

Veröffentlichungen des Instituts  
der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo)  
an der Technischen Hochschule zu Berlin

---

---

Heft 2

---

---

**Über die Setzungen und  
Dichtigkeitsänderungen bei Sandschüttungen  
infolge von Erschütterungen**

Von

**Dr.-Ing. Demosthenes Ath. Pippas**

Mit 71 Textabbildungen



**Berlin**  
Verlag von Julius Springer  
1932

Alle Rechte, insbesondere das der Übersetzung  
in fremde Sprachen, vorbehalten.  
Copyright 1932 by Julius Springer in Berlin.

ISBN-13: 978-3-7091-5178-5 e-ISBN-13: 978-3-7091-5326-0  
DOI:10.1007/978-3-7091-5326-0

## **Vorwort.**

Setzungen, die an Gebäuden durch Erschütterungen hervorgerufen werden, sind heute der Gegenstand vielfacher Erörterungen. In der vorliegenden Arbeit wird die Frage geprüft, ob die Kornzusammensetzung sandigen Untergrundes einen Einfluß auf die Größe solcher Setzungen ausüben kann, und der gesetzmäßige Zusammenhang zwischen der Kornverteilung und den Setzungen festgestellt. Ferner wird die Verteilung der Setzungen und Dichteänderungen in einer durch Wände begrenzten Sandmasse sowie der Einfluß dieser Wände auf die Setzungen untersucht, wenn auf die Oberfläche der Sandmasse gleichmäßige Stöße ausgeübt werden.

Berlin-Charlottenburg, im Januar 1932.

**Deutsche Forschungsgesellschaft  
für Bodenmechanik.**

# Inhaltsverzeichnis.

	Seite
Einleitung.	
A. Die durch statische Belastungen in den Sandböden hervorgerufenen Formänderungen . . . . .	1
B. Die durch dynamische Einwirkungen hervorgerufenen Formänderungen . . . . .	2
I. Abschnitt.	
Der Einfluß der Zusammensetzung des Sandes auf seine Verdichtung . . . . .	3
a) Allgemeines, Versuchsmethode, Versuchsmaterial . . . . .	3
b) Versuchsergebnisse . . . . .	4
c) Die Änderung der Porenziffer . . . . .	6
II. Abschnitt.	
Die Verteilung der Setzungen bzw. Verdichtungen in senkrechter Richtung . . . . .	8
a) Allgemeines, Versuchsmethode, Versuchsmaterial . . . . .	8
b) Versuchsergebnisse, die Form der Setzungskurve . . . . .	9
c) Die Dichteänderungen, die Porenzifferänderungen . . . . .	11
III. Abschnitt.	
Die Verteilung der Setzungen bzw. Verdichtungen in waagerechter Richtung . . . . .	11
a) Allgemeines, Versuchsmethode, Versuchsmaterial . . . . .	11
b) Versuchsergebnisse, die Setzungskurven, die Dichteänderung, die Porenzifferänderung . . . . .	12
c) Ergebnisse . . . . .	16
IV. Abschnitt.	
Der Einfluß der Wände der Gefäße auf die Setzungen . . . . .	18
a) Übergang von einer durch Wände begrenzten Sandmasse auf den Halbraum . . . . .	18
b) Einfluß starrer Wände innerhalb einer Sandmasse auf die Setzungen der Sandmasse . . . . .	21
V. Abschnitt.	
Allgemeine Ergebnisse . . . . .	23
a) Ist das Zurückführen eines dynamischen Vorganges auf einen statischen möglich? . . . . .	23
b) Die Elastizität und die Dämpfung der Sandböden . . . . .	24
c) Die Bildung eines dynamischen Tragkörpers . . . . .	25
d) Die Form und die Größe des dynamischen Tragkörpers und die in ihm durch Schwingungen erfolgende Fortpflanzung der Energie . . . . .	25
e) Welche Amplituden- und Dämpfungswerte kann man durch Versuche mit Erschütterungsmaschinen entnehmen? . . . . .	27
f) Die Erklärung der in dem ersten, zweiten und dritten Abschnitt abgeleiteten Ergebnisse . . . . .	27

## Einleitung.

### A. Die durch statische Belastungen in den Sandböden hervorgerufenen Formänderungen.

Es ist schon bekannt, daß die Sandböden unter dem Einfluß äußerer statischer Belastung plastische Formänderungen ausführen, die man dadurch bestätigt findet, daß die auf solchen Böden gegründeten Bauwerke Setzungen aufweisen.

Diese Formänderungen kann man in zwei Gruppen teilen:

1. Diejenigen, welche auf der Verdichtung des Bodens beruhen. Während die äußere Belastung auf die Oberfläche des Bodens wirkt, suchen die Körner des Bodens unterhalb der Belastungsfläche eine solche Verteilung zu erreichen, daß sie imstande sind, die auf sie wirkenden Kräfte zu übernehmen und auf die tieferen Schichten zu übertragen. Dieses Bestreben der Körper führt zu der Bildung einer anderen dichteren Strukturform, die der Größe der fraglichen Kräfte entspricht. Folglich besitzt diese Verdichtung ihren größten Wert gleich unterhalb der Lastfläche; sie nimmt mit der Tiefe ab (weil die Kräfte mit der Tiefe abnehmen), und sie wird in jener Tiefe zu Null, wo die vorhandene Strukturform der Bodenschicht imstande ist, die auf jene von den höheren Schichten übertragenen Kräfte zu übernehmen. In diesem Sinne steht die Dichteänderung eines Sandbodens in enger Beziehung mit der in seinem Inneren durch die zugehörige Belastung hervorgerufenen Spannungsverteilung.

2. Diejenigen, welche auf rein plastischer Formänderung des Bodens beruhen, wobei keine Verdichtung entsteht. Nimmt man beispielsweise an, daß auf einem in seiner dichtesten Packung befindlichen Sandboden ein Bauwerk zu gründen ist, dieser Boden aber nicht imstande ist, die Last zu übernehmen. Dann wird das Bauwerk in den Sandboden einsinken, während der letztere unter Bildung von Gleitflächen schräg nach außen und oben ausweicht. Dieser Bewegungsvorgang geht so weit, bis der an der Gleitfläche des Bauwerkes auftretende Widerstand und die auf seine Seitenflächen wirkenden Reibungswiderstände imstande sind, dem gesamten Gewicht des Bauwerkes das Gleichgewicht zu halten. Die in diesem Falle hervorgerufenen Formänderungen des Sandbodens können voraussetzungsgemäß zu keiner weiteren Verdichtung des Bodens führen und sind daher rein plastische Formänderungen. Durch diese kann nur eine Auflockerung in den oberen Schichten seitlich des Bauwerkes bewirkt werden.

In praktischen Fällen treten beide Arten der Formänderung zumeist gleichzeitig auf.

Den Setzungsvorgang der zweiten Art bezeichnet Terzaghi<sup>1</sup> als „Bodenverdrängung durch Auftrieb“. Weiter schreibt er für den Fall einer stetig wachsenden Belastung die ruckartig auftretenden Setzungen der Bodenverdrängung durch Auftrieb und die stetig auftretenden Setzungen der Bodenverdrängung durch Verdichtung zu.

Jedenfalls sind die Formänderungen des Sandbodens ein Ausdruck seines Bestrebens nach einer solchen inneren Struktur, durch die er imstande ist, der äußeren Belastung das Gleichgewicht zu halten. Wie die elastischen Körper durch ihre elastischen Formänderungen dasjenige System der inneren Spannungen erzeugen, welches den die Formänderungen hervorrufenden Kräften das Gleichgewicht hält, so wird beim Sandboden durch die plastischen Formänderungen ein solches inneres Spannungssystem zu erreichen gesucht, das den äußeren Kräften standhält. Diese Formänderungen treten mit einem erheblichen Teile ihres Gesamtbetrages gleichzeitig mit der Einwirkung der äußeren Belastung auf und wachsen dann allmählich, bis der gesuchte Gleichgewichtszustand erreicht ist<sup>2</sup>. Dieser Vorgang

<sup>1</sup> Erdbaumechanik, S. 232.    <sup>2</sup> Erdbaumechanik, S. 89, Abb. 16.

kann durch das Auftreten verschiedener Ursachen (wie z. B. Wasserbewegungen im Boden, Erschütterungen usw.) unterbrochen werden. Dann wird unter diesen neuen Verhältnissen von neuem der Gleichgewichtszustand zu erreichen gesucht.

## **B. Die durch dynamische Einwirkungen hervorgerufenen Formänderungen.**

Außer den vorgenannten, durch statische Belastungen entstehenden Formänderungen der Sandböden, haben diejenigen eine besondere Bedeutung, die auf dynamische Ursachen zurückzuführen sind, wie Erschütterungen im Bauwerk selbst oder in seiner Nachbarschaft, die z. B. durch Maschinen, vorüberfahrende Lastkraftwagen, Eisenbahnzüge oder durch Rammen von Pfählen usw. hervorgerufen werden können.

Die auf der Oberfläche oder im Innern eines Sandbodens erzeugten Erschütterungen pflanzen sich durch Schwingungen in seinem Innern bis auf große Entfernungen fort, so daß die durch Erschütterungen hervorgerufenen Formänderungen außerordentliche Bedeutung gegenüber solchen aus statischer Belastung haben, insofern, als sie erheblich größer sind und sich auch in größerer Entfernung bemerkbar machen als die letzteren. Über den Einfluß von Erschütterungen auf die Formänderung von Sandböden findet man einige Angaben bei Terzaghi<sup>1</sup>.

In der vorliegenden Arbeit soll untersucht werden, welchen Einfluß auf der Oberfläche des Sandbodens erzeugte Erschütterungen auf die Formänderung und die Dichte desselben haben.

Die Versuche wurden im Laboratorium der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik ausgeführt. Die Erschütterungen wurden durch wiederholtes Fallen einer Stahlkugel auf eine auf dem Sandboden liegende eiserne Platte hervorgerufen. Die im ersten Abschnitt behandelten Versuche wurden in einem zylindrischen Gefäß mit 0,18 m Radius und 0,50 m Höhe ausgeführt. Dort wurden drei Sorten Sand untersucht, von denen zwei Sorten natürliche Sande von verschiedener Zusammensetzung, die dritte gesiebter Sand von regelmäßiger Korngröße (von 0,5—1,0 mm) waren (s. Abb. 15).

So wurde der Einfluß festgestellt, den die Zusammensetzung des Sandes auf die Änderung der Dichte aufweist.

Durch die im zweiten und dritten Abschnitt behandelten Versuche, die in einem ebenfalls zylindrischen Gefäße, jedoch mit 0,50 m Radius und 1 m Höhe ausgeführt worden sind (Versuchseinrichtung s. Abb. 18a und 18b), wurde die Verteilung der Setzungen und damit die Verdichtung des Bodens sowohl in senkrechter wie auch in waagerechter Richtung untersucht. Im vierten Abschnitt ist versucht worden, den Einfluß der den Sandkörper begrenzenden Wände auf die Größe der Setzungen (bzw. Verdichtungen) zu erfassen. Im fünften Abschnitt endlich wird eine Erklärung der in den vorhergehenden Abschnitten abgeleiteten Folgerungen gegeben.

---

<sup>1</sup> Erdbaumechanik, S. 89 u. 270.

## Der Einfluß der Zusammensetzung des Sandes auf seine Verdichtung.

### a) Allgemeines, Versuchsmethode, Versuchsmaterial.

In Abb. 1 ist der Apparat dargestellt, mit dem die Versuche dieses Abschnittes ausgeführt wurden. Das Gefäß wurde regelmäßig mit Sand bis auf die Ebene 3—3 gefüllt, dann wurde auf die Oberfläche die mit einem Stäbchen versehene kreisförmige Platte *cc* gesetzt. Das Stäbchen konnte durch die Führungen *d* hingeleitet, die mit dem Gefäß fest verbunden waren. Jeder Platte entsprachen zwei solcher Führungen, welche die senkrechte Bewegung des Stäbchens sicherten. Nach dem Einbringen der Platte *cc* folgte die Füllung des Gefäßes mit dem Sand bis auf die Ebene 2—2, das Einbringen der Platte *bb* in gleicher Weise, dann nochmals die Füllung des Gefäßes mit dem Sand bis auf die Ebene 1—1, das Einbringen der Platte *aa* und zuletzt die Füllung des Gefäßes bis auf die Ebene 0—0, die 3 cm unterhalb des Randes des Gefäßes lag.

Die Platten *aa*, *bb* und *cc* besaßen in allen Versuchen die in Abb. 1 bezeichneten Lagen.

Auf die Mitte der Sandoberfläche wurde eine eiserne kreisförmige Platte mit vier senkrecht nach unten gehenden eisernen Stiften gelegt, auf die in ungefähr gleichen Zeitabständen von je 5 Sekunden eine Kugel von 0,882 kg Gewicht aus einer mittleren Höhe von 1 m herabfiel.

Die Setzungen der Platten wurden durch drei Zeißuhren gemessen. Hierbei konnten Hundertstel des Millimeters abgelesen und Tausendstel geschätzt werden. Nach einer bestimmten Fallzahl der Kugel wurden die Setzungen der Platte aufgeschrieben; dann wurde die etwas in den Sand eingesunkene Platte aufgehoben und nach Einebnen der Oberfläche des Sandes von neuem in ihre ursprüngliche Lage gebracht, worauf der Versuch weiter fortgeführt wurde.

Für jede Sandsorte wurden zwei gleiche Versuche durchgeführt. Die Setzungen der beiden Versuche wichen stets nur wenig, äußerstenfalls 6%, voneinander ab. Daher wurden die Mittelwerte der Setzungen aus beiden Versuchen als die wirklichen Setzungen der Platten *aa*, *bb* und *cc* angesehen.

Die verschiedenen Sandsorten sind mit A, B und C bezeichnet:

Sorte A war ein natürlicher, jedoch getrockneter Sand, der zu etwa 60% aus Grobsand (2—0,6 mm Korngröße nach Merkblatt des Unterausschusses für einheitliche Benennung der Bodenarten) bestand. Je 20% waren gröber bzw. feiner.

Sorte B war ebenfalls ein natürlicher, jedoch getrockneter Sand, der zu etwa gleichen Teilen aus Mittelsand (0,6—0,2 mm) und Feinsand (0,2—0,1 mm) gemischt war. Nur 7% waren feiner als 0,1 mm.

Sorte C wurde durch Aussieben der Sorte A erhalten und wies nur Körner von 1—0,5 mm Durchmesser auf.

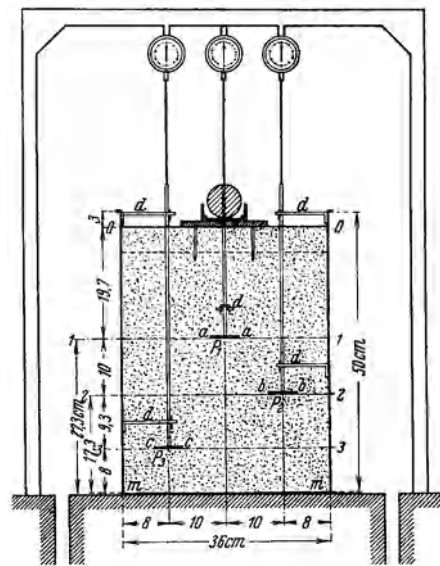


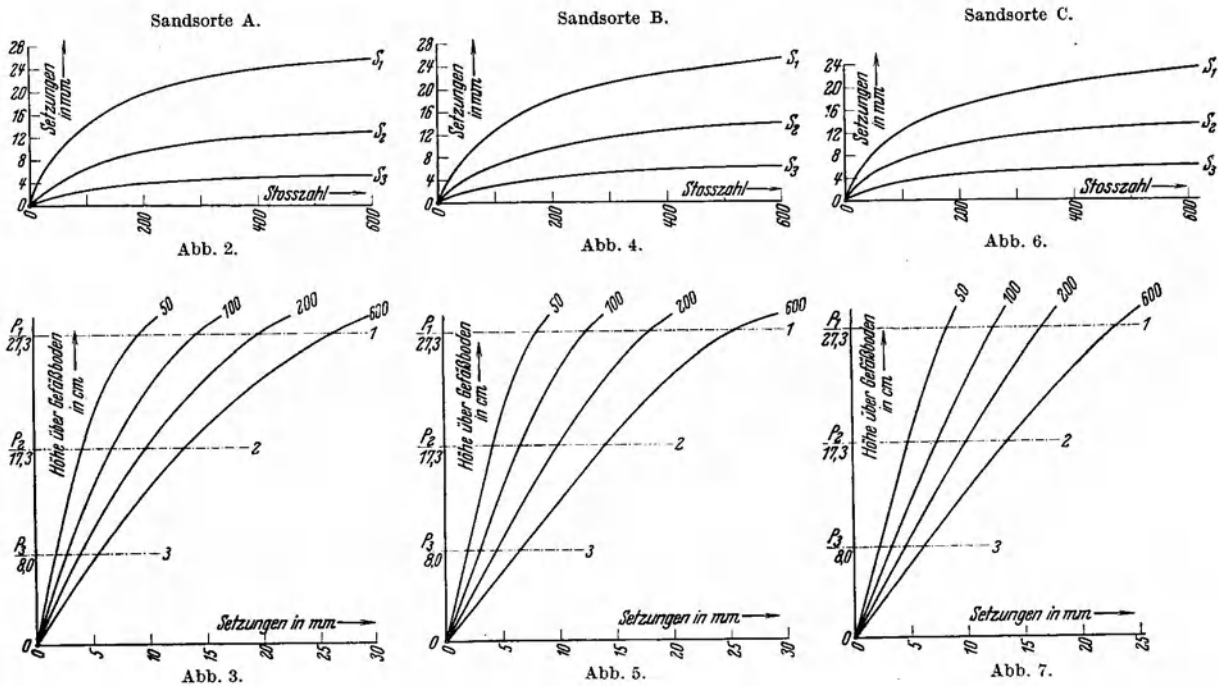
Abb. 1. Kleine Versuchsanordnung.

## b) Die Versuchsergebnisse.

Die Tabelle 1 enthält die Ergebnisse der Versuche für die drei Sandarten. Wie schon gesagt, sind in diese Tabelle die mittleren Werte der Setzungen aus zwei Versuchsreihen für jede Sandart eingetragen.

Diese Ergebnisse sind auch in den Abb. 2—7 als Kurven aufgetragen. Abb. 2, 4 und 6 sind die Kurven der Setzungen für die Sandarten A, B und C an den drei Punkten  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$ . Als Abszissen sind die Fallzahlen der Kugel (Stoßzahlen) und als Ordinaten die beobachteten Setzungen aufgetragen. Aus diesen Kurven ist leicht zu ersehen:

1. daß die Setzungen aller drei Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  für alle drei Sorten zuerst mit zunehmender Anzahl der Stöße sehr rasch wachsen, dann aber langsamer und endlich einem konstanten Grenzwert zustreben. Abb. 3, 5 und 7 stellen die Verteilung der Setzungen in einer senkrechten, durch die Punkte



$P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  gehenden Linie für alle drei Sandarten und für verschiedene Stoßzahlen (50, 100, 200 und 600) dar. Aus dem Verlauf dieser Kurven ist zu ersehen:

2. daß für alle drei Sandarten die höheren Schichten sich mehr verdichten als die tieferen Schichten. Wenn z. B. die Kurve der Verteilung eine gerade Linie  $ab$  wäre (Abb. 8), so würde das bedeuten, daß der Sandboden sich in allen Schichten gleichmäßig setzt. Ist sie aber gekrümmt  $acde$ , und zwar nach oben hin zunehmend, so bedeutet dies, daß die Verdichtung in den oberen Schichten größer ist als in den unteren. Letzteres ist auch der Fall für die vorliegenden Sandarten. Eine systematische Untersuchung der mit der Tiefe abnehmenden Verdichtung des Sandes findet man in dem nachstehenden zweiten und dritten Abschnitt.

Das gleiche Ergebnis kommt noch besser zum Ausdruck, wenn man für die drei Sandarten aus den beobachteten Setzungen die Dichteänderungen der entsprechenden Schichten berechnet. In der Tabelle 1 sind die Änderungen der Dichte für die zwischen den Punkten  $P_1$ — $P_2$ ,  $P_2$ — $P_3$  und  $P_3$ — $m$  liegenden Schichten berechnet.

Hierbei ist aber die stillschweigende Voraussetzung gemacht, daß die Setzungen der Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  als diejenigen der durch diese Punkte gehenden waagerechten Ebenen angesehen werden können, was auch der Wahrheit naheliegt, weil die näher an der Achse des Gefäßes bzw. weiter von ihr entfernt liegenden Punkte als die Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  auch größere bzw. kleinere Setzungen als diejenigen der Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  aufweisen werden (s. dritten Abschnitt). Infolgedessen können die Setzungen der Punkte  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  als die Mittelwerte der Setzungen aller Punkte der durch sie gehenden senkrechten Ebenen betrachtet werden.

In den Abb. 9, 11 und 13 sind die in der Tabelle 1 berechneten Ergebnisse der Dichteänderungen für die drei Sandarten graphisch dargestellt. Als Y-Achsen sind die durch die Punkte  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$



und  $m$  gehenden senkrechten Linien aufgetragen. Als Abszissen sind die Dichteänderungen der zwischen zwei Punkten bzw. zwischen dem untersten Punkt  $P_3$  und dem Boden liegenden Schichten jeweils für den in der oberen Begrenzungsebene der Schicht liegenden Punkt  $P_1$ ,  $P_2$  und  $P_3$  aufgetragen. Aus den Kurven der Abb. 9, 11 und 13 sieht man ebenfalls, daß für alle drei Sandsorten die Verdichtung in den obersten Schichten ihren größten Wert besitzt und mit der Tiefe abnimmt.

