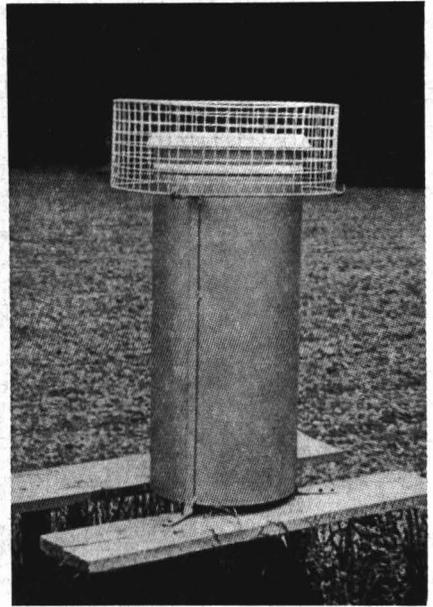
6. Messungen des Staubgehaltes

6.1 Sedimentationsmethode

Die älteste, zugleich aber auch die einfachste Methode zur Messung des Staubgehaltes der Luft beruht darauf, den zu Boden sedimentierenden Staub aufzufangen und zu bestimmen. Die Menge des abgesetzten Staubes wird maßgeblich von der Expositionszeit und der Größe der Auffangfläche bestimmt. Deshalb muß man das Ergebnis auf bestimmte, willkürlich gewählte Einheitsmaße umrechnen. Messungen dieser Art sind bereits 1916 in England vorgenommen worden; von 1926 an galt das auch noch heute sehr viel verwendete Verfahren als Einheitsverfahren. Das englische Gerät, standard deposit gauge genannt, stellt im wesentlichen einen Glstrichter dar, unter den eine auswechselbare 10-Liter-Flasche gestellt wird; die Probenahmezeit beträgt einen Monat. Das älteste in Deutschland verwendete Staubbiederschlagsmeßgerät ist dem englischen verwandt und im Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene entwickelt worden. Der Durchmesser dieses nach den Erfindern als Liesegang-Löbner-Gerät bezeichneten Auffangtrichters ist nahezu identisch mit dem englischen Gerät. Trotzdem fängt dieses mehr Staub auf (wenn man die beiden Geräte nebeneinanderstellt) als jenes. Der Unterschied der Meßwerte ist in erster Linie durch die Form der Geräte bedingt, wobei andere Einflüsse, wie etwa Anströmung, ebenfalls eine gewisse Rolle spielen. Nach und nach kamen auch noch andere Staubbiederschlagsmeßgeräte in Deutschland auf, so daß wir heute über eine Reihe von Meßgeräten verfügen, deren Ergebnisse leider nicht unmittelbar miteinander vergleichbar sind. In den letzten Jahren fand das Gerät der Landesanstalt Nordrhein-Westfalen (Bergerhoff-Gerät) sehr breite Verwendung. Es handelt sich dabei um ein fabrikmäßig hergestelltes Einmachglas von 1,5 Liter Inhalt mit einem geeigneten Gestell. Entsprechend der kleineren Auffangfläche fällt in dieses Gerät weniger Staub als in das Liesegang-Löbner-Gerät ein, was allerdings bei reinen Staubbiederschlagsmessungen (ohne die Bestimmung anderer Parameter) von untergeordneter Bedeutung ist, da man mit dem Bergerhoff-Gerät lediglich den Staubgehalt der monatlichen Probe nach Eindampfen des gesamten Glasinhalts feststellt. Zur Lösung anderer Probleme, wie etwa der



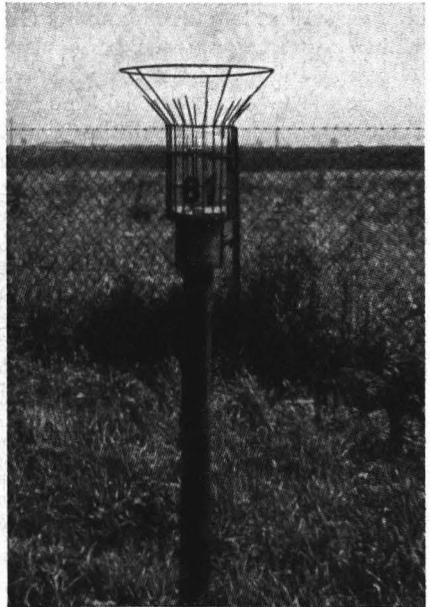
a)



b)



c)



d)

Abb. 2. Staubniederschlagsmeßgeräte nach der Regenwasserauffangmethode.
 a) Englisches „standard deposit gauge“; b) Liesegang-Löbner-Gerät des Instituts;
 c) „Hibernia“-Gerät; d) Gerät der Landesanstalt.

Bestimmung des sedimentierenden Bleistaubes in der näheren Umgebung bleiverarbeitender Werke, wird man dagegen das mit der größeren Fläche versehene Liesegang-Löbner-Gerät anwenden, mit dem im allgemeinen wesentlich mehr Erfahrungen vorliegen.

Um mit verschiedenen Geräten erzielte Meßergebnisse untereinander vergleichen zu können, bedarf es gewisser Umrechnungsfaktoren, mit denen die Werte zu multiplizieren sind, um Werte des Bezugsgerätes zu erhalten. Solche Faktoren zu ermitteln, sind bereits mehrere Forscher bestrebt gewesen. Zur Zeit ist erst ein Faktor angegeben, und zwar der Umrechnungsfaktor für das Gerät der Landesanstalt, auf den unter Ziffer 7 (Normung) noch eingegangen wird. Die Abbildungen 2a bis 2d zeigen die äußere Form der Meßgeräte, Abbildung 3 läßt ein Versuchsfeld zur Ermittlung von Staubniederschlagsumrechnungsfaktoren erkennen. Abbildung 4 soll die Formen und Größen der verschiedenen Auffangvorrichtungen, die für die unterschiedliche Retention des Staubes maßgebend sind, deutlich machen.



Abb. 3. Versuchsfeld zur Ermittlung von Umrechnungsfaktoren.

Die an Staubniederschlagsmeßgeräte in bezug auf Meßgenauigkeit und Reproduzierbarkeit zu stellenden Forderungen werden mit den vorhandenen Geräten erfüllt. Man muß sich jedoch stets dessen bewußt sein, daß Staubniederschlagsmessungen Relativmessungen sind und daß jedes Meßgerät mit einer gewissen Schwankungsbreite arbeitet. Zur Verhinderung des Auswehens von einmally aufgefangenen Staub geben manche Untersucher glycerinhaltiges Wasser vor, was allerdings bei einem Trichterauffanggerät nicht möglich ist. Die vorgegebene Glycerinlösung stellt eine Art „Falle“ dar; eine ähnliche Aufgabe fällt auch der Form des Hibernia-Trichters zu, der unter gleichen Bedingungen, auf gleiche Expositionszeit und Auffangfläche bezogen, wesentlich mehr Staub als der

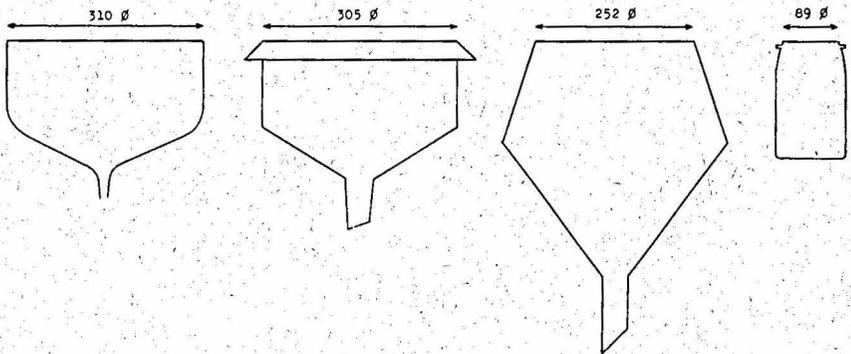


Abb. 4. Formen und Größen der Auffangvorrichtungen.
 a) Standard deposit gauge; b) Institut WaBoLu; c) Hibernia-Trichter;
 d) Landesanstalt.

