

3. Sandstudien.

(Vorläufiger Bericht.)

VON PETER TREITZ.

(Mit 4 Abbildungen im Texte.)

Unsere Laboratorien für Materialprüfung haben zum Zweck der Festigkeitsprüfung der Cemente ihr Material bisher aus Österreich bezogen. Da aber die Beschaffenheit des dorther erhaltenen Sandes sich zeitweise sehr verschieden zeigte, erschien es wünschenswert, innerhalb unserer Landesgrenzen Sandgruben aufzuschließen, aus denen man ein Material gewinnen könnte, welches dem aus Galizien bezogenen Normalsand in jeder Hinsicht gleichwertig wäre, wodurch es dann möglich wäre, bei strenger Beaufsichtigung der Sandgruben, aus einheimischem Material einen Normalsand von beständig gleicher Beschaffenheit zu gewinnen.

Die Bauabteilung des Vereines der Materialprüfer richtete ein Ansuchen an die Direktion der kgl. ungar. geologischen Reichsanstalt diesbezügliche Bestrebungen ihrerseits bei der wissenschaftlichen Untersuchung der Sandproben zu unterstützen. In voller Würdigung der Wichtigkeit dieser Frage beeilte sich die Direktion unserer Anstalt durch Vermittelung der kgl. ungar. Industrieinspektion Sandproben zu erhalten, und als sie auf diesem Wege in Besitz von 16 Proben gekommen war, wurde ich mit deren Untersuchung betraut. Der Zweck dieser Untersuchungen war nachzuweisen, welche einheimische Sandgrube ein geeignetes Material für Normalsand liefern könne.

Ehe ich zur Mitteilung dieser Sandanalysen schreite, wird es angezeigt sein, die wichtigsten Merkmale eines Normalsandes und deren Relation zu den allgemeinen Eigenschaften der Sande festzustellen, um auf Grund dieser Erkenntnis ein Gutachten in der Frage geben zu können, in wie weit die eingesendeten Sandproben zur Herstellung von Normalsand geeignet erscheinen.

Ungarische Sandarten.

Das Material unserer einheimischen Sandgruben läßt sich seinem Ursprung nach in zwei Gruppen einteilen, nämlich: 1. tertiäre, 2. quartäre Sande.

Die Sande der Tertiärzeit sind größtenteils Flußablagerungen. Es gibt darunter scharfe Sande vom Grunde der Flußbetten, Sande mit abgeschliffenen Kanten aus Uferdünen und auf Inundationsgebieten abgelagerte und nach ihrer Austrocknung im Winde abgerollte, perlartig gekörnte Flugsande. Die Produkte dieser drei Entstehungsarten sind Sandarten von sehr verschiedenen materiellen Eigenschaften. Die Unterschiede werden vorzüglich durch die Verschiedenheit der Agentien bedingt, welche den Transport des Sandmaterials bewirkt haben. Der Sand kann nämlich einmal durch die Bewegung der Gletscher, ein anderesmal durch fließendes Wasser, ein drittesmal durch Winde getrieben werden, und je nach dem jeweiligen bewegenden Mittel, werden die Eigenschaften der Sandkörner verschieden sein. Die Verschiedenheit bezieht sich

1. auf die mineralogische Zusammensetzung des Sandes,
2. auf die Gestalt der Sandkörner,
3. auf die Dichtigkeit ihrer Packung,
4. auf die Rindenbildung der Sandkörner.

Die letztere Eigenschaft ist es vornehmlich, die je nach der Art der Entstehung große Unterschiede zeigt.

Auch in den Eigenschaften der Sandablagerungen selbst äußert sich die Verschiedenheit der Entstehungsart an gewissen Merkmalen, die in jeder Sandgrube zu erkennen sind und Aufklärung über die Bildung des Sandes geben. Da jedoch letztere Hinsicht für die Frage des Normalandes nicht von Belang ist, will ich hier nicht näher auf die Entstehungsart eingehen, sondern mich nur mit den obgenannten Eigenschaften der Sande und deren Abänderungen befassen.

Die mineralogische Zusammensetzung der Sande.

Unter den Sandkörnern finden sich alle Mineralien wieder, welche in der Zusammensetzung der Gesteine eine Rolle spielen. Je größer die Mannigfaltigkeit der Gesteine im Sammelgebiet eines Flusses ist, umso artenreicher ist der Sand, den er fördert.

Die Zahl der Mineralspezies eines natürlichen Sandes nimmt mit der Zunahme der Korngröße ab. Der Sand, welcher durch ein Sieb, das

eine Maschenweite von 1 mm hat, nicht durchfällt, enthält gewöhnlich wenig Mineralarten, meist nur Körner von Feldspath, Glimmerschuppen und wenige Granatkörner dem überwiegenden Quarz beigemischt. Je näher dem Ursprungsgebirge der Sand abgelagert ist, umso artenreicher ist sein Gemenge; im Verhältnis zur Entfernung nimmt die Zahl der Arten ab. So z. B. besteht der Sand der Donau unterhalb Budapest aus sehr vielerlei Mineralien. Dr. A. Vendl¹⁾ hat den zwischen der Margaretheninsel und dem Quai von Ujlak aus dem Flußbette gebaggerten Sand auf seine mineralogische Zusammensetzung untersucht und darin folgende Species, nach den Krystallsystemen geordnet, gefunden:

Amorph: Opal.

Regulär: Granat (Almandin), Magnetit.

Hexagonal: Quarz, Calcit (Dolomit), Apatit, Turmalin.

Tetragonal: Zirkon, Rutil.

Rhombisch: Hypersthen, Staurolith, Olivin, Cordierit.

Monoklin: Amphibol (Actinolit), Augit, Biotit, Muskovit, Chlorit, Epidot, Orthoklas.

Triklin: Mikroklin, Plagioklas, Disthen.

Insgesamt 23 Mineralspecies.

Dem spezifischen Gewicht nach lassen sich die Sandkörner in folgende Gruppen und Prozentsätze sondern:

Quarz (Kalifeldspath-, Opal)-Gruppe	12·1%	mt. sp. G.	< 2·651
Quarz-Gruppe	73·2%	" " "	2·651
Quarz-Calcit-Glimmer-Gruppe . .	13·5%	" " "	2·651—3·035
Granat-Amphibol-Zirkon-Gruppe . .	1·2%	" " "	> 3·035

Diesem artenreichen Sand gegenüber zeigt sich der Sand aus dem Flußbette der Tisza, zwischen Szeged und Szentés oberhalb der Einmündung der Maros, recht arm an Mineralarten; nebst Quarz, Feldspath, Granat und Muskovit hat er kaum noch ein anderes Mineral aufzuweisen.

Der große Reichtum an Mineralarten, der die meisten Flußsande auszeichnet, ist eine der Ursachen, weshalb eben dieses Material zur Bestimmung des Festigkeitsgrades der Cemente weniger geeignet ist.

Weit weniger Mineralarten enthalten die in Seen und Meeren abgelagerten Sande, weil auf dem langen Wege den das Sandmaterial von seinem Ursprungsort bis zur definitiven Ablagerung zu durchlaufen hatte,

¹⁾ A. Vendl: Adatok a Duna homokjának ásványtani ismertetéséhez. Budapest, 1910.

die weniger widerstandsfähigen Mineralien größtenteils zugrunde gegangen sind. Nur die schwer zersetzbaren Mineralkörner, wie Quarz, Glimmer, Granat, Feldspath usw. konnten sich bis dahin erhalten. Daher fehlen in solchen Sanden Körner von Carbonaten des Kalkes und der Magnesia, die ja bekanntlich in kohlenensäurehaltigem Wasser löslich sind und auch infolge ihrer geringeren Härte von den anderen Körnern, namentlich von den stets stark überwiegenden Quarzkörnern starken Schliff zu erleiden haben, so daß schließlich nur ihre ganz feinen Reste übrig bleiben und sich mit den Tonteilen vermischen.

Hingegen begegnen wir in den Sanden des Meeresstrandes, welche zum großen Teil durch die Wellenbrandung erzeugt werden, dort, wo an den Ufern Kalkfelsen und Dolomit anstehen, viele Kalkkörner, die zum Teil auch von zerriebenen Muschel- und Schneckengehäusen herkommen.

Die Flußsande sind oft kalkleer, besonders wenn im Sammelgebiete der Flußwässer keine Kalkfelsen anstehen. So enthält z. B. der Sand des Tiszaflusses oberhalb der Maroseinmündung keine Kalkkörner, aber die Maros führt deren viele und übergibt sie auch dem Unterlaufe der Tisza.

Ganz reinen oder doch 98—99% Quarz enthaltenden Quarzsand hat man bisher nur in Meeresablagerungen gefunden. Auf den Vorgang, welcher zu einem so hohen Reingehalt führt, werfen die Sandablagerungen, die man im Untergrunde der Sphagnumtorfe findet, einiges Licht. Im Torflager wirkt die säurehaltige Feuchtigkeit bei genügend langer Einwirkung, auflösend auf fast alle Mineralkörner, die nicht Quarz sind, und nur die letzteren bleiben übrig. In den Sphagnummooren findet man häufig unter dem Torf reinen Quarzsand; dieser ist dann immer aus gewöhnlichem Sand durch die Einwirkung der sauren Torfwässer entstanden.