Durch weiteren Vergleich der dargestellten Abbildungen unter Berücksichtigung der Kornverteilungskurven in Abb. 15 erhält man folgendes dritte Ergebnis:

3. Die für alle Sandsorten bestehende Ungleichheit der Dichteänderungen mit der Tiefe ist am größten für die Sandsorte, die aus Körnern von unregelmäßiger Größe besteht. Sie ist also am größten

Tabelle 1. Versuchsergebnisse mit der kleinen Apparatur.

Stoßzahl	Sandsorte A						Sandsorte B						Sandsorte C					
	Setzungen in mm			Verdichtungen in mm			Setzungen in mm			Verdichtungen in mm			Setzungen in mm			Verdichtungen in mm		
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	der Schicht			$P_1$	$P_2$	$P_3$	der Schicht			$P_1$	$P_2$	$P_3$	der Schicht		
				$P_3-m$	$P_2-P_3$	$P_1-P_2$				$P_3-m$	$P_2-P_3$	$P_1-P_2$				$P_3-m$	$P_2-P_3$	$P_1-P_2$
4	0,87	0,40	0,22	0,22	0,18	0,47	1,30	0,62	0,27	0,27	0,35	0,68	1,15	0,67	0,31	0,31	0,36	0,48
8	1,85	0,82	0,45	0,45	0,37	1,00	2,25	1,15	0,50	0,50	0,65	1,10	2,06	1,22	0,56	0,56	0,66	0,84
12	2,50	1,14	0,61	0,61	0,53	1,36	3,07	1,56	0,69	0,69	0,87	1,51	2,98	1,72	0,81	0,81	0,91	1,26
16	3,32	1,49	0,78	0,78	0,71	1,83	3,63	1,89	0,85	0,85	1,04	1,74	3,69	2,18	1,00	1,00	1,18	1,51
20	4,16	1,86	0,91	0,91	0,95	2,30	4,29	2,24	1,01	1,01	1,23	2,05	4,40	2,60	1,19	1,19	1,41	1,80
24	5,10	2,26	1,05	1,05	1,21	2,84	4,85	2,55	1,17	1,17	1,38	2,30	5,05	3,02	1,35	1,35	1,67	2,03
28	5,94	2,63	1,19	1,19	1,44	3,31	5,44	2,85	1,32	1,32	1,53	2,59	5,64	3,40	1,56	1,56	1,84	2,24
32	6,78	3,00	1,33	1,33	1,67	3,78	6,08	3,17	1,46	1,46	1,71	2,91	6,23	3,74	1,67	1,67	2,07	2,49
36	7,30	3,25	1,43	1,43	1,82	4,05	6,67	3,47	1,59	1,59	1,88	3,20	6,80	4,04	1,82	1,82	2,22	2,76
40	7,85	3,52	1,53	1,53	1,99	4,33	7,25	3,74	1,72	1,72	2,02	3,51	7,33	4,30	1,97	1,97	2,32	3,03
46	8,80	3,96	1,70	1,70	2,26	4,84	7,82	4,04	1,87	1,87	2,17	3,78	8,01	4,70	2,16	2,16	2,54	3,31
50	9,35	4,22	1,81	1,81	2,41	5,13	8,23	4,25	1,96	1,96	2,29	3,98	8,47	4,94	2,28	2,28	2,66	3,53
52	9,62	4,36	1,86	1,86	2,50	5,26	8,43	4,35	2,01	2,01	2,34	4,08	8,69	5,07	2,34	2,34	2,73	3,62
58	10,42	4,75	2,02	2,02	2,73	5,67	9,00	4,65	2,14	2,14	2,51	4,35	9,27	5,44	2,50	2,50	2,94	3,83
60	10,61	4,87	2,06	2,06	2,81	5,74	9,20	4,74	2,18	2,18	2,56	4,46	9,45	5,56	2,55	2,55	3,01	3,89
64	11,01	5,07	2,12	2,12	2,95	5,94	9,58	4,91	2,25	2,25	2,66	4,67	9,80	5,78	2,64	2,64	3,14	4,02
70	11,61	5,37	2,21	2,21	3,16	6,24	10,15	5,25	2,36	2,36	2,89	4,90	10,30	6,15	2,80	2,80	3,35	4,15
80	12,56	5,88	2,39	2,39	3,49	6,68	11,03	5,75	2,60	2,60	3,15	5,28	11,15	6,60	3,02	3,02	3,58	4,55
90	13,52	6,37	2,54	2,54	3,83	7,15	11,83	6,21	2,82	2,82	3,39	5,63	11,85	7,03	3,22	3,22	3,81	4,82
100	14,35	6,79	2,69	2,69	4,10	7,56	12,58	6,65	3,02	3,02	3,63	5,93	12,51	7,45	3,40	3,40	4,05	5,06
110	15,12	7,25	2,82	2,82	4,43	7,87	13,32	7,07	3,22	3,22	3,85	6,25	13,06	7,78	3,55	3,55	4,23	5,28
120	15,72	7,56	2,95	2,95	4,61	8,16	13,94	7,46	3,40	3,40	4,06	6,48	13,62	8,10	3,68	3,68	4,42	5,52
140	16,95	8,22	3,19	3,19	5,03	8,73	15,29	8,21	3,75	3,75	4,46	7,08	14,63	8,70	3,97	3,97	4,73	5,93
160	18,03	8,82	3,48	3,48	5,34	9,21	16,43	8,86	4,03	4,03	4,83	7,57	15,47	9,15	4,20	4,20	4,95	6,32
180	18,96	9,36	3,71	3,71	5,65	9,60	17,40	9,40	4,28	4,28	5,12	8,00	16,15	9,58	4,39	4,39	5,19	6,57
200	19,82	9,82	3,92	3,92	5,90	10,00	18,10	9,84	4,50	4,50	5,34	8,26	16,83	10,00	4,57	4,57	5,43	6,83
220	20,55	10,17	4,07	4,07	6,10	10,38	18,93	10,31	4,70	4,70	5,61	8,62	17,45	10,32	4,77	4,77	5,55	7,13
240	21,07	10,46	4,22	4,22	6,24	10,61	19,65	10,61	4,88	4,88	5,81	8,96	17,98	10,58	4,86	4,86	5,72	7,40
260	21,53	10,76	4,34	4,34	6,42	10,79	20,28	11,03	5,04	5,04	5,99	9,25	18,45	10,83	4,99	4,99	5,84	7,62
280	21,95	11,01	4,46	4,46	6,55	10,94	20,85	11,36	5,20	5,20	6,16	9,49	18,92	11,06	5,10	5,10	5,96	7,86
300	22,39	11,21	4,55	4,55	6,66	11,18	21,31	11,65	5,35	5,35	6,30	9,66	19,32	11,30	5,20	5,20	6,10	8,02
340	23,18	11,63	4,74	4,74	6,89	11,55	22,17	12,18	5,57	5,57	6,61	9,99	20,08	11,76	5,40	5,40	6,36	8,32
380	23,87	11,94	4,91	4,91	7,07	11,89	22,80	12,60	5,76	5,76	6,84	10,20	20,73	12,19	5,57	5,57	6,62	8,54
400	24,17	12,14	4,98	4,98	7,16	12,03	23,13	12,78	5,85	5,85	6,93	10,35	21,04	12,40	5,65	5,65	6,75	8,64
420	24,47	12,29	5,05	5,05	7,24	12,18	23,45	12,94	5,94	5,94	7,00	10,51	21,34	12,60	5,72	5,72	6,88	8,70
460	24,98	12,56	5,17	5,17	7,39	12,42	24,02	13,26	6,09	6,09	7,17	10,76	21,80	12,90	5,86	5,86	7,04	8,90
500	25,49	12,81	5,28	5,28	7,53	12,68	24,52	13,53	6,22	6,22	7,31	10,99	22,25	13,15	6,00	6,00	7,15	9,10
540	25,82	12,98	5,37	5,37	7,61	12,87	24,90	13,82	6,34	6,34	7,48	11,08	22,70	13,36	6,12	6,12	7,24	9,34
580	26,12	13,17	5,45	5,45	7,72	12,95	25,32	14,05	6,43	6,43	7,62	11,27	23,11	13,54	6,24	6,24	7,30	9,57
600	26,27	13,26	5,49	5,49	7,77	13,01	25,53	14,16	6,50	6,50	7,66	11,37	23,34	13,62	6,30	6,30	7,32	9,72

für die Sandsorte A, kleiner für die Sandsorte B und am kleinsten für die Sandsorte C. Je flacher bzw. steiler die Kornverteilungskurve der Abb. 15 für eine Sandsorte ist, desto flacher bzw. steiler sind die Verteilungskurven der Setzungen der Abb. 3, 5 und 7 und die Kurven der Dichteänderung der Abb. 9, 11 und 13.

Eine Folge der obenstehenden Ergebnisse Nr. 2 und 3 unter Berücksichtigung der Abb. 2 bis 13 ist:

4. daß, für den Fall eines aus Körnern von unregelmäßiger Größe bestehenden Sandes, der größte Teil der Stoßwirkungen für die schnelle Verdichtung der oberen Schichten verzehrt wird, und nur ein kleiner Teil davon für die Verdichtung der unteren Schichten, die sich ganz langsam vollzieht, übrig bleibt. Erst nachdem die oberen Schichten einigermaßen verdichtet sind, erfolgt die Verdichtung in den tieferen Schichten in größerem Ausmaß. Dagegen gilt für den aus Körnern von regelmäßiger Größe

bestehenden Sand, daß die Verdichtung in den oberen Schichten kleiner ist als diejenige des Sandes des ersten Falles. Sie nimmt nicht so schnell mit der Tiefe wie die erstere ab und sie erstreckt sich, wenn auch in kleinem Betrage, in tiefere Schichten als die erstere. Es macht sich also die Wirkung von

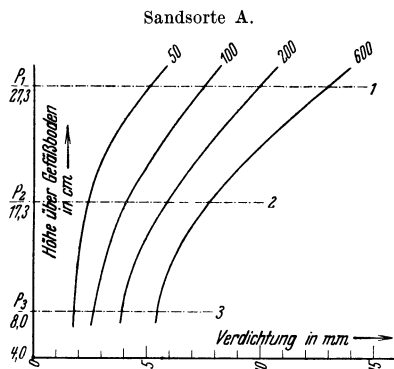


Abb. 9.

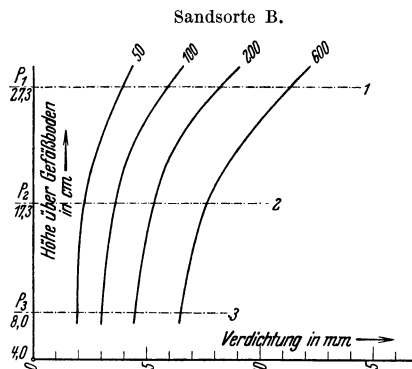


Abb. 11.

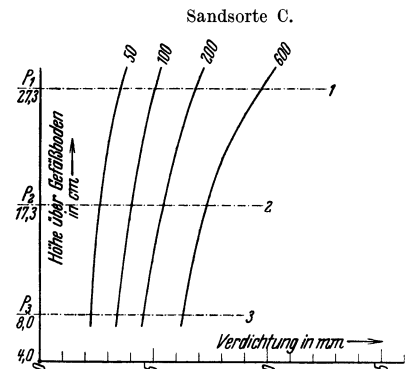


Abb. 13.

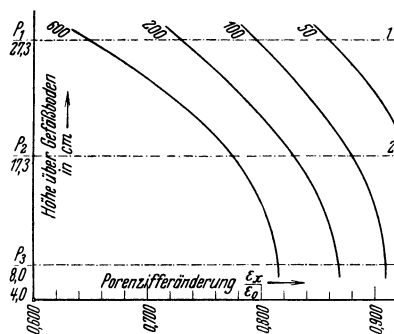


Abb. 10.

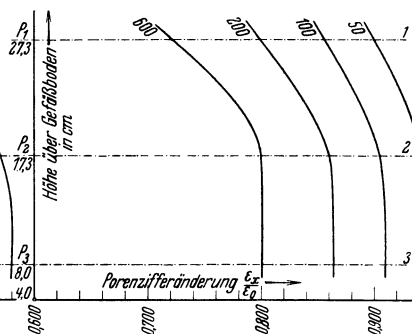


Abb. 12.

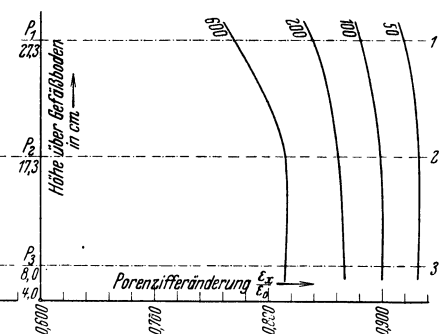


Abb. 14.

Stößen bei gleichmäßige Körner aufweisenden Sandsorten in größeren Tiefen bemerkbar als bei ungleichmäßige Körner aufweisenden Sandsorten.

So ist z. B. die Verdichtung der Schicht 1—2 bei 50 Stößen für die Sandsorte C mit 3,53 mm kleiner als die Verdichtung für die beiden anderen Sandsorten A (5,13 mm) und B (3,98 mm). Die Verdichtung der Schichten 2—3 (2,66 mm) und 3—*m* (2,28 mm) der Sorte C ist jedoch größer als die Verdichtung der Sorte A (2—3 = 2,41 mm, 3—*m* = 1,81 mm) und B (2—3 = 2,29 mm, 3—*m* = 1,96 mm). Nach einer ganz bestimmten Stoßanzahl, wenn die oberen Schichten der Sandsorten A und B genug verdichtet sind, fangen auch die Verdichtungen in den Schichten 2—3 und 3—*m* der Sorten A und B an, gleich und mit weiter wachsender Stoßanzahl größer zu werden als die Verdichtungen derselben Schichten für die Sorte C. Nach 600 Stößen z. B. ist schon die Verdichtung der Schicht 2—3 für die Sorte A (7,77 mm) und B (7,66 mm) größer als diejenige der Sorte C (7,32 mm), und die Verdichtung der Schicht 3—*m* für die Sorte B (6,50 mm) größer als diejenige der Sorte C (6,30 mm) geworden usw. (Die obigen Zahlenwerte sind aus Tab. I entnommen.)

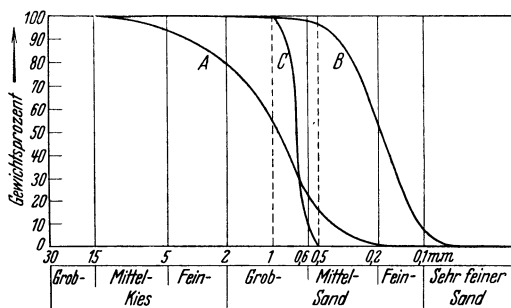


Abb. 15. Kornverteilungskurven der Versuchssande.

### c) Die Änderung der Porenziffer.

Sind  $V_k$ ,  $V_h$  das anfängliche Volumen der Körner bzw. der Hohlräume einer Sandschicht,  $\epsilon_0$  die anfängliche Porenziffer,  $F$  der Querschnitt des Gefäßes,  $x$  die Verdichtung der fraglichen Schicht nach einer bestimmten Stoßzahl, und  $\epsilon_x$  die neue Porenziffer, so ist

$$\varepsilon_0 = \frac{V_h}{V_k} \quad (1)$$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_0 - \delta \varepsilon_0 = \frac{V_h - F \cdot x}{V_k} \quad (2)$$

$$\delta \varepsilon_0 = x \cdot \frac{F}{V_k} \quad (3)$$

$$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0} = \frac{V_h - F \cdot x}{V_h} = 1 - x \cdot \frac{F}{V_h} \quad (4)$$

Für jede Schicht ist der Wert  $V_k$  konstant und unabhängig von der Stoßzahl.

In der Tabelle 2 sind die Werte  $\varepsilon_x$  und die entsprechenden  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$  der Porenziffer der Schichten 1—2, 2—3, 3— $m$  für alle drei Sandsorten je nach 50, 100, 200, 300, 400, 500 und 600 Stößen berechnet. Wie

Tabelle 2. Die Änderung der Porenziffer.

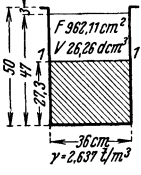
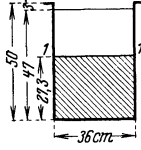
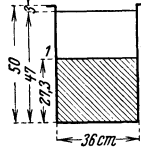
Sandsorte	Stoßzahl	Schicht 1—2				Schicht 2—3				Schicht 3— $m$				Bemerkungen
		$x$ in dm	$\frac{F}{V_k} x$	$\varepsilon_x$	$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$	$x$ in dm	$\frac{F}{V_k} x$	$\varepsilon_x$	$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$	$x$ in dm	$\frac{F}{V_k} x$	$\varepsilon_x$	$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$	
A	0	0,000	0	0,590	1,000	0,000	0	0,590	1,000	0,000	0	0,590	1,000	Schicht 1—2, $\varepsilon_0=0,590$ , $V_k=6,06$ $\varepsilon_x = 0,590 - \frac{9,6211}{6,06} x = 0,590 - 1,59 x$
	50	0,0513	0,082	0,508	0,860	0,0241	0,041	0,549	0,930	0,0181	0,036	0,554	0,940	
	100	0,0756	0,120	0,470	0,796	0,0410	0,070	0,520	0,880	0,0269	0,053	0,537	0,910	
	200	0,1000	0,159	0,431	0,730	0,0590	0,101	0,489	0,828	0,0392	0,078	0,512	0,868	Schicht 2—3, $\varepsilon_0=0,590$ , $V_k=15,62$ $\varepsilon_x = 0,590 - \frac{9,6211}{5,62} x = 0,590 - 1,71 x$
	300	0,1118	0,178	0,412	0,697	0,0666	0,114	0,476	0,806	0,0455	0,091	0,499	0,845	
	400	0,1203	0,192	0,398	0,674	0,0716	0,122	0,468	0,793	0,0498	0,099	0,491	0,832	
	500	0,1268	0,202	0,388	0,658	0,0753	0,129	0,461	0,781	0,0528	0,105	0,485	0,822	Schicht 3— $m$ $V_k = 4,84 \text{ dm}^3$ $\varepsilon_x = 0,590 - 1,99 x$
600	0,1301	0,207	0,383	0,649	0,0777	0,133	0,457	0,775	0,0549	0,109	0,481	0,815		
B	0	0,000	0	0,695	1,000	0,000	0	0,695	1,000	0,000	0	0,695	1,000	Schicht 1—2, $\varepsilon_0=0,695$ , $V_k=5,69$ $\varepsilon_x = 0,695 - 1,70 x$
	50	0,0398	0,068	0,627	0,900	0,0229	0,042	0,653	0,940	0,0196	0,042	0,653	0,940	
	100	0,0593	0,101	0,594	0,856	0,0363	0,066	0,629	0,905	0,0302	0,064	0,631	0,910	
	200	0,0826	0,140	0,555	0,799	0,0534	0,097	0,598	0,860	0,0450	0,095	0,600	0,864	Schicht 2—3, $V_k = 5,29 \text{ dm}^3$ $\varepsilon_x = 0,695 - 1,82 x$
	300	0,0966	0,164	0,531	0,765	0,0630	0,115	0,580	0,835	0,0535	0,114	0,581	0,838	
	400	0,1035	0,176	0,519	0,746	0,0693	0,116	0,569	0,818	0,0585	0,124	0,571	0,822	
	500	0,1099	0,187	0,508	0,730	0,0731	0,133	0,562	0,810	0,0622	0,132	0,563	0,811	Schicht 3— $m$ $V_k = 4,55 \text{ dm}^3$ $\varepsilon_x = 0,695 - 2,12 x$
600	0,1135	0,193	0,502	0,722	0,0766	0,139	0,556	0,800	0,0650	0,138	0,557	0,801		
C	0	0,000	0	0,738	1,000	0,000	0	0,738	1,000	0,000	0	0,738	1,000	Schicht 1—2, $\varepsilon_0=0,738$ , $V_k=5,52$ $\varepsilon_x = 0,738 - 1,74 x$
	50	0,0353	0,061	0,677	0,919	0,0266	0,050	0,688	0,932	0,0228	0,050	0,688	0,932	
	100	0,0506	0,088	0,650	0,881	0,0405	0,076	0,662	0,898	0,0340	0,074	0,664	0,900	
	200	0,0683	0,119	0,619	0,839	0,0543	0,102	0,632	0,861	0,0457	0,099	0,639	0,867	Schicht 2—3 $V_k = 5,14 \text{ dm}^3$ $\varepsilon_x = 0,738 - 1,87 x$
	300	0,0802	0,140	0,598	0,810	0,0610	0,114	0,624	0,848	0,0520	0,113	0,625	0,849	
	400	0,0864	0,150	0,588	0,798	0,0675	0,126	0,612	0,830	0,0565	0,123	0,615	0,832	
	500	0,0910	0,158	0,580	0,787	0,0715	0,134	0,604	0,820	0,0600	0,130	0,608	0,823	Schicht 3— $m$ $V_k = 4,43 \text{ dm}^3$ $\varepsilon_x = 0,738 - 2,17 x$
600	0,0972	0,169	0,569	0,770	0,0732	0,137	0,601	0,815	0,0630	0,137	0,601	0,815		

schon aus der Gleichung (2) und (4) leicht zu ersehen ist, geben die Kurven der Abb. 9, 11 und 13 in einem anderen Maßstab die graphische Darstellung der Werte  $\varepsilon_x$  und  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$ . Die Werte  $\varepsilon_x$ ,  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$  neu aufzutragen, ist entbehrlich. Trotzdem sind in den Abb. 10, 12 und 14 für alle drei Sandsorten die Werte  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$  graphisch dargestellt. Alle für die Verdichtung der Schichten in den vorstehenden Absätzen abgeleiteten Ergebnisse gelten auch für die Änderung der Porenziffer.