WaBoLu-Trichter auffängt. In Deutschland werden den Geräten keine „Haftlösungen“ beigegeben.

In den letzten Jahren haben die bereits früher verwendeten Haftfolien, von denen zur Zeit die DIEMsche am bekanntesten ist, eine gewisse Bedeutung erlangt. Die Folien werden mit einem Überzug versehen, an denen der Staub haften

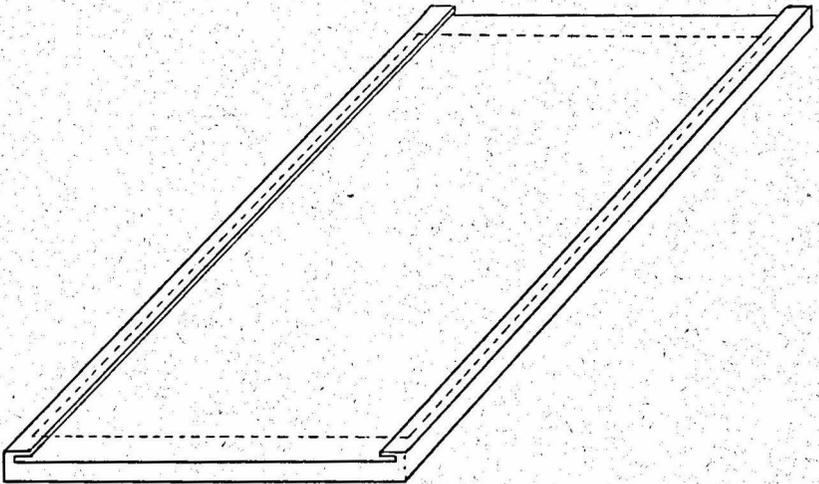


Abb. 5. Haftfolie nach DIEM. Halterung und Folie (gestrichelt).

bleibt. Eine stärkere Belegung der DIEMschen Folie als mit etwa 30 mg ist nicht möglich, da der Staub sonst von selbst abfällt. Erfahrungsgemäß ist in einem stärker beaufschlagten Gebiet eine solche Belegung bereits nach sieben Tagen erreicht, was ein Auswechseln der Folie nach dieser Zeit erforderlich macht. Der Aufwand für den Folienaustausch ist deshalb groß. Auf der anderen Seite kann man so auch kurzfristige Messungen direkt unter dem Winde von Staubquellen vornehmen. Der besondere Vorteil dieser Methode liegt darin, daß man den aufgefangenen Staub photographisch fixieren kann, was nach der Regenwasserauffangmethode wegen der Löslichkeit des Staubes, durch die die Teilchen ihre ursprüngliche Form verlieren, nicht möglich ist.

6.2 Aspirationsmethode

Im Gegensatz zur Sedimentationsmethode, die nur den sich am Boden absetzenden Staub zu bestimmen gestattet, wird nach der Aspirationsmethode der im Schwebzustand befindliche, nur sehr langsam oder überhaupt nicht fallende Staub gemessen. Diese beiden Methoden lassen auch keine Korrelation zwischen Sediment und Schwebestaub erwarten, woraus zu schließen ist, daß sie sich lediglich ergänzen, nicht aber ersetzen.

Der Methode der Aspiration liegt die allgemeine Basis der Messung von Luftschadstoffen zugrunde; wenn wegen der geringen Konzentration nicht direkt gemessen werden kann, muß Luft durch einen Abscheider gesaugt werden, auf dem sich der Luftschadstoff anreichert. Neben Flüssigkeiten als Abscheider können für staubförmiges Gut auch Filter (Papier-, Glasfaser-, Watte-, Mikrosorban-, Membranfilter), Zyklone oder elektrostatische Abscheider, unter Umständen auch Plattenabscheider wie bei Konimetern verwendet werden. Um die Art des Schwebestaubes feststellen zu können, müssen größere Staubmengen abgetrennt werden, was einen größeren Luftdurchsatz erfordert. Setzt man voraus, daß für eine chemisch-physikalische Untersuchung des Staubes etwa 20 mg benötigt werden, dann müssen bei einem Staubgehalt von $0,1 \text{ mg/m}^3$ 200 m^3 Luft durchgesaugt werden. Die Probenahme soll sich nicht zu lange ausdehnen; es muß angestrebt werden, Proben in 2 Stunden ziehen zu können. In manchen Fällen kann sie sich allerdings über 24 Stunden erstrecken.

Für Routineuntersuchungen gibt es im Ausland bereits eine Reihe von Geräten, auf die hier näher eingegangen werden soll. Die in England seit längerer Zeit in großem Maßstab verwendeten Geräte beruhen auf der „spot“ (tape)-Methode, d. h. auf der Schwärzungsmethode. Hierbei wird eine bestimmte Menge Luft durch ein weißes Filter gezogen, auf dem sich der Staub abscheidet, einen mehr oder weniger tief gefärbten grauen bis schwarzen Fleck, den spot, bildend. Die Tiefe der Schwärzung dieses Flecks, die reflektometrisch oder nach der Lichtdurchlässigkeit bestimmt wird, ist ein Maß für die Staubkonzentration der Luft, wenn der gleiche Staub als Eichsubstanz verwendet wurde. Abbildung 6 gibt das Gerät und die Methode wieder.

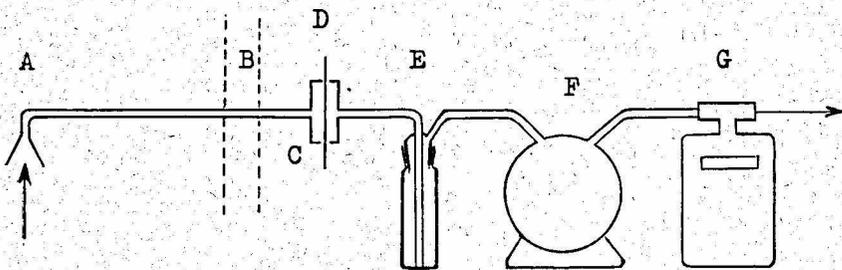


Abb. 6. Diskontinuierliches Gerät zur Bestimmung des Schwebestaubgehaltes der Luft nach der Schwärzungsmethode.

A — Trichter (außen), B — Wand oder Fensterrahmen, C — Filterhalter, D — Filter, E — Waschflasche, F — Luftpumpe, G — Luftvolumenmesser.