Wenn ein schon teilweise zersetzter Sand nachträglich durch fließendes Wasser wieder in Bewegung gesetzt wird, werden sich im Laufe des Transportes die durch teilweise Lösung kleiner gewordenen Körner von den unzersetzten Quarzkörnern mechanisch absondern, da letztere vermöge ihres größeren Volumens und Gewichtes schon dort zum Absatz gelangen, wo die Strömung die verminderten Gemengteile noch weiterführt. Durch eine solche Umlagerung kann also in manchen Flußbetten oder am Rande eines größeren See's eine reine Quarzsandablagerung entstehen.

Auf diese Weise ist wohl in den Tiefebenen Norddeutschlands jenes mächtige Sandlager entstanden, aus welchem der deutsche Normalsand gewonnen wird.

In Ungarn finden sich unter den tertiären Sandablagerungen auch einige mit 96—99% Quarz, allein deren Korngröße ist so gering, daß sie für den Gebrauch als Normalsand untauglich sind.

Die Entstehung des Flugsandes.

In den Überschwemmungsgebieten der Flüsse werden Kiese und Sande abgelagert, die dann im Sommer, sowie auch im Winter, bei geringem Wasserstand trocken liegen. Dort, wo die Strömung des Hochwassers stark genug war um die Feinteile weiter zu führen, bleibt an der Oberfläche nur das gröbere Material zurück. In den Böden, die auf solche Weise entstanden sind, finden die keimenden Pflanzensamen keine günstigen Lebensbedingungen und gehen daher bald zugrunde. Diese Sandablagerungen bleiben in der trockenen Jahreszeit ohne Pflanzendecke und werden daher, sobald sie durch die Hitze ausgetrocknet und gelockert worden sind, von den Winden leicht bewegt und werden allmählich zu Flugsand.

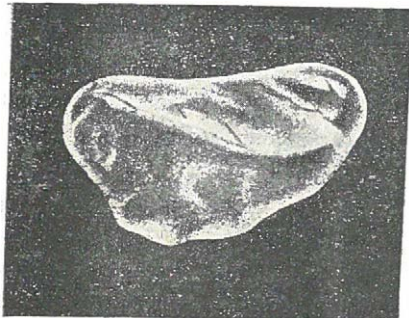
In Ungarn gibt es vier große und mehrere kleine Gebiete, in denen der auf diese Weise entstandene Flugsand vorherrscht; es sind dies: 1. Das Flugsandgebiet zwischen Donau und Tisza, 2. die Nyírség (Komitat Szabolcs), 3. die Sandwüste von Deliblat und 4. die sandigen Streifen im Komitate Somogy.

Vom einfach unter Wasser abgelagerten Sand unterscheidet sich der Flugsand durch charakteristische Merkmale. Im Sande der Überschwemmungsgebiete und der See'n, sowie auch des Meeres findet man immer Glimmerschuppen, oft in großer Menge, im Flugsande hingegen fehlen sie, denn indem bei der Bewegung des Flugsandes in der Luft die Körner aneinander stoßen, werden die weichen und leicht spaltbaren Glimmerschuppen bald zu ganz winzigen Partikeln zerrieben, die der Wind viel weiter führt, als den Quarzsand, und erst später mit anderem Mineralmehl vermischt sinken läßt. So wird aller Glimmer aus dem Flugsand ausge-reutert und den Lößablagerungen am Rande der Sandzone einverleibt. Beobachtungen, welche ich im Gebiete zwischen der Donau und der Tisza angestellt habe, haben mich gelehrt, daß der Flugsand, welcher vom Winde getrieben eine Strecke von 10 Kilometer zurückgelegt hat, seinen Glimmergehalt schon ganz eingebüßt hat.

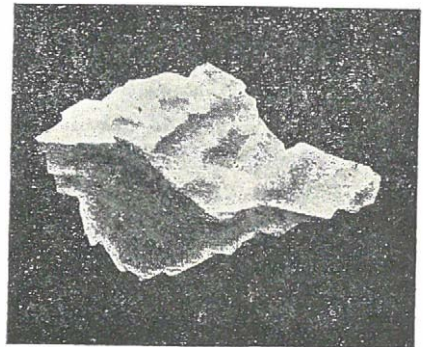
Morphologie der Sandkörner.

Die Gestalt der Sandkörner ist je nach ihrer Entstehung verschieden: die im Wasser gebildeten Körner haben Kanten und Ecken, wogegen die Körner des Flugsandes abgeschliffen und zum großen Teil perlartig abgerundet sind.

Typisch fragmentarische Gestalten haben die durch Gletscher geförderten Sandkörner; sie weisen die schärfsten Kanten und die geringsten Spuren des Schliffes auf. Sobald aber das Wasser den Detritus in Arbeit nimmt, müssen Kanten und Ecken verschwinden. Zuerst werden die größeren Gesteinsbrocken abgerundet, allmählich dann auch die Kanten der Sandkörner abgeschliffen.



a) Sandkorn eines österreichischen Normalsandes.



b) Sandkorn aus zerstampfem Quarz.

Figur 1.

Die im fließenden Wasser abgerundeten Sandkörner haben immer einen Durchmesser von mehr als $1\frac{1}{2}$ mm, denn kleinere Fragmente erhält die Strömung mehr-weniger schwebend, so daß sie während des Transportes nicht abgerieben werden. Findet man also in einem Sande abgerundete Körner von weniger als 1 mm Durchmesser, so kann man sicher sein, daß diese zuerst im Trockenen mit dem Wind eine weite Strecke gewandert sind und, nachdem sie auf diese Weise abgerundet worden, nachträglich in die Sandablagerung gelangten.

Die Körner des Flugsandes schwanken zwischen 1 mm und 0.1 mm, denn über 1 mm große Körner kann höchstens ein starker Sturm forttragen. Auch im Winde werden zuerst die größeren Körner abgeschliffen, je weiter aber der Weg ist, den der Flugsand an der Luft zurücklegt,

umso mehr werden auch die kleineren Körner, bis zu den winzigsten herab zu Perlen abgerundet.

Eine besondere Folge des Transportes an der Luft ist äußerst bemerkenswert, wo es sich um Sandmaterial für die Prüfung der Cemente handelt. Jedes Sandkorn ist nämlich schon bei seiner Entstehung von zahlreichen Sprüngen durchsetzt, da es ja ursprünglich ein Fragment eines Gesteines war. Das mit Sprüngen behaftete Korn verhält sich aber im fließenden Wasser ganz anders, als wenn es an der freien Luft rollend fortbewegt wird; ein Gesteinsfragment, welches im Wasser schwebend fortbewegt wird, kann zum endlichen Absatz gelangen, ohne daß sich seine Sprünge vergrößern, es bleibt also von Sprüngen durchzogen. Wenn hingegen ein Sand vom Winde fortgerollt wird, stoßen seine Körner fortwährend aneinander, wobei das Gewicht jedes Kornes zur vollen Wirkung kommt. Durch die unzähligen Stöße und Schläge werden die Sprünge im Korn erweitert, dringen tiefer ein und bewirken zuletzt ein Zerfallen des Kornes in mehrere Stücke, bis daß nur solche Fragmente ganz bleiben, welche keine oder doch nur unbedeutende Sprünge besitzen. Die durch diese Zertrümmerung entstandenen kleineren Fragmente reißt der Wind mit sich und bläst sie aus dem gröberen Sand aus.

Demnach unterscheiden sich die Körner des Flugsandes von den im Wasser gebildeten Sandkörnern nicht nur in ihrer äußeren Gestalt, sondern auch in ihrer inneren Struktur. Die Wassersande haben Körner mit scharfen Kanten und Ecken, im Inneren aber vielfache Sprünge und Risse; beim Flugsand sind die Körner größtenteils wie Perlen abgerundet und im Inneren frei von Sprüngen. Dieser morphologische Unterschied hat für die Festigkeitsproben der Cemente eine entscheidende Bedeutung. Denn während vom gesunden Flugsand jedes Korn, seiner Größe entsprechend, seinen vollen Wert zur Festigkeit der Cementprobe beiträgt, wird bei Anwendung von Flußsand diese Festigkeit durch die in den Sandkörnern vorhandenen Sprünge herabgemindert.

Figur 1. zeigt in starker Vergrößerung den gestaltlichen Unterschied zwischen den beiden Arten von Sandkörnern. Das Sandkorn a) stammt aus Flugsand und läßt die abgerundete Gestalt, die glänzend abgeschliffene Oberfläche und den Mangel an inneren Sprüngen erkennen. Das andere Korn (b) ist ein künstlich erzeugtes Quarzfragment, an welchem man scharfe Kanten und Ecken sieht, indess die inneren Risse in der Zeichnung nicht dargestellt werden konnten.

Die Kruste der Sandkörner.