Wenn man die unterhalb einer durch den Punkt  $P_1$  gehenden waagerechten Ebene liegende Sandmasse als eine Schicht betrachtet, und man für alle drei Sandsorten nach 50, 100, 200, 300, 400, 500 und 600 Stoßzahl die ihr entsprechende neue Porenziffer  $\varepsilon_x$  nach der Formel 2 und die Werte  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$  berechnet, so kommt man weiter zu neuen Ergebnissen. Die neuen Werte der Porenziffer  $\varepsilon_x$  und die Werte  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$  sind in der Tabelle 3 eingetragen. In den Abb. 16 und 17 sind diese Werte  $\varepsilon_x$  und  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$  für alle drei Sandsorten graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die Stoßzahlen aufgetragen. Durch Vergleich der Kurven der Abb. 16 und 17 miteinander kommt man zu folgenden Ergebnissen:

5. Die anfängliche Porenziffer der Sandsorte A ist kleiner als diejenige der Sandsorten B und C, weiter ist auch die Porenziffer der Sandsorte B kleiner als diejenige der Sandsorte C. Unter Berücksichtigung

Tabelle 3. Berechnung der Werte  $\varepsilon_x$  und  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$ .

Sand-sort	Stoß-zahl	$x$ in dm	$\frac{F}{V_k} x$	$\varepsilon_x$	$\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$	Bemerkungen
A	0	0,0000	0,000	0,590	1,000	 <p>Gesamtes Gewicht 75 kg: <math>\frac{27,3}{47} \times 75 = 43,55</math> kg  <math>V_k = \frac{43,55}{2,637} = 16,51</math>    <math>V_h = 26,26 - 16,51 = 9,75</math> dm<sup>3</sup>  <math>\varepsilon_0 = \frac{V_h}{V_k} = \frac{9,75}{16,51} = 0,590</math>  <math>\varepsilon_x = 0,590 - \frac{F}{V_k} x = 0,590 - 0,5828 x</math></p>
	50	0,0935	0,055	0,535	0,907	
	100	0,1435	0,084	0,506	0,858	
	200	0,1982	0,116	0,475	0,805	
	300	0,2239	0,130	0,460	0,780	
	400	0,2417	0,141	0,449	0,761	
	600	0,2549	0,148	0,442	0,750	
B	0	0,0000	0,000	0,695	1,000	 <p>Gesamtes Gewicht: 70,45 kg: <math>\frac{27,3}{47} \times 70,45 = 40,92</math> kg  <math>V_k = \frac{40,921}{2,641} = 15,49</math>    <math>V_h = 26,26 - 15,49 = 10,77</math> dm<sup>3</sup>  <math>\varepsilon_0 = \frac{10,77}{15,49} = 0,695</math>  <math>\varepsilon_x = 0,695 - 0,621 x</math></p>
	50	0,0823	0,051	0,644	0,927	
	100	0,1258	0,078	0,617	0,887	
	200	0,1810	0,112	0,583	0,840	
	300	0,2131	0,132	0,563	0,811	
	400	0,2313	0,144	0,551	0,793	
	600	0,2452	0,152	0,543	0,782	
C	0	0,0000	0,000	0,738	1,000	 <p>Gesamtes Gewicht 68,60: <math>\frac{27,3}{47} \times 68,60 = 39,85</math> kg  <math>V_k = \frac{39,85}{2,637} = 15,11</math>    <math>V_h = 26,26 - 15,11 = 11,15</math> dm<sup>3</sup>  <math>\varepsilon_0 = \frac{11,15}{15,11} = 0,738</math>  <math>\varepsilon_x = 0,738 - 0,6367 x</math></p>
	50	0,0847	0,054	0,684	0,927	
	100	0,1251	0,0795	0,658	0,892	
	200	0,1683	0,107	0,631	0,858	
	300	0,1932	0,123	0,615	0,834	
	400	0,2104	0,134	0,604	0,820	
	600	0,2225	0,142	0,596	0,808	

sichtigung der Kurven in Abb. 15 kann man also sagen, daß der flacher verlaufenden Kornverteilungskurve (Sandsorten, die aus Körnern von unregelmäßiger Größe bestehen) eine kleinere anfängliche Porenziffer entspricht als der steiler verlaufenden Kornverteilungskurve, naturgemäß unter denselben Ablagerungsverhältnissen. Dieses Ergebnis könnte man auch aus Tabelle 3 entnehmen.

6. Mit dem Beginn der Verdichtung nehmen die Porenziffern derjenigen Sandsorten, die aus Körnern von unregelmäßiger Größe bestehen (flach verlaufende Kornverteilungskurve) schneller ab als die der aus Körnern regelmäßiger Größe bestehenden Sandsorten (steiler verlaufende Kornverteilungskurve), obgleich die Porenziffern der ersteren kleiner als die der zweiten waren.

Die Erklärung für alle diese Ergebnisse findet man in dem letzten Abschnitt.

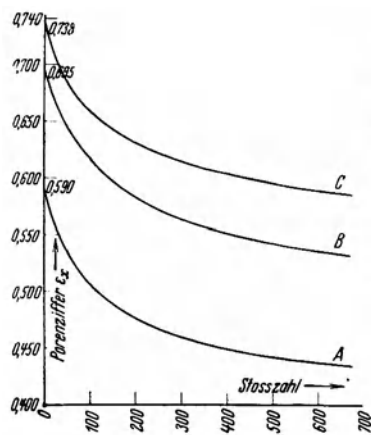


Abb. 16.

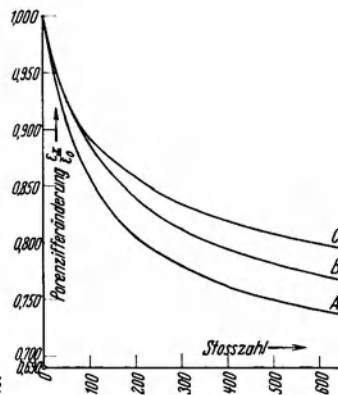


Abb. 17.

## Zweiter Abschnitt.

# Die Verteilung der Setzungen bzw. Verdichtungen in senkrechter Richtung.

## a) Allgemeines, Versuchsmethode, Versuchsmaterial.

Die kleinen Dimensionen des Gefäßes, in dem die in Abschnitt I behandelten Versuche ausgeführt sind, hatten es nicht gestattet, ein besseres Bild über die Verteilung der Verdichtungen des Sandbodens in senkrechter Richtung zu erhalten. Deswegen sind die Versuche auf ein neues größeres, ebenfalls

kreiszyndrisches Gefäß mit 0,50 m Radius und 1 m Höhe ausgedehnt. Abb. 18a stellt die neue Versuchsanordnung dar. Mit dieser Anordnung wurden die Setzungen in vier Punkten  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  gemessen, die entsprechend 0,20, 0,40, 0,60 und 0,80 m unterhalb des Gefäßrandes und in 0,10 m Entfernung von der Achse des Gefäßes lagen, wie es aus der Abb. 18a zu ersehen ist. Zur Vermeidung der Reibung zwischen dem Sande und den Stäbchen der Platten  $aa$ ,  $bb$ ,  $cc$  und  $dd$  waren die Stäbchen in Messingrohren geführt, die fest mit eisernen Rahmen (s. Abb. 18a und 18b) verbunden waren. Diese Rahmen wurden mit den vorher in die Rohre eingeschobenen Stäbchen der Platten während der Füllung des Gefäßes an letzteres angeschraubt. Während der Setzung der Platten konnten die Stäbchen in den Rohren gleiten, so daß ihre senkrechte Bewegung gesichert war. Die Versuche wurden mit Sandsorte A durchgeführt (s. Kornverteilungskurve Abb. 15). Die Füllung des Gefäßes mit Sand erfolgte in ähnlicher Weise, wie es im ersten Abschnitt beschrieben ist, d. h. es wurde das Gefäß mit Sand bis an die Ebene 4—4 gefüllt, dann wurde der Rahmen mit dem Stäbchen der Platte  $dd$  in das Gefäß gesetzt und festgeschraubt, dann wurde die Füllung bis an die Ebene 3—3 fortgesetzt usw., bis endlich das Gefäß bis auf 1 cm unterhalb seines Randes mit Sand gefüllt war. In die Mitte der Sandoberfläche wurde die eiserne Platte gesetzt, auf die die Stahlkugel in ungefähr gleichen Zeitabständen von je etwa 5 Sekunden aus einer mittleren Höhe von 1 m herabfiel. Nach einer bestimmten Stoßzahl wurden die Setzungen der Platten aufgeschrieben. Dann wurde die etwas in den Sand eingesunkene Platte aufgehoben und nach Einebnen der Oberfläche des Sandes in der Nähe der Mitte von neuem in ihre ursprüngliche Lage gebracht, worauf der Versuch weiter fortgeführt wurde. Am Ende des Versuchs, d. h. nach 2500 Stößen, hatte die Sandoberfläche die in der Abb. 18a durch gestrichelte Linien dargestellte Form angenommen.

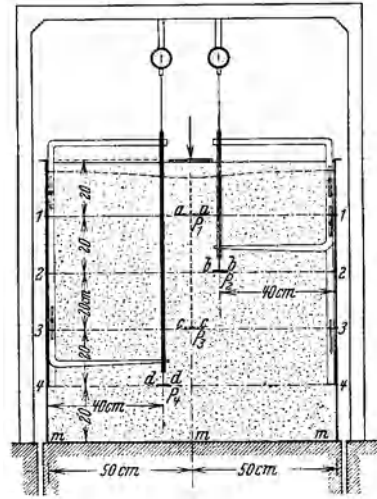


Abb. 18 a. Grosse Versuchsanordnung.

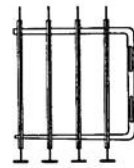


Abb. 18 b.

### b) Versuchsergebnisse, die Form der Setzungskurven.

In der Tabelle 4 sind die beobachteten Setzungen der Punkte  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  von 0 bis 2500 Stößen aufgeschrieben. In der Abb. 19 sind diese Setzungen graphisch dargestellt. Als Abszissen sind die Stoßzahlen aufgetragen. In der Tabelle 5 sind die Werte  $\frac{S_2}{S_1}$ ,  $\frac{S_3}{S_1}$  und  $\frac{S_4}{S_1}$ , d. h. die Verhältnisse der Setzungen, der Punkte  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$  zu denjenigen des Punktes  $P_1$  berechnet und in der Abb. 20 die-

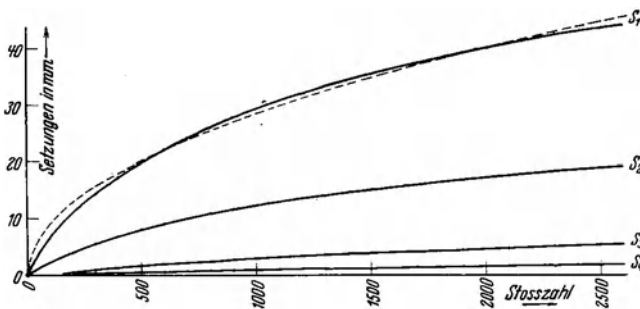


Abb. 19.

selben Werte in Abhängigkeit von den Stoßzahlen graphisch dargestellt. Aus der Form der Setzungskurven (Abb. 19) ergibt sich eine gewisse Abweichung von dem im ersten Abschnitt gebrachten ersten Ergebnis insofern, als dieses Ergebnis für die ersten Stoßzahlen zunächst nur für die beiden oberen Punkte  $P_1$  und  $P_2$  gilt. Erst nach einer bestimmten Stoßzahl beobachtet man, daß auch der Punkt  $P_3$ , und nach noch größerer

Tabelle 4. Versuchsergebnisse mit der großen Apparatur.

Stoßzahl	Setzungen in mm für Punkt			
	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$
5	0,45	0,08	0,00	0,00
20	1,56	0,32	0,005	0,00
50	3,67	1,02	0,075	0,01
100	6,88	2,09	0,275	0,08
150	9,20	2,98	0,47	0,155
200	11,05	3,90	0,63	0,235
250	12,15	4,59	0,84	0,305
300	14,54	5,51	1,07	0,385
350	16,01	6,14	1,215	0,44
400	17,63	6,85	1,41	0,50
450	18,93	7,42	1,55	0,54
500	20,23	8,00	1,71	0,60
600	22,07	8,87	1,94	0,66
700	24,21	9,85	2,21	0,75
800	26,06	10,71	2,46	0,83
900	28,18	11,68	2,74	0,91
1000	30,09	12,63	3,02	0,995
1100	31,56	13,33	3,215	1,045
1200	32,36	13,66	3,35	1,105
1300	33,30	14,09	3,50	1,165
1400	34,42	14,56	3,67	1,23
1500	35,72	15,15	3,87	1,29
1600	36,46	15,52	4,00	1,32
1700	37,40	15,98	4,16	1,38
1800	38,42	16,45	4,32	1,43
1900	39,30	16,84	4,465	1,49
2000	40,23	17,23	4,605	1,53
2100	41,05	17,61	4,76	1,58
2200	41,97	18,10	4,93	1,62
2300	42,63	18,44	5,05	1,66
2500	43,70	18,90	5,29	1,74

Stoßzahl auch der Punkt  $P_4$  anfangen, sich zu setzen, und daß auch diese Punkte langsamer einem konstanten Grenzwert zustreben.

Für den ganzen Versuchsbereich (Stoßzahlen 0 bis 2500) scheinen die Kurven der Setzungen eine

Tabelle 5. Verhältniswerte der beobachteten Setzungen.

Stoßzahl	$\frac{S_2}{S_1}$	$\frac{S_3}{S_1}$	$\frac{S_4}{S_1}$
50	0,280	0,0204	0,0027
100	0,303	0,0400	0,0116
200	0,353	0,0570	0,0213
500	0,395	0,0850	0,0296
1000	0,420	0,1007	0,0330
1500	0,424	0,1085	0,0360
2000	0,427	0,1144	0,0382
2500	0,432	0,1210	0,0397

$$y = \alpha \sqrt{x} \tag{5}$$

entspricht, wobei  $x$  die Stoßzahl und  $y$  die entsprechende beobachtete Setzung bedeutet. Der Faktor  $\alpha$  ist, strenggenommen, nicht konstant, sondern auch eine Funktion von  $x$ . Für die Setzungskurve des Punktes  $P_1$  z. B. nimmt der Faktor  $\alpha$ , wenn man die Werte der Setzungen in Millimeter einsetzt, die in der Tabelle 6 angegebenen Werte an. Aus diesen Werten sieht man, daß der Faktor  $\alpha$  mit zunehmender Stoßzahl, und zwar bis 300, sehr rasch wächst, dann aber langsamer zunimmt. Er erreicht ein Maximum

bei 1000 Stößen und nimmt dann langsam wieder ab. In dem Bereich von 300 bis 2500 Stößen kann man einen Mittelwert  $\alpha = 0,90$  annehmen. Die in der Abb. 19 gestrichelte Linie stellt die mit  $\alpha = 0,90$

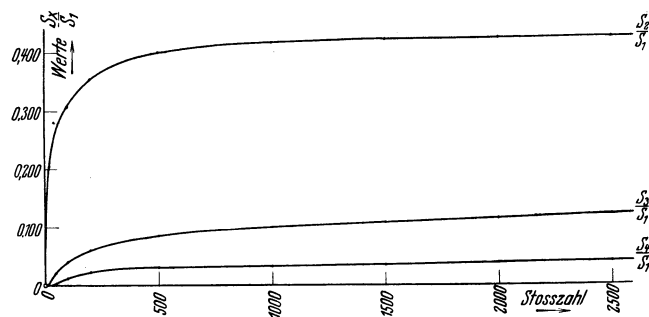


Abb. 20.

errechneten Werte der Gleichung (5) dar. Mit Hilfe der in Tabelle 5 berechneten  $\frac{S_2}{S_1}$ ,  $\frac{S_3}{S_1}$  und  $\frac{S_4}{S_1}$ -Werte und unter Berücksichtigung der Werte des Faktors  $\alpha$  für die Setzungskurve des Punktes  $P_1$  bekommt man die Werte des Faktors  $\alpha$  für die Setzungskurven der Punkte  $P_2$ ,  $P_3$  und  $P_4$ . Sie sind ebenso in der Tabelle 6 enthalten. Auch für die Setzungskurven dieser Punkte in dem Bereich von 300—2500 Stößen kann man einen Mittelwert von  $\alpha$  annehmen.

Aus den Kurven der Abb. 20 ist zu ersehen:

1. daß der Wert  $\frac{S_x}{S_1}$  (wobei  $S_1$  die Setzung des obersten Punktes  $P_1$  und  $S_x$  diejenige des in einer tieferen Ebene  $x-x$  liegenden Punktes  $P_x$  bedeutet) für den Fall, daß die Ebene  $x-x$  nicht viel tiefer als die Ebene 1—1 liegt, mit zunehmender Stoßzahl sehr schnell wächst, dann aber langsamer einem konstanten Grenzwert zustrebt.

Tabelle 6.

Stoßzahl	Die Werte des Faktors $\alpha$ für			
	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$
50	0,519	0,145	0,0106	0,0014
100	0,690	0,219	0,0226	0,0080
200	0,780	0,275	0,0445	0,0166
500	0,905	0,357	0,0770	0,0268
1000	0,950	0,399	0,0960	0,0314
1500	0,923	0,391	0,1000	0,0332
2000	0,900	0,385	0,1030	0,0344
2500	0,880	0,380	0,1065	0,0350

Das ist z. B. der Fall für den auf der Ebene 2—2 liegenden Punkt  $P_2$ . Liegt dagegen die Ebene  $x-x$  viel tiefer als die Ebene 1—1, dann bleibt mit zunehmender Stoßzahl der Wert  $\frac{S_x}{S_1}$  zunächst immer gleich 0 und fängt erst nach einer bestimmten Stoßzahl an sehr rasch zu wachsen, um endlich langsamer einem Grenzwert zuzustreben (Punkt  $P_3$  und  $P_4$ ). Mit anderen Worten kann man sagen, wenn die höheren Schichten etwas verdichtet sind, dann erst fängt die Wirkung der Stöße in den tieferen Schichten an, sich bemerkbar zu machen und dort eine Verdichtung des Sandes hervorzurufen. Nach diesem Prinzip pflanzt sich die Wirkung der Stöße in die tieferen Schichten bis zu einer der Größe des Stoßes entsprechenden Tiefe fort (s. nachstehenden fünften Abschnitt).

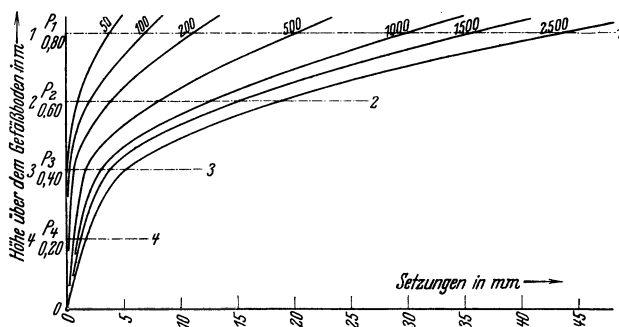


Abb. 21.

In der Abb. 21 ist die Verteilung der Setzungen in einer 0,10 m von der Achse des Gefäßes entfernten senkrechten Linie für verschiedene Stoßzahlen (50, 100, 200, 500, 1000, 1500 und 2500) aufgetragen. Aus dem Verlauf dieser Kurven ist zu ersehen:

2. daß sie mit zunehmender Stoßzahl

stets eine hyperbolische Form besitzen. Da aber, wie schon oben unter 1 gesagt, die  $\frac{S_2}{S_1}$ ,  $\frac{S_3}{S_1}$  und  $\frac{S_4}{S_1}$ -Werte einem konstanten Grenzwert zustreben, ist es ohne weiteres klar, daß für diesen Grenz-

wert auch die Verteilungskurven ihre hyperbolische Form besitzen, d. h. also, daß die Setzungen mit der Tiefe sehr schnell abnehmen. Daß diese Verteilungskurve in der Grenze in eine gerade Linie übergeht, scheint nicht der Fall zu sein.

### c) Die Dichteänderungen, die Porenzifferänderungen.

Wenn man die Setzungen der Punkte  $P_1, P_2, P_3$  und  $P_4$  als diejenigen der durch diese Punkte gehenden waagerechten Ebenen betrachtet, so kann man leicht die entsprechenden Verdichtungen der Schichten 1—2, 2—3, 3—4 und 4— $m$  berechnen. In der Tabelle 7 sind diese Verdichtungen errechnet. Abb. 22 stellt diese Verdichtungen für verschiedene Stoßzahlen (50, 100, 200, 500, 1000, 1500 und 2500) dar. Aus dem Verlauf dieser Kurven ist zu ersehen:

3. daß auch sie mit zunehmender Stoßzahl stets eine hyperbolische Form aufweisen und diese ebenfalls bis zur Grenze entsprechend dem obigen zweiten Ergebnis behalten. Die mit den ersten Stößen in den höheren Schichten beobachtete Ungleichheit der Verdichtung erstreckt sich mit zunehmender Stoßzahl auch in die tieferen Schichten, bis sie eine Grenze erreicht hat, bei der man keine Verdichtung mehr bemerkt. Der Fall, daß in der Grenze die Verteilungskurve der Verdichtungen eine Parallele zur Achse des Gefäßes (also eine senkrechte Linie) wäre, d. h., daß man die Bildung eines überall gleichmäßig verdichteten Sandkörpers zu erwarten hätte, scheint ausgeschlossen zu sein.