Genauer genommen, handelt es sich bei Messungen der atmosphärischen Luft nach dieser Methode mehr um die Bestimmung des Gehaltes an Ruß, welcher durch seine schwarze Farbe sehr viel mehr Licht absorbiert als hellere Stoffe. In der angelsächsischen Literatur wird diese Methode korrekterweise auch nicht als

„Staub“-Bestimmungsmethode (dust measuring method), sondern als Rauchmeßmethode (smoke measuring method) bezeichnet. Diese Methode hat den Vorteil der besonderen Empfindlichkeit und Schnelligkeit; ihr Nachteil ist, daß sie keine ausreichend genauen Ergebnisse liefert, wenn die Zusammensetzung des Staubes schwankt. Nahezu unbrauchbar erscheint sie zur Bestimmung ganz hellen Staubes, wie er etwa unter dem Winde von Zementwerken vorkommt. Für Staubgehaltsbestimmungen und langzeitige Vergleichsmessungen, die besonders die meteorologischen Einflüsse an bestimmten Meßstellen erfassen sollen, leistet sie in Wohngebieten sehr gute Dienste.

In der Sowjetunion unterscheidet man zwischen dem Rußgehalt und dem Staubgehalt der Luft. Der erste wird optisch bestimmt, der zweite gravimetrisch. Die optische Bestimmung geschieht durch Vergleich mit einer Standardvergleichsskala, die man wie folgt herstellt: Etwa 120 mg Ruß werden unter Zugabe von etwas Saponin mit wenig Wasser verrieben und auf 1 Liter aufgefüllt. Zur genauen Bestimmung der Konzentration dieser Suspension werden 500 ml eingedampft, bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und gewogen; die so eingestellte Konzentration beträgt etwa 0,1 mg/ml. Von der übrigen Suspension wird eine zehnfache Verdünnung mit einem Gehalt von 0,01 mg/ml hergestellt und aus dieser die eigentliche Skala, die man durch Filtration eines entsprechenden Volumens durch ein Blaubandfilter erhält. Die Skala mit Gehalten von 0,002 — 0,004 — 0,006 — 0,008 — 0,01 — 0,015 — 0,02 — 0,03 — 0,04 und 0,05 mg wird staubdicht unter Glas aufbewahrt und kann praktisch unbegrenzte Zeit als Vergleichsskala dienen. Zur Errechnung der Rußkonzentration wird das durch den Schwärzungsvergleich ermittelte Gewicht durch die bei der Probenahme durch das Filter gesaugte Luftmenge (m^3) dividiert. Die Empfindlichkeit dieser Methode wird bei einer Probenahmedauer von 20 Minuten und einer Durchsauggeschwindigkeit von 1 Liter je Minute mit 0,002 mg angegeben. — Zur gravimetrischen Bestimmung des Staubes wird Luft 2 Stunden lang mit einer Geschwindigkeit von 30 Litern je Minute durch ein Blaubandfilter gesaugt und aus der Gewichts-differenz des vor und nach der Exposition gewogenen Filters und dem durchgesaugten Luftvolumen die Konzentration errechnet.

Nach dem in Abbildung 6 wiedergegebenen Prinzip sind im westlichen Ausland auch kontinuierliche Meßgeräte entwickelt worden, von denen es bereits eine ganze Reihe im Handel gibt. Ein Gerät dieser Art, das mit einem Bandfilter ausgerüstet ist, durch das die zu messende Luft gesaugt wird, zeigt Abbildung 7; die Probenahmezeit kann in den neueren Geräten willkürlich variiert werden. Ein Schwärzungsfleck-Gerät ist auch der deutsche Avigraph.

In Deutschland werden die Verfahren zur Bestimmung des Schwebestaubgehaltes nach der optischen Schwärzungsmethode nicht als aussagekräftig angesehen, man mißt hier den echten gravimetrischen Konzentrationsbestimmungen mehr Gewicht bei. Geräte, die mit einer hinreichenden Genauigkeit solche Bestimmungen gestatten, wurden bereits für routinemäßige Untersuchungen — besonders in den USA — eingesetzt, aber auch in anderen Ländern. Abbildung 8 gibt zwei solcher Geräte wieder. Der besondere Vorteil dieser Geräte liegt darin, daß sie große Luftmengen in kurzen Zeiten durchzusaugen gestatten.

Die Geräte bestehen aus starken Motoren mit entsprechenden Lüftern, wie sie auch bei Staubsaugern Verwendung finden, und einem vorgeschalteten Rahmen, in den das zur Staubaufnahme dienende Filter eingespannt wird. Die Filterhalter sind für verschieden große Filter ausgelegt und auswechselbar. Wegen der schlecht zu erreichenden Gewichtskonstanz empfiehlt es sich, keine Papierfilter, sondern Glasfaserfilter zu verwenden. Diese Filter haben zudem den Vorteil der

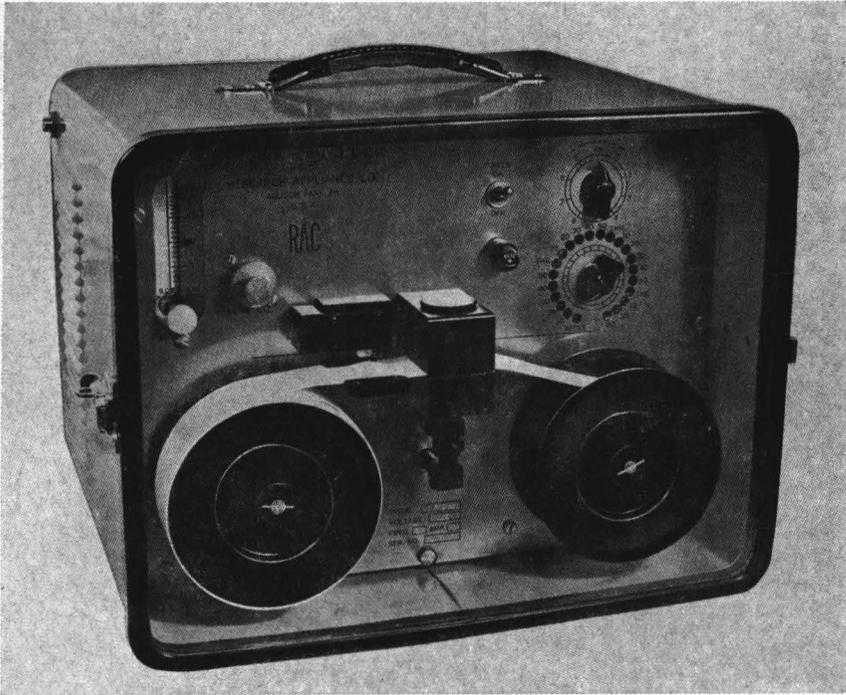


Abb. 7. Kontinuierliches Meßgerät zur Bestimmung des Schwebstaubgehaltes der Luft nach der Schwärzungsmethode.