Jedes Mineralfragment überzieht sich mit einer dünnen Kruste, deren chemische Zusammensetzung von der des Mineralen oft ganz verschieden ist. Diese Rinde kann sich auch während des Transportes im Wasser oder an der Luft auf der Oberfläche der Sandkörner bilden. Das hauptsächlichste Agens ihrer Bildung ist das Wasser, das schon für sich allein viele Mineralien angreifen kann; da aber das Wasser der Flüsse und Bäche immer schon gewisse Stoffe in Lösung führt, so handelt es sich hier meistens nicht um eine einfache Lösung, sondern es treten verwickelte chemische Wechselwirkungen auf, deren Endresultat dann die Rindenbildung ist.

Auf der Oberfläche der Körner des Flugsandes wird die Kruste durch die Niederschlagwässer, die ja auch immer Salzlösungen enthalten, erzeugt. Wo der Flugsand zur Ruhe gekommen ist, wird die Krustenbildung durch die Bodenfeuchtigkeit weiter geführt, denn auch in dieser sind immer gewisse Salzlösungen vorhanden, die das Mineral angreifen können, indem sie an der Oberfläche manche chemische Bestandteile auflösen und durch ihre eigenen ersetzen. Durch diesen Vorgang kann z. B. ein ganz kalkfreies Mineral Korn sich mit einer Rinde von Kalkhydro-silikat oder ein eisenfreies mit einer eisenhaltigen Rinde überziehen.

Derartige Überkrustung finden wir auf jedem Sandkorn, mögen wir es aus Erdschichten oder aus dem Ufersand eines Flußes oder aus einer Düne genommen haben. Die chemische Konstitution der Rinde ist jedesmal vom Klima abhängig, welches am Ursprungsorte des Sandkornes vorherrscht. Sie richtet sich nach dem chemischen Charakter des Wassers, welches die Rinde erzeugt hat. Da aber der Salzgehalt der Bodenfeuchtigkeit sowohl qualitativ wie quantitativ von dem örtlichen Klima abhängig ist, gestaltet sich die durch das Grundwasser erzeugte Rinde auch nach der Natur dieses Hauptfaktors der Bodenbildung.

Wir wissen, daß die Überkrustung der Sandkörner hauptsächlich aus einem Hydrosilikat von Alkalien besteht, an welches dann noch Kalk, Magnesia, Eisen und Mangan in wechselnden Verhältnissen gebunden sind. In Sanden aus humosen Erdschichten gesellen sich noch organische Verbindungen dazu.

Die charakteristische Färbung der Sande hängt von der chemischen Zusammensetzung der Kornrinden ab, da ja der Hauptbestandteil der meisten Sande, der Quarz an und für sich farblos ist.

Je nach der Verschiedenheit der Klimazonen kann man im Großen und Ganzen an der Rindenbildung der Sandkörner folgende Unterschiede feststellen.

Die Sandablagerungen der klimatischen Waldzonen haben eisenhaltige Kornrinden, die den Sand meistens lebhaft gelb oder orange-gelb färben; nur die in tieferen Schichten liegenden Sande sind farblos.

In den klimatischen Zonen der Flurvegetation enthalten die Rinden gewöhnlich viel Kalk, ihre Farbe ist dann weiß oder grau. Natürlich ist auch hier eine Silikatrinde vorhanden und der Kalk ist dieser aufgelagert.

Die braune Farbe der Flugsande kommt von einer Überkrustung her, in welcher die Silikatrinde auch etwas organische Substanz enthält. Ein solcher Sand ist zur Cementbereitung nicht geeignet, weil die organische Substanz die Bindung des Cementes beeinträchtigt; beim Austrocknen würden die Sandkörner aus der Cementmasse herausfallen.

Im Flugsandgebiet zwischen Donau und Tisza ist es gebräuchlich die gegrabenen Brunnen mit Cementringen zu versteifen. Man muß dabei Vorsicht in der Auswahl des Sandes anwenden, denn nicht jeder Sand eignet sich dazu. Unter den Cementringen werden gewöhnlich einige sein, deren Festigkeit sich geringer erweist, obgleich alle Ringe nach gleichem Verfahren aus einer einzigen Cementmasse hergestellt worden sind; wenn ich aber die schlechteren Ringe untersuchte, konnte ich fast jedesmal feststellen, daß dieses mürbere Material mit Sand, der organische Substanzen und Eisenoxyd enthielt, bereitet worden war.

Auf die Bindigkeit des Cementes hat die Beschaffenheit der Silikatrinde der Sandkörner großen Einfluß: Kalk- und Eisenoxydulgehalt in den Silikaten vermehrt, Eisenoxyd und organische Verbindungen vermindern die Bindigkeit des Cementes.

Das Vorhandensein einer Überkrustungsrinde im Sande läßt sich sehr leicht nachweisen, indem man den Sand mit irgend einem basisch wirkenden Färbemittel, etwa Metylenblau oder Metylenviolett behandelt: der Farbstoff wird von der Rinde aufgenommen und verleiht dem Sande eine lebhaftere Färbung. Hat man aber vorher die Rinden durch chemische Mittel von den Sandkörnern entfernt, so wird der Sand ganz farblos und nimmt keinen Farbstoff auf, da der Quarz an und für sich dessen nicht fähig ist.

Von der Richtigkeit dieser Tatsache habe ich mich im Laboratorium wiederholt überzeugt. Ein Versuch, den ich mit dem Wiener Normalsand, der scheinbar aus ganz reinen, krystallklaren Körnern besteht, angestellt habe, ist besonders überzeugend. Dieser reine Sand, an welchem das Auge keine Krustenbildung wahrnimmt, zeigt sich, mit Färbemitteln behandelt, doch sehr empfänglich und nahm die Farbe lebhaft an. Wenn ich aber vorher die Rinde durch Fluorwasserstoff oder andere Säuren abgewaschen hatte, trat die Färbung nicht ein.

Aus dem Gesagten geht hervor, daß die meisten Eigenschaften der

Sande je nach der Art ihrer Entstehung sehr verschieden sind. Meeres- sande, Seesande, Flußsande sind auch untereinander nicht gleich, aber alle diese unterscheiden sich noch mehr von den trockenen Sandablagerungen, dem Flugsande und dem Material der Uferdünen.

Es hat demnach die geologische Bildungsweise in der Frage der Verwendbarkeit eines Sandes als Normalsand, ihr Wort mitzusprechen. Wir wollen zunächst die mineralogische Zusammensetzung und morphologische Ausbildung der gebräuchlichen Normalsande kennen lernen. Die Regeln für die Herstellung von Normalsand sind aber in den einzelnen Ländern sehr verschieden. Von den geforderten Eigenschaften der Normalsande in europäischen Staaten und in den Vereinigten Staaten von Nordamerika habe ich bisher folgende Kunde erhalten können.

Normalsand.

Die in verschiedenen Staaten gebräuchlichen Normalsande lassen sich in zwei Gruppen einteilen, in Natursande und künstlich erzeugte Sande. Nordamerika und Frankreich bereiten sich nämlich ihre Normalsande aus zerstoßenem Quarz, während die anderen Staaten dieselben durch Reinigung von Natursand erzeugen. Die natürlichen Sande werden entweder aus Flüssen oder an den Meeresküsten gewonnen, aber es gibt auch Normalsande, welche aus Sandablagerungen früherer geologischer Epochen hergestellt werden, deren Material also oft aus beträchtlicher Tiefe mit bergmännischer Arbeit zu beschaffen ist. Man erkennt leicht, daß ein Produkt, aus so verschiedenartigen Rohmaterial hergestellt, in seinen materiellen Eigenschaften auch nicht gleichartig sein kann. Und, in der Tat, haben die vergleichenden Versuche, welche mit diesen verschiedenen Sanden an ein und derselben Cementmasse angestellt worden sind, sehr verschiedene Resultate ergeben.

1. *Die Vereinigte Staaten von Nordamerika* verwenden für ihren Normalsand harten Quarz aus dem Staate Massachusetts, der fein zerstoßen und gesiebt, zwischen Netzen von 60 und 240 Maschen auf den Quadratcentimeter gewonnen wird.

2. *Frankreich* hat zweierlei Normalsande: die eine Art wurde ebenfalls durch Zerstoßen von Quarz aus den Steinbrüchen bei Cherbourg hergestellt, wobei Netze von 64 und 144 Maschen p. cm² die Korngröße begrenzten. Die zweite Art, der sog. Leucate-Sand, stammt aus den Pyrenäen, von wo ihn der Fluß Roussillon dem Meere zuführt; am Cap Leucate häuft sich der Sand in großer Menge an und wird hier ausgebeutet. Die Korngröße liegt zwischen 1.5 und 1 mm.

3. *In England* wurde das Material für Normalsand aus einer älte-

ren Ablagerung bergmännisch gewonnen und zwischen Netzen mit 64 und 120 Maschen p. cm² ausgesiebt.