Hier darf man nicht übersehen, daß stillschweigend vorausgesetzt wurde, daß die aus den Versuchen gewonnenen Setzungskurven ohne weiteres auch für den aus Sand bestehenden unendlichen Halbraum Gültigkeit haben. Daß dies in der Tat der Fall ist und die unendliche Wiederholung der Stöße auf die Oberfläche des Halbraumes zur Bildung eines Grenzsandkörpers führt, findet man in dem fünften Abschnitt.

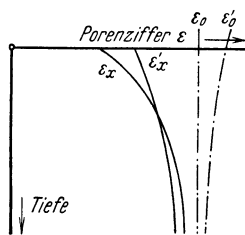


Abb. 23.

Stellen  $P_1, P_2, P_3$  und  $P_4$ , wie auch für die Werte  $\frac{\epsilon_x}{\epsilon_0}$  gilt. Falls die anfänglichen Porenziffern mit der Tiefe nicht konstant gewesen, sondern mit der Tiefe dem Gesetz der Kurve  $\epsilon_0'$  gefolgt wären, dann würde sich auch leicht die neue Verteilungskurve der Porenziffern  $\epsilon_x$  auftragen lassen (Abb. 23).

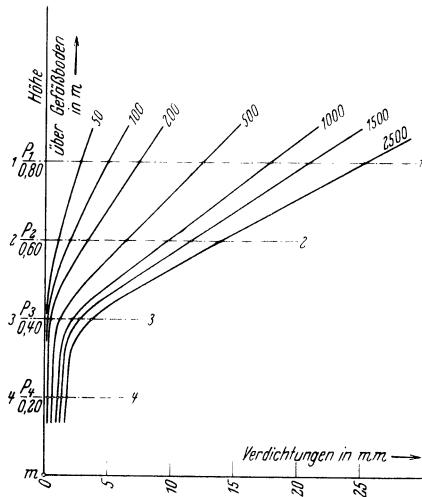


Abb. 22.

Tabelle 7.

Stoßzahl	Verdichtungen in mm			
	Schicht $P_1 - P_2$	Schicht $P_2 - P_3$	Schicht $P_3 - P_4$	Schicht $P_4 - m$
50	2,65	0,955	0,065	0,010
100	4,79	1,825	0,195	0,080
200	7,15	3,27	0,395	0,235
500	12,23	6,29	1,110	0,600
1000	17,46	9,61	2,025	0,995
1500	20,57	11,28	2,580	1,290
2000	23,00	12,625	3,075	1,530
2500	24,80	13,61	3,55	1,740

Unter Berücksichtigung der Gleichung (2) und (4) auf S. 7 und unter der Voraussetzung, daß vor dem Beginne des Versuches in allen Schichten dieselbe Porenziffer herrschte, kommt man zu dem Ergebnis, daß das, was vorstehend für die Verdichtung gesagt wurde, sowohl für die neue Porenziffer an den verschiedenen

#### Dritter Abschnitt.

## Die Verteilung der Setzungen bzw. Verdichtungen in waagerechter Richtung.

### a) Allgemeines, Versuchsmethode, Versuchsmaterial.

Zur Vervollständigung der Untersuchung des Einflusses der Stöße auf die Dichteänderung des Sandbodens ist es für notwendig gehalten worden, auch die Verteilung der Setzungen in waagerechter Richtung zu untersuchen. Zu diesem Zweck wurden mit derselben Versuchseinrichtung der Abb. 18 a

neue Versuche ausgeführt. Durch Vervollständigung der Rahmen mit je drei weiteren Messingrohren, wie man dies auf Abb. 18 b sieht, ist es erreicht, bei jedem neuen Versuch die Setzungen von vier auf derselben Ebene und in 0,10, 0,20, 0,30 und 0,40 m Abstand aus der Achse des Gefäßes liegenden Punkte zu messen, so daß insgesamt mit vier neuen Versuchen die Setzungen der in Abb. 24 dargestellten 16 Punkte  $P_{1,1}$ ,  $P_{1,2}$ ,  $P_{1,3} \dots P_{4,4}$  bis zu 2500 Stößen gemessen worden sind. Die Punkte besitzen zwei Kennziffern. Die erste bedeutet die senkrechte und die zweite die waagerechte Linie, auf welcher der betreffende Punkt liegt. Als senkrechte Linie 0—0 ist die Achse des Gefäßes und als waagerechte Linie 0—0 die Sandoberfläche bezeichnet. Die verwendete Sandsorte ist auch hier die Sorte A (s. Kornverteilungskurve A, Abb. 15). Der Füllungsvorgang, das Einbringen der Platten mit dem Rahmen, das Fallen der Kugel usw. ist, wie im zweiten Abschnitt auseinandergesetzt, erfolgt, nur mit dem Unterschied, daß hier mit dem Einbringen der Rahmen jedesmal vier Platten gleichzeitig auf den Sand gesetzt wurden.

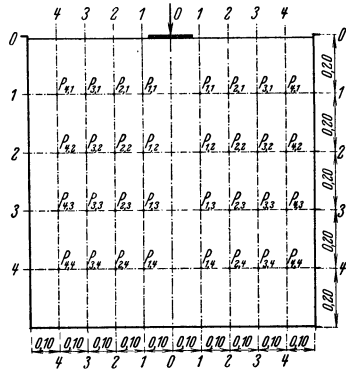


Abb. 24.

**b) Versuchsergebnisse, die Setzungskurven, die Dichteänderung, die Porenzifferänderung.**

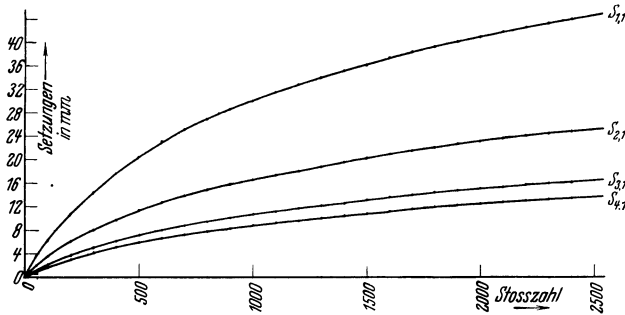


Abb. 25.

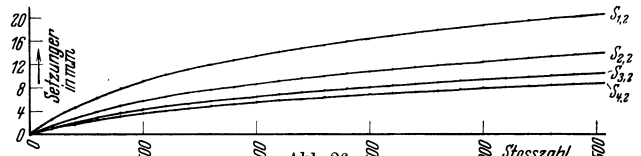


Abb. 26.

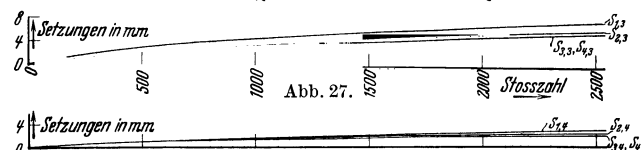


Abb. 27.

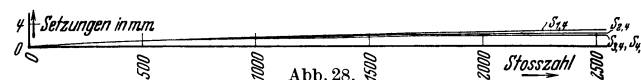


Abb. 28.

Tabelle 8. Versuchsergebnisse mit der großen Apparatur.

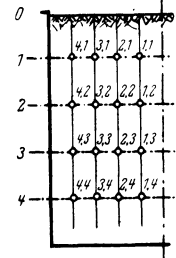
Stoßzahl	Beobachtete Setzungen in mm															
	$S_{1,1}$	$S_{2,1}$	$S_{3,1}$	$S_{4,1}$	$S_{1,2}$	$S_{2,2}$	$S_{3,2}$	$S_{4,2}$	$S_{1,3}$	$S_{2,3}$	$S_{3,3}$	$S_{4,3}$	$S_{1,4}$	$S_{2,4}$	$S_{3,4}$	$S_{4,4}$
5	0,50	0,09	0,02	0,00	0,10	0,02	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
20	1,55	0,67	0,34	0,25	0,65	0,30	0,18	0,17	0,10	0,06	0,08	0,09	0,015	0,025	0,04	0,05
50	3,66	1,83	1,16	0,91	1,41	0,79	0,56	0,51	0,38	0,27	0,27	0,31	0,09	0,11	0,11	0,12
100	6,57	3,49	2,24	1,78	2,68	1,57	1,14	0,99	0,77	0,58	0,55	0,60	0,20	0,23	0,21	0,21
150	8,79	4,84	3,12	2,45	3,67	2,07	1,57	1,36	1,09	0,82	0,78	0,85	0,31	0,33	0,29	0,29
200	10,75	5,90	3,70	3,00	4,66	2,74	2,03	1,75	1,41	1,09	1,03	1,05	0,42	0,43	0,37	0,38
250	12,71	7,15	4,47	3,68	5,50	3,30	2,48	2,14	1,70	1,31	1,24	1,21	0,50	0,52	0,44	0,44
300	14,71	8,16	5,12	4,23	6,30	3,83	2,87	2,47	2,00	1,53	1,44	1,43	0,58	0,60	0,50	0,50
350	16,28	9,00	5,68	4,70	7,12	4,35	3,25	2,79	2,27	1,74	1,63	1,61	0,65	0,68	0,56	0,56
400	17,75	9,84	6,23	5,16	7,84	4,81	3,60	3,08	2,52	1,94	1,81	1,79	0,73	0,75	0,61	0,61
450	19,29	10,67	6,76	5,59	8,52	5,25	3,93	3,37	2,81	2,16	2,00	1,97	0,83	0,79	0,67	0,68
500	20,52	11,36	7,22	5,98	9,08	5,62	4,23	3,64	3,00	2,29	2,14	2,14	0,93	0,83	0,73	0,75
600	23,02	12,74	8,10	6,69	10,18	6,42	4,79	4,10	3,40	2,59	2,39	2,39	1,08	0,95	0,81	0,81
700	25,16	13,93	8,87	7,32	11,14	7,08	5,28	4,51	3,76	2,90	2,67	2,67	1,22	1,06	0,90	0,90
800	27,00	14,95	9,54	7,88	11,87	7,57	5,67	4,84	4,04	3,11	2,88	2,88	1,35	1,17	0,99	0,97
900	28,62	15,85	10,15	8,39	12,58	8,09	6,06	5,16	4,28	3,38	3,11	3,10	1,46	1,26	1,06	1,05
1000	30,08	16,70	10,70	8,83	13,33	8,61	6,47	5,49	4,56	3,58	3,32	3,30	1,58	1,35	1,13	1,12
1100	31,42	17,45	11,20	9,25	14,01	9,10	6,84	5,80	4,84	3,80	3,52	3,48	1,69	1,43	1,20	1,18
1200	32,73	18,25	11,74	9,69	14,72	9,56	7,20	6,10	5,10	4,00	3,71	3,67	1,79	1,51	1,26	1,25
1300	34,04	19,04	12,25	10,12	15,27	9,97	7,50	6,36	5,33	4,19	3,88	3,84	1,90	1,59	1,32	1,30
1400	35,24	19,74	12,72	10,51	15,85	10,39	7,81	6,62	5,52	4,33	4,02	3,98	1,99	1,66	1,38	1,36
1500	36,42	20,43	13,20	10,91	16,40	10,79	8,12	6,85	5,75	4,55	4,18	4,15	2,08	1,75	1,44	1,42
1600	37,52	21,12	13,69	11,34	16,83	11,09	8,36	7,07	5,98	4,72	4,35	4,32	2,15	1,81	1,48	1,47
1700	38,52	21,67	14,11	11,70	17,32	11,46	8,64	7,31	6,19	4,88	4,51	4,48	2,21	1,88	1,53	1,52
1800	39,35	22,24	14,48	12,01	17,80	11,81	8,91	7,53	6,39	5,07	4,67	4,62	2,31	1,94	1,58	1,57
1900	40,21	22,76	14,85	12,32	18,29	12,18	9,19	7,78	6,59	5,21	4,80	4,76	2,39	2,00	1,63	1,62
2000	41,04	23,27	15,19	12,62	18,73	12,50	9,43	7,98	6,80	5,39	4,97	4,91	2,45	2,05	1,67	1,66
2100	41,85	23,77	15,54	12,89	19,12	12,78	9,65	8,16	6,97	5,53	5,10	5,04	2,52	2,11	1,72	1,69
2200	42,63	24,23	15,86	13,18	19,54	13,09	9,89	8,36	7,15	5,69	5,23	5,18	2,59	2,17	1,77	1,73
2300	43,33	24,65	16,14	13,42	19,93	13,38	10,13	8,55	7,32	5,82	5,36	5,31	2,65	2,22	1,81	1,77
2500	44,50	25,40	16,67	13,86	20,61	13,83	10,51	8,87	7,64	6,02	5,57	5,51	2,81	2,30	1,89	1,84



In der Tabelle 8 sind die beobachteten Setzungen der 16 Punkte  $P_{1,1}$ ,  $P_{1,2} \dots P_{4,4}$  bis zu 2500 Stößen eingetragen und in den Abb. 25—28 graphisch dargestellt. In der Tabelle 9 sind

Tabelle 9. Verhältniswerte der beobachteten Setzungen.

Stoßzahl	Werte $\frac{S_{x,1}}{S_{1,1}}$			Werte $\frac{S_{x,2}}{S_{1,2}}$			Werte $\frac{S_{x,3}}{S_{1,3}}$			Werte $\frac{S_{x,4}}{S_{1,4}}$		
	$\frac{S_{2,1}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{3,1}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{4,1}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{2,2}}{S_{1,2}}$	$\frac{S_{3,2}}{S_{1,2}}$	$\frac{S_{4,2}}{S_{1,2}}$	$\frac{S_{2,3}}{S_{1,3}}$	$\frac{S_{3,3}}{S_{1,3}}$	$\frac{S_{4,3}}{S_{1,3}}$	$\frac{S_{2,4}}{S_{1,4}}$	$\frac{S_{3,4}}{S_{1,4}}$	$\frac{S_{4,4}}{S_{1,4}}$
50	0,500	0,317	0,250	0,560	0,397	0,361	0,710	0,710	0,818	1,220	1,220	1,340
100	0,530	0,340	0,270	0,587	0,425	0,370	0,752	0,715	0,780	1,150	1,050	1,050
200	0,545	0,345	0,280	0,588	0,436	0,375	0,773	0,730	0,744	1,020	0,880	0,905
500	0,552	0,351	0,290	0,620	0,466	0,401	0,762	0,713	0,713	0,881	0,785	0,806
1000	0,556	0,356	0,294	0,647	0,485	0,411	0,785	0,730	0,724	0,856	0,716	0,710
1500	0,561	0,363	0,300	0,658	0,496	0,418	0,792	0,730	0,724	0,840	0,692	0,682
2000	0,567	0,369	0,307	0,669	0,504	0,426	0,792	0,730	0,722	0,838	0,682	0,678
2500	0,570	0,375	0,307	0,672	0,510	0,430	0,790	0,729	0,722	0,820	0,672	0,656



für je vier Punkte, die auf derselben waagerechten Ebene liegen, die  $\frac{S_{2,x}}{S_{1,x}}$ ,  $\frac{S_{3,x}}{S_{1,x}}$  und  $\frac{S_{4,x}}{S_{1,x}}$ -Werte, d. h. die Verhältnisse der Setzungen der auf den Senkrechten 2—2, 3—3 und 4—4 liegenden Punkte  $P_{2,x}$ ,  $P_{3,x}$  und  $P_{4,x}$  zu denjenigen der auf der Senkrechten 1—1 liegenden Punkte  $P_{1,x}$  berechnet. Dieselben Werte  $\frac{S_{2,x}}{S_{1,x}}$ ,  $\frac{S_{3,x}}{S_{1,x}}$  und  $\frac{S_{4,x}}{S_{1,x}}$  sind in Abb. 29—32 graphisch dargestellt.

In der Tabelle 11 sind die Werte  $\frac{S_{2,1}}{S_{1,1}}$ ,  $\frac{S_{3,1}}{S_{1,1}}$ ,  $\frac{S_{4,1}}{S_{1,1}}$  usw., d. h. die Verhältnisse der Setzungen aller 15 Punkte zu denjenigen des nahe zur Achse und Oberfläche liegenden Punktes  $P_{1,1}$ , berechnet und in Abb. 37 graphisch dargestellt.

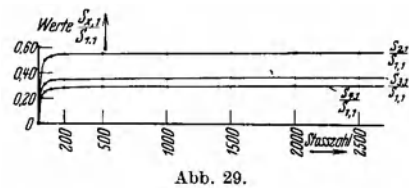


Abb. 29.

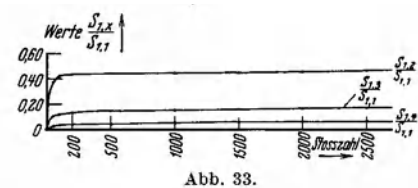


Abb. 33.

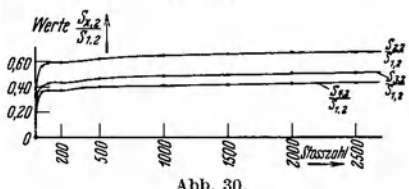


Abb. 30.

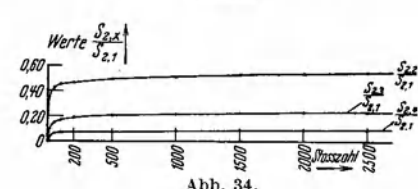


Abb. 34.

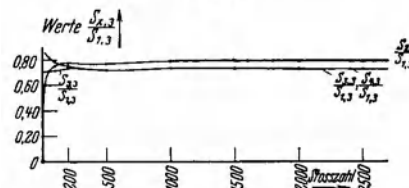


Abb. 31.

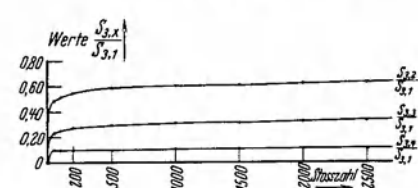


Abb. 35.

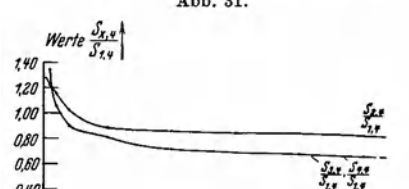


Abb. 32.

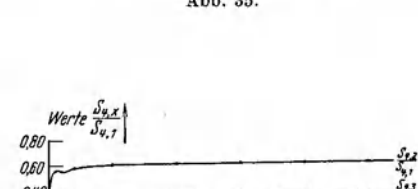
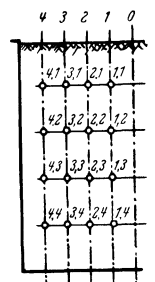


Abb. 36.

Tabelle 10. Verhältniswerte der beobachteten Setzungen.

Stoßzahl	Werte $\frac{S_{1,x}}{S_{1,1}}$			Werte $\frac{S_{2,x}}{S_{2,1}}$			Werte $\frac{S_{3,x}}{S_{3,1}}$			Werte $\frac{S_{4,x}}{S_{4,1}}$		
	$\frac{S_{1,2}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{1,3}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{1,4}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{2,2}}{S_{2,1}}$	$\frac{S_{2,3}}{S_{2,1}}$	$\frac{S_{2,4}}{S_{2,1}}$	$\frac{S_{3,2}}{S_{3,1}}$	$\frac{S_{3,3}}{S_{3,1}}$	$\frac{S_{3,4}}{S_{3,1}}$	$\frac{S_{4,2}}{S_{4,1}}$	$\frac{S_{4,3}}{S_{4,1}}$	$\frac{S_{4,4}}{S_{4,1}}$
50	0,375	0,104	0,025	0,431	0,148	0,060	0,482	0,233	0,095	0,560	0,340	0,132
100	0,420	0,118	0,030	0,450	0,166	0,066	0,510	0,246	0,094	0,557	0,337	0,118
200	0,435	0,131	0,039	0,465	0,185	0,073	0,548	0,278	0,100	0,583	0,350	0,127
500	0,441	0,146	0,045	0,496	0,202	0,073	0,586	0,296	0,101	0,609	0,358	0,126
1000	0,443	0,152	0,052	0,516	0,214	0,081	0,603	0,316	0,108	0,620	0,374	0,127
1500	0,450	0,158	0,057	0,530	0,223	0,086	0,617	0,317	0,109	0,628	0,380	0,130
2000	0,455	0,165	0,060	0,537	0,231	0,088	0,620	0,327	0,110	0,632	0,389	0,132
2500	0,464	0,172	0,063	0,545	0,237	0,091	0,630	0,334	0,114	0,640	0,397	0,133



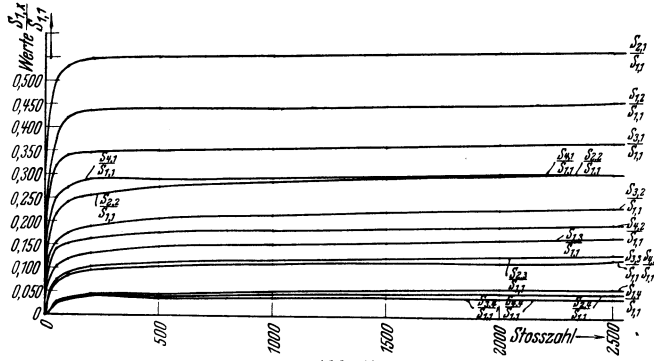


Abb. 37.

Die Abb. 38, 39 und 40 stellen die Verteilung der Setzungen in den waagerechten Richtungen 1—1, 2—2, 3—3 und 4—4 und die Abb. 41—44 die Verteilung der Setzungen in den senkrechten Richtungen 1—1, 2—2, 3—3 und 4—4 graphisch dar.