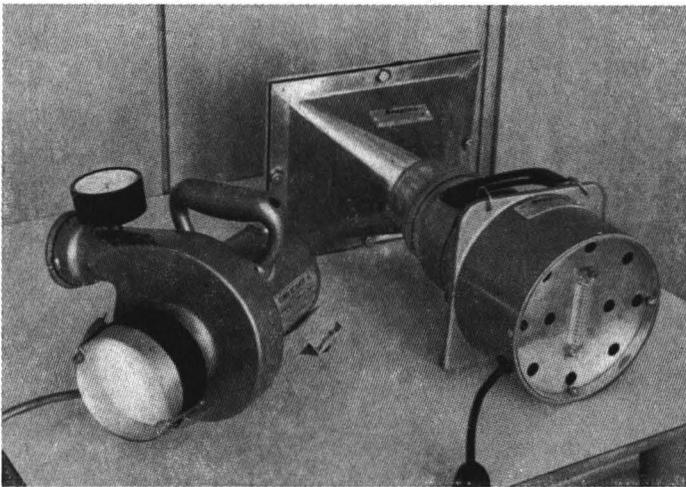


Abb. 8. Diskontinuierliche Geräte zur gravimetrischen Bestimmung des Schwebstaubgehaltes der Luft.

höheren Abscheidungsleistung. Bei den größten Filtern (25×20 , wirksame Fläche 23×18) wird eine Ansaugleistung von $80 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht, die selbst bei sehr niedrigen Staubgehalten bei einer Probenahmedauer von 2 Stunden eine hinreichend genaue Bestimmung des Staubes gestattet.

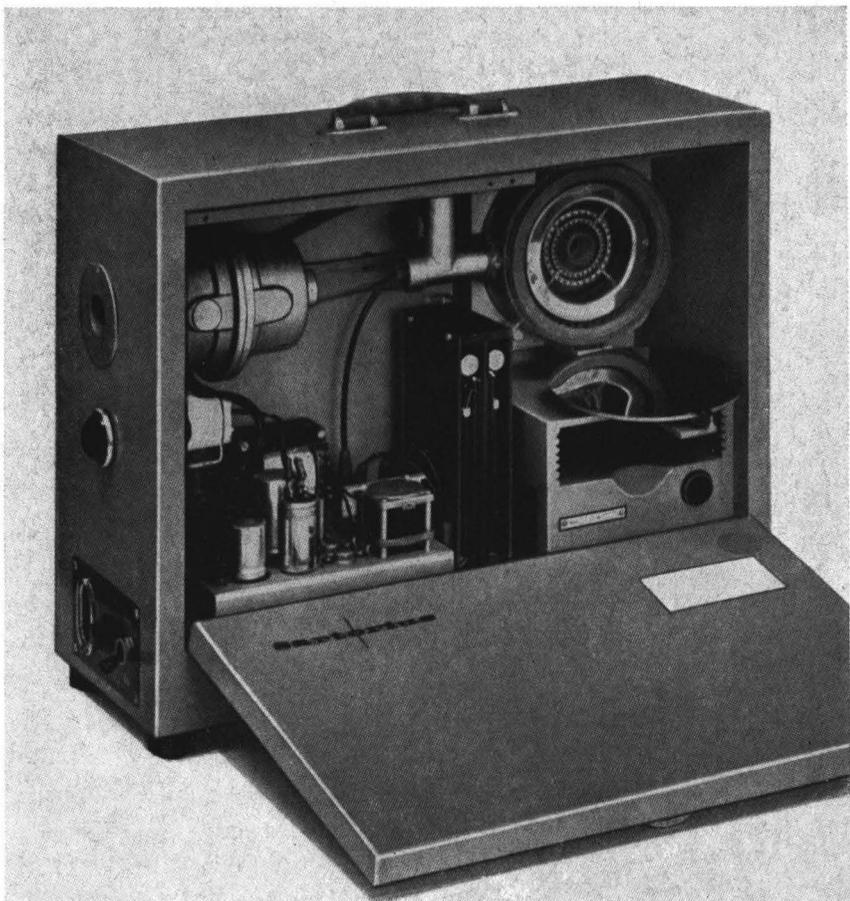


Abb. 9. Gerät zur Bestimmung des Schwebstaubgehaltes nach dem Prinzip der elektrostatischen Abscheidung.

Ein auf elektrostatischer Abscheidung basierendes Gerät hat in Deutschland die Firma Sartorius entwickelt. Das Gerät hat einen konstanten Luftdurchsatz von $3,6 \text{ m}^3/\text{h}$ und scheidet den Staub auf einer leicht zu reinigenden und mikroanalytisch wägbaren Metallplatte aus nichtrostendem Stahl ab.

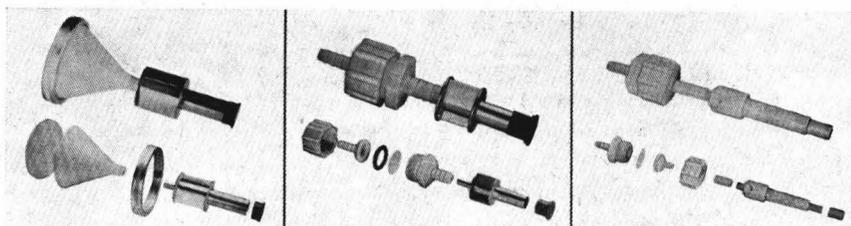


Abb. 10. Vorrichtungen amerikanischer Bauart zur Vorabscheidung von Staub größer als $5 \mu\text{m}$.

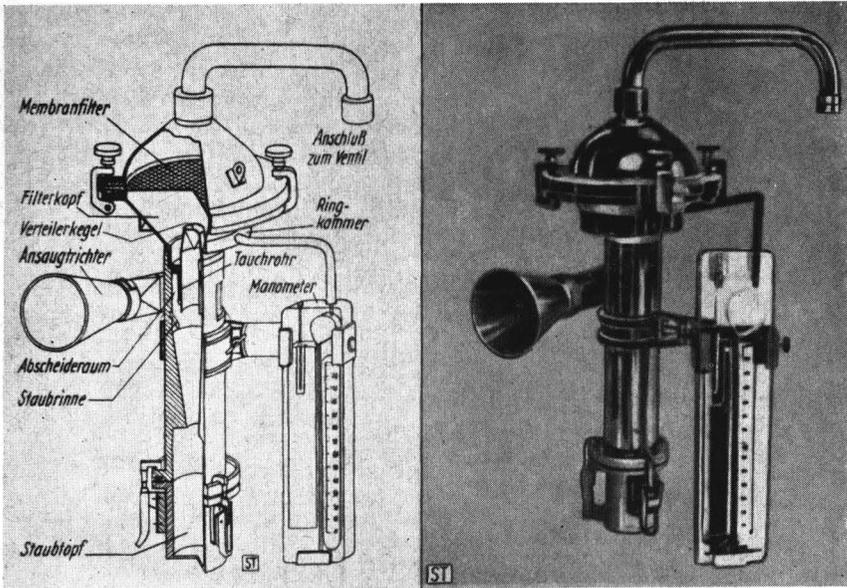


Abb. 11. BAT-Gerät zur getrennten Bestimmung von Feinst- und Grobstaub.