4. *Die Schweiz* bereitet sich ihren Normalsand aus den Anschwemmungen der Aar. Dieser Sand ist mineralogisch sehr bunt zusammengesetzt, er enthält auch viel Kalkkörner, so daß sein Gehalt an kohlen-saurem Kalk auf 15% steigt. Nebstbei führt er auch viele andere Mineralien. Die Korngröße liegt zwischen den Zahlen 64 und 144.

5. *Norwegen* benützt ebenfalls Flußsand, der nach mehrfachem Auswaschen auf Netzen von 76, 124 und 256 M. p. cm² sortiert wird; hierauf werden die auf den Netzen 124 und 256 zurückgehaltenen Sande im Verhältnis 1:1 gemengt und als Normalsand verwendet.

6. Der Normalsand *Russlands* wird durch Netze von 64, 144 und 225 M. p. cm² gereinigt und die beiden letzteren Korngrößen in gleichem Verhältnis gemengt.

7. *In Deutschland* wird das Material für Normalsand aus tertiären Flußsandablagerungen gewonnen. Bei Stettin, im Bezirke der Stadt Freienwalde befindet sich ein Sandlager, dessen von fremden Mineralen ganz reiner Quarzsand die Chamottefabrik Henneberg und Co. zum Zweck der Herstellung von Normalsand ausbeutet.

8. *In Österreich* wird zu gleichem Zweck ein Sand von Glinsko bei Lemberg benützt. Die Sandgruben liegen im Tale der Skarzana, ihr Material hat zwar die erforderliche Reinheit, doch scheint seine Menge nicht genügend sicher, da es nur linsenförmige Einlagerungen in Ton-schichten sind.

Für Ungarn könnte in geographischer wie in ökonomischer Hinsicht nur das österreichische oder das deutsche Material in Betracht kommen, wesshalb wir die Eigenschaften dieser beiden Natursande, die übrigens auch in chemischer und mineralogischer Hinsicht die reinsten sind, eingehender betrachten wollen.

Der deutsche Normalsand.

Die deutschländische Vorschrift stellt folgende Anforderungen an die Eigenschaften eines Normalsandes:

1. In Bezug auf die mineralogische Zusammensetzung ist die Bedingung, daß der Sand zu 99% aus reinem Quarz bestehe. Diese Anforderung drückt schon eine präzise mineralogische Qualität aus, denn ein Sand, der 99% reinen Quarz enthalten soll, kann kein anderes Mineral-korn als Quarz enthalten. Aber auch die mineralogische Beschaffenheit der Kieselsäure ist dadurch auf Quarz beschränkt, denn wenn darunter

Opal in größerer Menge vorkäme, könnte der Prozentsatz an Kieselsäure nicht 99 betragen.

2. In Bezug auf die Gestalt der Körner wird gefordert, daß es ein scharfer Sand sei; das besagt, daß die Körner scharfe Kanten und Ecken haben sollen. Die Mitteilungen a. d. kön. techn. Versuchsanstalten, Berlin 1903, bringen eine Mikrophotographie solcher Körner, die deutlich erkennen läßt, daß an ihnen die geringsten Zeichen der Abschleifung fehlen.

3. Für die Korngröße wird als geeignetestes Maß vorgeschrieben, daß der Sand durch Siebe mit Löchern von 1.35 mm Durchmesser hindurchfalle und von Sieben mit 0.775 mm zurückgehalten werde. Ein Durchmesser von 1.35 mm der Rundlöcher entspricht Drahtnetzen mit 60 Öffnungen auf den Quadratcentimeter, und 0.775 mm bedeuten 120 Öffnungen des Drahtnetzes.¹⁾ In Bezug auf die Schwankungen der Korngröße bemerkt die Vorschrift, daß „im Normalsand an feineren Bestandteilen (d. i. solchen Körnern, die durch das Netz mit 120 Öffnungen durchfallen) 10%, und von den Körnern, die auf dem Netze 60 zurückbleiben, 2% enthalten sein dürfen.“

4. Da der Sand in seinem ursprünglichen Zustand 1.86% abschlämmbare Teile enthält, ist ein gründliches Waschen vor dem Absieben notwendig. Schon 0.45% abschlämmbare Teile geben bei den Festigkeitsproben abweichende Werte. Die Vorschrift verlangt daher, daß der Normalsand nicht mehr als 0.09% an abschlämmbaren Teilen enthalte.

5. Da ferner die Versuche erwiesen haben, daß die mit organischer Substanz behafteten Sandkörner die Festigkeit der Probekörper herabsetzen, stellt die Vorschrift die Bedingung, daß die braunen oder überhaupt die farbigen Sandschichten der Gruben von den weißen Sanden getrennt abgebaut werden sollen und für den Normalsand nur die letzteren benützt werden. Aus dieser letzteren Vorschrift geht hervor, daß die Beschaffenheit der Berindung der Sandkörner auf die Festigkeitsproben viel größeren Einfluß übt als selbst die Schwankungen der Korngröße.

Die Normalsande für Deutschland werden auch heute noch aus Sandgruben der Stadt Freienwalde bei Stettin gewonnen. Das Sandlager, welches tertiären Schichten angehört, hat eine Mächtigkeit von 40 Meter.

¹⁾ auf 1 cm² 60 Öffnungen bei einer Drätstärke von 0.38 Mm gibt 1.5 mm² Raum
 „ 1 „ 64 „ „ „ „ „ 0.40 „ „ 0.85 „
 „ 1 „ 120 „ „ „ „ „ 0.30 „ „ 0.64 „
 „ 1 „ 144 „ „ „ „ „ 0.30 „ „ 0.93 „
 „ 1 „ 600 „ „ „ „ „ 0.12 - 0.14 „ 0.25—0.25 mm².

Die Herstellung des Normalsandes untersteht der Kontrolle der kgl. mechanisch-technischen Versuchsanstalt zu Charlottenburg und des Vereinslaboratoriums zu Karlshorst. Diese Kontrolle wird auf solche Weise geübt, daß von jeder Tagesproduktion eine Durchschnittsprobe genommen und in den Laboratorien untersucht wird; nur wenn die Probe als den Vorschriften entsprechend gefunden wird, darf die Masse in Säcke gefüllt werden. Jeder Sack von 50 Kg Inhalt wird mit amtlichem Siegel versehen und kann nur so verschickt werden.

Der österreichische Normalsand.

Der österreichische Sand enthält 98% Kieselsäure, er kann demnach außer reinen Quarz nur ganz wenig andere Mineralkörner führen. Die Sandkörner sind einzeln genommen rein und durchsichtig, weißer Milchquarz ist darunter nur sehr wenig.

Der österreichische Normalsand unterscheidet sich von anderen Normalsanden besonders durch die Gestaltung seiner Körner, die ganz abgerundet, ja meistens perlartig sind, während die übrigen Normalsande scharfe Kanten und Ecken haben, besonders wenn sie, wie in den Vereinigten Staaten und in Frankreich, aus zerstoßenem Quarz hergestellt werden. Die Gestaltung der Körner hat aber einen großen Einfluß auf die Festigkeit, weil an glatten Flächen die Adhäsion der Cementmasse geringer ist als bei rauen und scharfkantigen Körnern, daher denn auch, bei gleicher Korngröße, die Festigkeitsproben für beide Körnersorten verschiedene Resultate ergeben.

Auch der österreichische Normalsand hat überkrustete Körner. Manche Lieferungen weisen kaum eine wahrnehmbare Rindenbildung, während ich an anderen Proben fand, daß die Überrindung die ganze Sandmasse rosenrot färbte. Von dem Vorhandensein einer Rindenbildung kann man sich überzeugen, indem man den Sand in einem reinen Glasgefäße mit destilliertem Wasser rüttelt; dabei stoßen die Körner aneinander und die teilweise Abtrennung von Rindenteilen verursacht eine Trübung des Wassers. Auch durch Färbung kann man das Vorhandensein von Rinden nachweisen: mit einem basischen Färbemittel behandelt, nehmen die Rinden den Farbstoff auf; hat man aber vorher die Rinden durch chemische Mittel gelöst und entfernt, so bleibt der reine Quarzsand auch nach Anwendung von Färbemitteln ganz farblos.

Auch in Bezug auf Größe der Körner unterscheidet sich der österreichische Normalsand von den übrigen. Seine Körnung ist feiner als solche des deutschen Normalsandes und der meisten anderen Länder, nur die Korngröße der Schweizer Normalsande ist ihr gleich. In Österreich

wird der Normalsand noch immer durch Siebe mit Drahtgeflechten gelassen, obwohl die diesbezüglichen Untersuchungen in Deutschland nachgewiesen haben, dass man auf diese Weise keine konstanten Korngrößen erhalten kann. Der österreichischen Vorschrift nach wird der Normalsand mittelst Sieben von 64 bis 144 Maschen pro cm^2 gewonnen, ohne dass das Mengenverhältnis der verschiedenen Größensortimente angegeben wäre.

Der Donausand.

Da man in Ungarn an mehreren Orten den Normalsand aus den Sanden der Donau herstellt, empfiehlt es sich die Eigenschaften dieses Materiales näher zu betrachten.