In der Tabelle 12 sind die Verdichtungen für die einzelnen Elemente des Sandkörpers berechnet, die oben und unten durch je zwei aufeinanderfolgende Ebenen mit den Punkten *P* bzw. durch den Boden

Tabelle 11. Verhältniszerte der beobachteten Setzungen.

Stoßzahl	$\frac{S_{2,1}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{3,1}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{4,1}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{1,2}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{2,2}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{3,2}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{4,2}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{1,3}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{2,3}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{3,3}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{4,3}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{1,4}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{2,4}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{3,4}}{S_{1,1}}$	$\frac{S_{4,4}}{S_{1,1}}$
50	0,500	0,317	0,250	0,375	0,215	0,153	0,139	0,104	0,074	0,074	0,074	0,025	0,027	0,027	0,027
100	0,530	0,340	0,270	0,420	0,240	0,174	0,151	0,118	0,088	0,084	0,084	0,030	0,032	0,032	0,032
200	0,545	0,345	0,280	0,435	0,255	0,189	0,163	0,131	0,102	0,096	0,096	0,039	0,040	0,034	0,035
500	0,552	0,351	0,290	0,441	0,274	0,206	0,177	0,146	0,112	0,104	0,104	0,045	0,040	0,035	0,036
1000	0,556	0,356	0,294	0,443	0,286	0,215	0,183	0,152	0,119	0,110	0,110	0,052	0,045	0,037	0,037
1500	0,561	0,363	0,300	0,450	0,296	0,224	0,188	0,158	0,125	0,115	0,115	0,057	0,048	0,039	0,039
2000	0,567	0,369	0,307	0,455	0,305	0,230	0,194	0,165	0,130	0,120	0,120	0,060	0,050	0,041	0,041
2500	0,570	0,375	0,307	0,464	0,311	0,236	0,200	0,172	0,136	0,125	0,124	0,063	0,052	0,042	0,041

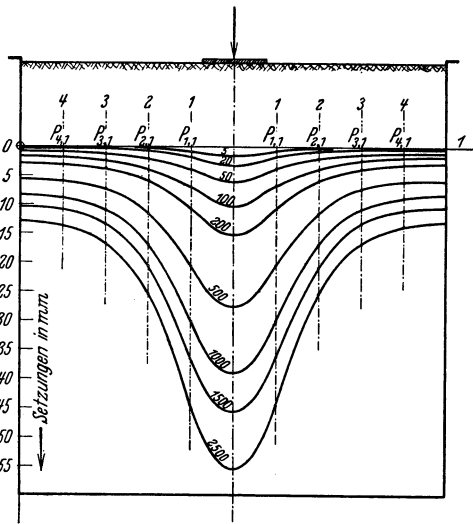


Abb. 38.

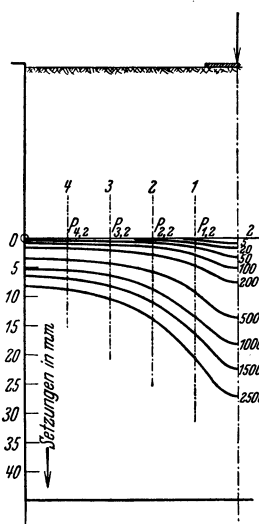


Abb. 39.

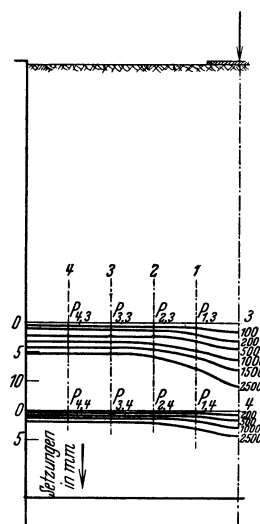


Abb. 40.

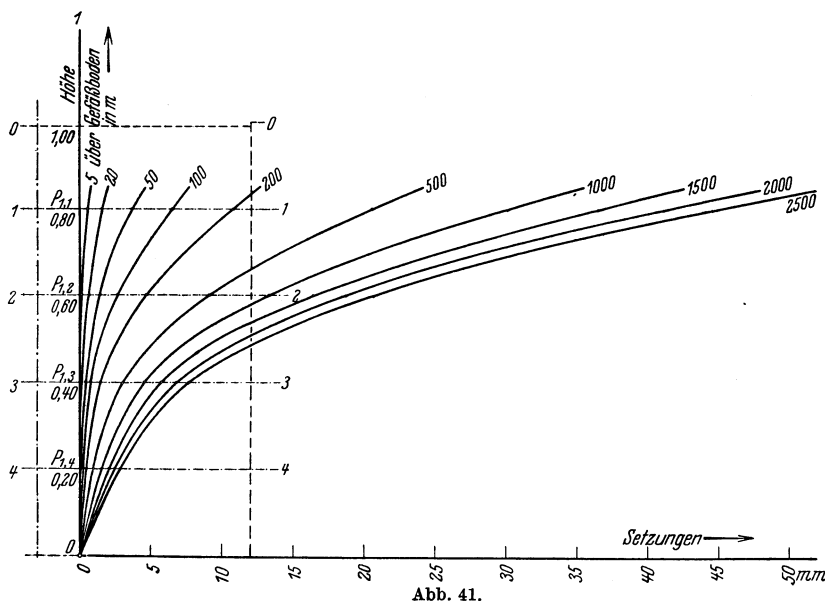


Abb. 41.

und die seitlich durch senkrechte Ebenen zwischen den Punkten *P* begrenzt sind.

Es ist ferner die Verteilung dieser Verdichtungen einerseits in den waagerechten Richtungen 1—1, 2—2, 3—3 und 4—4 in den Abb. 45—48, und andererseits in den senkrechten Richtungen 1—1, 2—2, 3—3 und 4—4 in den Abb. 49 bis 52 für verschiedene Stoßzahlen graphisch dargestellt.

Die Verteilungskurven der neuen Porenziffern und die Kurven der Werte  $\frac{\epsilon_x}{\epsilon_0}$  haben, unter der Voraussetzung, daß

die anfängliche Porenziffer in der Sandmasse überall konstant ist, ähnliche Formen wie die Abb. 45 bis 52. Ist das nicht der Fall und sind die anfänglichen Porenziffern sowohl in senkrechter wie auch in

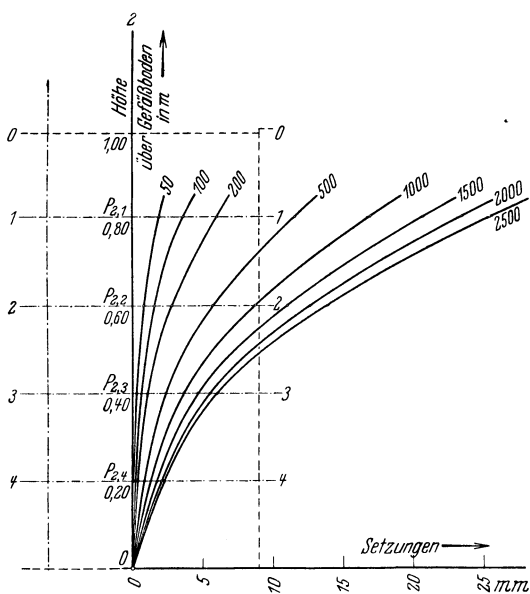


Abb. 42.

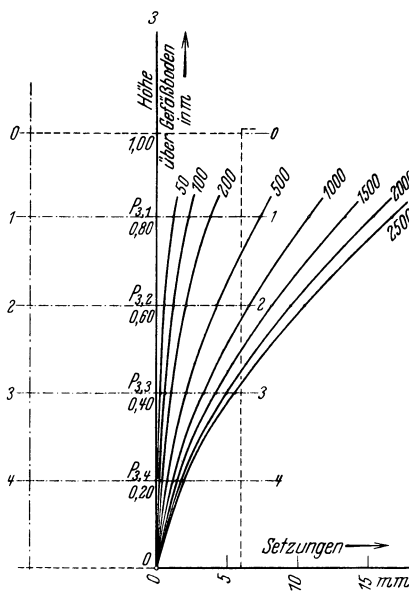


Abb. 43.

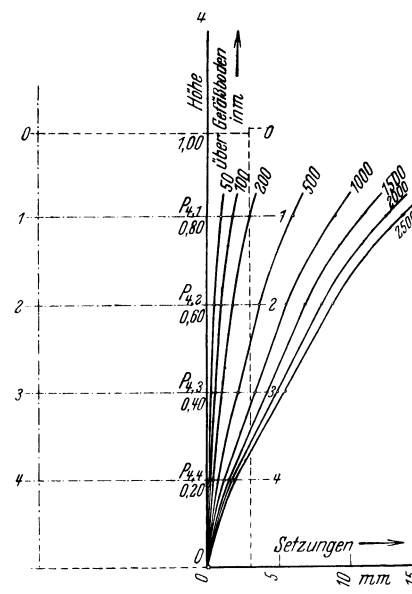


Abb. 44.

Tabelle 12.

Stoßzahl	Differenz der Setzungen je zweier übereinanderliegenden Punkte = Verdichtungen in mm															
	$P_{1,1}-P_{1,2}$	$P_{1,2}-P_{1,3}$	$P_{1,3}-P_{1,4}$	$P_{1,4}-P_{1,n}$	$P_{2,1}-P_{2,2}$	$P_{2,2}-P_{2,3}$	$P_{2,3}-P_{2,4}$	$P_{2,4}-P_{2,n}$	$P_{3,1}-P_{3,2}$	$P_{3,2}-P_{3,3}$	$P_{3,3}-P_{3,4}$	$P_{3,4}-P_{3,n}$	$P_{4,1}-P_{4,2}$	$P_{4,2}-P_{4,3}$	$P_{4,3}-P_{4,4}$	$P_{4,4}-P_{4,n}$
50	2,25	1,03	0,27	0,09	1,04	0,52	0,16	0,11	0,60	0,31	0,29	0,11	0,40	0,24	0,16	0,12
100	3,89	1,91	0,54	0,20	1,92	0,99	0,35	0,23	1,10	0,59	0,34	0,21	0,79	0,44	0,34	0,21
200	6,09	3,25	0,98	0,42	3,16	1,65	0,66	0,43	1,67	1,00	0,66	0,37	1,25	0,74	0,63	0,38
500	11,44	6,08	2,07	0,93	5,74	3,33	1,46	0,83	2,99	2,09	1,41	0,73	2,34	1,50	1,39	0,75
1000	16,75	8,77	2,98	1,58	8,09	5,03	2,23	1,35	4,23	3,15	2,19	1,13	3,34	2,19	2,18	1,12
1500	20,02	10,65	3,67	2,08	9,64	6,24	2,80	1,75	5,08	3,94	2,74	1,44	4,06	2,70	2,73	1,42
2000	22,31	11,93	4,35	2,45	10,77	7,11	3,34	2,05	5,76	4,46	3,30	1,67	4,64	3,07	3,25	1,66
2500	23,89	12,97	4,83	2,81	11,54	7,84	3,72	2,30	6,08	4,82	3,59	1,89	4,99	3,36	3,67	1,84

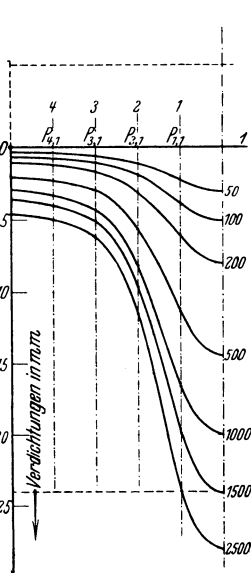


Abb. 45.



Abb. 46.

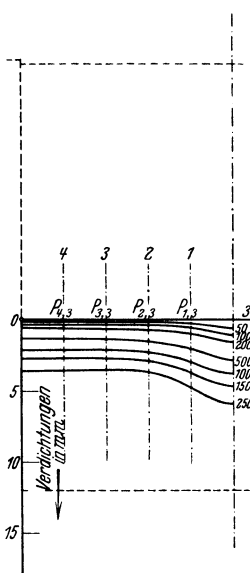


Abb. 47.

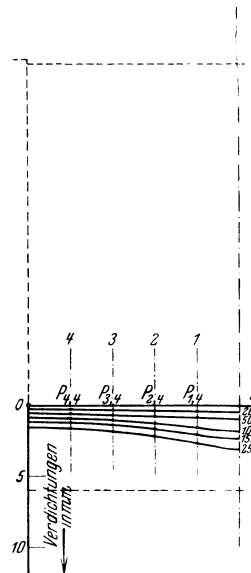


Abb. 48.

waagerechter Richtung durch bestimmte Kurven von vornherein gegeben, so kann man auf Grund des letzten Absatzes des vorigen Abschnittes sehr leicht die Verteilungskurven der neuen Porenziffer berechnen und auftragen.

Tabelle 13.

Stoßzahl	$\varepsilon_x$ -Werte der einzelnen Sandelemente															
	$P_{1,1}-P_{1,2}$	$P_{1,2}-P_{1,3}$	$P_{1,3}-P_{1,4}$	$P_{1,4}-P_{1,n}$	$P_{2,1}-P_{2,2}$	$P_{2,2}-P_{2,3}$	$P_{2,3}-P_{2,4}$	$P_{2,4}-P_{2,n}$	$P_{3,1}-P_{3,2}$	$P_{3,2}-P_{3,3}$	$P_{3,3}-P_{3,4}$	$P_{3,4}-P_{3,n}$	$P_{4,1}-P_{4,2}$	$P_{4,2}-P_{4,3}$	$P_{4,3}-P_{4,4}$	$P_{4,4}-P_{4,n}$
50	0,561	0,571	0,577	0,578	0,571	0,575	0,578	0,578	0,574	0,577	0,577	0,578	0,576	0,577	0,578	0,578
100	0,548	0,564	0,575	0,577	0,564	0,571	0,576	0,577	0,570	0,574	0,576	0,577	0,573	0,576	0,576	0,577
200	0,531	0,553	0,571	0,576	0,554	0,566	0,574	0,576	0,566	0,571	0,574	0,576	0,569	0,573	0,574	0,576
500	0,489	0,531	0,563	0,572	0,534	0,553	0,567	0,572	0,555	0,563	0,568	0,573	0,561	0,567	0,568	0,573
1000	0,447	0,510	0,556	0,567	0,515	0,539	0,561	0,568	0,546	0,554	0,562	0,570	0,553	0,562	0,562	0,570
1500	0,421	0,495	0,550	0,563	0,503	0,530	0,557	0,565	0,539	0,548	0,557	0,568	0,547	0,558	0,557	0,568
2000	0,403	0,485	0,545	0,560	0,494	0,523	0,553	0,563	0,534	0,544	0,553	0,566	0,543	0,555	0,554	0,566
2500	0,391	0,477	0,541	0,557	0,488	0,517	0,550	0,561	0,531	0,540	0,550	0,565	0,540	0,553	0,551	0,565

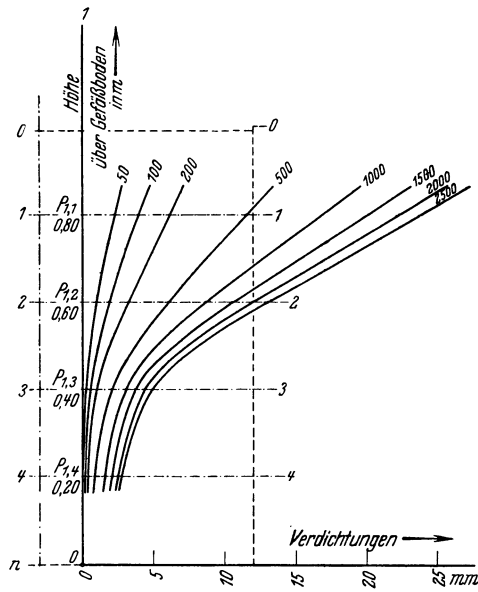


Abb. 49.

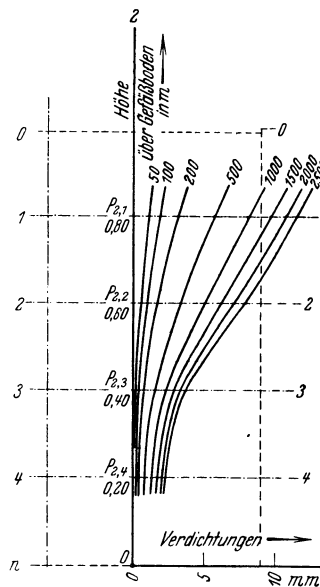


Abb. 50.

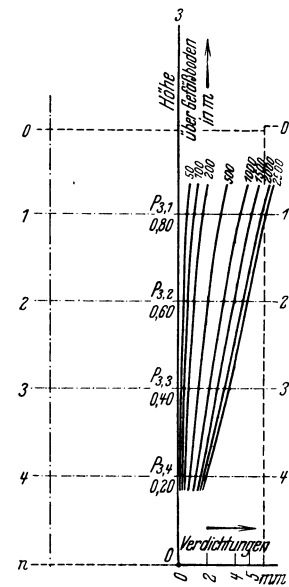


Abb. 51.

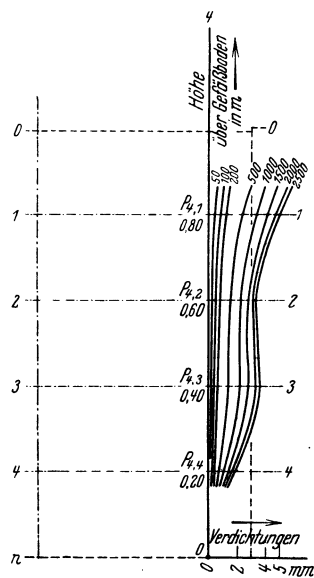


Abb. 52.

Mit der ersten Voraussetzung, d. h. überall konstanter Porenziffer sind in der Tabelle 13 und 14 die Werte  $\varepsilon_x$  und  $\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_0}$  für alle Teile des Sandbodens und für verschiedene Stoßzahlen berechnet, und in den Abb. 53—56 die entsprechenden Verteilungskurven der neuen Porenziffer  $\varepsilon_x$  für die senkrechten Richtungen 1—1, 2—2, 3—3 und 4—4 graphisch dargestellt.

Diese Kurven verlaufen, wie schon gesagt, ganz ähnlich wie die Kurven der Abb. 49—52.

Da schon aus den Kurven der Abb. 37 zu ersehen ist, daß die Verhältnisse der Setzungen aller 15 Punkte zu denjenigen des Punktes  $P_{1,1}$  (wenigstens von 200 Stößen an) einen verhältnismäßig konstanten Wert annehmen, so kommt man auf den Gedanken, daß die Setzungen aller 16 Punkte während des Versuches (wenigstens von 200 Stößen an) in konstanten Verhältnissen zueinander stehen, und es ist infolgedessen gestattet, von Kurven, welche die dieselben Setzungen aufweisenden Punkte verbinden, Kurven gleicher Setzungen, zu sprechen. In der Abb. 57 sind diese Kurven aufgetragen. Dort ist die durch den Punkt  $P_{1,1}$  gehende Kurve mit 100% bezeichnet und auf Grund dieser und der Setzungen der anderen Punkte die Kurven 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20, 10, 5, 4, 3, 2, 1% aufgetragen.

### c) Ergebnisse.

Aus den im vorigen Absatz genannten Kurven und Tabellen entnimmt man folgende Ergebnisse:

1. Die Setzungskurven aller 16 Punkte weisen eine parabolische Form auf, entsprechend der Gleichung (5), S. 10, in welcher der Faktor  $\alpha$  für jede Kurve einen angenähert konstanten Wert annimmt; bei unendlicher Stoßzahl scheinen sie jedoch einem konstanten Wert zuzustreben.

2. Bei den ersten Stößen beobachtet man Setzungen nur an denjenigen Punkten, die dicht an dem Mittelpunkt des Gefäßes (Stoßstelle) liegen. Dagegen beginnen die entfernter liegenden Punkte

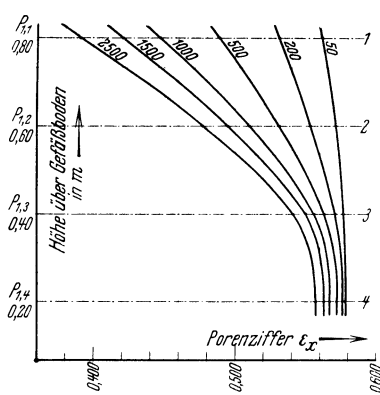


Abb. 53.

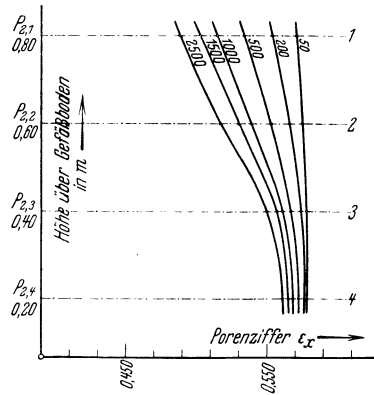


Abb. 54.

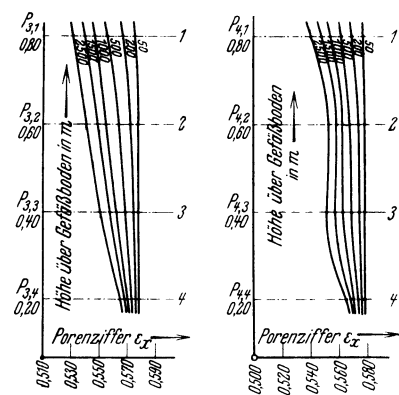


Abb. 55.

