

# Versuche

über die

## Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen.

Von

**C. Bach,**

K. Württ. Baudirektor,

Professor des Maschinen-Ingenieurwesens an der K. Technischen Hochschule Stuttgart.

---

**Heft 3.**

Untersuchungen über die Formänderungen und die Anstrengung flacher Böden.

---

Mit 67 Abbildungen im Text und auf 2 Tafeln.



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH

1897.

Verlag von Julius Springer in Berlin N.

---

Versuche  
über die  
**Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen.**

Von

**C. Back,**

Kgl. Württ. Baudirektor,

Professor des Maschinen-Ingenieurwesens an der K. Technischen Hochschule zu Stuttgart.

Heft 1. Wasserkammerplatten von Wasserröhrenkesseln. Mit 77 in den Text  
gedruckten Abbildungen . . . . . Preis *M* 2,40

Heft 2. Die Berechnung flacher, durch Anker oder Stehbolzen unterstützter Kessel-  
wandungen, und die Ergebnisse der neuesten hierauf bezüglichen  
Versuche.

Die auf der kaiserlichen Werft in Danzig von 1887 bis 1892 ausgeführten  
Versuche über die Widerstandsfähigkeit von Flammrohren. Mit  
56 in den Text gedruckten Abbildungen und 2 Tafeln . . . Preis *M* 3,—

---

Zu beziehen durch jede Buchhandlung.

# Versuche

über die

## Widerstandsfähigkeit von Kesselwandungen.

Von

**C. Bach,**

K. Württ. Baudirektor,

Professor des Maschinen-Ingenieurwesens an der K. Technischen Hochschule Stuttgart.

---

**Heft 3.**

Untersuchungen über die Formänderungen und die Anstrengung flacher Böden.

---

Mit 67 Abbildungen im Text und auf 2 Tafeln.



Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH 1897

Sonderabdruck

aus der

Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1897.

---

**Additional material to this book can be downloaded from <http://extras.springer.com>**

ISBN 978-3-662-31798-3      ISBN 978-3-662-32624-4 (eBook)

DOI 10.1007/978-3-662-32624-4

# Untersuchungen

über die

## Formänderungen und die Anstrengung flacher Böden.

Die angestellten Versuche erstrecken sich auf 9 Böden, und zwar auf 5 umgekrempte, eingenietete Böden aus Flusseisen und auf 4 gusseiserne Böden, welche mit den Hohlcylindern, die sie abschließen, je aus einem Stück bestehen.

### Erster Teil.

#### Versuche mit umgekrempten, eingenieteten Böden aus Flusseisen.

Die für den vorliegenden Sonderzweck entworfene und ausgeführte Versuchseinrichtung lassen die Textfiguren 1 bis 3 deutlich erkennen. Der Boden, welcher der Untersuchung unterworfen werden soll (vergl. Textfig. 1), also der eigentliche Versuchskörper, ist in den Versuchscylinder, dessen Längsnaht durch Schweißsen hergestellt wurde, eingenietet und innen wie außen verstemmt. Unten wird der letztere durch einen gusseisernen Untersatz abgeschlossen; die Verbindung erfolgt durch 26 Schrauben von 38 mm ( $1\frac{1}{2}$ " engl.) Gewindestärke, die Abdichtung durch Gummiringe, welche zum Schutz gegen das Herausgedrücktwerden in einer Nute gelagert sind. Rechts (Textfig. 1) schließt am Untersatz das von der Presspumpe kommende Rohr an, links befindet sich ein bis ganz hinauf an den Boden reichendes Rohr behufs möglichst vollständiger Abführung der Luft.

Der Versuchscylinder ist oben an dem äußeren Umfange durch Drehen mit einer vertieften Ringfläche versehen (vergl. außer Textfig. 1 auch Fig. 12, Taf. XXI). Auf dieser ruht ein in den Abmessungen stark gehaltenes, außen durch einen Ring verbundenes Armkreuz aus Gusseisen, der Messtisch, welcher besitzt:

33 senkrechte Löcher, Textfig. 2: 0 in der Mitte, 1 bis 4, 7 bis 10, 13 bis 16, 19 bis 22, 25 bis 28, 31 bis 34, 37 bis 40 und 43 bis 46 in den 8 Armen;

8 unter  $45^\circ$  geneigte Löcher, Textfig. 1 und 2: 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 und 48.

Diese Löcher sind zur Führung für gut passende Stifte bestimmt, welche sich einerseits gegen den zu untersuchenden Boden legen, andererseits um die Strecke  $x$  über die bearbeitete Tischfläche hinausragen. Durch Messung dieser Strecken  $x$  bei den verschiedenen Flüssigkeitspressungen, die

im Innern des Cylinders hergestellt werden, lässt sich die Formänderung des Bodens an 41 Stellen ermitteln. Später — von der Untersuchung des zweiten Bodens an — wurden auch noch 4 derartige Löcher und Messstifte: 49, 50, 51 und 52, Textfig. 1 und 2, in wagerechter Richtung angeordnet, um die Formänderung des Bodens da zu bestimmen, wo er aus dem Cylinder heraustritt, an dem cylindrischen Fortsatz.

Die Strecken  $x$  wurden mittels Mikrometerschraube gemessen, deren Teilung bis auf  $\frac{1}{100}$  mm reicht, sodass noch  $\frac{1}{200}$  mm geschätzt werden konnten. Eine weitergehende Genauigkeit anzustreben, schien schon bei der Oberflächenbeschaffenheit von solchen unbearbeiteten Böden unzweckmäßig, aber auch mit Rücksicht auf das Ziel der Versuche nicht nötig.

Um Messungsfehler nach Möglichkeit auszuschließen, wurde zu Anfang jede Strecke  $x$  von zwei Beobachtern, deren jeder eine Mikrometerschraube führte, unabhängig von einander gemessen. Bei denjenigen Stiften, für die sich ein Unterschied ergab, wurden die Messungen wiederholt. Für den Boden A beispielsweise waren so weit über 3000 derartige Messungen auszuführen.