In neuerer Zeit wird besonders seitens der Ärzte die Forderung erhoben, den gesundheitsgefährdenden Staub unter $5\ \mu\text{m}$ getrennt zu bestimmen. Dieser Forderung nachzukommen, ist mit den geschilderten Geräten nicht direkt möglich; um sie zu erfüllen, müssen Vorabscheider vorgeschaltet werden, die den groben Staub absondern. Als Vorabscheider benutzt man im allgemeinen kleine Zyklone, d.h. Vorrichtungen, die den groben Staub auf Grund seiner Schwerkraft aus dem rotierenden Strom herausdrücken. Die Vorabscheider sollen so

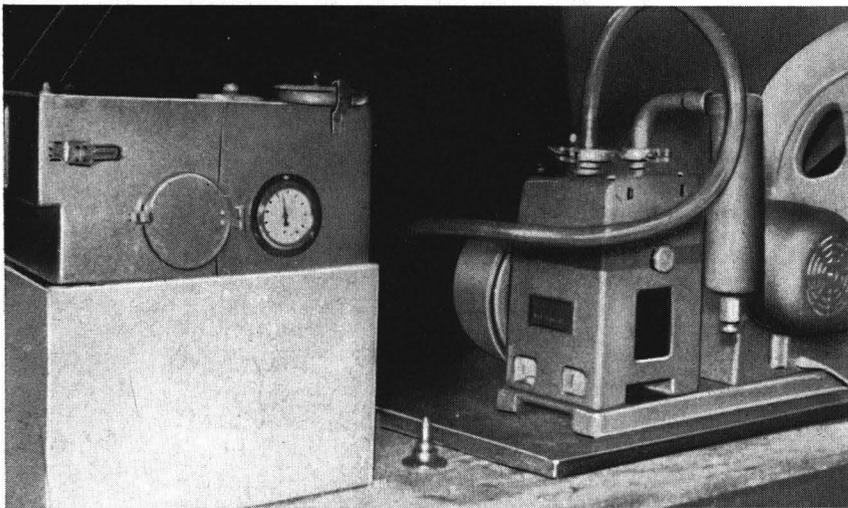


Abb. 12. Staubmeßgerät mit Plattenvorabscheider System SFI, Bauart Dräger.

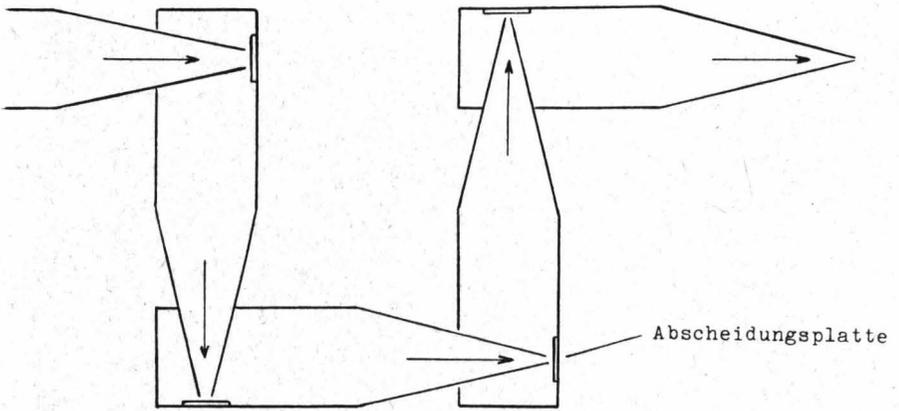


Abb. 13. Schema eines Kaskadenimpaktors.

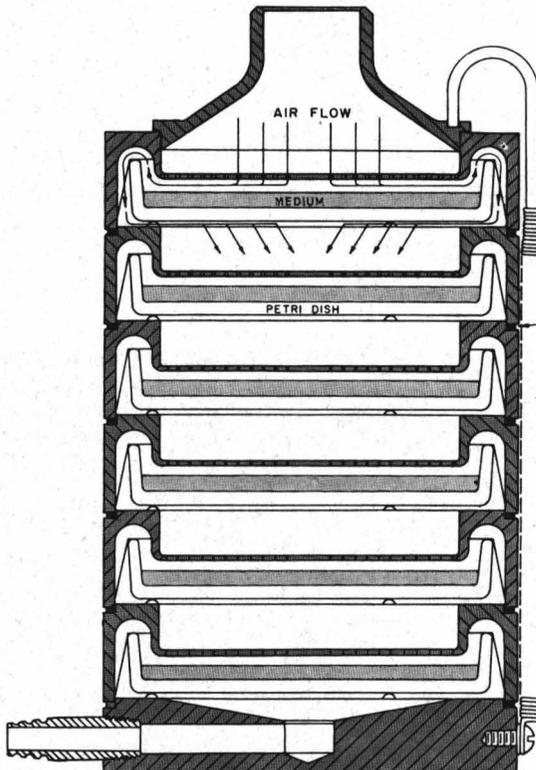


Abb. 14. Kaskadenabscheider der Firma Andersen.
 (Air flow = Luftdurchgang; Medium = Abscheidungs-vorrichtung; Petri dish =
 Petrischale.)

ausgelegt sein, daß sie — korrespondierend zum Atemvorgang — gerade den im oberen Atemtrakt zur Abscheidung gelangenden Staub zurückhalten, während der feine, lungengängige Staub auf einem Glasfaserfilter abgeschieden wird. Abbildung 10 zeigt Filterhalter mit vorgeschalteten Zyklonen amerikanischer und Abbildung 11 und 12 solche Geräte deutscher Bauart. Das BAT-Gerät für die Abscheidung von grobem atmosphärischem Staub ist eine Weiterentwicklung eines für diese Zwecke bereits im Bergbau erprobten Gerätes.

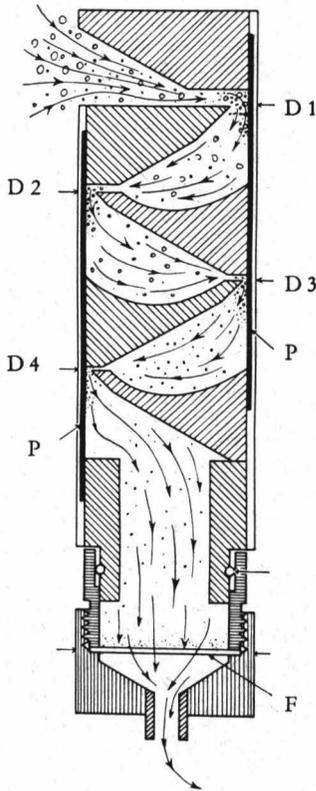


Abb. 15. Kaskadenabscheider der Firma Unico.

D1 bis D4 = Düsen zunehmend enger; P = Abscheideplatte; F = Glasfaserfilter.

Der Luftstrom ist in beiden Abbildungen durch Pfeile gekennzeichnet.

Eine Aufteilung des Staubes nach seinem Korn ohne die Anwendung der sehr zeitraubenden Sedimentationsmethode mit Flüssigkeiten gelingt mit Kaskadenimpaktoren. Das Prinzip dieser Geräte beruht auf der Ausschleuderung immer kleinerer Teilchen bei Umlenkung des Luftstromes: je höher die Luftgeschwindigkeit, um so kleinere Teilchen werden ausgeschleudert. Die Steigerung der Luftgeschwindigkeit läßt sich durch Anwendung zunehmend engerer Düsen erreichen, wie das schematisch in Abbildung 13 wiedergegeben ist. Abbildung 14 und 15 stellen handelsübliche Impaktoren dar.