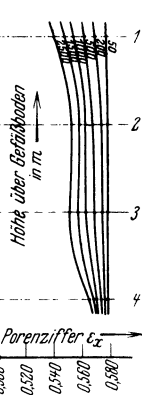


Abb. 56.

erst sich nach einer bestimmten Stoßzahl zu setzen (s. Tabelle 8).

3. Die Verhältnisse  $\frac{S_{2,1}}{S_{1,1}}$ ,  $\frac{S_{3,1}}{S_{1,1}}$  usw. aller 15 Punkte  $P_{2,1} \dots P_{4,4}$  zu der Setzung des dicht am Mittelpunkt der Stöße liegenden Punktes  $P_{1,1}$  nehmen mit zunehmender Stoßzahl zu und jeder strebt einem konstanten Wert zu (s. Abb. 37 und Tabelle 11). Je mehr durch die wiederholten Stöße die dicht am Mittelpunkt der Stöße liegende Sandmasse sich verdichtet, desto größer wird die Stoßwirkung an den entfernteren Punkten.

4. Die Verhältnisse  $\frac{S_{2,x}}{S_{1,x}}$ ,  $\frac{S_{3,x}}{S_{1,x}}$  und  $\frac{S_{4,x}}{S_{1,x}}$  der Setzungen der auf derselben Ebene liegenden Punkte  $P_{2,x}$ ,  $P_{3,x}$  und  $P_{4,x}$  zu der Setzung der Punkte  $P_{1,x}$  neben der Stoßachse, die mit zunehmender Stoßzahl zunehmen, nehmen mit der Tiefe zu (s. Abb. 29—32). Die in einer waagerechten Richtung entstehende Ungleichheit der Setzungen nimmt mit der Tiefe ab.

5. Die Verhältnisse  $\frac{S_{x,2}}{S_{x,1}}$ ,  $\frac{S_{x,3}}{S_{x,1}}$  und  $\frac{S_{x,4}}{S_{x,1}}$  der Setzungen der auf einer Senkrechten liegenden Punkte  $P_{x,2}$ ,  $P_{x,3}$  und  $P_{x,4}$  zu den Setzungen der Punkte  $P_{x,1}$ , die mit zunehmender Stoßzahl

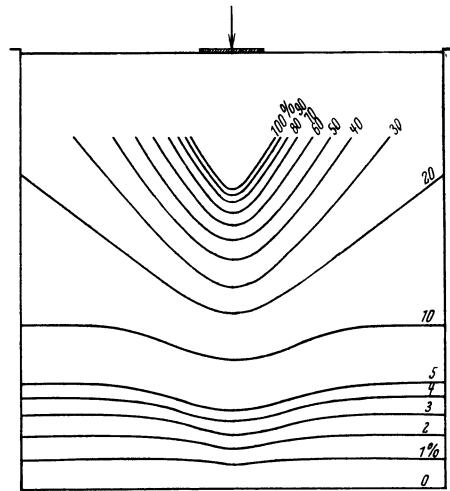


Abb. 57.

Tabelle 14.

Stoßzahl	$\frac{\epsilon_x}{\epsilon_0}$ - Werte der einzelnen Sandelemente															
	$P_{1,1}-P_{1,2}$	$P_{1,2}-P_{1,3}$	$P_{1,3}-P_{1,4}$	$P_{1,4}-P_{1,n}$	$P_{2,1}-P_{2,2}$	$P_{2,2}-P_{2,3}$	$P_{2,3}-P_{2,4}$	$P_{2,4}-P_{2,n}$	$P_{3,1}-P_{3,2}$	$P_{3,2}-P_{3,3}$	$P_{3,3}-P_{3,4}$	$P_{3,4}-P_{3,n}$	$P_{4,1}-P_{4,2}$	$P_{4,2}-P_{4,3}$	$P_{4,3}-P_{4,4}$	$P_{4,4}-P_{4,n}$
50	0,970	0,986	0,996	0,998	0,986	0,993	0,998	0,998	0,991	0,996	0,996	0,998	0,994	0,996	0,998	0,998
100	0,946	0,975	0,993	0,996	0,975	0,986	0,995	0,996	0,985	0,991	0,995	0,996	0,990	0,995	0,995	0,996
200	0,919	0,956	0,986	0,995	0,958	0,978	0,991	0,995	0,978	0,986	0,991	0,995	0,982	0,990	0,991	0,995
500	0,843	0,919	0,972	0,988	0,922	0,956	0,979	0,988	0,959	0,971	0,981	0,990	0,970	0,979	0,981	0,990
1000	0,772	0,880	0,960	0,980	0,890	0,930	0,970	0,981	0,942	0,958	0,971	0,985	0,956	0,971	0,971	0,985
1500	0,727	0,854	0,950	0,972	0,870	0,915	0,960	0,976	0,930	0,947	0,960	0,981	0,943	0,962	0,961	0,981
2000	0,696	0,838	0,941	0,968	0,852	0,905	0,956	0,972	0,924	0,940	0,957	0,977	0,939	0,960	0,958	0,977
2500	0,675	0,823	0,935	0,960	0,842	0,890	0,950	0,970	0,918	0,932	0,950	0,976	0,932	0,955	0,952	0,976

zunehmen, vergrößern sich mit wachsender Entfernung der Senkrechten von der Stoßachse (s. Abb. 33 bis 36). Die in einer senkrechten Richtung vorhandene Ungleichheit der Setzungen nimmt mit wachsender Entfernung von der Stoßachse ab.

6. Die in einer waagerechten Richtung vorhandene Ungleichheit der Dichteänderungen nimmt mit der Tiefe ab (s. Abb. 45—48).

7. Die in einer senkrechten Richtung vorhandene Ungleichheit der Dichteänderungen nimmt mit der Entfernung von der Stoßachse ab (s. Abb. 49—52).

8. Die die Punkte mit gleichen Setzungen verbindenden Kurven haben eine hyperbolische Form. Sie haben in den oberen Schichten eine schmalere Form und verbreitern sich in den tieferen Schichten (s. Abb. 57).

Dieses Ergebnis kann man auch als eine Folge der Ergebnisse Nr. 4 und 5 betrachten.

9. Die Verteilungskurven der Setzungen in senkrechter Richtung (s. Abb. 41—44 und 57) haben eine gewisse Ähnlichkeit mit der Verteilung der lotrechten Normalspannungen, welche in einer Sand-schüttung durch eine Last mit kreisförmiger Grundfläche hervorgerufen werden (vgl. Terzaghi<sup>1</sup> und Kögler<sup>2</sup>).

Die Verteilungskurven der Setzungen in waagerechter Richtung (Abb. 38—40) weisen auch die Form der Verteilungskurven der lotrechten Normalspannungen in einer waagerechten Richtung (vgl. Kögler<sup>3</sup>) auf, jedoch mit dem Unterschied, daß sie sich weiter von der Mittelachse des Gefäßes aus nach beiden Seiten hin erstrecken als die letzteren. Die Form des durch die Stoßwirkungen gebildeten verdichteten Sandkörpers weicht also von der Form des bei einer statischen Belastung entstehenden Tragkörpers dadurch ab, daß der verdichtete Sandkörper sich in der waagerechten Richtung viel weiter von der Fallachse aus nach allen Seiten hin erstreckt. Auf die Form dieses Körpers kommen wir nochmals im fünften Abschnitt zurück.

#### Vierter Abschnitt.

## Der Einfluß der Wände der Gefäße auf die Setzungen.

### a) Übergang von einer durch Wände begrenzten Sandmasse auf den Halbraum.

Die Setzungskurven, die aus den im ersten, zweiten und dritten Abschnitt behandelten Versuchen gewonnen sind, gelten nur für diejenigen Sandmassen, die durch Wände begrenzt sind. Da das Vor-

Tabelle 15. Vergleich der Setzungen im kleinen und großen Gefäß.

1	2		4	5		6		7		8		9		10	11	12
	Setzungen $a a'$			Setzungen $a'' a'$	Setzungen $a'' a = a'' a' + a a'$		Setzungen $a'' a$		Setzungen $a'' a'' = a'' a - a'' a'$		Setzungen $P_1 - P_{1,1}$	Setzungen $P_3 - P_{1,2}$				
	für $P_1$	für $P_3$			für $P_1$	für $P_3$	für $P_{1,1}$	für $P_{1,2}$	für $P_1$	für $P_3$						
10	2,20	0,53	0,10	2,30	0,63	0,85	0,16	1,45	0,47	1,35	0,37					
20	4,16	0,91	0,20	4,36	1,11	1,56	0,32	2,80	0,79	2,60	0,59					
30	6,32	1,26	0,31	6,63	1,57	2,23	0,51	4,40	1,06	4,09	0,75					
50	9,32	1,80	0,64	9,96	2,44	3,67	1,02	6,29	1,42	5,65	0,78					
70	11,61	2,21	1,02	12,63	3,33	5,46	1,59	7,17	1,74	6,15	0,62					
100	14,35	2,69	1,36	15,71	4,05	6,88	2,09	8,83	1,96	7,47	0,60					
130	16,35	3,07	1,77	18,12	4,84	8,36	2,68	9,76	2,16	7,99	0,39					
160	18,03	3,48	2,08	20,11	5,56	9,60	3,12	10,51	2,44	8,43	0,36					
200	19,82	3,92	2,60	22,42	6,52	11,05	3,90	11,37	2,62	8,77	0,02					
250	21,30	4,28	3,09	24,39	7,37	12,15	4,59	12,24	2,78	9,15	- 0,31					
300	22,39	4,55	3,73	26,02	8,28	14,54	5,51	11,48	2,77	7,85	- 0,96					
350	23,35	4,86	4,17	27,52	9,03	16,01	6,14	11,51	2,89	7,34	- 1,28					
400	24,17	4,98	4,67	28,84	9,65	17,63	6,85	11,21	2,80	6,54	- 1,87					
450	24,85	5,13	5,07	29,92	10,20	18,93	7,42	10,99	2,78	5,92	- 2,29					
500	25,49	5,28	5,49	30,98	10,77	20,23	8,00	10,75	2,77	5,26	- 2,72					
550	25,90	5,39	5,74	31,64	11,13	21,03	8,36	10,61	2,77	4,87	- 2,97					
600	26,27	5,49	6,11	32,38	11,60	22,07	8,87	10,31	2,73	4,20	- 3,38					

handensein der Wände einen gewissen Einfluß auf die Größe der Setzungen ausübt, so ist es klar, daß dieselben Kurven nur unter gewissen Abänderungen auf die Verhältnisse des aus Sand bestehenden Halbraumes übertragen werden können. Eine genaue und eingehende Untersuchung dieses Einflusses

<sup>1</sup> Erdbaumechanik, S. 228, Abb. 42.

<sup>2</sup> Die Belastung des Baugrundes. Bauing. 1927, H. 44, S. 819, Abb. 1 u. 2.

<sup>3</sup> a. a. O., Abb. 1.

ist schwierig. Es soll daher nur der Versuch gemacht werden, sich über diesen Einfluß ein ungefähres Bild zu machen, wie weit man imstande ist zu sagen, daß die in dem ersten, zweiten und dritten Abschnitt gewonnenen Ergebnisse angenähert auf die Verhältnisse des aus Sand bestehenden Halbraumes übertragbar sind. Zu diesem Zweck geht man von der Tatsache aus, daß der Einfluß der Wände, sei er negativ, sei er positiv, für dieselben Stoßzahlen abnimmt, sofern die Wände sich nach allen Richtungen hin vom Mittelpunkte der Stöße entfernen, und daß er für bestimmte Wandentfernungen gleich 0 wird. Aus ganz theoretischen Betrachtungen würden diese Grenzentfernungen unendlich groß sein, in der Tat aber erstrecken sich die Grenzen nicht so weit (s. fünften Abschnitt). Sie besitzen endliche, ja gar nicht so große, von der Stärke des Stoßes und der Beschaffenheit des Bodens abhängige Werte. Ein Vergleich der in Abb. 2 enthaltenen Setzungskurven mit denen in Abb. 19 veranschaulicht den gesuchten Einfluß der Wände.

Da die Entfernungen der Punkte  $P_1$  bzw.  $P_3$  des kleinen Gefäßes von der Stoßachse und von der Sandoberfläche gleich den Entfernungen der Punkte  $P_{1,1}$  bzw.  $P_{1,2}$  von der Stoßachse und der Sandoberfläche im großen Gefäß sind, so ist ein Vergleich zwischen den Setzungen dieser Punkte möglich.

In den Spalten 2 und 3 der Tabelle 15 sind die Setzungen der Punkte  $P_1$  und  $P_3$  des kleinen Gefäßes und in den Spalten 7 und 8 diejenigen der Punkte  $P_{1,1}$  und  $P_{1,2}$  des großen Gefäßes (von 10—600 Stoßzahl) eingetragen.

Ein Vergleich dieser Spalten ergibt:

1. Für dieselben Stoßzahlen sind die Setzungen des Punktes  $P_1$  des kleinen Gefäßes größer als diejenigen des Punktes  $P_{1,1}$  des großen Gefäßes. Die Differenz zwischen den beiden nimmt mit zunehmender Stoßzahl bis zu einer bestimmten Grenze zu und nach Überschreiten dieser Grenze ab. Dasselbe gilt auch für die Setzungen der Punkte  $P_3$  des kleinen Gefäßes und  $P_{1,2}$  des großen Gefäßes mit dem Unterschied, daß die Differenz der beiden nach Überschreiten der Grenze sogar negative Werte (siehe Spalte 12) annimmt.

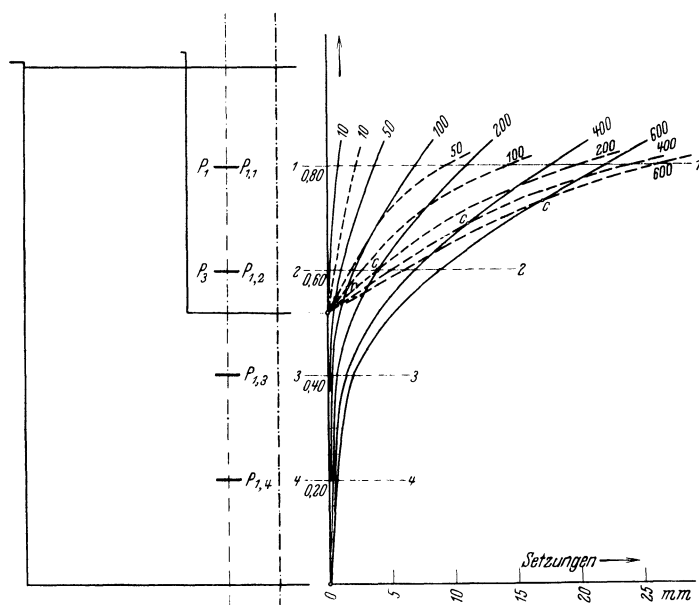


Abb. 58.

Dieses Ergebnis kommt besser zum Ausdruck in Abb. 58, wo für 10, 50, 100, 200, 400, 600 Stöße für beide Gefäße die entsprechenden Verteilungskurven der Setzungen aufgetragen sind. Der Schnittpunkt zweier entsprechenden Verteilungskurven gibt die Lage einer Grenze, die der betreffenden Stoßzahl entspricht. Die oberhalb dieser Grenze liegenden Punkte weisen im kleinen Gefäß größere Setzungen auf, als im großen Gefäß. Mit zunehmender Stoßzahl bewegt sich diese Grenze nach oben (s. Punkt c in Abb. 58).

2. Da die Setzungen der Punkte  $P_{1,1}$  und  $P_{1,2}$  des großen Gefäßes wenigstens bis zu 100 Stößen von dem Einfluß der Wände frei sind, weil sich erst nach 100 Stößen die in der Nähe der Wände liegenden Sandteilchen zu setzen beginnen, so stellen die Differenzen zwischen den Setzungen der Punkte  $P_1$  des kleinen Gefäßes und  $P_{1,1}$  des großen Gefäßes und  $P_3$  des kleinen und  $P_{1,2}$  des großen Gefäßes bis zu 100 Stößen den Einfluß dar, den die Wände des kleinen Gefäßes auf die Setzungen der Punkte  $P_1$ ,  $P_3$  ausüben. Für größere Stoßzahlen als 100 macht sich der Einfluß der Wände des großen Gefäßes auf diese Differenzen auch bemerkbar, so daß die in den Spalten 11 und 12 (Tabelle 15) eingetragenen Differenzen von 100 Stößen an nicht mehr den wirklichen Einfluß der Wände des kleinen Gefäßes auf die Setzungen der Punkte  $P_1$  und  $P_3$  darstellen. Wären die Dimensionen des großen Gefäßes noch größer, so würde der Bereich, in dem die Differenzen der Spalte 11 und 12 den wirklichen Einfluß der Wände des kleinen Gefäßes darstellen, größer, und so hätte man auch den Einfluß der Wände des großen Gefäßes.

3. Aus den beiden vorstehenden Ergebnissen sieht man, wenn man die Setzungen im kleinen Gefäß mit den entsprechenden Setzungen des aus Sand bestehenden Halbraumes vergleicht, daß die Setzungen an den Punkten des kleinen Gefäßes, die oberhalb einer bestimmten Grenzfläche liegen, nach einer gewissen Stoßzahl größer sind als die Setzungen in den entsprechenden Punkten des aus Sand bestehenden

Halbraumes für dieselbe Stoßzahl. Dagegen sind die Setzungen der unterhalb dieser Grenzfläche liegenden Punkte im kleinen Gefäß kleiner als die Setzungen der entsprechenden Punkte im sandigen Halbraum. Mit zunehmender Stoßzahl bewegt sich diese Grenzfläche nach oben, und nach einer bestimmten Stoßzahl ist sie schon mit der Oberfläche des Sandes zusammengelassen. Nach Überschreiten dieser Grenzstoßzahl sind die Setzungen aller Punkte im kleinen Gefäß kleiner als die Setzungen der entsprechenden Punkte im Halbraum. So z. B. sind für das kleine Gefäß bis zu 10 Stößen die Setzungen fast aller Punkte des kleinen Gefäßes größer als die Setzungen der entsprechenden Punkte im sandigen Halbraum, da die Grenzfläche fast auf dem Boden des Gefäßes liegt; von 10—200 Stößen bewegt sie sich nach dem Punkt  $P_3$ , und von 200 Stößen an nach dem Punkt  $P_1$ .

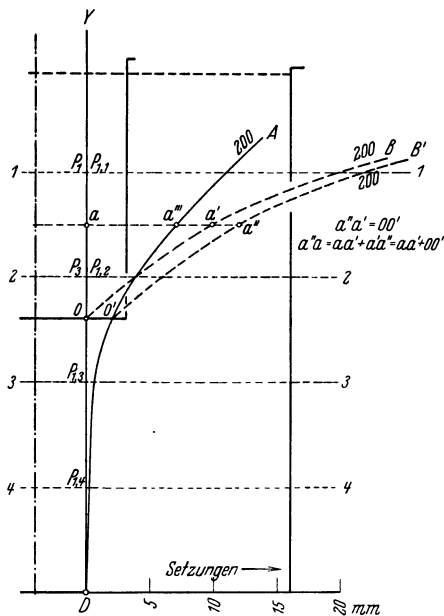


Abb. 59.

Unter der Annahme, daß die in dem großen Gefäß bis zu 600 Stößen gemessenen Setzungen für den unbegrenzten Halbraum gelten, kann man die notwendigen Verbesserungen für die Setzungskurven des kleinen Gefäßes auf folgende Weise finden:

Der Übergang von dem kleinen Gefäß zu dem großen hat zur Folge:

- die Vergrößerung des Volumens des Sandes,
- das Versetzen der Wände in größere Entfernungen.

Das Vorhandensein größerer Sandmassen hat zur Folge, daß die Setzungen der Punkte  $P_1$  und  $P_3$  (s. Abb. 59) um den gleichen Betrag wie die entsprechende Setzung des Punktes  $O$  in dem großen Gefäß zunehmen. In Abb. 59 ist die Kurve  $OB$  die Verteilungskurve der Setzungen in der Richtung  $DY$  nach 200 Stößen im kleinen Gefäß,  $DO'A$  ist die Verteilungskurve der Setzungen im großen Gefäß, ebenfalls nach 200 Stößen. Durch Parallelverschiebung der Kurve  $OB$  um das Maß  $OO'$  in die Lage  $O'B'$  erhält man den Einfluß der Vergrößerung des Sandvolumens auf die Setzungen.

Durch Hinausrücken der Wände des kleinen Gefäßes bis zu denen des großen Gefäßes wird eine Verminderung des Einflusses der Wände auf die Setzungen hervorgerufen. Diese Verminderung geben die Differenzen zwischen den Kurven  $O'B'$  und  $O'A$ . Aus diesen Differenzen entnimmt man, daß die Einflüsse mit der Tiefe abnehmen.

Der vorstehende Gedanke gibt an, wie man die Setzungen im großen Gefäß verbessern muß, damit man zu den vom Einfluß der Wände freien Setzungen kommt (Setzungen in dem aus Sand bestehenden Halbraum). Sind (Abb. 60) z. B.  $Oa'$  die Verteilungskurve der Setzungen nach bestimmten Stößen in dem großen Gefäß,  $a-a'$  die entsprechenden Setzungen, so muß man die Setzungen  $a-a'$  erst um den unbekanntes Betrag  $a''-a$  der Setzung des Punktes  $O$  in  $a''-a'$  vergrößern (Linie  $b-b$ ) und dann diese neuen Setzungen  $a''-a'$  um die ebenfalls unbekanntes Strecken  $a''-a'''$ , die den Einfluß der Wände für dieselbe Stoßzahl bedeuten (Kurve  $O'B$ ), vermindern. Die zwischen den Kurven  $Oa'$  und  $O'B$  liegenden Strecken sind die wirklichen Setzungen im unbegrenzten Halbraum. Nur der obenstehende Vergleich gibt einen Anhaltspunkt für die Größe des Betrages  $OO'$  und die Form der Kurve  $O'B$ . Mit zunehmender Stoßzahl bewegt sich der Punkt  $C$  (Lage der Grenzfläche) vom Boden des Gefäßes nach oben, bis er nach einer bestimmten Stoßzahl mit der Oberfläche des Sandes zusammenfällt.