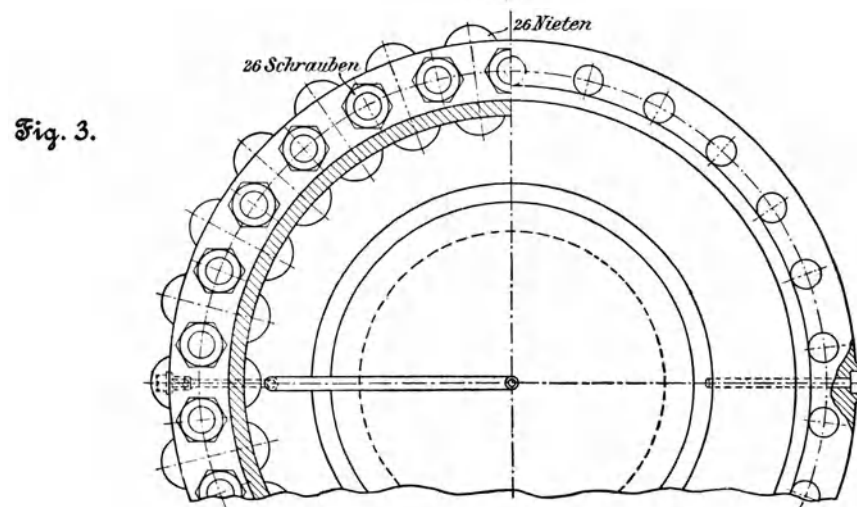
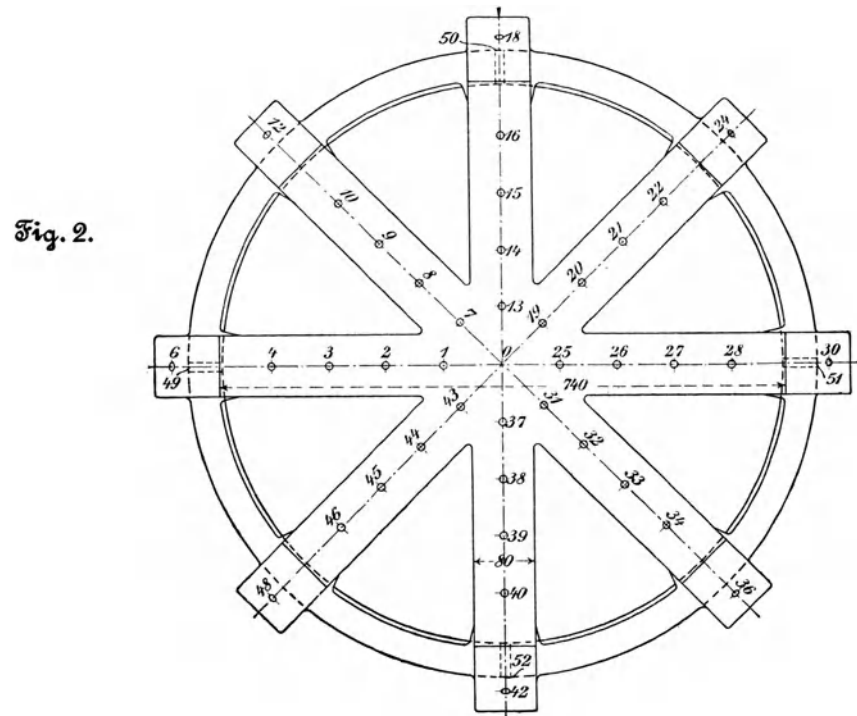
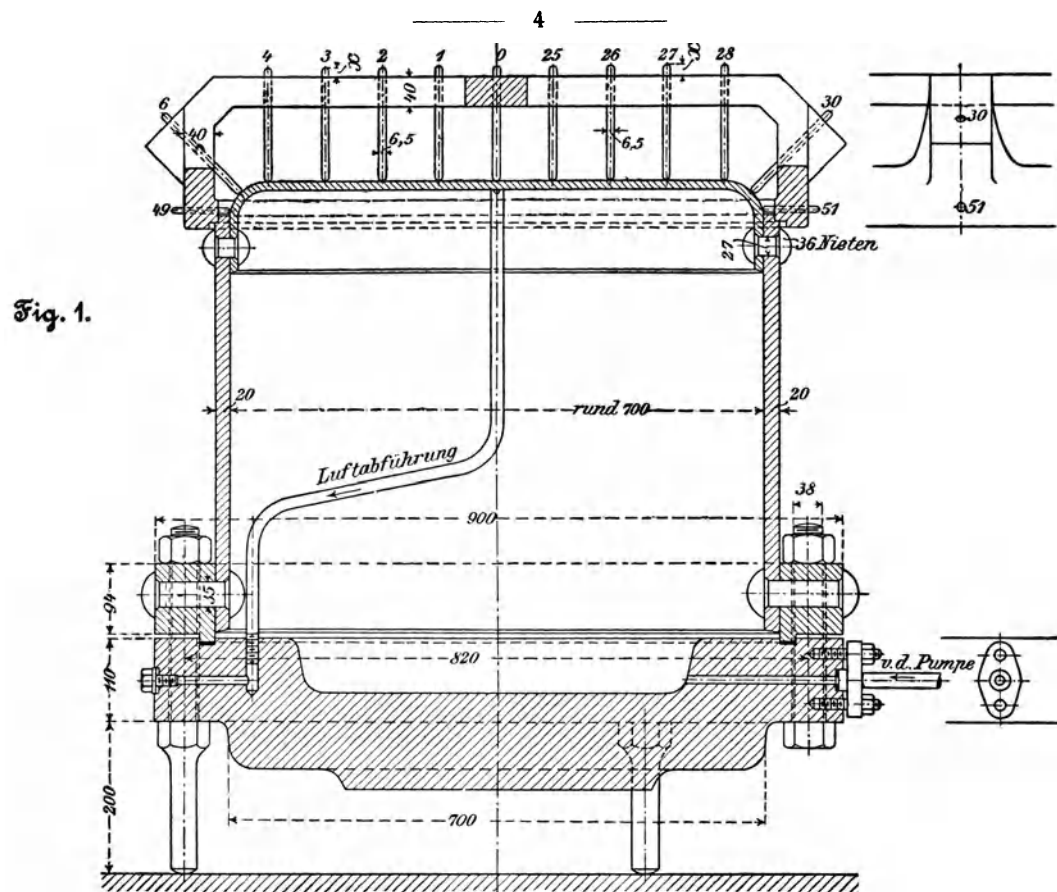
Im Nachstehenden sind die Ergebnisse der Messungen und Beobachtungen an den 5 eingenieteten Böden A, B, C, D und E zusammengestellt. Für den ersten Boden A ist das ausführlicher geschehen, um den vollen Einblick zu ermöglichen, für die übrigen Böden etwas gedrängter.

Die Bestimmung der Wandstärken der Böden fand jeweils nach den Versuchen in der Weise statt, dass der Boden an einer größeren Anzahl von Stellen durchgebohrt, hier die Dicke gemessen und aus den Messungen das Mittel genommen wurde.

Das zu den Böden verwendete Blech ergab für Flachstäbe von durchschnittlich 4 qcm Querschnitt und 200 mm Messlänge im mittel

Zugfestigkeit . . . . .	3820 kg/qcm
Bruchdehnung . . . . .	30,2 pCt
Querschnittsverminderung . . . . .	60 »
Proportionalitätsgrenze . . . . .	1650 kg/qcm
Streckgrenze . . . . .	2375 »
	1
Dehnungskoeffizient . . . . .	$\frac{1}{2205000}$

Bei den Zugversuchen mit diesen Blechstreifen wurde überdies noch beobachtet, unter welcher Belastung der Zunder abzuspringen begann. Es geschah dies bald nach Ueberschreitung der Streckgrenze, im mittel bei rd. 2600 kg/qcm.



### Boden A, Fig. 4 und 5, Taf. XXI.

Die Abmessungen des Bodens ergeben sich aus Fig. 4, die Abstände der Messpunkte von einander aus Fig. 5. Beabsichtigt war ein Abstand von 75 mm, sodass für den ursprünglich ebenen Teil des Bodens gemessen werden sollten: die Durchbiegungen in der Mitte, in Abständen von 75 mm, 150 mm, 225 mm und 300 mm aus der Mitte. Bei der erheblichen Länge der Messstifte und bei der Rauigkeit wie Unebenheit der Bodenoberfläche liefs sich vollständige Gleichheit dieser Abstände nicht erreichen, weshalb es angezeigt erschien, die thatsächlichen Abstände der Messpunkte nach Möglichkeit genau festzustellen und in Fig. 5 einzutragen.