7. Normung der Außenluft

Die Normung der Luft in bezug auf den Staub wird sich nach dessen Wirkung auf den Menschen und seine Umgebung richten, allem voran sollte aber die eingangs erwähnte These stehen, wonach die Luft so beschaffen sein sollte, daß sie der Entwicklung des Menschen nicht hinderlich ist. Eine unmittelbare Einwirkung auf den Menschen könnte dann erfolgen, wenn Staub in den menschlichen Organismus durch Einatmen oder auf anderem Wege eindringt und mit dem Körper in Berührung kommt. Diese beiden Vorgänge, das Eindringen und das Berühren, werden jedoch offensichtlich unterschiedliche Bewertungsfaktoren haben. Staub, der in die Lungen einzudringen vermag und dort retiniert wird, stellt, auch wenn er inert ist, bereits eine Gefahr dar, insbesondere wenn er in höheren Konzentrationen auftritt. Es hat sich als zweckmäßig erwiesen, auch weiterhin zwischen Staubniederschlag und Schwebstaub zu unterscheiden, wobei bei dem letzteren auch eine Normung der Teilchen kleiner als $5 \mu\text{m}$ erfolgen soll. Mittelbare Wirkung übt der Staub auf den Menschen durch Verminderung der Sichtweite, als Kondensationsbildner für die atmosphärische Feuchtigkeit u. a. aus. Durch Verschmutzung der Umgebung treten besonders bei starker Belastung Beeinträchtigungen des sozialen und psychischen Wohlbefindens sowie wirtschaftliche Nachteile auf. Auf Pflanzen und Blumen niedergeschlagener Staub kann durch Verkrustung, Assimilationsstörung, Azidität oder Alkalität zu Unansehnlichkeit, vermindertem Wachstum und Un genießbarkeit für Tiere und Menschen führen.

Der von LIESEGANG erstmalig in den dreißiger Jahren angegebene und in den späteren Jahren allgemein anerkannte und häufig verwendete Richtwert für den noch zulässigen Staubniederschlag von $3 \text{ kg je } 100 \text{ m}^2$ und Monat wird heute allgemein als zu hoch angesehen. Im LIESEGANGSchen Sinne war die Staubbelastung einer Gegend für die Anwohner noch zumutbar, wenn dieser Wert im Mittel über ein ganzes Jahr nicht überschritten wurde. Sowohl der LIESEGANGSche als auch die zur Zeit in Bearbeitung befindlichen Grenzwerte sind reine, aus jahrelanger Erfahrung gewonnene Konventionswerte. Der letzte Entwurf der VDI-Richtlinie 2305 „Maximale Immissions-Konzentrationen (MIK) — Niederschlag inerter Stäube“ vom Mai 1964 sieht Grenzwerte für Industriegebiete und allgemeine Gebiete vor, die jedoch nicht in den vom Institut üblichen Bezugsgrößen ($\text{kg}/100 \text{ m}^2$ und Monat), sondern in g/m^2 und Tag angegeben werden. Es werden folgende Grenzwerte vorgeschlagen:

	LIESEGANG-LÖBNER g/m^2 und Tag	BERGERHOFF g/m^2 und Tag
a) im allgemeinen:		
Jahresmittelwert	0,32	0,42
Monatsmittelwert	0,50	0,65
b) in Industriegebieten:		
Jahresmittelwert	0,65	0,85
Monatsmittelwert	1,00	1,30

Rechnet man die auf das Liesegang-Löbner-Gerät bezogenen Werte durch Multiplikation mit 3000 in $\text{kg}/100 \text{ m}^2$ und Monat um, so erhält man folgende Werte:

a) im allgemeinen:

Jahresmittelwert (abgerundet)	1,0 $\text{kg}/100 \text{ m}^2$ und Monat
Monatsmittelwert (abgerundet)	1,5 $\text{kg}/100 \text{ m}^2$ und Monat

b) in Industriegebieten:

Jahresmittelwert (abgerundet)	2,0 kg/100 m ² und Monat
Monatsmittelwert (abgerundet)	3,0 kg/100 m ² und Monat

Nach der Richtlinie ist ein Staubfall dann noch als zumutbar anzusehen, wenn er im allgemeinen (außerhalb von Industriegebieten) im Mittel über ein Jahr (d.h. aus zwölf einzelnen Monatsmessungen) den Wert von 1 kg nicht überschreitet, in den einzelnen Monaten dieses Jahres darf er allerdings 1,5 kg erreichen. Entsprechendes gilt für Industriegebiete, in denen der Staubfall mit 2,0 bzw. mit 3,0 kg je 100 m² und Monat begrenzt wird. Die Bezugsgrößen in kg je 100 m² und Monat sind dem größten Teil der Experten geläufiger, weshalb sie hier nochmals angegeben worden sind; sie tragen auch zu einem besseren Verständnis der neuen Zahlenwerte bei. In dem Monatsmittelwert von 3,0 kg je 100 m² und Monat erkennt man den alten LIESEGANGSchen Wert, der jetzt aber nur noch als maximal zulässiger Monatsgrenzwert für Industriegebiete angesehen wird. Die auf das Bergerhoff- (Landesanstalts-) Gerät bezogenen Grenzwerte sind naturgemäß höher als die auf das Liesegang-Löbner-Gerät bezogenen, da, wie bereits in 6.1 erwähnt wurde, bei Vergleichsmessungen höhere Staubniederschläge gemessen werden. Der Umrechnungskoeffizient Liesegang-Löbner zu Bergerhoff beträgt 1,3. Durch die im September 1964 herausgekommene Technische Anleitung (Gemeinsames Ministerialblatt Ausg. A 15. Jg. Nr. 26 vom 14. September 1964) haben diese Werte Gesetzeskraft.

Im Ausland sind Normen des Staubfalles nur in einem einzigen Fall festgelegt worden, und zwar in Oregon, USA: Dort unterscheidet man ebenfalls zwischen Wohn- und Geschäftsgebieten einerseits und Industriegebieten andererseits, für die ein Staubfall von 0,6 bzw. 1,73 kg je 100 m² und Monat zugelassen sind (15 t/sqmile/mo und 45 t/sqmile/mo). Wenn auch diese Werte mit unseren nicht direkt verglichen werden können, so ist doch bemerkenswert, daß sie sich in gleichen Größenordnungen bewegen.

Einige Gesichtspunkte, die für die Normung des Schwebstaubes maßgebend sind, sind bereits früher erwähnt worden. Neben dem Gesamtschwebstaub soll auch der höchstzulässige Anteil unter 5 µm festgelegt werden. Vom humanmedizinischen Standpunkt aus interessiert auch die Anzahl der Partikel in cm³, die in der Gewerbehygiene eine ausschlaggebende Rolle spielt. Normen dafür werden in Deutschland zur Zeit erarbeitet.

Im Ausland gibt es wiederum in Oregon, USA, eine Norm für Wohngebiete und eine für Industriegebiete, die eine maximale Konzentration von 0,15 bzw. 0,25 mg/m³ vorsehen. In der Sowjetunion erfolgte die Normung nach einem anderen Gesichtspunkt; hier setzte man Konzentrationen fest, die der Bevölkerung a) auf die Dauer und b) kurzzeitig zugemutet werden können. Der Wert für die Langzeitkonzentration (Mittelwert über 24 Stunden) beträgt 0,15 mg/m³, der für die Kurzzeitkonzentration (Probenahme über 2 Stunden) 0,5 mg/m³. Vom hygienischen Standpunkt aus werden Orte, die über 24 Stunden eine höhere Verstaubung als 0,15 mg/m³ aufweisen, und Orte, die einmal innerhalb von 24 Stunden eine kurzzeitige Verstaubung von mehr als 0,5 mg/m³ haben, als sanierungsbedürftig angesehen.