Die mineralogische Zusammensetzung des Donausandes hat Dr. A. VENDL eingehend untersucht an Sanden, die oberhalb Budapest aus dem Flußbett gebaggert worden sind (vgl. S. 624). Aus diesen Untersuchungen erfahren wir, daß im Ganzen 23 Mineralarten an der Zusammensetzung des Sandes teilnehmen, und daß sein Gehalt an Kieselsäure, der verschiedenen mineralogischen Konstitution entsprechend, nur 70—80% beträgt, demnach vom österreichischen und deutschen Normalsand sehr verschieden ist; auch ist sein Kalkgehalt nicht unbedeutend.

Was die Gestaltung des Donausandes betrifft, so sind seine Körner größtenteils scharfkantig, doch gibt es auch abgeschliffene darunter, an denen man einen langen Lufttransport erkennen kann. Diese Körner stammen aus der Kleinen Tiefebene, wo der Flugsand große Flächen einnimmt; Überschwemmungen mögen den Sand von den Ufern in das Flußbett gefördert haben, in dem sie dann weiter bis Budapest gewandert sind. Die abgerollten Körner sind intakt und fast frei von Rissen und Sprüngen, während die anderen Mineralsplitter größtenteils von vielen Sprüngen durchzogen sind und ein ganz heiles Korn sich unter ihnen kaum findet. Allein diese Risse sind so fein, daß sie selbst mit der Loupe kaum sichtbar werden und nur durch Färbung, die sich in die Spalten hineinzieht, nachweisbar sind. Die Zerklüftung der Sandkörner verrät sich auch durch den Umstand, daß bei der Herstellung von Probekörpern mit Donausand mehr Wasser verbraucht wird, als wenn man österreichischen Sand dazu nimmt, da ein Teil des Wassers sich in die Risse einsaugt und dem Cement nicht zugute kommt.

Die Unterschiede, die wir zwischen dem österreichischen Normalsand und dem Donausand gefunden haben, genügen zur Erklärung

mancherlei Erscheinungen, die beim Vergleich der Festigkeitsproben mit diesen zwei Sanden angefertigter sonst aber gleicher Cemente uns entgegenreten.

Der Normalsand für Ungarn.

Die ungarische amtliche Vorschrift¹⁾ für die Bereitung von Normalsand lautet folgendermaßen: „Normalsand wird auf der Weise gewonnen, daß man in der Natur vorkommenden reinen Quarzsand auswäscht und dessen gröbere Partikel mittelst Siebe, die bei einer Drahtstärke von 0.40 mm. 64 Maschen auf den Quadratcentimeter haben, absondert; hierauf wird der Sand auf ein anderes Sieb mit Drahtstärke von 0.30 mm und 144 Maschen pro cm² gebracht, wo die feinsten Teile durchfallen. Das auf diesem Siebe zurückbleibende Material gibt den Normalsand.“

Diese Vorschrift ist in vieler Hinsicht mangelhaft.

1. Was die chemische und mineralogische Beschaffenheit des Sandes betrifft, so ist schon die Anweisung, wonach der Normalsand aus in der Natur vorkommendem reinen Quarzsand herzustellen sei, insofern anfechtbar, weil ein wirklich reiner Quarzsand äußerst selten zu finden ist. In der Praxis pflegt man wohl jeden Sand, sobald er nur kieselsaure Minerale enthält, Quarzsand zu nennen, besonders wenn seine Farbe hell ist und keine dunkelfärbigen Körner darin vorkommen. Es wäre aber dann notwendig in der Vorschrift auszudrücken, in welcher Form die Kieselsäure des Sandes zu verstehen sei.

2. Über die morphologischen Eigenschaften der Sandkörner spricht sich die Vorschrift nicht aus, obschon diese sehr zu beachten sind. Reine Quarzkörner können scharfkantig oder abgeschliffen sein, die Farbe des Sandes kann rein weiß, oder, wenn die Körner sekundäre Rinden haben, gefärbt sein. Es gibt reine Quarzsande mit 98% Kieselsäure, die dennoch braune, graue oder tiefgelbe Farben zeigen. Die färbigen Rinden haben aber, wie schon erwähnt, großen Einfluß auf die Festigkeit des Cementes.

3. Die Vorschrift gibt nicht an, in welchem Verhältnis die verschiedenen Körnersortimente im Normalsand mit einander gemischt werden sollen, wo doch von diesem Gemengeverhältnis viele Eigenschaften eines Normalsandes abhängig sind.

In Ungarn hat man bisher bei amtlichen Untersuchungen ausschließ-

¹⁾ Bestimmungen betreffs Benennung der zur Mörtelbereitung gebrauchten Bindemittel und der einheitlichen Herstellung und Untersuchung der Zemente. Herausgegeben vom ungarischen Verein der Ingenieure und Architekten. 1897.

lich den österreichischen Normalsand verwendet, und es war eine präzisere Vorschrift für seine Zusammensetzung umso leichter zu entbehren, da der galizische Sand von einer verlässlichen Firma (LEDERER und NESSÉNYI, Wien) geliefert wird und man voraussetzen konnte, daß die Lieferungen in den österreichischen Ämtern von Zeit zu Zeit kontrolliert werden. Gegenwärtig ist aber davon die Rede, daß jener galizische Sand durch einheimischen ersetzt werde. Wir müssen uns daher mit allen Eigenschaften des österreichischen Normalsandes genau bekannt machen, um einen vollkommen gleichwertigen Ersatz finden zu können. Wenn wir bei den nachfolgenden Untersuchungen vom österreichischen Normalsand ausgehen, schließen wir in vornehin alle Fehlerquellen aus, die sich aus der wechselnden mineralogischen Zusammensetzung des Sandes, aus der abweichenden Form der Körner und der chemischen Beschaffenheit der Körnerhüllen ergeben würden.

Die physikalischen Eigenschaften des österreichischen Normalsandes.

Die Korngröße. Zur Prüfung der Cementfestigkeit muß laut Verordnung ein Sand verwendet werden, dessen Körner durch ein 64-er Sieb noch hindurchgehen, aber auf dem Siebe mit 144 Maschen pro cm^2 zurückgehalten werden. Für die Durchmesser solcher Körner ergeben sich, in Millimeter ausgedrückt, folgende Werte.

Das Sieb, welches auf den Quadratcentimeter 64 Maschen hat, ist aus Drähten von 0.4 mm Stärke geflochten. Daher hat die Seite jeder quadratischen Öffnung eine Länge von 0.85 mm. Die Sandkörner als Kugeln gedacht, würden also solche mit einem Kugelradius von 0.42 mm durch ein derartiges Sieb passieren und nur größere zurückbleiben.

Die Siebe mit 144 Öffnungen auf dem Quadratcentimeter sind aus Draht von 0.3 mm Stärke gemacht. Eine Seite der Öffnung ist daher 0.53 mm lang und alle Körner deren Kugelradius kleiner als 0.25 mm ist, fallen durch. Daher schwankt der Durchmesser aller Körner des Normalsandes zwischen den Größen 0.53 und 0.85 mm.

Die Vorschrift besagt aber nicht in welchem Verhältnis diese verschiedenen Korngrößen im Sand enthalten sein sollen.

Über die hierbei möglichen Mischungsverhältnisse kann uns das nachstehende Graphikon (Fig. 2) belehren, das ich derart konstruiert habe, daß auf der Abscissenaxe die Werte der Korndurchmesser und auf der Ordinatenaxe die Prozentsätze der Größensortimente aufgetragen sind.

Wenn man für die Zusammensetzung eines Normalsandes von den beiden extremen Fällen ausgeht, welche auf der Zeichnung durch die

Curven 1 und 3 angedeutet sind, so wird man für das Mischungsverhältnis der verschiedenen Korngrößen in diesen Fällen nachstehende Werte erhalten.

Im Sand, der durch die Curve 1. dargestellt ist, sind:

90% der Körner mit einem Durchmesser von 0.55—0.60 mm

10 „ „ „ „ „ „ „ „ 0.60—0.85 „

Im Sand der Curve 3. hingegen:

10% der Körner mit einem Durchmesser von 0.55—0.80 mm

90 „ „ „ „ „ „ „ „ 0.80—0.85 „

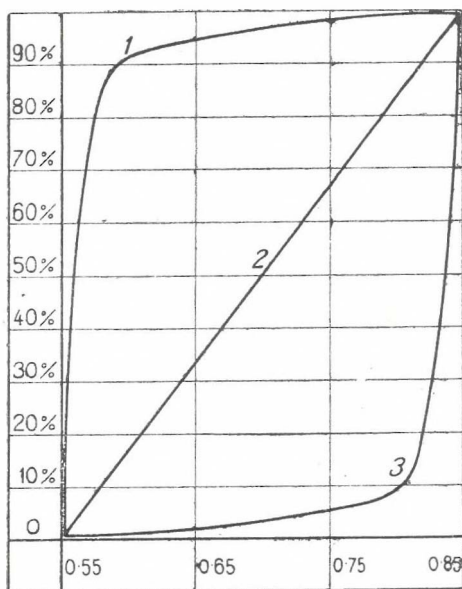


Fig. 2. Varianten der Korngröße im österreichischen Normalsand.