Die gemessenen Strecken  $x$ , welche die Formänderung des Bodens bestimmen, sind nach Abzug einer Konstanten  $a$  ( $= 10$  mm) auf Seite 14 für die Flüssigkeitspressungen bis 4 Atm. (4 kg/qcm) zusammengestellt, und zwar gilt

Zusammenstellung 1 für den Dmr. mit den Punkten	6, 0, 30,
» 2 » » » » » » »	12, 0, 36,
» 3 » » » » » » »	18, 0, 42,
» 4 » » » » » » »	24, 0, 48.

Dabei ergab sich, dass die Ermittlung von  $x$  für den Mittelpunkt 0 immer viermal erfolgte.

Wie ersichtlich, wurde jeweils wieder auf die Pressung Null zurückgegangen, sodass für jede Flüssigkeitspressung  $p$  die gesamte, die bleibende und federnde Durchbiegung berechnet werden kann. Beispielsweise ergibt sich:

für die Punkte	1	7	13	19	25	31	37	43
die bei $p=0$	3,530	2,980	4,030	3,320	4,120	3,890	4,410	2,915
Größe » $p=4$	6,620	6,055	7,110	6,400	7,215	7,010	7,550	6,040
$x-a$ » $p=0$	3,580	3,020	4,085	3,375	4,170	3,935	4,460	2,970

somit  
die gesamte Durchbiegung 3,090 3,075 3,080 3,080 3,095 3,120 3,140 3,125 »  
die bleibende Durchbiegung 0,050 0,040 0,055 0,055 0,050 0,045 0,050 0,055 »  
also im mittleren Abstände von

$$\frac{75,3 + 73,8 + 73,5 + 74,6 + 75,3 + 75,7 + 75,5 + 75,0}{8} = 74,84 = \text{rd. } 75 \text{ mm}$$

aus der Mitte

die gesamte Durchbiegung durchschnittlich	. . .	3,101 mm
» bleibende »	. . .	0,050 »
» federnde »	. . .	3,051 »

In gleicher Weise ergeben sich bei  $p = 4$  Atm. für die Punktreihe 2, 8, 14, 20, 26, 32, 38 und 44, d. i. im Abstände von rd. 150 mm aus der Mitte,

die gesamte Durchbiegung durchschnittlich	. . .	2,211 mm
» bleibende »	. . .	0,031 »
» federnde »	. . .	2,180 »

für die Punktreihe 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39 und 45, d. i. im Abstände von rd. 225 mm aus der Mitte,

die gesamte Durchbiegung durchschnittlich	. . .	1,040 mm
» bleibende »	. . .	0,014 »
» federnde »	. . .	1,026 »

für die Punktreihe 4, 10, 16, 22, 28, 34, 40 und 46, d. i. im Abstände von rd. 300 mm aus der Mitte,

die gesamte Durchbiegung durchschnittlich	. . .	0,121 mm
» bleibende »	. . .	0,001 »
» federnde »	. . .	0,120 »

für die Punktreihe 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 und 48, d. i. in der Krümmung da, wo die unter  $45^\circ$  geneigten Messstifte sie berühren,

die gesamte Durchbiegung durchschnittlich	. . .	— 0,057 mm
» bleibende »	. . .	— 0,003 »
» federnde »	. . .	— 0,054 »

Das Minuszeichen deutet an, dass hier die Formänderung der Krümmung eine solche ist, dass diese sich hier nicht nach außen, sondern nach innen durchbiegt, entsprechend einer Vergrößerung des Halbmessers der Krümmung (vergl. Fig. 12, Taf. XXI).

Um ein anschauliches Bild von der Veränderlichkeit der Formänderungen des Bodens zu erhalten, müssen die Durchbiegungen für die Bodenmitte sowie für die angegebenen Punktzeilen (im Abstände von rd. 75, 150, 225 und 300 mm aus der Bodenmitte und für die Krümmung) jeweils berechnet werden. Das geschieht durch die Zusammenstellungen 5, 6, 7, 8, 9, 10, S. 15 und 16, und zwar für die Flüssigkeitspressungen bis 25 Atm., bis zu welcher die sämtlichen Beobachtungen fortgesetzt worden sind. Dass die Zusammenstellungen 1 bis 4 nur bis 4 Atm. Flüssigkeitspressung geführt worden sind, hat darin seinen Grund, dass durch die vorliegende Arbeit der verfügbare Raum nicht ungebührlich in Anspruch genommen werden soll. Es erschien diese Beschränkung auch vollständig zulässig, da aus den Zusammenstellungen 5 bis 10 alles für die Beurteilung der Formänderung Erforderliche hervorgeht.

Die graphische Darstellung dieser Ergebnisse in Fig. 6, Taf. XXI, für den Punkt 0 (Bodenmitte) derart, dass zu den Pressungen als wagerechten Abszissen die Durchbiegungen als senkrechte Ordinaten — positive nach oben und negative nach unten — aufgetragen werden, liefert in dem ausgezogenen Linienzuge die Linie der gesamten, in dem gestrichelten Linienzuge die Linie der bleibenden Durchbiegungen für den Punkt 0, d. h. für die Mitte des Bodens. Die Ordinaten betragen das  $\frac{10}{3}$  fache<sup>1)</sup> der wirklichen Durchbiegungen.

In gleicher Weise gilt:

- Fig. 7, Taf. XXI, für die Punktreihe 1, 7, 13, 19, 25, 31, 37 und 43 (im Abstände rd. 75 mm von der Mitte),
- Fig. 8, Taf. XXI, für die Punktreihe 2, 8, 14, 20, 26, 32, 38 und 44 (im Abstände rd. 150 mm von der Mitte),
- Fig. 9, Taf. XXI, für die Punktreihe 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39 und 45 (im Abstände rd. 225 mm von der Mitte),
- Fig. 10, Taf. XXI, für die Punktreihe 4, 10, 16, 22, 28, 34, 40 und 46 (im Abstände rd. 300 mm von der Mitte),
- Fig. 11, Taf. XXI, für die Punktreihe 6, 12, 18, 24, 30, 36, 42 und 48 (in der Krümmung rd. 335 mm von der Mitte).

Diese Durchbiegungen sind negativ, wie bereits oben hervorgehoben, und wurden deshalb nach unten abgetragen.

In Fig. 12 ist der Boden A nach dem Durchmesser 6. 4, 3, 2, 1, 0, 25, 26, 27, 28, 30 (vergl. Fig. 5) im Maßstabe 1:5 dargestellt:

- a) im ursprünglichen Zustande durch die ausgezogenen Linien genau aufgenommen<sup>2)</sup>,
- b) bei der Pressung von 6 Atm. im Innern unter 20 facher Vergrößerung der gesamten Durchbiegungen durch die — — — Linien.

Fassen wir den Boden als Umdrehungskörper und seine Mittelfläche als Umdrehungsfläche auf, deren Meridianlinie im ursprünglichen Zustande sich zusammensetzt: aus einer Geraden senkrecht zur Achse (entsprechend dem ebenen Mittelteil des Bodens) von der Länge  $a-r$ , aus einem Viertelkreis (entsprechend der Krümmung) vom Halbmesser  $r+0,5s$ ,

<sup>1)</sup> Die Abbildungen waren ursprünglich so gezeichnet, dass die Ordinaten in der Veröffentlichung das Fünffache der Durchbiegungen betragen sollten. Um sie auf den beiden Tafeln unterzubringen, musste jedoch eine Verringerung auf 10:3 eintreten. Der gleiche Umstand nötigte bei anderen im Späteren zu besprechenden Darstellungen zur Aufgabe des ursprünglich beabsichtigten Maßstabes 50:1 und zur Wahl von 100:3.