Für Ruß, für den die gleichen sanitären Regeln gelten, liegen niedrigere Normen vor, und zwar beträgt der Kurzzeitwert 0,15 und der Langzeitwert 0,05 mg/m³. — Sehr großes Interesse für Normungen des Schwebstaubgehaltes der Luft in den einzelnen Ländern zeigt die Weltgesundheitsorganisation, die eine internationale Standardisierung der Werte herbeizuführen bestrebt ist. We-

niger interessiert zeigt sich diese Organisation an der Normung des Staubniederschlags, den man für weniger bedeutsam hält als den Schwebestaub.

8. Meßergebnisse

8.1 Staubniederschlagsmessungen

Sowohl im Ausland als auch in Deutschland liegt eine größere Anzahl von Messungen vor, die viele Jahre hindurch vorgenommen worden sind. Die folgende Gegenüberstellung zeigt, mit welchen Staubfällen im allgemeinen zu rechnen ist:

Charakter des Meßortes	Mittlerer monatlicher Staubniederschlag in g/100 m ²
Ländliche Gegend	bis 320
Gute Wohnlage (Villenvorort von Berlin)	300 bis 600
Großstadt ohne wesentliche Industrie (Berlin Stadtmitte)	600 bis 1200
Industriestädte im Mittel	2000 bis 2500

Staubmengen von mehr als 2 kg/100 m² und Monat fallen in ausgesprochenen Industriestädten, aber auch dort zum Teil sehr eng begrenzt, was mit der relativ schnell erfolgenden Sedimentation im Zusammenhang steht. Man kann selbst in einer Stadt mit stark staubemittierenden Betrieben größere Flächen finden, die relativ wenig beaufschlagt sind. Selbstverständlich haben auch die meteorologischen Verhältnisse einen Einfluß auf die Verteilung des größeren Staubes; er ist jedoch nicht so groß wie bei dem im Schwebezustand befindlichen Staub, der sich in der atmosphärischen Luft bei ungünstigen Bedingungen kumuliert. Eine Kumulierung des groben Staubes in der Luft gibt es praktisch nicht.

Im allgemeinen ist heute die Tendenz der Beaufschlagung durch sedimentierenden Staub in Industriegebieten trotz der in den letzten Jahren sehr stark angestiegenen Produktion von Gütern und der Erweiterung der Industriewerke eher ab- als zunehmend. Das ist ein erfreuliches Zeichen. Selbstverständlich sind noch nicht alle Werke mit Staubabscheidern ausgerüstet, insbesondere die älteren nicht, aber auch sie werden in absehbarer Zeit damit versehen sein. Die technischen Probleme, den Grobstaub aus industriellen Abgasen abzuscheiden, können als gelöst betrachtet werden. Oftmals machen der Platzmangel und die Finanzierung noch immer erhebliche Schwierigkeiten, zumal neben den verhältnismäßig teuren Reinigungsanlagen häufig umfangreiche Umbauten der Produktionsstätten erforderlich sind.

8.2 Schwebestaubmessungen

Die jahreszeitlichen Unterschiede des Schwebestaubgehaltes der Luft treten sehr viel deutlicher in Erscheinung als die der Staubniederschläge. Dies ist den besonderen Eigenschaften dieser Staubfraktionen zuzuschreiben, die in bezug auf das Verhalten in der atmosphärischen Luft den gasförmigen Stoffen, wie SO₂, Nitrose u. a., näher stehen als den größeren Staubpartikeln. Feinster Schwebestaub wird nicht allein aus Industriewerken emittiert, einen großen Teil tragen auch Hausbrand und Kleingewerbefeuierungen bei. Statistische Auswertungen der Meßergebnisse des Amerikanischen National Air Sampling Network haben

eine ausgesprochene Abhängigkeit der Luftverunreinigung durch Schwebestaub von der Größe der Städte ergeben.

Tabelle 4

Schwebestaubgehalte der atmosphärischen Luft in Abhängigkeit von der Einwohnerzahl.

Einwohnerzahl	Anzahl der Städte	Anzahl der Proben	Schwebestaubgehalte der Luft in Mikrogramm (μg) je Kubikmeter (m^3)								
			Minimum	Häufigkeitsverteilung in Prozent					Maximum	Mittel	
				10	30	50	70	90		arithmetisches	geometrisches
3 Millionen und mehr	2	216	65	105	148	175	213	281	714	189	176
1 bis 3 Millionen	3	368	48	90	121	156	196	274	594	169	154
700 000 bis 1 Million	7	846	14	59	93	122	162	233	658	136	119
400 000 bis 700 000	19	2133	15	58	85	112	145	216	977	129	113
100 000 bis 400 000	87	6353	10	49	74	100	133	204	1706	117	101
50 000 bis 100 000	60	3511	6	45	69	92	126	212	978	115	96
25 000 bis 50 000	8	779	10	29	49	69	97	151	487	84	69
10 000 bis 25 000	4	288	11	26	43	62	88	155	466	80	63

Dieser Tabelle ist u. a. eine eindeutige Abnahme der mittleren Konzentrationen an Schwebestaub mit kleiner werdenden Städten zu entnehmen. Ländliche Gegenden haben nach Ergebnissen derselben Untersuchungen einen mittleren Schwebestaubgehalt von $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Sehr aufschlußreich erscheinen auch die Ergebnisse der Messungen in Paris. Diese Stadt, die keinerlei Großindustrie beherbergt, hat zwei rauchlose Zonen und eine „rauchlose Stadt“ (Boulogne-Billancourt), die ausgesprochen wenig Emittenten haben. Es sollte eigentlich erwartet werden, daß besonders Boulogne-Billancourt wesentlich niedrigere Verstaubungen aufzuweisen hat als das Zentrum von Paris selbst. Der Verstaubungsgrad liegt zwar geringfügig niedriger, er folgt aber im allgemeinen der ab- und aufsteigenden Tendenz des Stadtzentrums. 1961 sind in Paris folgende Minima und Maxima gemessen worden:

Tabelle 5

Minima und Maxima des Schwebestaubes in Paris.

Zeitintervall	Schwebestaub in μg je m^3	
	Minima	Maxima
Tagesmittel	um 20	um 600
Monatsmittel	um 50	um 200

Maximale Tagesmittelwerte der Größenordnung von $600 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kommen also auch in Gegenden vor, in denen man sie gar nicht vermuten würde. Dieser hohe Verstaubungsgrad kann einzig und allein auf die zur Zeit der Beaufschla-

gung herrschende Großwetterlage zurückzuführen sein, während der sich die Schadstoffe in der Luft über eine längere Zeit anhäufen konnten.

Der mittlere monatliche Gang folgt ebenfalls der Wetterlage; die Konzentrationen sind im Sommer wesentlich niedriger als im Winter.

Tabelle 6

Mittlere monatliche Schwebstaubkonzentrationen in Paris im Jahre 1961.