Aber diese beiden Sandvarietäten bezeichnen noch immer nicht die wirklichen Grenzfälle, denn es ist denkbar, daß man, bei Einhaltung aller Vorschriften für das Absieben, einen Sand erhalten könnte, der entweder nur aus Körnern von 0.55 mm Durchmesser, oder anderseits ganz aus Körnern von 0.85 mm Durchmesser bestände.

Nun müssen wir die physikalischen Eigenschaften dieser beiden extremen Fälle hinsichtlich ihres Einflusses auf die Festigkeit des Zementes untersuchen, um uns davon zu überzeugen, ob die verschiedenen Korngrößen überhaupt das Resultat der Zementprüfung beeinflusst, und wenn ja, wie groß diese Wirkung sei?

In Hinsicht auf diese Frage ist zu untersuchen:

1. Das Volumen der Sandkörner sowie das der leeren Zwischenräume, mit anderen Worten das prozentuelle Verhältnis zwischen dem Sandmaterial und den Poren einer gegebenen Raumauffüllung;

2. die zur Auffüllung eines gegebenen Raumes nötige Menge von Körnern und deren Oberflächengröße. Letztere Zahl gibt uns dann das Maß für die Adhäsionsfläche des Zementes.

Die Bestimmung der Porengröße gibt uns Aufschluß über die Frage, welchen Einfluß die Anordnung der Körner auf die Größe der leeren Räume, die von der Zementmasse ausgefüllt werden sollen, ausübt.

Aus der Menge und Größe der Sandkörner ergibt sich die Größe der Adhäsionsfläche für die Zementmasse.

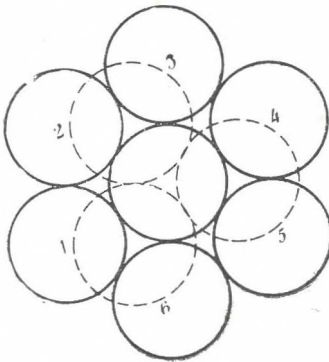


Fig. 3.

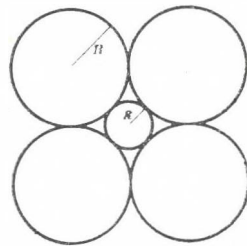


Fig. 4.

Die theoretische Ausführung dieser Berechnungen setzt der Einfachheit halber die vollkommene Kugelgestalt der Sandkörner voraus, eine Voraussetzung, die zwar in der Natur niemals zutrifft, die aber die einzige Möglichkeit bietet der Lösung nahe zu kommen.

Die Raumgröße der Poren. Diese hängt von der räumlichen Anordnung der Körner ab. Bei der Auffüllung eines gegebenen Raumes mit Kugeln gleicher Größe kann man die beiden extremen Fälle der dichtesten und der lockersten Auffüllung in Betracht ziehen.

Die lockerste Auffüllung wird erreicht, wenn sich die einzelnen Kugeln mit je sechs anderen Kugeln berühren, wobei die Tangentialflächen von je vier Kugeln einen Würfel einschließen, dessen Seitenlänge dem doppelten Durchmesser der Kugel ($= 4R$) entspricht. Der Durchschnitt des eingeschlossenen Hohlraumes ist in diesem Falle ein regelmäßiges Viereck.

Das Volumen dieses Hohlraumes $H = (2r)^3 - \frac{4}{3}r^3\pi = 8r^3 - \frac{4}{3}r^3\pi = r^3(8 - \frac{4}{3}\pi) = r^3 \cdot 3.811$

In Prozenten ausgedrückt $\frac{8r^3}{3.811r^3} = \frac{100}{x}$; daher $x = 47.64\%$

Bei der lockersten Raumauffüllung nehmen also die Sandkörner nur 52.36% des Raumes ein.

Bei der dichtesten Anordnung der Körner wird jede Kugel 12 benachbarte Kugeln berühren (s. Fig. 3). Die durch die Berührungspunkte gelegten Tangentialebenen umschließen in diesem Falle einen Raum in der Form eines Pentagon-Dodekaeders, aus dessen Größe man die Größe der Hohlräume durch Abzug der eingeschlossenen 13 Kugelvolumina berechnen kann. Wenn der Radius der Kugeln gleich r gesetzt wird, so beträgt die Seite des Dodekaeders $\frac{20r}{\sqrt{250+110\sqrt{5}}}$, woraus das Volumen $v = \left(\frac{20r}{\sqrt{250+110\sqrt{5}}}\right)^3 \times \frac{15+7\sqrt{5}}{4}$. Hieraus das Volumen des Hohlraumes $H v = \left(\frac{20r}{\sqrt{250+110\sqrt{5}}}\right)^3 \times \frac{15+7\sqrt{5}}{4} - \frac{4}{3}\pi r^3$, oder: $H v = r^3(5.549 - 4.189) = r^3 \cdot 1.360$.

In Prozenten: $\frac{5.549r^3}{1.360r^3} = \frac{100}{x}$; daher $x = 24.51\%$

Dies besagt, daß bei der dichtesten Lagerung der gegebene Raum zu 75.49% von den kugelförmigen Körnern und nur zu 24.51% von Hohlräumen erfüllt ist. Der Unterschied des Porenvolumens bei der dichtesten und der losesten Lagerung beträgt also $47.64 - 24.51 = 23.13\%$.

In Wirklichkeit wird die dichteste Lagerung vom natürlichen Sande nie erreicht, da ja die Sandkörner einerseits nie die vollkommene Kugelgestalt besitzen und andererseits ihre Dimensionen auch nie ganz gleich sein werden, selbst bei sorgfältigster Sortierung. Nach bisherigen Untersuchungen geben verschiedene Materialien bei dichtester Lagerung folgende Porenvolumina:

Schotter	38.4—40.1%	Hohlraum
Sand	35.6—40.8	„
Schotter mit Sand zu gleichen Teilen gemischt	23.1—28.9	„

Das Gemenge von Schotter mit Sand weist darum so geringe Werte für die leeren Räume auf, weil die Fugen zwischen den groben Schotterkörnern vom feineren Sand ausgefüllt sind, wodurch das Massenvolumen erhöht wird.

Ich habe an den in ungarischen Laboratorien verwendeten Normalanden die Größe der leeren Räume (Porensumme) zu 38.98% gefunden.

Die Untersuchung wurde auf die Weise bewerkstelligt, daß ich aus dem Sande 3000 Körner von möglichst gleicher Größe herauslas, deren spezifisches Gewicht bestimmte, sie dann zusammen abwog und aus der Differenz das Volumen der leeren Räume erhielt. Die Berechnung ergab 39.00%, die Wägung 38.98%.

Tabelle I.

Kornradius mm	Volumen eines Kornes $\frac{4}{3} \pi r^3 \text{ mm}^3$	Anzahl der Körner in einem Kubikdecimeter		Gewicht eines Kubik- decimeter Quarzsandes	
		bei dichter	bei lockerer	dicht	locker
		A n o r d n u n g		a n g e o r d n e t	
0.10	0.004,188	176,661,900	125,097,000	1961	1397
0.20	0.033,12	22,127,000	15,636,000	1961	1397
0.25	0.065,447	11.303,000	8,005,800	1961	1397
0.40	0.263,17	2,769,700	1,954,600	1961	1397
0.50	0.523,59	1,413,295	1,000,766	1961	1397
1.00	4.188,79	176,662	125.079	1961	1397
5.00	523.598,90	1,413	1,001	1961	1397

Die Größendimensionen der Körner ändern nichts an der Größe der Porensumme. Gleichmäßige Korngröße vorausgesetzt, ist die Porensumme bei kleineren oder größeren Körnern immer die gleiche.

Von der Richtigkeit dieses Satzes überzeugt uns eine einfache Gleichung. Füllen wir in ein und dasselbe Gefäß nach einander eine, vier, acht . . . n Kugeln, deren Radien respective = $2r, r, \frac{1}{2}r, \frac{1}{n}r$ sind, so wird das Gesamtvolumen der Hohlräume $H_v = (2r)^3 - \frac{4}{3}(2r)^3\pi = (2r)^3 - 8 \cdot \frac{4}{3}r^3\pi = (2r)^3 - 64 \cdot \frac{4}{3}\left(\frac{r}{2}\right)^3\pi = (2r)^3 - n \cdot \frac{4}{3}\left(\frac{r}{n}\right)^3\pi$. Dieses Gesetz kann auch experimentell nachgewiesen werden.

Aus dem Gesagten folgt, daß ein feinkörniger Sand der Zementmasse ebensoviel Raum freiläßt wie ein grobkörniger, vorausgesetzt, daß die Körner der einzelnen Proben unter sich immer von gleicher Größe sind.

Die Gesamtoberfläche der Hohlräume. Diese hängt von der Menge der

den gegebenen Raum ausfüllenden Körner ab. Je kleiner die Körner sind, umso mehr haben davon im Raume Platz und umso größer wird auch die Summe der Oberflächen der leeren Räume. Diese Größe läßt sich aus einer Zahlenreihe erkennen, welche angibt, wie viel Körner gleicher und gemessener Größe in ein und demselben Raume enthalten sein können. Letztere Angaben kann man sowohl durch Berechnung als durch direktes Abzählen bekommen.