<sup>2)</sup> Da die Böden im ursprünglichen Zustande nicht genau die mathematische Form besitzen, welche sie eigentlich haben sollen, so erfolgte je für zwei senkrecht zu einander stehende Durchmesser die Herstellung von Blechlehren. Hierdurch wurde die ursprüngliche Form eines jeden Bodens ausreichend genau festgelegt. Fig. 12 giebt die Form nach derjenigen Lehre wieder, welche die bezeichnete Achsialebene (6, 0, 30) lieferte.

und aus einer Geraden parallel zur Achse im Abstände  $\alpha + 0,5s$  (entsprechend dem cylindrischen Fortsatz des Bodens), so erkennen wir in bezug auf die elastische Mittelfläche, in welche die soeben gekennzeichnete Mittelfläche unter Einwirkung der Flüssigkeitspressung übergeht, dass die Meridianlinie in der Nähe der Messstellen 3 bzw. 27 einen Wendepunkt besitzt. Mit der Genauigkeit, mit welcher die betreffenden, für gerade stabförmige Körper gültigen Sätze nach hier übertragen werden dürfen, ist hieraus zu schließen, dass in dem Ringquerschnitt, der durch den Abstand des Wendepunktes in der Meridianlinie der elastischen Mittelfläche von der Achse bestimmt erscheint, die Biegungsanstrengung Null ist, und dass, während im mittleren Teile des Bodens bis zu diesem Ringquerschnitt die Biegungsanspruchnahme die inneren Fasern zu gedrückten und die äußeren zu gezogenen macht, in den darüber hinausgelegenen Ringquerschnitten bis in die Krümmung hinein dieses Verhältnis sich umkehrt. Dass außer den Biegungsspannungen auch noch Zugspannungen auftreten, lässt die Formänderung Fig. 12 deutlich erkennen; mit zunehmender Durchbiegung des Bodens wächst die Kraft, mit welcher der mittlere Bodenteil einwärts ziehend auf die Krümmung wirkt.

Eine Durchsicht der Schaulinien, Fig. 6, gültig für die Bodenmitte, lässt Folgendes erkennen:

Die Linie der gesamten Durchbiegungen kehrt bis  $p = 5$  Atm. der Abszissenachse ihre hohle Seite zu; es wachsen somit die Durchbiegungen langsamer als die Flüssigkeitspressungen. Bis dahin sind auch die bleibenden Durchbiegungen sehr gering. Nach Ueberschreitung von  $p = 5$  Atm., sicher bei  $p = 6$  Atm., beginnt sich die Linie der gesamten Durchbiegungen entschieden zu wenden: diese fangen an, rascher zu wachsen als die Flüssigkeitspressungen. Dies währt bis etwa  $p = 9$  Atm. Von da an bis ungefähr  $p = 13$  Atm. zeigt sich die Linie der gesamten Durchbiegungen annähernd als Gerade, entsprechend Proportionalität zwischen Durchbiegungen und Flüssigkeitspressungen. Bei weiterer Steigerung der letzteren, etwa bis 20 Atm., findet sich geringeres Wachstum der Durchbiegung; der Linienzug beginnt, der Abszissenachse wieder eine hohle Seite zuzukehren. Ueber 20 Atm. wendet sich der Linienzug nochmals nach oben.

Die bleibenden Durchbiegungen zeigen nach Ueberschreitung von  $p = 5$  Atm. Wachstum, das rasch immer ausgeprägter wird. Später entspricht der Verlauf des gestrichelten Linienzuges so ziemlich demjenigen der Linie der gesamten Durchbiegungen.

Aus dem Vorstehenden darf geschlossen werden, dass die Elastizitätsgrenze des Materials, d. i. die Spannung, bis zu welcher hin die bleibenden Dehnungen sehr klein, also vernachlässigbar sind<sup>1)</sup>, bei  $p = 5$  Atm. noch nicht, wohl aber bei  $p = 6$  Atm. überschritten war. Damit hängt es denn auch zusammen, dass die gesamten Durchbiegungen bis  $p = 5$  Atm. langsamer wachsen als die Flüssigkeitspressungen: der ursprünglich ebene Boden wölbt sich, er wird dadurch widerstandsfähiger, und zwar umso mehr, je stärker er sich wölbt<sup>2)</sup>, bis zu dem Augenblick hin, in welchem das Material bleibend

<sup>1)</sup> Dass diese Grenzspannung nicht mit der Proportionalitätsgrenze, die für eine große Anzahl von Materialien überhaupt nicht vorhanden, verwechselt werden darf, darüber s. des Verfassers »Elastizität und Festigkeit«, 1889/90 S. 11 und 1894 S. 14.

<sup>2)</sup> In dieser Hinsicht sei auch auf die im J. 1889 durchgeführten »Versuche über die Widerstandsfähigkeit ebener Platten« verwiesen. Wird von den untersuchten Platten die Scheibe  $Z_0$  (Flussstahl) herausgegriffen (S. 74 u. f. der im Verlage von Julius Springer, Berlin, unter dem bezeichneten Titel erschienenen Schrift des Verfassers, oder auch Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure 1890, S. 1110, Versuchsreihe 2, letzte Untersuchung), so findet sich, dass die federnden Durchbiegungen der in der Mitte mit  $P$  belasteten und im Umfange eines Kreises vom Durchmesser 560 mm aufliegenden Scheibe betragen beim Uebergange

von $P = 200 - 42$ kg	zu $P = 795 - 42$ kg	$1,49$ mm
» $P = 795 - 42$ »	» $P = 1415 - 42$ »	$1,50$ »
» $P = 1495 - 42$ »	» $P = 2300 - 42$ »	$1,62$ »
» $P = 2300 - 42$ »	» $P = 3000 - 42$ »	$1,35$ »
» $P = 3000 - 42$ »	» $P = 3730 - 42$ »	$1,15$ »
» $P = 3730 - 42$ »	» $P = 4500 - 42$ »	$1,12$ »
» $P = 4500 - 42$ »	» $P = 5250 - 42$ »	$1,04$ »

Die graphische Darstellung dieser Ergebnisse in nachstehender

nachzugeben anfängt. Dann beginnt der Einfluss der bleibenden Formänderungen das Verhältnis umzukehren. Später, wenn unter Einwirkung der weiter gesteigerten Flüssigkeitspressung die bleibenden Formänderungen so groß geworden sind, dass wir es in Wirklichkeit auch nicht mehr angenähert mit einem ebenen, sondern mit einem stark gewölbten Boden und mit an gewissen Stellen überanstrengtem Material zu thun haben, dann nehmen die Durchbiegungen im Verhältnis zur Flüssigkeitspressung wieder ab (von etwa  $p = 13$  bis 20 Atm.). Wenn gegen Ende (ungefähr von  $p = 20$  Atm. an) die gesamten und noch mehr die bleibenden Durchbiegungen wieder rascher wachsen, so dürfte das vorzugsweise darin seinen Grund haben, dass unter diesen Belastungsverhältnissen die überanstrengten Stellen, die zu Anfang aufsen etwa bei  $xy$  (Fig. 12, Taf. XXI) lagen, immer mehr nach  $c$  hin rücken, und dass mit dem weiteren Einziehen des cylindrischen Fortsatzes, d. h. dem ausgeprägten Lösen des Bodens bei  $c$  von dem Cylinder, gleichzeitig auch eine größere Nachgiebigkeit der Vernietung sich geltend macht.