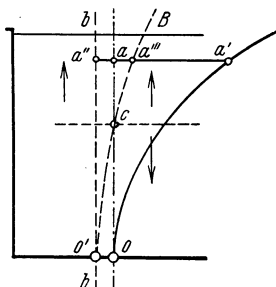


Abb. 60.

Aus Abb. 59 ist zu ersehen, daß die nach obenstehenden Ausführungen an den Setzungskurven im Gefäß beim Übergang in den sandigen Halbraum anzubringenden Verbesserungen die Form der Setzungskurven wenig beeinflussen, daß also die Form der Setzungskurven im sandigen Halbraum und im Gefäß nur wenig voneinander abweicht. Infolgedessen gelten die in dem ersten, zweiten und dritten Abschnitt abgeleiteten Ergebnisse über die Setzungsänderungen, Dichteänderungen usw. auch für den unbegrenzten Halbraum. Nur werden vielleicht im unbegrenzten Halbraum die mit der Tiefe abnehmenden Ungleichheiten der Dichteänderungen nicht so groß sein wie die, welche die Kurven für die durch die Gefäßwände abgeschlossene Sandmasse aufweisen.



## b) Einfluß starrer Wände innerhalb einer Sandmasse auf die Setzungen der Sandmasse.

Starre Wände in einer Sandmasse, auf deren Oberfläche wiederholte Stöße ausgeübt werden, haben einen gewissen Einfluß auf die Setzungen der Sandmasse. Zur Untersuchung dieses Einflusses sind weitere Versuche durchgeführt, bei denen sich ein Gefäß mit den Abmessungen des zu den Versuchen des ersten Abschnittes benutzten kleinen Gefäßes in der Sandmasse des großen Gefäßes befand. Für diese Versuchsanordnung sind zwei Versuche durchgeführt, wobei das kleinere Gefäß einmal einen Boden hatte und einmal unten offen war, wie Abb. 61a und b schematisch zeigen. Das kleine Gefäß wurde während der Füllung des großen Gefäßes eingesetzt, und die Füllung dann so fortgesetzt, daß die Dichte der Schüttung in beiden Gefäßen dieselbe war. Bei dem ersten der beiden Versuche (kleines Gefäß mit Boden) sind bis zu 1000 Stößen die Setzungen der Punkte  $K$  (Sandoberfläche),  $F, G, H, I, A (P_{1,1})$  und  $B (P_{1,2})$  gemessen und in Tabelle 16 eingetragen. Das kleine Gefäß setzte sich während des Versuches ebenfalls. Seine Setzungen wurden an drei Punkten des oberen Gefäßrandes gemessen. In die Tabelle 16 ist nur das arithmetische Mittel der drei Punkte, also die achsiale Setzung des Gefäßes, eingetragen und mit  $E$  bezeichnet. Bei dem zweiten Versuch (kleines Gefäß ohne Boden) sind außer an den oben erwähnten Punkten noch die Setzungen an den Punkten  $C (P_{1,3})$  und  $D (P_{1,4})$  gemessen, die beim ersten Versuch wegen des Vorhandenseins des Bodens des kleinen Gefäßes nicht gemessen werden konnten.

In Abb. 62a und b sind die Verteilungskurven der Setzungen in der Richtung  $a-a$  für 500 und 1000 Stöße für beide Versuche aufgetragen. Mit  $a$  ist der erste Versuch (kleines Gefäß mit Boden) und mit  $b$  der zweite Versuch (kleines Gefäß ohne Boden) bezeichnet. In die gleichen Abbildungen sind die aus den früheren Versuchen mit dem großen Gefäß ohne das kleine Gefäß gewonnenen Setzungen zu Vergleichszwecken gestrichelt aufgetragen, wobei die Setzungen für nicht durch Versuche belegte Punkte interpoliert sind.

In Abb. 63a und b sind die Verteilungskurven der Setzungen in der Richtung  $1-1$  für 50, 100, 500, 1000 Stöße für beide Fälle aufgetragen. Die gestrichelten Linien stellen die Verteilungskurven der Setzungen im großen Gefäß ohne das kleine Gefäß dar, die aus den im dritten Abschnitt beschriebenen Versuchen entnommen sind (s. Tabelle 8 und Abb. 41).

Die in der Tabelle 16 zusammengestellten achsialen Setzungen des Gefäßes mit Boden (Spalte Ea) geben die mittleren Setzungen der Ebene  $NN$  der Sandmasse, und infolgedessen können sie als die Setzungen des Punktes  $O$  (Abb. 59) der Sandmasse angenommen werden. Dagegen sind für den zweiten Fall (kleines Gefäß ohne Boden) die achsialen Setzungen des Gefäßes (Spalte Eb der Tabelle 16) größer als die mittleren Setzungen der Ebene  $NN$ , weil das Gefäß unter den Erschütterungen und dem Einfluß seines Gewichtes (21,50 kg) in die Sandmasse eindringt. Deswegen sind beim Auftragen der Verteilungskurven in der Richtung  $1-1$  nur die Setzungen der Punkte  $A (P_{1,1}), B (P_{1,2}), C (P_{1,3})$  und  $D (P_{1,4})$  berücksichtigt. Die Punkte  $O_{50}, O_{100}, O_{500}$  und  $O_{1000}$  geben für 50—1000 Stöße die achsialen Setzungen des Gefäßes an.

Aus den Abb. 61a, 61b, 62a, 62b und der Tabelle 16 sind folgende Ergebnisse zu entnehmen:

1. Für eine senkrechte Richtung  $a-a$ , die außerhalb des kleinen Gefäßes liegt, sind die Setzungen der Punkte, welche unterhalb bzw. oberhalb der Ebene  $m-m$  der Gefäßsohle liegen, für beide Fälle (kleines Gefäß mit Boden oder ohne Boden) größer bzw. kleiner als die Setzungen derselben Punkte im großen Gefäß, wenn das kleine Gefäß nicht vorhanden wäre. Die beobachteten Differenzen scheinen für den ersten Fall (kleines Gefäß mit Boden) größer zu sein.

2. Wenn auch in dem Verlauf der Verteilungskurven der Setzungen in der Richtung  $a-a$  für die beiden Fälle a und b gewisse Abweichungen auftreten, sind jedoch die Setzungen der Sandoberfläche in beiden Fällen fast dieselben.

3. Für eine senkrechte Richtung  $1-1$ , die innerhalb des kleinen Gefäßes liegt, sind die Setzungen aller Punkte der Senkrechten für den Fall b und der Punkte von  $L$  bis  $O$  im kleinen Gefäß für den Fall a größer als die Setzungen der entsprechenden Punkte im großen Gefäß, wenn das kleine Gefäß nicht vorhanden wäre (s. Abb. 63a und b). Mit Bezug auf Ergebnis Nr. 1 gilt sicherlich auch dasselbe für die Punkte der Richtung  $1-1$  (Fall a), die unterhalb der Gefäßsohle liegen, für welche eine Messung der Setzungen infolge der Sohle des kleinen Gefäßes nicht möglich war.

4. Die Verteilungskurven der Setzungen in der Richtung  $1-1$  sind für beide Fälle a und b fast dieselben (mindestens für die Punkte, die im kleinen Gefäß liegen).

Durch Vergleich der Verteilungskurven in Abb. 63 bekommt man ein Bild des Einflusses, den die Wände des kleinen Gefäßes auf die Setzungen hervorrufen.



In Abb. 64 ist  $O''L$  die Verteilungskurve der Setzungen für 200 Stöße im großen Gefäß in der Richtung 1—1, wenn in demselben das kleine Gefäß mit Boden sich befindet,  $RO'L'$  die Verteilungskurve der Setzungen im großen Gefäß ohne das Vorhandensein des kleinen Gefäßes. Die zwischen den Kurven  $RO'L'$  und  $O''L$  liegenden Strecken (z. B.  $a''a'''$ ) sind die Einflüsse der Wände des kleinen Gefäßes auf die Setzungen (hier positiv).  $O'O''$  ist infolgedessen der Einfluß der Wände auf die Setzungen des Punktes  $O$ . Durch parallele Verschiebung der Kurve  $O'L'$  zu  $O'L''$  bekommen wir die Strecken zwischen  $O'L''$  und  $O''L$  (Strecke  $a'a''$ ), die den Einfluß der Wände (positiv) auf die Setzungen der Punkte in der Richtung 1—1 von  $L$  bis  $O$  geben, falls der Boden unter der Ebene  $NN$  nicht nachgibt. Da auch die Verteilungskurve der Setzungen für den Fall des kleinen Gefäßes ohne Boden fast dieselbe wie die Kurve  $O''L$  ist, so haben nur die seitlichen Wände des kleinen Gefäßes Einfluß auf die Setzungen im großen Gefäß. Die zwischen den Kurven  $O''L$  und  $O'L''$  liegenden Strecken in Abb. 64 entsprechen den Strecken, die zwischen den Kurven  $O'B'$  und  $O'A$  in Abb. 59 liegen.

Die Erklärung der vorerwähnten Ergebnisse findet man im letzten Abschnitt.

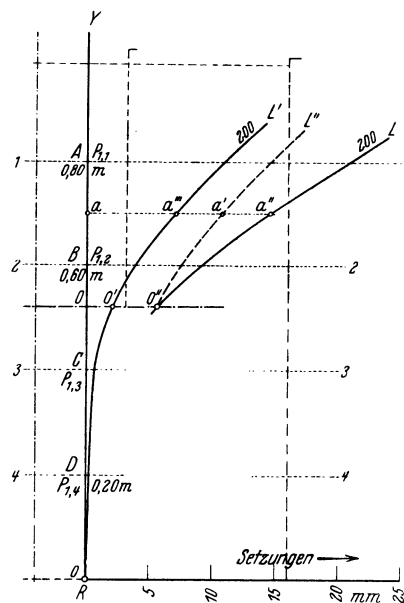


Abb. 64.

## Fünfter Abschnitt.

## Allgemeine Ergebnisse.

## a) Ist das Zurückführen eines dynamischen Vorganges auf einen statischen möglich?

Wenn man von dem im dritten Abschnitt abgeleiteten Ergebnis Nr. 9 ausgeht, so wird, da das Verhältnis der Normalspannungen in den Sandschüttungen zu den entsprechenden Setzungen für eine statische Belastung innerhalb bestimmter Grenzen (Proportionalitätsgrenze) konstant ist (Bettungsziffer konstant, s. Terzaghi<sup>1</sup>), die folgende Frage gestellt:

Kann man wenigstens innerhalb gewisser Grenzen ein Setzungssystem im Innern eines Sandkörpers, hervorgerufen durch Stöße auf die Sandoberfläche, auf ein solches zurückführen, das durch eine statische Belastung erzeugt würde, wobei die Größe der statischen Belastung sich aus der Multiplikation des Gewichtes der fallenden Kugel mit einem noch zu suchenden dynamischen Faktor ergäbe?

So z. B. kann man aus der Durchbiegung  $f$ , welche ein elastischer, masseloser Balken unter der statischen Einwirkung einer Last  $P$  erfährt, s. Abb. 65, die Durchbiegung  $f_D$  berechnen, die der Balken  $AB$  erfährt, wenn das Gewicht  $P$  aus einer Höhe  $h$  auf den Balken fällt, indem man die Durchbiegung  $f$  mit einem dynamischen Faktor  $\nu$  multipliziert. Es ist bekanntlich:

$$f_D = \nu \cdot f = f(1 + \sqrt{1 + 2n})$$

$$n = \frac{h}{f}$$

Ließe sich ein solcher Faktor finden, so würde man (wenigstens innerhalb der Grenzen eines der statischen Belastung entsprechenden Tragkörpers) die Erklärung für manche Ergebnisse der vorigen Abschnitte im Bereich der Gesetze zu suchen haben, die für die statischen Belastungen und für die von ihnen hervorgerufenen Setzungen der Sandböden gelten.

Eine solche Zurückführung ist aus folgenden Gründen nicht möglich:

<sup>1</sup> Erdbaumechanik, S. 234.

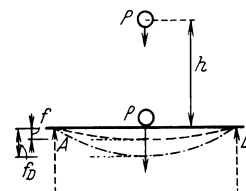


Abb. 65.

Wirkt auf die Oberfläche der Sandmasse eine statische Last und nimmt diese Last langsam zu, so ist das Verhältnis zwischen Normalspannungen und Setzungen bis zur Proportionalitätsgrenze konstant. Infolgedessen ist bis zu dieser Grenze ein Zurückführen des dynamischen Vorganges auf einen statischen Vorgang immer möglich. Da aber diese Proportionalitätsgrenze sehr tief liegt, so sind die Setzungen bis zu den der Proportionalitätsgrenze entsprechenden Belastungen in den oberen Schichten zu klein und in den tieferen entweder gleich 0 oder ganz unmerkbar. Diese Proportionalitätsgrenze ist naturgemäß höher für diejenigen Sandarten, die von Anfang an eine dichtere Packung aufweisen, aber immerhin bleibt sie zu tief. So z. B. (s. Terzaghi<sup>1</sup>) ist sie für einen locker gelagerten Sand (Kurve *L*) nur  $0,3 \text{ kg/cm}^2$  und für einen dicht gelagerten Sand  $1,3 \text{ kg/cm}^2$ . Eine Belastung von  $0,7 \text{ kg/cm}^2$  bei einer Belastungsfläche von  $0,1 \text{ m}^2$  auf der Oberfläche der Sandmasse im großen Gefäß verursachte nur in dem Punkte  $P_{1,1}$  eine Setzung, die sich auf einige Tausendstel Millimeter (jedenfalls kleiner als  $0,1 \text{ mm}$ ) belief. In den tieferen Punkten machten sich keine Setzungen bemerkbar. Dagegen war bereits nach dem ersten Stoß die Setzung des Punktes  $P_{1,1}$   $0,10 \text{ mm}$  und des Punktes  $P_{1,2}$   $0,01 \text{ mm}$  (statische Belastung  $\frac{P}{\pi \cdot r^2} = \frac{0,882 \text{ kg}}{3,14 \cdot 7,5^2} = \frac{0,882}{176} = 0,005 \text{ kg/cm}^2$ ). Es war somit für den Punkt  $P_{1,1}$  die Proportionalitätsgrenze erheblich überschritten und für den Punkt  $P_{1,2}$  bereits erreicht. Da ein dynamischer Faktor nur unterhalb der Proportionalitätsgrenze gültig sein kann, gibt es im vorliegenden Fall keinen derartigen Faktor. — Wollte man durch zunehmende statische Belastung auf der Oberfläche des Sandes über die Proportionalitätsgrenze gehen, dann würde die Lastfläche in den Sand einsinken, während der Boden unter Bildung von Gleitflächen schräg nach außen ausweicht. Die gleich unterhalb der Lastfläche liegenden Schichten würden große Setzungen (Terzaghi<sup>2</sup>) aufweisen, und es wäre möglich, daß der Punkt  $P_{1,1}$  so große Setzungen erfährt wie diejenigen infolge der Stoßbeanspruchung. In den tiefer gelegenen Punkten hätte man keine Setzung beobachtet. Bei höheren Belastungen also bricht die obere Schicht des Sandes zusammen, die Lastfläche sinkt in den Sand hinein, die Proportionalität zwischen Spannungen und Setzungen hört auf, und es treten solche Vorgänge ein, die nichts mit dem dynamischen Vorgang zu tun haben.

Wenn trotzdem die Einführung eines dynamischen Faktors möglich wäre, so würden gewisse Punkte, wie z. B. die Bildung eines verdichteten Körpers, der sich sehr viel weiter von der Fallachse erstreckt als der Tragkörper der statischen Belastung, ungeklärt bleiben.

Für das Nichtvorhandensein eines dynamischen Faktors spricht noch das Ergebnis Nr. 3 des vorigen Abschnittes. Dort wurde gezeigt, daß die Wände in den oberen Schichten und bis zu einer Grenzstoßzahl eine Vergrößerung der Setzungen hervorrufen. Die durch eine statische Belastung hervorgerufenen Setzungen werden dagegen ohne Rücksicht auf die Größe der Belastung immer vermindert.

Man muß also eine andere Erklärung der abgeleiteten Ergebnisse suchen.

## b) Die Elastizität und die Dämpfung der Sandböden.

Der in irgendeinem lockeren oder dichteren Zustand befindliche Sandkörper besitzt einen Elastizitätsgrad. Über die Beschaffenheit der Elastizität s. Terzaghi<sup>3</sup>. Durch die von Terzaghi ausgeführten Versuche<sup>4</sup> ist bewiesen, daß der Elastizitätsmodul ( $E = \frac{dP}{d\varepsilon}$ ) für irgendeinen lockeren oder dichteren Zustand desselben Sandbodens dieselben Werte aufweist (vgl. die Hysteresisschleifen der Kurven Abb. 15a, 15b, S. 88). Ein Beispiel der Elastizität gibt Franzius<sup>5</sup>.

Als elastischer Körper kann der Sandkörper Schwingungen ausführen und leitet infolgedessen eine durch Stöße ihm zugeführte Energie durch Schwingungen in seinem Innern fort. Diese Fortpflanzung der Energie hängt aber nicht nur von dem Elastizitätsgrad des Sandbodens, sondern auch von seiner Dämpfungsfähigkeit ab. Über die Größe und die Ursache der Dämpfungsfähigkeit der Sandböden ist noch nicht viel bekannt. Sie drückt sich dadurch aus, daß sich die Sandböden unter äußeren Wirkungen durch Aufsuchen einer neuen Strukturform verdichten. Wäre die Dämpfung während des Stoßvorganges in dem Sandboden konstant, so würde die Fortpflanzung der Energie für alle Zeiträume des Versuches in gleicher Weise stattfinden. Das aber ist für den Sandkörper nicht der Fall.

Der in einem lockeren, überall gleichmäßigen Zustand befindliche Sandkörper mit einer konstanten Porenziffer besitzt überall dieselbe Dämpfung, welche einen großen Wert hat. Die mit den ersten Stößen

<sup>1</sup> Erdbaumechanik, S. 234, Abb. 45.

<sup>2</sup> Erdbaumechanik, S. 234.

<sup>3</sup> Erdbaumechanik, S. 101.

<sup>4</sup> Erdbaumechanik, S. 88—89.

<sup>5</sup> Messungen der Bewegungen der Trockendocks V und VI der Kaiserlichen Werft Kiel. Ztschr. f. Bauwesen 1908, S. 83.

auf einem Punkt seiner Oberfläche erzeugte Energie strebt sich nach allen Richtungen hin fortzupflanzen. Da aber die vorhandene Dämpfung des Sandes (Möglichkeit zu weiterer Verdichtung) zu groß ist, verzehrt sich diese Energie nur bei der Verdichtung der in der Nähe des Stoßmittelpunktes liegenden Sandmassen, so daß sie sich nicht in entfernteren Punkten bemerkbar macht. Diese Verdichtung verringert die vorhandene Dämpfung der in der Nähe des Stoßmittelpunktes liegenden Sandmassen, so daß die durch neue Stöße hervorgerufene Energie sich in einem elastischen Körper mit kleinerer Dämpfung fortpflanzt. Sie ruft durch neue Verdichtungen noch weitere Verminderung der Dämpfung der in der Nähe des Stoßmittelpunktes liegenden Sandmassen hervor und durch weitere Fortpflanzung macht sie sich in größerer Entfernung bemerkbar, indem sie eine Verdichtung des Sandes und infolgedessen eine Verminderung der anfänglichen Dämpfung auch dort verursacht.

### e) Die Bildung eines dynamischen Tragkörpers.

Mit zunehmender Stoßzahl bildet und verbreitet sich nach allen Richtungen ein verdichteter Sandkörper. Die Verdichtung in diesem Körper besitzt ihren größten Wert in der Nähe des Stoßmittelpunktes, und sie nimmt mit der Entfernung von ihm nach allen Richtungen ab. Diese immer weiter sich verbreitende Verdichtung hat zur Folge die stetige Verminderung der Dämpfung innerhalb des gebildeten Körpers. Sie besitzt daher immer ihren kleinsten Wert in der Nähe des Stoßmittelpunktes, und sie nimmt mit der Entfernung von ihm zu, bis sie an der Grenze des Körpers ihren anfänglichen größten Wert erreicht. Mit zunehmender Stoßzahl findet der Schwingungsvorgang innerhalb dieses stetig sich verdichtenden und sich nach allen Richtungen vergrößernden Körpers mit stetig sich vermindender Dämpfung statt. Dieser Körper wird im Gegensatz zu dem bei statischen Belastungen entstandenen Tragkörper als dynamischer Tragkörper bezeichnet. Außerhalb dieses dynamischen Tragkörpers führt der Sandboden keine Schwingung aus. Dieser dynamische Vorgang soll naturgemäß nach bestimmten Gesetzen vor sich gehen; und weil es sich hier um eine Formänderung des Sandkörpers, die durch Bewegungen der Körner entsteht, handelt, geht die Bildung dieses Tragkörpers nach dem Gesetz des geringsten Widerstandes vor sich. Es werden innerhalb des Sandkörpers diejenigen Formänderungen zu erreichen gesucht, für welche die geringste Arbeit aufgewendet wird, und es wird infolgedessen ein beträchtlicher Teil der dem Sandboden durch die Stöße zugeführten Energie weiter fortgepflanzt. Diese Formänderungen führen zur Bildung jenes Körpers, innerhalb dessen die Elastizität des Bodens für die weitere Fortpflanzung der Energie am besten ausgenützt wird. Bei Sandböden wird also die zur Erzeugung der Strukturänderung aufzuwendende Arbeit ein Kleinstwert in ähnlicher Weise wie bei elastischen Körpern die zur Erzeugung der Formänderungen aufzuwendende Arbeit der inneren Spannungen. Der Unterschied zwischen Sandböden und elastischen Körpern ist, daß letztere während der Formänderungen ihre elastischen Eigenschaften innerhalb gewisser Grenzen behalten, während bei Sandböden zwar der Elastizitätsmodul konstant bleibt (Terzaghi<sup>1</sup>), aber die Dämpfung mit den Formänderungen sich verändert. Auch behält die Dämpfung nicht den gleichen Wert für jede Stelle des dynamischen Tragkörpers. Hierdurch erklärt sich, daß es nicht möglich ist, den dynamischen Vorgang in Sandböden mit statischen Vorgängen durch einen dynamischen Faktor zu erfassen. Ebenso wird auch die Form des dynamischen Tragkörpers in Sandböden nach dieser Überlegung nicht mit der Form des statischen Tragkörpers übereinstimmen, wie ja auch die Versuche (s. dritten Abschnitt, Ergebnis 9) gezeigt haben.