Das Verhältnis zwischen der Größe (dem Radius) der Körner und deren im gegebenen Raum enthaltenen Zahl erhalten wir aus folgender Berechnung. Betrachtet man zwei Kugeln von verschiedener Größe, deren Radien mit r und r_1 bezeichnet werden sollen, so werden ihre Volumina nach der Formel $\frac{4}{3} \pi r^3$ und $\frac{4}{3} \pi r_1^3$ zu berechnen sein. In einem gegebenen Raume (v) sei die Zahl der darin Platz findenden Kugeln im ersten Falle $N = \frac{v}{\frac{4}{3} \pi r^3}$, im zweiten Falle $N_1 = \frac{v}{\frac{4}{3} \pi r_1^3}$, so wird $N : N_1 = \frac{v}{\frac{4}{3} \pi r^3} : \frac{v}{\frac{4}{3} \pi r_1^3} = \frac{1}{r^3} : \frac{1}{r_1^3} = r_1^3 : r^3$.

Die Zahl der (gleichgroßen) Körner in einem gegebenen Raume steht also im umgekehrten Verhältnis zur dritten Potenz ihrer Radien und somit auch zu ihrem Rauminhalt. Mit dem Abnehmen der Durchmesser der Körner wächst also ihre Zahl in sehr raschem Maße, wofür die Zahlenwerte in der Tabelle II. ein Beispiel liefern.

Tabelle II.

Radius des Kornes mm	Oberfläche eines Kornes mm ²	Gesamtoberfläche der Körner mm ²		Quadratwurzel aus der Gesamtoberfläche	
		bei dichter	bei lockerer	dicht	locker
		A n o r d n u n g		gelagerter Körner	
0.10	0.125,66	22.200,00	15.720,000	4.711	3.965
0.25	0.785,25	8.880,000	6.288,000	2.980	2.478
0.40	2.010,5	5.550,000	3.930,000	2.356	1.982
0.50	3.141,59	4.440,000	3.144,000	2.107	1.773
1.00	12.566,37	2.220,000	1.572,000	1.490	1.254
5.00	314.159,20	400,000	314,000	0.666	0.561

Die Radien der zwischen den Sieben mit 64 resp. 144 Maschen gewonnenen Körner schwanken zwischen 0·8 und 0·55 mm, daher kann auch die Zahl der einen Kubikdecimeter ausfüllenden Körner zwischen den Grenzwerten 1,954.000 und 11,303.000 variieren. Hiernach haben wir also noch zu untersuchen, welche Schwankungen sich für die Oberflächengrößen der Sandkörner ergeben.

Als Ausgangspunkt dieser Untersuchung kann man die Angaben der Tabelle II, welche die jeder Korngröße entsprechende Oberflächensumme aufweist, benützen. Ebenso kann man aber auch auf dem Wege der Rechnung zum Ziel gelangen.

Setzt man nämlich die Summe der Oberflächen aller Körner gleich S , so braucht man nur die Oberfläche des einzelnen Kornes ($4 \pi r^2$) mit der Zahl der gleichgroßen Körner $\frac{v}{\frac{4}{3} \pi r^3}$ zu multiplizieren, und erhält dann:

$$S = \frac{v}{\frac{4}{3} \pi r^3} 4 \pi r^2 = \frac{3 v}{r}$$

Für die verschiedenen Korngrößen gilt dann das Verhältnis:

$$S : S_1 = \frac{3 v}{r} : \frac{3 v}{r_1} = \frac{1}{r} : \frac{1}{r_1} = r_1 : r.$$

was besagt, daß die Oberflächensumme aller einen gegebenen Raum ausfüllenden Kugeln zu deren Radien im umgekehrten Verhältnis steht.

Auf Tafel II. findet man die Oberflächensumme für die uns zunächst interessierenden Körnerdimensionen.

Aus dem Gesagten folgt:

1. daß die Korngröße keinen Unterschied in dem Verhältnis der ausfüllenden Sandmasse zu der Gesamtgröße der leeren Räume macht;

2. daß die Gesamtoberfläche der Körner, also die Adhäsionsfläche für die Zementmasse im verkehrten Verhältnis zur Größe der Körner zu- und abnimmt.

In einem Raume von 1 Kubikdecimeter erreicht die Adhäsionsfläche bei einer Korngröße von 0·82 mm Durchmesser die Größe von 5·55 m²; haben die Körner aber nur 0·4 mm im Durchmesser, so wächst die Oberfläche zu 8·88 m² an.

Hieraus müßte folgen, daß: „je größer die Adhäsionsfläche, umso fester die Zementprobestücke“. In Wahrheit aber verhält es sich anders indem die Festigkeit eines Zementes mit sehr kleinen Sandkörnern eine geringe ist. Diesem scheinbaren Widerspruch auf den Grund zu kommen, hat Professor M. GARY langwierige Untersuchungen vorgenommen. Seine Versuche wurden mit einer bestimmten Zementmasse vorgenommen, welcher er Normalsand von Freienwalde beimengte, der aus Körnern ver-

Tabelle III.

Jahr	Mischungsverhältnis des Sandes	Korngrösse in Millimetern	Prozentuelle Zusammen- setzung	Gewicht von 1 Liter in Gramm	Porenvolumen in % der Gesamtmasse	Festigkeit der Versuchs- stücke, 1 cm ² — kg.				
						Zugfestigk.		Druckfest.		
						28 Tage	90 Tage	28 Tage	90 Tage	
1898	Normalsand	1·37—0·63	100	1682	36·6	17·5	—	145	—	
1903	„	1·37—0·63	100	1684	36·6	18	23	146	217	
1898	Feinteil des Normal- sandess	0·7—0·62	100	1677	36·8	15·8	—	137	—	
1898	Grobteil des Normal- sandess	1·37—0·70	100	1676	36·8	15·4	—	143	—	
	<i>Mischungen</i>									
1903 1.	Normalsand 100 . .	1·37—0·63	83·4	1740	34	—	—	—	—	
	Feinsand 20	0·63—0·25	16·4							
1903 2.	Normalsand 100 . .	1·37—0·63	66·7	1772	33	—	—	—	—	
	Feinsand 50	0·63—0·25	33·3							
1903 3.	Normalsand 100 . .	1·37—0·63	86·7	1872	29	—	—	—	—	
	Feinsand und feinster Teil 20 . .	0·63— ?	16·6							
1903 4.	Normalsand 100 . .	1·37—0·63	66·7	1917	28	19	17	172	237	
	Feinsand und feinster Teil 50 . .	0·63— ?	33·3							
1903 5.	Normalsand 100 . .	1·37—0·63	66·7	1931	27	21	28	146	217	
	Feinster Sand 50 . .	0·22— ?	33·3							

schiedener Größe in planmäßig wechselnden Verhältnissen gemengt war (s. Tabelle III).

Diese Versuche haben zu folgenden Resultaten geführt: Wenn Sand einer bestimmten Sandgrube und ein bestimmter Zement verwendet wurden, hat es sich gezeigt, daß

1. die größte Zugfestigkeit dem mit groben Körnern gemengten Zement zukommt;

2. die geringste Zug- und Druckfestigkeit besitzt der mit feinem Sande gemengte Zement;

3. am größten wird die Zug- und Druckfestigkeit, wenn man grobe Körner mit feinen mengt. Die so hergestellten Probestücke haben auch die größte Dichte.

Im Jahre 1903 stellte Herr GARY eine neue Reihe von Versuchen an, um zu ermitteln, welches Mischungsverhältnis verschieden großer Körner die dichteste Raumauffüllung gäbe.

Das Porenvolumen des deutschen Normalsandes erreicht 36·16%. Herr GARY ersah aus seinen Versuchen, daß je mehr feine Teile er dem Normalsande beimengte, die Dichte und dementsprechend auch die Festigkeit der Probestücke umso größer wurde.

Bei diesen Versuchen tauchte auch die Frage auf, auf welche Weise sich die Sandkörner bei der praktisch erreichbaren höchsten Dichtigkeit gruppieren.

Die größte Dichte, die sich bei dem deutschen Normalsand erreichen ließ, ergab für 1 dm³ 1684 Gramm. Diesem Versuchsergebnis gegenüber ergibt die Rechnung, daß bei der gedrängtesten Lagerung der entsprechenden, gleichgroßen Körner das Gewicht 1961 gr., bei lockerster Lagerung aber nur 1397 gr. sein müßte. Die Wirklichkeit liegt also zwischen diesen beiden theoretischen Extremen.

Gehen wir nun von der lockersten Lagerung gleichgroßer, kugelförmiger Körner aus und denken wir uns diesem Material ein anderes, feineres Kornsortiment beigemischt, dessen Größe genau in die von den größeren Körnern freigelassenen Poren hineinpaßt, so müßte dadurch scheinbar die größtmögliche Dichtigkeit erreicht werden.