Die Bestimmung der Krümmungshalbmesser  $R$  für den mittleren Bodenteil ergab unter Zugrundelegung der gesamten Durchbiegungen mit der Genauigkeit, mit welcher diese Ermittlungen durch Aufzeichnung ausgeführt werden können, was durch eine Hilfskraft geschah, bei

$p = 5$	6	7	8	9	11	13	15	17	20	25	Atm.
$R = 4590$	3930	3310	2940	2480	2230	2125	2040	1950	1730	1390	mm.

Die Schaulinien Fig. 7, Taf. XXI, gültig für Punkte im Abstände von rd. 75 mm, zeigen Ähnliches wie diejenigen in Fig. 6, Taf. XXI, ebenso diejenigen der Fig. 8 und 9, Taf. XXI; nur findet sich hier bloß der erste Wendepunkt in der Linie der gesamten Durchbiegungen, die übrigen verschwinden. In den Fig. 10 und 11, Taf. XXI, ist auch der erste Wendepunkt nicht mehr zu erkennen.

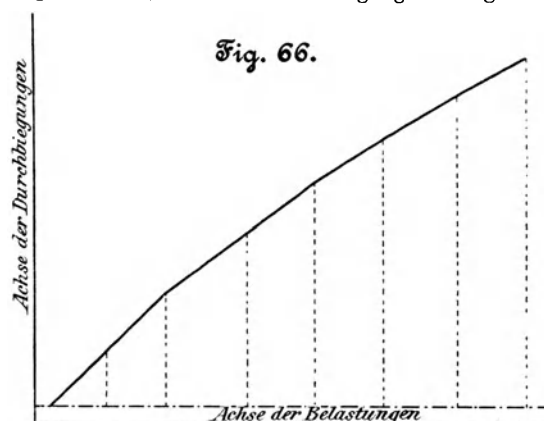
#### Weitere Beobachtungen bei der Untersuchung des Bodens A.

Bei der Entlastung des mit 5 Atm. gepressten Bodens durch Ablassen des Wassers machte sich das Zurückfedern erstmals auch durch das Ohr bemerkbar.

Als die Flüssigkeitspressung zum erstenmale auf 7 Atm. gesteigert wurde, erwiesen sich die Durchbiegungen in erheblichem Maße abhängig von der Zeit; infolgedessen musste mit den endgültigen Messungen jeweils gewartet werden, bis sich ein Einfluss der Zeit nicht mehr bemerklich machte. Die Zeitdauer dieses Wartens betrug bei  $p = 7$  Atm. 25 Min. und bei  $p = 8$  Atm. 50 Min. Im letzteren Falle ergab sich sodann auch die Notwendigkeit, die endgültigen Messungen an dem entlasteten Boden nicht unmittelbar nach der Entlastung vorzunehmen, sondern ebenfalls eine gewisse Zeit verstreichen zu lassen: beim Rückgang von  $p = 8$  Atm. auf  $p = 0$  betrug diese Zeit 15 Min. Bei  $p = 9$  Atm. musste 60 Min. und nach Rückgang auf  $p = 0$  30 Min. gewartet werden usw.

Zum Zwecke der Verfolgung des Einflusses der Zeit auf

Fig. 66 zeigt deutlich, dass die Durchbiegungen im ganzen lang-



samer wachsen als die Belastungen, und dass der Unterschied um so größer wird, je bedeutender die Durchbiegungen sind, d. h. je mehr sich der Boden wölbt.



die Durchbiegung wurden verschiedene Messungen durchgeführt, von denen die folgenden wiedergegeben seien.

Der vorher mit  $p = 13$  Atm. belastet gewesene und hierauf entlastete Boden wurde erstmals der Pressung von 15 Atm. ausgesetzt. Dabei ergab die Messung der GröÙe  $x - a$  (vergl. oben S. 3, 1. Spalte) für die Bodenmitte

unmittelbar nach Herstellung des Druckes . . .	19,690 mm
nach 40 Minuten . . . . .	19,815 »
» 75 » . . . . .	19,910 »
» 100 » . . . . .	19,925 »
» 200 » . . . . .	19,960 »
» 270 » . . . . .	19,965 »
» 390 » . . . . .	19,965 »

entsprechend einer Zunahme der Durchbiegung um

$$19,965 - 19,690 = 0,275 \text{ mm}$$

mit der Zeit (in  $4\frac{1}{2}$  Stunden).

Für den entlasteten Boden fand sich

nach 10 Minuten . . . . .	14,380 mm
» 25 » . . . . .	14,370 »
» 40 » . . . . .	14,365 »
» 55 » . . . . .	14,365 »

Die Aufgabe, diesen Einfluss der Zeit fortgesetzt festzustellen, und die Notwendigkeit, mit der endgültigen Messung jeweils solange zu warten, bis ein solcher Einfluss sich nicht mehr äußert, im Zusammenhang damit, dass an dem Boden *A* allein weit über 3000 Messungen auszuführen waren, machen die Untersuchung derartiger Böden zu einer außerordentlich zeitraubenden<sup>1)</sup> und damit auch kostspieligen Arbeit.

Bei Steigerung der Pressung von 11 auf 13 Atm. begann erstmals der Zunder an der Stelle *xy*, Fig. 12, abzuspringen: ein Beweis dafür, dass hier unter dieser Belastung die Quetschgrenze des Materials überschritten wird, und dass bei *xy*, d. h. in der Krempung, die stärkste Beanspruchung der Außenfläche des Bodens stattfindet. An der Innenfläche des Bodens, ungefähr an der gleichen Stelle, wird schon ziemlich lange vorher die Fließ- oder Streckgrenze überschritten worden sein: einmal, weil es sich um einen auf Biegung beanspruchten gekrümmten Körper handelt, dessen dem Krümmungsmittelpunkt zugekehrte, am stärksten gezogene Fasern die größte Biegebeanspruchung erfahren<sup>2)</sup>, und zweitens, weil die vorhandenen Zugspannungen, mit welchen der mittlere Bodenteil auf die Krempung wirkt, die Biegebeanspruchungen innen vergrößern, diejenigen außerhalb dagegen vermindern. Leider lässt sich der Beginn des Zunderabspringens an der Innenfläche des Bodens nicht beobachten.

Bei Steigerung der Pressung auf 15 Atm. wird die Stelle, an welcher der Zunder außen abspringt, etwas breiter, und zwar gegen den äußeren (geneigten) Stift *b* zu, sodass sie ungefähr in die Mitte zwischen den beiden Stiften *a* und *b* zu liegen kommt. Die weitere Erhöhung des Druckes hat Verbreiterung der Stelle in gleichem Sinne zur Folge; bei  $p = 20$  Atm. reicht sie bis zu dem äußeren Stift *b*. Mit Erhöhung der Pressung auf 25 Atm. erstreckt sich das Zunderabspringen vom Stift *a* bis nahezu an den Cylinderrand *c*; auch öffnet sich die Stemmefuge zwischen Boden und Cylindermantel bei *c*.

Bei höheren Pressungen als 25 Atm. wurden noch folgende Beobachtungen gemacht:

Flüssigkeitspressung	gesamte Durchbiegung
30 Atm.	53,415 mm
35 » »	60,045 »
38,5 » »	63,695 »

Hierbei fand jedoch ein Warten, bis der Boden zur Ruhe gekommen war, nicht mehr statt.