Monat	Mittlere Schwebstaubkonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Monat	Mittlere Schwebstaubkonzentration in $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Januar	185	Juli	68
Februar	169	August	(53)
März	168	September	120
April	76	Oktober	105
Mai	75	November	161
Juni	80	Dezember	160

Jahresmittel 116

Wie die Pariser Messungen des Jahres 1961 zeigen, kann die Variationsbreite der Werte von unter 20 bis über 600 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ sehr groß sein. Die täglichen und monatlichen Schwankungen weisen auch eine Parallelität mit den SO_2 - und CO_2 -Konzentrationen auf, was die bereits hier ausgesprochene These, wonach der Schwebstaub in seinem Verhalten in der atmosphärischen Luft mehr den gasförmigen Stoffen als dem Sedimentstaub ähnlich ist, bestätigt.

Durch routinemäßige, d. h. regelmäßige Pegelmessungen sind in England auch interessante Konzentrationen während Smogperioden gemessen worden. Diese Perioden sind nicht so selten, wie im allgemeinen angenommen wird, sie führten auch verschiedentlich zu Katastrophen mit erhöhten Todesraten der Bevölkerung. Zu den wichtigsten Luftkatastrophen zählen: London 1873, 1880, 1891, 1948, 1952 (4000 Tote), 1956 (1000 Tote), 1962; Glasgow 1909; Manchester und Salford 1930/31, Maastal 1930, Donora 1948. Die Bildung von Smog ist nicht zuletzt auf eine kumulative Anhäufung von Schwebstaubteilchen zurückzuführen. Während solcher Perioden sind Spitzenkonzentrationen bis zu 10 mg/m^3 (das sind 10 000 μg) gemessen worden. Durch laufende Kontrollen konnte festgestellt werden, daß Smogerscheinungen bei Konzentrationen von etwa 1,7 bis 2 mg/m^3 an auftreten, wobei auch andere Bedingungen, wie ein erhöhter SO_2 -Gehalt der Luft und die Feuchtigkeit (Nebel), eine sehr wichtige Rolle spielen. Staubkonzentrationen dieser Größenordnungen müssen daher bereits als gefährlich angesehen werden.

Von den in der Sowjetunion durchgeführten Messungen sind besonders diejenigen interessant, die in stark verstaubten Gegenden unter dem Winde stark emittierender Werke durchgeführt werden. Diese Messungen dienen meist dem Ziel, den hygienischen Einfluß festzustellen, den diese Werke auf ihre Umgebung ausüben; sie werden außerdem unter extrem ungünstigen Witterungsbedingungen durchgeführt. Die hier gefundenen Werte liegen mit bis zu 50 mg/m^3 sehr hoch, doch sei ausdrücklich betont, daß es sich bei diesen Messungen nicht um Pegelmessungen, sondern um gezielte Messungen handelt.

Schlußbetrachtungen

Stellt man sich nun die Frage, ob das Staubproblem, wie viele annehmen, bereits gelöst ist, so kann man darauf mit „ja“ und mit „nein“ antworten. Das Grobstaubproblem kann zwar als gelöst betrachtet werden, nicht aber das Feinstaubproblem. Wir verfügen zwar bereits über technische Abscheidevorrichtungen, mit denen nahezu jeder gewünschte Reinigungsgrad von industriellen Abgasen erzielt werden kann, in praxi wird jedoch eine Reinigung auf Staubgehalte unter 150 mg/Nm^3 (was die Industrie ohnehin als sehr scharfe Forderung ansieht) nie verlangt. Der aus einem Staubgemisch zur Abscheidung gelangende Staub besteht in der Hauptsache aus dem relativ groben Korn, die feinen und allerfeinsten Teilchen verbleiben im Abgas. Bei größeren Anlagen, die z. B. je Stunde $1\,000\,000 \text{ Nm}^3$ Luft auswerfen, beträgt die Emission auch bei maximalen Forderungen der Behörden (Reingasstaubgehalt 150 mg/m^3) je Stunde 150 kg . Ein neu zugelassenes Werk dieser Größe würde demnach gerade mit dem als bedenklich anzusehenden Staub die Atmosphäre nicht unwesentlich mehr verunreinigen. Auch die stets zunehmende Urbanisierung und ansteigende Verkehrsdichte lassen erwarten, daß im Gegensatz zum Staubbiederschlag, bei dem eine Abnahme zu verzeichnen ist, die Schwebstaubbelastung eher zunehmen wird. Mit dieser Erkenntnis ist das Grobstaubproblem zugunsten des Feinstaubproblems zurückgetreten. Es ist auch zu erwarten, daß die zur Zeit in einem großen Maßstab durchgeführten Staubbiederschlagsuntersuchungen zugunsten von Schwebstaubuntersuchungen eine gewisse Einschränkung erfahren werden.

Literatur

1. VDI-Richtlinie 2104, Begriffsbestimmungen, Mai 1962.
2. VDI-Richtlinie 2119, Staubbiederschlagsmessungen, September 1962.
3. VDI-Richtlinie 2305 MIK, Niederschlag inerter Stäube (Entwurf), Mai 1964.
4. MAGA, J. A., and J. R. GOLDSMITH: Standards for Air Quality in California. Journ. Air Poll. Contr. Ass. 10 (1960), S. 453.
5. Air Pollution Measurements of the National Air Sampling Network. Analyses of Suspended Particulates 1957—1961. US Department of Health, Education and Welfare, Public Health Service, Cincinnati, Ohio, 1962.
6. Surveillance de la Pollution Atmosphérique dans le Département de la Seine pendant l'Année 1961. Imprimerie municipale, Hôtel de Ville, 1963.
7. LANGMANN, R., und H. KETTNER: Schwebstaubgehalt der Luft in Mülheim. Ges.-Ing. 84 (1963), H. 8, S. 247/250.
8. HELLER, A.: Verfahren zur Untersuchung der Außenluft und deren Bedeutung für die Lufthygiene. Schriftenreihe des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene Nr. 10 (1955), S. 27—38.
9. LÖBNER, A.: 10 Jahre Regenwasseranalyse — ein Beitrag zur Ortsüblichkeit von Staubbiederschlägen. Ges.-Ing. 70 (1949), H. 11/12, S. 196/200.
10. LIESEGANG, W.: Die Bedeutung der chemischen Luftuntersuchung für die gewerbe-
polizeiliche Genehmigung von Industrieanlagen. Kl. Mitteilungen des Vereins für Wasser-, Boden- und Lufthygiene 12 (1936), Nr. 14/15, S. 395/413.
11. — —: Der Flugascheauswurf vom Standpunkt des Nachbarnschutzes. Staub 1953, H. 31, S. 29—36.
12. The Investigation of Atmospheric Pollution. Tables of Observations for the Year Ended 31st March 1962. Warren Spring Laboratory, Stevenage, England.
13. BREUER, H.: Gewerbehygienische Eigenschaften des Staubes am Arbeitsplatz des Bergmanns. Staub 22 (1962), Nr. 11, S. 444/451.

14. CARTWRIGHT, H., and G. NAGELSCHEIDT: The size and shape of dust from human lungs and its relation to relativ sampling. Proceedings of an International Symposium organized by the British Occupational Hygiene Society. Pergamon Press, Oxford 1961, S. 445/452.
15. SCHLIPKÖTER, H.-W., A. BRÖCKHAUS und R. DOLGNER: Das Problem der staubförmigen Luftverunreinigungen in medizinischer Sicht. Med. Welt 1963, S. 937 bis 941.
16. EFFENBERGER, E.: Ein einfaches Registriergerät für das Grobaerosol (Staub) und dessen Eichung. Staub 52 (1957), S. 715—728.



03AB360011