Es stellt sich nun die Frage, welches Gewicht ein Kubikdecimeter Sand unter dieser Voraussetzung haben müßte?

Da die Korngröße keinen Einfluß auf die Dichtigkeit und somit auf das spezifische Gewicht der materiellen Raumauffüllung ausübt, so können wir zur Vereinfachung der Rechnung die Korngröße von 1 mm Durchmesser annehmen.

Die Radien der locker gelagerten Kugeln verhalten sich zu den Radien der in die Hohlräume hineinpassenden Kugeln wie 10 : 4·16.

Zwischen Kugeln von 1 mm Durchmesser würden also kleine Kugeln von 0.4 mm Durchmesser Platz finden.

Der Raum von 1 dm³ fasst bei lockerster Lagerung 1,000.767 Kugeln von 1 mm Durchmesser, zwischen denen ebensoviele Lücken bleiben, die mit Kugeln von 0.4 mm Größe gerade noch ausgefüllt werden können.

Wenn, wie oben gesagt, die lockere Ausfüllung eines Kubikdecimeters mit Quarzkugeln ein Gewicht von 1397 gr. darstellt, so wird nun das Gemenge um so viel schwerer sein, als das Gesamtgewicht der die Poren ausfüllenden Kugeln ausmacht.

Das Gewicht von 1,000.767 Quarzkugeln von 0.4 mm Kaliber stellt sich der Rechnung nach auf 77.83 gr. Mithin hat das Gemenge der beiden Kornsortimente bei bestmöglicher Raumaufüllung das Gewicht von

$$1397 + 77.8 = 1474.8 \text{ gr.},$$

also noch weit weniger als das vom wirklichen Normalsand erreichbare Höchstgewicht, 1682 gr.

Bei der dichtesten Lagerung gleichgroßer Quarzkugeln haben wir ein Gewicht von 1961 gr. auf den Kubikdecimeter gefunden, was also, auch schon ohne Lückenausfüllung, größer ist als das von GARY gefundene Höchstgewicht des Normalsandes, 1 dm³ = 1931 gr. (s. Tabelle III).

Die in den Versuchen erreichte dichteste Lagerung, welche ein Gewicht von 1682 gr. für den Liter ergab, müssen wir uns so vorstellen, daß beiläufig die Hälfte der Körner in lockerer, die andere Hälfte aber in dichter Anordnung gelagert ist. Es ergibt sich nämlich für

50% locker angeordneter Körner ein Gewicht von . . . 698 gr.

50% dicht angeordneter Körner ein Gewicht von . . . 980 „

demnach als Gesamtgewicht pro 1 dm³ 1678 gr.

Nehmen wir aber

49% der Körner locker angeordnet mit 684.5 gr.

51% aber dicht angeordnet mit 1000.1 „

so erreicht der ganze Kubikdecimeter ein Gewicht von 1684.6 gr. was dem experimentell gefundenen Höchstgewicht bereits sehr nahe kommt.

Das Einheitsgewicht eines gemischten Sandes ist aber weit höher. GARY'S Versuche haben gezeigt, daß wenn man dem gröberen Sand 33% so feinen Sand beimischt, daß letzterer sich im Durchmesser zu ersterem wie 3 : 20 verhält, das Litergewicht 1931 gr. wird, was sich dem Litergewichte eines ungemischten, dickst gelagerten Sandes (1961 gr.) nähert.

Die Anordnung des gemischten Sandes beruht nicht auf der Porenausfüllung der größten Körner, denn wenn wir von der in der Praxis erreichbaren größten Dichte eines aus gleichgroßen Körnern bestehenden Sandes ausgehen und hiebei die Dichtigkeit durch Porenausfüllung noch zu erhöhen versuchen, so wird das Resultat ganz anders ausfallen, als es der Versuch beweist.

Kubikdecimeter, bei lockerer Anordnung 1,000.766 und bei einer dichten 1,413.295 Körner Raum. Nehmen wir an, daß die Hälfte der Sandausfüllung locker, die andere Hälfte dicht gelagert ist, so wäre der Gewinn, den man durch Ausfüllung der Poren mit kleineren, aber gerade noch hineinpassenden Körnern erzielen könnte, nicht mehr als 39.58 gr. im Kubikdecimeter.

Das locker gelagerte Material, das die Hälfte des ganzen ausmacht, enthält 500.000 Poren, in welche ebensoviel Körner mit 0.4 mm Durchmesser hineingehen, die zusammen 38.91 gr. wägen. In der Hälfte der dicht gelagerten Körner werden 700.000 Poren sein, die aber nur Körner mit 0.15 mm Durchmesser zulassen, deren Gesamtgewicht 0.782 gr. sein wird. Die Gewichtszunahme durch Porenausfüllung ist also

$$38.9 + 0.782 = 39.58 \text{ gr.}$$

Bei den Versuchen zeigt sich aber eine viel größere Gewichtszunahme, wenn man gröberen Sand mit feinem mischt; sie kann das Gewicht des dicht gelagerten deutschen Normalsandes um 249 gr. übersteigen (s. Tabelle III). Man erkennt daraus, daß hier eine andere Anordnung der Gemengteile im Spiele ist, als die, welche wir für die regelmäßige Porenausfüllung der geometrisch angeordneten groben Körner angenommen haben. Es ist klar, daß in den Sandgemengen, welche ein so hohes Einheitsgewicht aufweisen, die kleineren Partikel nicht die von den groben Körnern eben noch freigelassenen Hohlräume ausfüllen, sondern daß die groben Körner in das feine Material gleichsam eingebettet sind.

Die bisher bewerkstelligten Versuche geben aber über diese Frage keine Auskunft.

Analyse der eingesendeten Sandproben.

Auf den von der Direktion der kgl. ungar. geologischen Reichsanstalt erlassenen Aufruf hin sind der Anstalt folgende Sandproben zugesendet worden:

Die kgl. ungar. Gewerbeinspektion in Sopron schickte vier Sandmuster, die mit den Nummern 1, 2, 14 und 15 bezeichnet wurden.

Die kgl. ungar. Gewerbeinspektion in Szombathely schickte zwei Muster, eines von Szombathely (No. 8.), ein anderes von Pinkafő (No. 16.).

Die kgl. ungar. Gewerbeinspektion in Pécs sandte vier Muster aus den Sandgruben des Herrn V. LAUBER in Pécs.

Außerdem wurden eingesandt: 2 Muster aus Pécsvárad, 3 Muster aus Felsőtúr (Kom. Nógrád), 1 Muster aus Rákosszentmihály (Kom. Pest).

Von den eingelaufenen Mustern habe ich die mit den folgenden Nummern bezeichneten, die sich auf den ersten Blick als ganz ungeeignet erkennen ließen, keiner Schlämprobe unterworfen, u. zw. No. 7 aus Pécs IV., No. 8 aus Szombathely, No. 12 Felsőtúr II., No. 13 Felsőtúr III., No. 14 Schotter aus Sopron und No. 15 feinkörniger schlammiger Sand aus Sopron.

Die übrigen Muster unterwarf ich der mechanischen Analyse mit Sieben für die gröberen Teile und mit dem Schlämapparat für die feineren.

Tabelle IV.

No.	Fundort	Schlämungsresultat				Summe %	Anmerkung
		Korngrösse in Millimetern					
		Kleiner als 1	1-1.25	1.25-1.5	1.5-2		
1.	Sopron I.	19.0	22.7	29.7	28.5	98.9	—
2.	„ XXV.	21.1	14.0	15.3	50.5	100.9	—
3.	Rákosszentmihály . . .	18.3	16.2	10.2	58.2	102.9	—
4.	Pécs, (Lauber V.) I. . .	36.6	41.4	4.5	17.5	100.0	—
5.	„ „ „ II. . .	89.1	9.2	3.0	8.7	100.0	—
6.	„ „ „ III. . .	69.5	23.5	4.5	2.5	100.0	—
9.	Pécsvárad	43.9	34.0	9.9	12.2	100.0	eisenschüssiger Sand
10.	„	52.1	31.7	7.2	8.0	100.0	grauer Sand
11.	Felsőtúr I.	66	25	4	5	100.0	—
16.	Pinkafő	34.6	18.4	11.0	36.1	100.0	—

Von den angeführten Sandmustern kann nur der Sand von Felsö-tür in Betracht kommen, da er nur wenig farbige Bestandteile enthält und überwiegend aus Quarzkörnern besteht. Allein dieser Sand enthält nur 29% von jener Korngröße, die für die Zementprüfung gefordert wird. Man müßte also vor allem feststellen, wie groß der Sandvorrat in dem betreffenden Lager ist, damit man ausrechnen könne, für wie lange Zeit die daraus zu gewinnenden 20—29% des brauchbaren Materials für die Laboratorien hinreichen würden.

In den Sanden der übrigen Fundorte sind viele fremde Mineral-körner und darunter meistens auch kohlensaurer Kalk enthalten, so daß sie schon ihrer Zusammensetzung halber ungeeignet sind als Substrat eines Normalsandes verwertbar zu sein.