Ueber 38,5 Atm. konnte infolge von Undichtheiten an dem unteren Flanschenring des Versuchscylinders die Pressung nicht gesteigert werden.

<sup>1)</sup> Bei der Durchführung der Untersuchungen der 9 Böden bin ich unterstützt worden durch die Herren Haberer, Gundel, Benz und Haier.

<sup>2)</sup> Näheres hierüber s. des Verfassers »Elastizität und Festigkeit«, fünfter Abschnitt: »Stabförmige Körper mit gekrümmter Mittellinie«.

## Boden B, Fig. 13 und 14, Taf. XXI.

Die Abmessungen dieses Bodens, mit denjenigen des Bodens *A* fast genau übereinstimmend, ergeben sich aus Fig. 13, Taf. XXI, die Abstände der Messpunkte aus Fig. 14, Taf. XXI. Aufgrund der beim Boden *A* gemachten Erfahrungen erschien es ausreichend, die Messstellen auf die Oberflächenpunkte zweier rechtwinklig zu einander stehender Achsialebenen zu beschränken, wie Fig. 14 zeigt.

Ueber die bei den verschiedenen Flüssigkeitspressungen ermittelten Durchbiegungen geben die Zusammenstellungen 11 bis 17, S. 16 und 17, Auskunft, und zwar Zusammenstellung

11 für die Bodenmitte,
12 » » Punkte im Abstände von rd. 75 mm aus der Mitte,
13 » » » » » » » » 150 » » » » ,
14 » » » » » » » » 225 » » » » ,
15 » » » » » » » » 300 » » » » ,
16 » » » ungefähr in der Mitte der Krempung,
17 » » » 4 mm über dem Austritt des Bodens aus dem Versuchscylinder (vergl. Fig. 13 und Fig. 22, Taf. XXI).

In den Fig. 15 bis 21, Taf. XXI, sind diese Ergebnisse nach Maßgabe des unter »Boden *A*« Bemerkten graphisch dargestellt, und zwar betragen in den Fig. 15 bis 18 die Ordinaten das  $\frac{10}{3}$ -fache der wirklichen Durchbiegungen. Derselbe Maßstab gilt auch für die Fig. 19 bis 21 je für die beiden der Abszissenachse am nächsten gelegenen Linienzüge. Um die Veränderlichkeit schärfer hervortreten zu lassen, sind in diesen Figuren sodann noch die Durchbiegungen in zehnfach größerem Maßstabe aufgetragen, wodurch das zweite, von der Abszissenachse weiter abgelegene Linienpaar entsteht.

In Fig. 22, Taf. XXI, ist der Boden *B* im Maßstabe 1:5 dargestellt

a) im ursprünglichen Zustande, derart ermittelt, dass für zwei senkrecht zu einander stehende Achsialebenen durch Herstellung zweier Blechlehren die Form der Oberfläche des Bodens genau bestimmt und sodann durch Nehmen des arithmetischen Mittels aus den so erhaltenen Ordinaten die mittlere Gestaltung gewonnen wurde,

b) bei einer Pressung von 6 Atm. im Innern unter 20-facher Vergrößerung der gesamten Durchbiegungen durch die — — — Linie.

Eine Durchsicht der Abbildungen Fig. 15 bis 22 giebt zu entsprechenden Bemerkungen Anlass, wie sie oben bei Betrachtung der Fig. 6 bis 12 für den Boden *A* gemacht worden sind.

Die Bestimmung der Krümmungshalbmesser *R* für den mittleren Bodenteil (vergl. das hierüber auf S. 4 Gesagte) ergab bei

$p = 5$	6	7	8	9	11	13	15	20 Atm.
$R = 4570$	4100	3320	3100	2740	2400	2100	2000	1750 mm.

Weitere Beobachtungen bei der Untersuchung des Bodens *B*.

Bei der Entlastung des mit 6 Atm. gepressten Bodens durch Ablassen des Wassers macht sich das Zurückfedern erstmals durch das Ohr hörbar (Ruck), und zwar in der Höhe der Manometerangabe  $p = 2$  Atm. Bei Entlastung von  $p = 7$  Atm. auf 0 tritt dieser Ruck schwächer auf, und zwar bei  $p$  etwa  $= 1,5$  Atm.; noch schwächer und nahezu bei  $p = 0$  liegend zeigt er sich im Falle der Entlastung von  $p = 8$  Atm. auf  $p = 0$ .

Ein Einfluss der Zeitdauer der Belastung auf die GröÙe der Durchbiegung, wie bei Boden *A* (vergl. S. 4 und 5) ausführlich geschildert, macht sich hier erstmals geltend bei  $p = 6$  Atm., allerdings nur sehr schwach; bei  $p = 7$  Atm. ist er schon erheblicher usw.

Nachdem die Pressung von 11 Atm. einige Zeit den Boden belastet hat, beginnt an der Außenfläche der Krempung, etwa bei *xy*, Fig. 22, der Zunder abzuspringen. Dabei bildet

sich allmählich ein Streifen von ungefähr 5 mm Breite, dessen Mittellinie in Fig. 14 gestrichelt eingetragen ist und der sich auf ein reichliches Drittel des Umfanges erstreckt. Unter der Belastung von  $p = 12$  Atm. fängt dieser Streifen an, sich auszudehnen und weit deutlicher hervorzutreten. Bei  $p = 13$  Atm. erstreckt sich seine Breite bis etwa 15 mm über die Messstelle  $b$  hinaus nach  $c$  hin. Gleichzeitig löst sich bei  $c$  der Boden entschieden vom Cylindermantel, sodass starke Undichtheit eintritt, namentlich in der Nähe der Messstelle 51 (vergl. Fig. 14).

Infolge der bedeutenden Undichtheiten, die sich an der Verbindungsstelle des Bodens mit dem Cylindermantel zeigten, konnte die Pressung von 20 Atm. nicht überschritten werden.

### Boden C, Fig. 23 und 24, Taf. XXII.

Die Abmessungen des Bodens, welcher sich von den Böden  $A$  und  $B$  durch den größeren Wölbungshalbmesser der Krümmung ( $r = 65$  mm gegen  $r = 40$  mm) und durch etwas größere Wandstärke ( $s = 10,4$  mm gegen  $s = 9,7$  mm) unterscheidet, sind in Fig. 23 eingetragen. Ueber die Abstände der Messstellen giebt Fig. 24 Auskunft.

Die Durchbiegungen, hier bis 40 Atm. ermittelt, finden sich S. 17 und 18 aufgezeichnet in Zusammenstellung

18	für die Bodenmitte,
19	» » Punkte im Abstände von rd. 75 mm aus der Mitte,
20	» » » » » » » » 150 » » » » ,
21	» » » » » » » » 225 » » » » ,
22	» » » » » » » » 300 » » » » ,
23	» » » ungefähr in der Mitte der Krümmung,
24	» » » 4 mm über dem Austritt des Bodens aus dem Versuchscylinder (vergl. Fig. 23, Taf. XXII, und Fig. 32, Taf. XXI).

Die Messstellen im Abstände von rd. 300 mm aus der Mitte, nämlich in den Punkten 4, 16, 28 und 40, liegen hier schon um eine erhebliche Strecke innerhalb der Krümmung, wie Fig. 23, Taf. XXII, und Fig. 32, Taf. XXI, deutlich erkennen lassen, während sie sich bei den Böden  $A$  und  $B$  nahe der Grenze befinden, wo der mittlere Teil des Bodens in die Krümmung übergeht (vergl. Textfig. 1 und Fig. 13, Taf. XXI).