### d) Die Form und die Größe des dynamischen Tragkörpers und die in ihm durch Schwingungen erfolgende Fortpflanzung der Energie.

Nun ist die Frage über die Form und die Größe dieses dynamischen Tragkörpers zu stellen. Aus dem Verlauf der in Abb. 57 aufgetragenen Kurven gleicher Setzung entnimmt man, daß der Tragkörper in der Nähe des Stoßmittelpunktes die Form eines Rotationshyperboloids annimmt und mit größerer Entfernung angenähert zu einer Platte übergeht (s. die Ergebnisse Nr. 4, 5, 6 und 7 im dritten Abschnitt), weil die in einer senkrechten Linie bzw. einer waagerechten Ebene liegenden Punkte mit zunehmender Entfernung von dem Stoßmittelpunkt ungefähr dieselben Dichteänderungen aufweisen. Die Größe dieses Tragkörpers kann man sich folgendermaßen vorstellen:

<sup>1</sup> Erdbaumechanik, S. 88—89.

Die durch jeden neuen Stoß im Innern eines elastischen Körpers erzeugten Schwingungen weisen immer dieselbe Intensität auf, die ihren größten Wert in ihrem Erzeugungspunkt besitzt und mit der Entfernung nach allen Richtungen abnimmt bis zu einer Grenzfläche, wo man keine Schwingung mehr bemerkt, und sie 0 wird. Diese Grenzfläche weist immer dieselbe Form auf und besitzt für jeden Körper eine konstante Lage, die nur von der Größe des Stoßes abhängt. Die Verminderung der Intensität der Schwingungen mit der Entfernung von dem Erzeugungspunkt ist dadurch erklärlich, daß sie fortwährend einen Teil zur Überwindung der inneren Reibung des Körpers verliert.

Etwas ähnliches geschieht bei der Fortpflanzung der Schwingungen im Inneren des dynamischen Tragkörpers in Sandböden. Die Intensität der Schwingungen besitzt ihren größten Wert an dem Erregungsmittelpunkt und nimmt mit der Entfernung von ihm ab. Diese Verminderung der Intensität

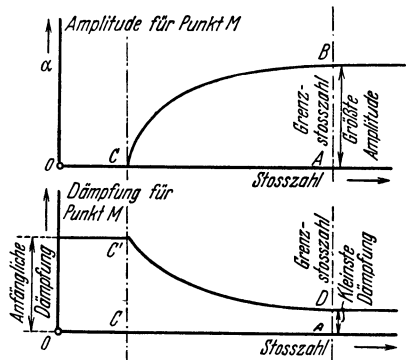


Abb. 66.

der Schwingungen nimmt mit zunehmender Stoßzahl ab, weil sie eng mit der Möglichkeit weiterer Verdichtungen in dem Tragkörper verbunden ist (abnehmende Dämpfung), so daß sie bei einer Grenzstoßzahl für jeden Punkt gleich 0 wird, d. h., die durch diesen Punkt laufende Schwingung verursacht keine neue Verdichtung an dieser Stelle. Die Dämpfung hat ihren kleinsten und die entsprechende Amplitude ihren größten Wert dort angenommen. Von dieser Grenzstoßzahl an verringert sich die Intensität der Schwingungen nur durch die Reibung zwischen den Körnern während der elastischen rückkehrbaren Strukturänderungen, so daß sie in den Grenzentfernungen nach allen Richtungen, wo man keine Schwingung mehr bemerkt, gleich 0 wird.

Der dynamische Tragkörper hat schon seine Grenzform erreicht, die der Stärke der Stöße entspricht und von der Beschaffenheit des fraglichen Bodens auch abhängt. Wenn man nun die Stöße noch unendlich lange auf die Oberfläche des Sandbodens wirken lassen wollte, so pflanzt sich die durch die Stöße erzeugte Energie durch Schwingungen fortwährend abnehmend im Innern des Tragkörpers, bis an seine Grenze, wo sie gleich 0 wird, fort, ohne inzwischen neue Verdichtungen hervorzurufen. Der Boden hat schon durch die Bildung dieses Tragkörpers seine Elastizität am besten ausgenützt. In der Abbildung 66 sind die Kurven der Änderung der Dämpfung und Amplitude in einem Punkt  $M$  des Sandkörpers während dieses Vorganges zur Erreichung des dynamischen Grenztragkörpers dargestellt. Der Fall also, daß die wiederholte Stoßwirkung von gegebener Größe auf der Oberfläche des aus Sand bestehenden Halbraumes in seinem Innern zur dichtesten Packung führt, ist ausgeschlossen (vgl. auch Ergebnisse Nr. 2 und 3 im zweiten Abschnitt).

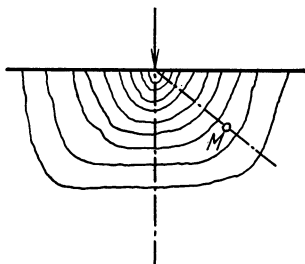


Abb. 67.

Die Größe der Amplitude und die entsprechende Dämpfung in dem Grenztragkörper ändert sich mit der Entfernung des Punktes  $M$  (Abb. 67) vom Erregungsmittelpunkt. Die Amplitude bzw. die Dämpfung besitzt im Mittelpunkt ihren größten bzw. kleinsten Wert, sie nimmt mit der Entfernung von ihm ab bzw. zu, und sie besitzt an der Grenze des Tragkörpers den Wert 0 bzw. ihren größten anfänglichen Wert.

In ähnlicher Weise ändert sich auch die Verdichtung, die im Mittelpunkt ihren größten Wert besitzt; sie nimmt mit der Entfernung von ihm ab und sie wird an der Grenze des Tragkörpers, wo die anfängliche Dichte des Sandkörpers herrscht, gleich 0.

Die Einwirkung größerer bzw. kleinerer Stöße hätte die Bildung eines größeren bzw. kleineren Tragkörpers mit größerer bzw. kleinerer Verdichtung zur Folge.

Die Einwirkung kleinerer Stöße auf einen schon gebildeten Grenztragkörper verursacht Schwingungen, die sich in seinem Innern fortpflanzen, ohne neue Verdichtungen hervorzurufen. Bevor sie zur Grenze des Tragkörpers kommen, würden sie gleich 0. Dagegen verursachen größere Stöße noch neue Verdichtungen und führen zur Bildung eines größeren Grenztragkörpers.

Die obenstehenden Überlegungen für die Bildung des dynamischen Grenzkörpers gelten, wie schon gesagt, für den Fall, wo der Sandkörper vor dem Beginn des Versuches sich in einem lockeren Zustand mit einer Porenziffer  $\epsilon_L$  befindet. Die Abb. 68 gibt eine schematische Darstellung des Grenztragkörpers. Befindet sich dagegen der Sandboden vor dem Beginn des Versuches (Stoßwirkungen) nicht in einem lockeren, sondern in einem dichteren Zustand mit einer Porenziffer  $\epsilon_D$  ( $\epsilon_D < \epsilon_L$ ), so hat man zwei Fälle zu unterscheiden:

1. Fall, wo  $\varepsilon_D \leq \varepsilon\text{-Grenze}$ , d. h. die überall herrschende anfängliche Dichte des Sandbodens ist größer oder gleich der Dichte im Stoßmittelpunkt, die der dynamische Grenztragkörper im Mittelpunkt bekommen würde, falls auf demselben Sandboden im lockeren Zustand dieselbe Stoßwirkung ausgeübt würde (s. Abb. 68,  $\varepsilon\text{-Grenze}$ ). Für diesen Fall ohne Bildung eines sich verdichtenden Körpers pflanzen sich vom Anfang der Stoßwirkung die Schwingungen im Innern des Sandkörpers immer abnehmend fort, bis ihre Intensität gleich 0 wird. Man hat es hier mit einem dynamischen Tragkörper zu tun, innerhalb dessen die Fortpflanzung der Energie durch Schwingungen sich vollzieht, der aber überall die anfängliche Dichte und Dämpfung aufweist. Während des Versuches behalten die Dichte und die Dämpfung ihre anfänglichen Werte (s. schematische Darstellung in Abb. 69).

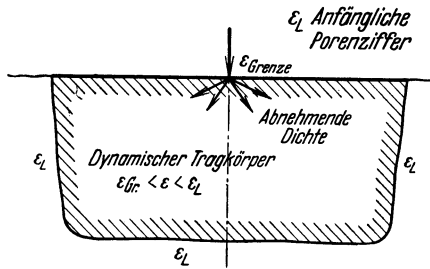


Abb. 68.

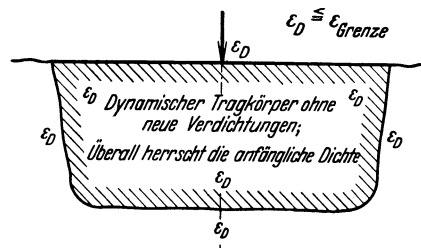


Abb. 69.

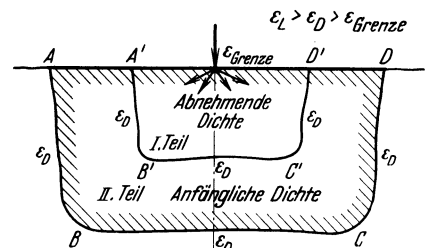


Abb. 70.

2. Fall, wo  $\varepsilon_L > \varepsilon_D > \varepsilon\text{-Grenze}$ , d. h., die anfängliche Dichte ist kleiner als die entsprechende in dem Mittelpunkt des Grenztragkörpers, falls auf demselben Sandboden im lockeren Zustand dieselbe Stoßwirkung ausgeübt würde. In diesem Fall führt die Stoßwirkung zu neuen Verdichtungen, aber bis zu kleineren Entfernungen vom Stoßmittelpunkt als in dem Fall des im lockeren Zustand befindlichen Sandbodens, und der dynamische Tragkörper besteht aus zwei Teilen I und II (s. schematische Darstellung in Abb. 70). Der Teil I weist mit zunehmender Entfernung vom Stoßmittelpunkt eine abnehmende Verdichtung bzw. zunehmende Dämpfung auf, bis sie in seiner Grenze zu der anfänglichen Dichte bzw. Dämpfung übergeht. Der Teil II, der an dem Teil I unmittelbar angrenzt, weist überall die anfängliche Dichte bzw. Dämpfung auf. In beiden Teilen vollzieht sich der Schwingungsvorgang.

### e) Welche Amplituden- und Dämpfungswerte kann man durch Versuche mit Erschütterungsmaschinen erhalten?

Auf Grund der Ergebnisse des vorigen Absatzes kann man mit Ausnahme des Falles Nr. 1 sagen, daß, wenn man für eine auf Sandboden arbeitende Erschütterungsmaschine aus aufgenommenen Amplituden- und Leistungskurven Zahlenwerte für die Größe der Amplitude und der Dämpfung entnehmen will, man die Maschine so lange mit der größten Exzentrizität und Frequenz laufen lassen soll, bis sich im Innern des Sandkörpers dieser dynamische Grenztragkörper gebildet hat. Erst dann erhält man durch weitere Versuche die gewünschten Werte, da nunmehr durch die Maschine keine neuen Verdichtungen hervorgerufen werden. Den Verlauf der Amplitudenkurven könnte man an allen Stellen bekommen, wo man einen Vibrographen hinstellt. Die gewonnenen Amplituden gelten genau für diese Stelle. Die aus der Leistungskurve aber berechnete Dämpfung stellt einen Mittelwert für die in dem Tragkörper vorhandene Dämpfung dar.

### f) Die Erklärung der in dem ersten, zweiten und dritten Abschnitt abgeleiteten Ergebnisse.

Durch die Elastizität des Bodens und seine stetig abnehmende Dämpfung während der Bildung des Grenztragkörpers finden alle die im zweiten und dritten Abschnitt abgeleiteten Ergebnisse ihre Erklärung. Aber dadurch sind auch alle Ergebnisse des ersten Abschnittes erklärlich.

Die aus Körnern von unregelmäßiger Größe bestehenden Sandböden weisen unter denselben Ablagerungsverhältnissen kleinere Porenziffern als die aus Körnern von regelmäßiger Größe bestehenden Sandböden auf, weil in den ersteren kleinere Körner die zwischen den größeren Körnern enthaltenen

Räume einnehmen. Trotz ihrer kleineren anfänglichen Porenziffer besteht immer in den ersteren Böden, durch eine bessere Auswahl der Lage der kleineren Körner in den zwischen den größeren enthaltenen Hohlräumen, größere Möglichkeit zur weiteren Verdichtung als in den zweitgenannten Böden, wo sie lediglich durch eine bessere Anordnung der Körner miteinander entsteht. Die anfängliche Dämpfung in den aus Körnern von unregelmäßiger Größe bestehenden Sandböden ist also unter denselben Ablagerungsverhältnissen größer als in den aus Körnern von regelmäßiger Größe bestehenden Sandböden, so daß die Schwingungen mit zunehmender Stoßzahl in den ersteren Böden eine größere Verdichtung hervorrufen und sich in kleineren Entfernungen bemerkbar machen als bei den zweitgenannten Böden. Man bemerkt also in den ersteren Sandböden die Bildung eines Grenztragkörpers mit kleineren Dimensionen und größeren Dichteänderungen als in den zweitgenannten.

Zuletzt finden die Ergebnisse des vierten Abschnittes auch durch denselben Gedanken ihre Erklärung.

Nehmen wir an, daß auf dem Punkt  $M$  der Oberfläche einer Sandmasse, die sich in einem Gefäß befindet, Stöße wirken und gleichzeitig auch auf dem Punkt  $M'$  des aus Sand bestehenden Halbraumes Stöße derselben Größe wirken, und vergleichen wir die Setzungen der Punkte  $P$  und  $P'$  (s. Abb. 71) miteinander, die in derselben Entfernung von der Sandoberfläche und Stoßachse stehen.

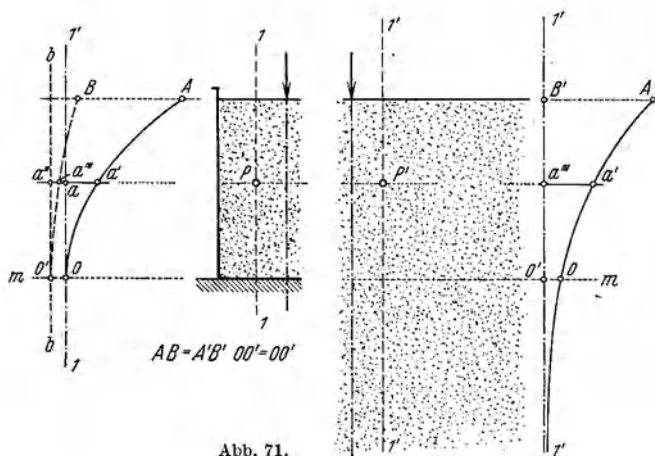


Abb. 71.

die durch wiederholte Stöße hervorgerufenen Schwingungen auf die Wände des Gefäßes und vergrößern durch Reflexion die auf eine Verdichtung im Punkte  $P$  hinwirkenden Stöße, so daß der Punkt  $P$  für gleiche Stoßzahl größere Setzungen aufweist als der Punkt  $P'$  im Halbraum. Das ist immer der Fall bis zu derjenigen Stoßzahl, wo die Schwingungen sich in der Sohle des Gefäßes noch nicht bemerkbar machen. Von dieser Stoßzahl an erfahren die Setzungen des Punktes  $P$  im Vergleich zu den Setzungen des Punktes  $P'$  einerseits eine Vergrößerung infolge der Reflexion der Schwingungen, andererseits aber eine Verminderung, weil sich die Punkte der Sohle  $NN$  des Gefäßes nicht unter der Wirkung der Stöße

nach unten bewegen können, wie es für den sandigen Halbraum geschieht, wo die Punkte der der Sohle  $NN$  entsprechenden Ebene  $mm$  sich nach unten bewegen können. Die durch Reflexion verursachte Vergrößerung der Setzungen des Punktes  $P$  für eine bestimmte Stoßzahl nimmt mit der Tiefe ab, weil der Weg, den die Schwingungen zurücklegen müssen, bis sie auf die Wände fallen und wieder zu dem entsprechenden Punkt zurückgekehrt sind, mit der Tiefe zunimmt. Infolgedessen nimmt auch ihre Intensität ab (Kurve  $O'B$ ). Dagegen ist die durch Absperrung verursachte Verminderung der Setzungen für alle Punkte des Gefäßes bei derselben Stoßzahl konstant, und zwar ungefähr gleich der Setzung der Gefäßsohle  $NN$ . In einer Grenztiefe wird die Vergrößerung der Setzungen gleich der Verminderung. Die dort liegenden Punkte des Gefäßes weisen dieselben Setzungen wie die entsprechenden Punkte des Halbraumes auf und sind deshalb unabhängig von dem Einfluß der Wände. Die oberhalb bzw. unterhalb dieser Fläche liegenden Punkte des Gefäßes weisen größere bzw. kleinere Setzungen auf als die entsprechenden Punkte im Halbraum. Da mit zunehmender Stoßzahl fortwährend die Dämpfung sich verringert, indem die Fortpflanzung der Schwingungen in tiefere Schichten geht und dort neue Verdichtungen hervorruft, wachsen die durch die Wände verursachten Verminderungen auf die Setzungen der Punkte des Gefäßes mit zunehmender Stoßzahl schneller als die Vergrößerungen, so daß die Grenzfläche sich nach oben bewegt, bis sie bei einer bestimmten Stoßzahl mit der Oberfläche zusammenfällt. Von dieser Grenzstoßzahl an sind die im Gefäß beobachteten Setzungen immer kleiner als die der entsprechenden Punkte des Halbraumes, und die entsprechenden Differenzen wachsen mit der Tiefe. Die Lage der Grenzfläche und ihre Bewegung nach oben oder die Form der Kurve  $O'B$  und die Bewegungen der Kurven  $O'B$  und  $b-b$  mit zunehmender Stoßzahl hängen von der Form der Wände und der Beschaffenheit des Sandbodens ab.

Die Erklärung der im Abschnitt IVb abgeleiteten Ergebnisse ist einfach: Bei Vorhandensein des kleinen Gefäßes mit Boden oder ohne Boden fallen die durch wiederholte Stöße hervorgerufenen Schwingungen auf die Wände des kleinen Gefäßes und vergrößern durch Reflexion, die auf eine Verdichtung der innerhalb des kleinen Gefäßes liegenden Punkte hinwirkenden Stöße, so daß diese Punkte bei Vorhandensein der Wände größere Setzungen aufweisen. Die Stoßwirkung auf die Ebene  $NN$  ist jetzt größer



und ruft in den Sandmassen, die unterhalb dieser Ebene liegen, größere Setzungen hervor, als wenn die Wände nicht vorhanden wären. Für die Sandmassen, die außerhalb des kleinen Gefäßes und oberhalb der Ebene  $m—m$  liegen, bemerken wir kleinere Setzungen, weil eine unmittelbare Fortpflanzung der Stoßwirkung vom Stoßmittelpunkt durch die Wände des kleinen Gefäßes beeinträchtigt wird. Der größte Teil der Stoßwirkung pflanzt sich durch die Sandmasse, die sich im kleinen Gefäß befindet, bis auf die Sohle  $NN$  fort und erstreckt sich von dort in die ganze Sandmasse, die unterhalb der Ebene  $m—m$  liegt.

Die obenstehenden Ausführungen gelten auch für den Fall, wo der Erregungsmittelpunkt nicht auf der Oberfläche des Sandbodens, sondern tiefer in seinem Innern liegt (wie z. B. beim Rammen von Pfählen). Die aus dem Erregungsmittelpunkt ausgehenden Schwingungen führen ringsherum zur Bildung jenes Grenztragkörpers, der imstande ist, die erzeugten Schwingungen in seinem Innern zu übergeben, ohne neue Verdichtungen hervorzurufen. Durch die Bildung dieses Tragkörpers ist die Elastizität des Bodens am besten ausgenutzt. Der Grenztragkörper befindet sich in seiner dichtesten Strukturform im Mittelpunkt. Mit der Entfernung von ihm nimmt die Dichte ab, bis sie an der Grenze des Tragkörpers in die anfängliche Strukturform übergeht.

Die Dimensionen dieses Tragkörpers, der Grad der dichtesten Strukturform in seinem Mittelpunkt und die Abnahme der Dichte nach außen hin hängen von der Beschaffenheit des Bodens und der Stärke der wiederholt wirkenden Stöße ab.