In den Fig. 25 bis 31, Taf. XXII, sind die Ergebnisse in der gleichen Weise, wie bei den Böden  $A$  und  $B$  bemerkt worden ist, graphisch dargestellt, und zwar betragen bei den Schaulinien Fig. 25 bis 28 die Ordinaten das  $10/3$ -fache der wirklichen Durchbiegungen, bei den Schaulinien Fig. 29 bis 31 dagegen das  $100/3$ -fache, um die Veränderlichkeit stark hervortreten zu lassen.

In Fig. 32, Taf. XXI, ist der Boden  $C$  im Maßstabe 1 : 5 dargestellt:

- im ursprünglichen Zustand, ermittelt wie beim Boden  $B$  oben unter a) angegeben,
- bei der Pressung von 9 Atm. im Innern unter 20-facher Vergrößerung der gesamten Durchbiegungen durch die — — — Linien.

Eine Durchsicht der Fig. 25 bis 32 giebt zu Bemerkungen Anlass, wie sie oben S. 4 für den Boden  $A$  bei Betrachtung der Abbildungen Fig. 6 bis 12 gemacht worden sind und in bezug auf welche deshalb auf die bezeichnete Stelle verwiesen werden darf. Besondere Hervorhebung verdient hier jedoch der Verlauf der Schaulinien in Fig. 29, welche für die Messstellen 4, 16, 28 und 40 gelten, die beim Boden  $C$  — wie oben bemerkt — bereits um eine erhebliche Strecke innerhalb der Krümmung liegen. Für diese rd. 300 mm aus der Mitte gelegenen Punkte sind die Durchbiegungen zunächst positiv, entsprechend einer Auswärtsschiebung des Messstiftes; bei Ueberschreitung von  $p = 15$  Atm. werden sie negativ, wie dies bei den Durchbiegungen in den Punkten 6, 18, 30 und 42 von Anfang an der Fall ist. Die Unregelmäßigkeiten im Verlauf der Schaulinien Fig. 29 rühren davon her, dass die Messstifte die Oberflächenelemente des Bodens nicht

senkrecht, sondern geneigt treffen (die Folge der Verwendung des gleichen Messtisches bei größerem Krümmungshalbmesser), weshalb ein Bestreben vorhanden ist, den Messstift seitlich zu drängen. Dadurch können um so erheblichere Abweichungen entstehen, je rauher der Boden ist. Einem gleichen, die Genauigkeit der einzelnen Messungen beeinträchtigenden Einfluss sind die Messstifte in den Punkten 49, 50, 51 und 52 (s. auch Fig. 32) ausgesetzt, worauf die Unregelmäßigkeiten in den Schaulinien Fig. 31 hindeuten.

Auch auf die Punkte 6, 18, 30 und 42 (Fig. 24 und 32) macht sich ein solcher Einfluss noch geltend, allerdings weit weniger, wie Fig. 30 erkennen lässt. Es ist übrigens zu berücksichtigen, dass die Durchbiegungen in den Figuren 29 bis 31  $100/3$ -fach vergrößert wiedergegeben sind, also auch die Unregelmäßigkeiten eine dementsprechende Vergrößerung zeigen.

Die Bestimmung der Krümmungshalbmesser  $R$  für den mittleren Bodenteil (vergl. das hierüber auf S. 4 Gesagte) ergab bei:

$p =$	8	9	10	11	12	13	15	17	20	25	30	40	Atm.
$R =$	4890	4405	4160	3870	3530	3190	2665	2140	1810	1505	1320	1190	mm.

### Weitere Beobachtungen bei der Untersuchung des Bodens C.

Ein Einfluss der Zeitdauer der Belastung auf die Größe der Durchbiegung, wie beim Boden  $A$  (vergl. S. 4 und 5) ausführlich besprochen, macht sich hier ausgeprägt geltend erstmals bei der Belastung von  $p = 9$  Atm.

Das Abspringen des Zunders an der Außenfläche des Bodens beginnt beim Steigern des Druckes von 11 auf 12 Atm., und zwar nahe 12 Atm. Es stellt sich zunächst ein auf eine Streifenbreite  $x y$ , Fig. 32, und hat statt zwischen den Messstellen 51 und 52 (Fig. 24), also innerhalb eines Bodenviertels. Mit Erhöhung der Pressung auf 13 Atm. erstreckt sich der Streifen des Zunderabspringens nahezu auf den ganzen Umfang und verbreitert sich nach der Messstelle  $a$  hin (Fig. 32); bei 15 Atm. ist das Zunderabspringen auf dem ganzen Umfange zu beobachten, an einzelnen Stellen erstreckt es sich noch um 6 bis 8 mm über die Stiftstelle  $a$  (Fig. 32) hinaus nach der Bodenmitte zu. Mit Steigerung des Druckes auf 17 Atm. verbreitert sich die Ringfläche, auf welcher der Zunder abspringt, nicht mehr nach  $a$ , sondern nach  $b$  hin, zumteil diese Stelle überschreitend. Dieser Beobachtung steht in Fig. 29 die Aenderung des Vorzeichens der Durchbiegungen bei Ueberschreiten des Druckes von 15 Atm. zur Seite. Bei weiterer Steigerung der Pressung verbreitert sich die Ringfläche nach  $c$  hin; von  $p = 25$  Atm. an zeigen sich infolge des Loslösens des Bodens vom Cylindermantel da, wo er aus diesem austritt, kleine Undichtheiten, die sich bei  $p = 40$  Atm. so stark äußern, dass Verstemmen nötig wird. Bei diesem Druck tritt übrigens eine Verbreiterung der Zone des Zunderabspringens um 40 bis 50 mm über die Stelle  $a$  hinaus ein.

Nach der Verstemmung liefs sich die Pressung bis 47 Atm. steigern, wobei eine Durchbiegung der Bodenmitte von 42,430 mm ermittelt wurde. Ein Warten, bis der Boden zur Ruhe gekommen war, fand jedoch hierbei nicht mehr statt. Das bedeutende Lecken machte es unmöglich, die Pressung weiter zu erhöhen und diejenige von 47 Atm. auf längere Zeit zu erhalten.

### Boden D, Fig. 33 und 34, Taf. XXI.

Dieser Boden unterscheidet sich von den bisher untersuchten vorzugsweise durch seine größere Wandstärke: 20 mm gegen 9,7 bzw. 10,4 mm, sowie dadurch, dass der mittlere Teil bereits im ursprünglichen Zustande eine nicht unbedeutliche Wölbung besaß. Die Abmessungen ergeben sich aus Fig. 33, die Abstände der Messstellen aus Fig. 34.

Die Durchbiegungen, hier bis 50 Atm. ermittelt, sind S. 19 enthalten in Zusammenstellung

25 für die Bodenmitte,  
 26 » » Punkte im Abstände von rd. 75 mm aus der Mitte,  
 27 » » » » » » » » 150 » » » » ,  
 28 » » » » » » » » 225 » » » » ,  
 29 » » » » » » » » 300 » » » » ,  
 30 » » » ungefähr in der Mitte der Krümpung,  
 31 » » » 2 mm über dem Austritt des Bodens aus dem Versuchscylinder (vergl. Fig. 33 und Fig. 42, Taf. XXI).

In den Fig. 35 bis 41, Taf. XXI, sind diese Ergebnisse in der gleichen Weise wie beim Boden *C* graphisch dargestellt.

In Fig. 42, Taf. XXI, ist der Boden *D* im Maßstabe 1:5 gezeichnet:

a) im ursprünglichen Zustand, ermittelt wie beim Boden *B* unter *a*), S. 5, angegeben,  
 b) bei der Pressung von 25 Atm. im Innern unter 20-facher Vergrößerung der gesamten Durchbiegungen durch die — · — · — Linien.

Die Betrachtung der Schaulinie, Fig. 35, für die gesamten Durchbiegungen zeigt — abweichend von dem Verlaufe der entsprechenden Linie für die Böden *A*, *B* und *C* — zunächst geraden Verlauf, bis  $p = 15$  Atm., entsprechend Proportionalität zwischen Pressungen und Durchbiegungen, hierauf rascheres Wachsen der letzteren, das namentlich nach Ueberschreitung von  $p = 20$  Atm. ausgeprägt hervortreten beginnt. Von  $p = 35$  Atm. an kann die Linie mit Annäherung als Gerade angesehen werden. Ähnlich verläuft der Linienzug der bleibenden Durchbiegungen.

In Fig. 40 wurde unterlassen, die bleibenden Durchbiegungen bis  $p = 25$  Atm. einzutragen, da die Werte sehr klein sind, infolgedessen dann die Abweichungen, welche sich aus Anlass der geneigten Lage des Messstiftes einstellten, (vergl. das hierüber auf S. 6 Gesagte) einen das wirkliche Bild stark beeinträchtigenden Einfluss ausüben würden.

Die Bestimmung der Krümmungshalbmesser *R* für den mittleren Bodenteil (vergl. das auf S. 4 hierüber Gesagte) ergab:

bei  $p = 20 \quad 25 \quad 30 \quad 35 \quad 40 \quad 45 \quad 50$  Atm.  
 »  $R = 4560 \quad 4275 \quad 3835 \quad 2615 \quad 2010 \quad 1640 \quad 1325$  mm.

Weitere Beobachtungen bei der Untersuchung des Bodens *D*.

Der Einfluss der Zeitdauer der Belastung auf die Größe der Durchbiegung, wie beim Boden *A* (vergl. S. 4 und 5) ausführlich erörtert, macht sich hier erstmals geltend bei Steigerung der Belastung auf 20 Atm.

Vom Abspringen des Zunders an der Außenfläche des Bodens zeigen sich die ersten Spuren unter der Belastung  $p = 30$  Atm. auf der Zone *xy*, Fig. 42, und zwar über den ganzen Umfang sich erstreckend. Bei Steigerung auf  $p = 35$  Atm. tritt das Abspringen auf die Breite *xy* ausgeprägter auf. Unter dem Druck von  $p = 40$  Atm. nimmt diese zu, einerseits bis auf 15 mm an die Messstelle *a* (Fig. 42) heranreichend und andererseits bis an die Messstelle *b* gehend. Die Steigerung des Druckes auf 50 Atm. hat zur Folge, dass sich die Zone des Zunderabspringens bis nach *c* hinunter verbreitert.

Infolge der starken Einziehung des zylindrischen Fortsatzes des Bodens entsteht schon bei  $p = 45$  Atm. eine ziemlich weite Fuge bei *c* (Fig. 42), die zu großen Undichtheiten führt, infolgedessen verstemmt werden muss. Derselbe Vorgang wiederholt sich bei Steigerung des Druckes auf  $p = 50$  Atm.

Die Rückwirkung des 20 mm starken Cylindermantels auf den 20 mm dicken Boden *D* ist naturgemäß geringer als bei den 9,7 bzw. 10,4 mm starken Böden *A* und *B* bzw. *C*.

## Boden E, Fig. 43 und 44, Taf. XXII.

Der Boden *E* unterscheidet sich von den Böden *A* und *B* durch einen weit größeren Krümmungshalbmesser der Krümpung ( $r = 119$  mm gegen  $r = 40$  mm) und eine etwas größere Wandstärke ( $s = 10,7$  mm gegen  $s = 9,7$  mm). Ferner besitzt der Boden *E* Unregelmäßigkeiten in der Form infolge seiner Herstellung von Hand, so z. B. zeigt der mittlere Teil geringe Wölbung nach innen, wie Fig. 52, Taf. XXII, erkennen lässt. Fig. 43 giebt über die Abmessungen und Fig. 44 über die Messstellen Auskunft.

Die bis  $p = 50$  Atm. bestimmten Durchbiegungen sind S. 19 und 20 zusammengestellt, und zwar in Zusammenstellung

32 für die Bodenmitte  
 33 » » Punkte im Abstände von rd. 75 mm aus der Mitte  
 34 » » » » » » » » 150 » » » »  
 35 » » » » » » » » 225 » » » »  
 36 » » » » » » » » 300 » » » »  
 37 » » » » » » » » 333 » » » »  
 38 » » » 35 mm über dem Austritt des Bodens aus dem Versuchscylinder (vergl. Fig. 43 und Fig. 52).

Hier liegen die Messstellen der 3 letzten Zusammenstellungen in der Krümpung.

In den Fig. 45 bis 51, Taf. XXII, sind diese Ergebnisse in gleicher Weise wie bei dem Boden *C* zur Aufzeichnung von Schaulinien für die gesamten und für die bleibenden Durchbiegungen verwendet.

In Fig. 52 ist der Boden *E* im Maßstabe 1:5 dargestellt:

a) im ursprünglichen Zustande, bestimmt wie beim Boden *B* unter a) S. 5 angegeben (abweichend von den bisher untersuchten Böden zeigt Boden *E* in der Mitte eine kleine Wölbung mit etwa 2 mm Pfeilhöhe nach innen, wie bereits oben bemerkt),

b) bei der Pressung von 9 Atm. im Innern unter 20-facher Vergrößerung der gesamten Durchbiegungen durch die — · — · — Linien.

Die Betrachtung der Fig. 45 bis 52 giebt zu ähnlichen Bemerkungen Veranlassung, wie sie oben für den Boden *A* bei Durchsicht der Fig. 6 bis 12 gemacht worden sind. Die kleinen Unregelmäßigkeiten im Verlaufe der Schaulinien Fig. 49, 50 und 51 rühren zum großen Teil davon her, dass die Messstifte die Oberfläche nicht senkrecht, sondern geneigt treffen, wodurch das Bestreben entsteht, den Messstift seitlich zu drängen, wie ein Bick auf Fig. 52 (Stift 4, 6 und 49) erkennen lässt. Es ist dies die Folge davon, dass der gleiche Messtisch benutzt werden musste. Durch dieses seitliche Abdrängen wird der Stift gehindert, immer den gleichen Oberflächenpunkt zu berühren. Bei der Oberflächenbeschaffenheit des nicht bearbeiteten Bodens sind dann Unregelmäßigkeiten, die bei dem gewählten Maßstab  $100/3$ -fach vergrößert bedeutend erscheinen, nicht zu vermeiden. Solche können sich bei der natürlichen Rauigkeit des Bodens und mit Rücksicht darauf, dass dieser mit Zunder bedeckt ist, der später zu einem Teile abspringt, unter Umständen auch an Messstellen geltend machen, deren Oberfläche — der Zeichnung nach zu urteilen — vom Stift senkrecht getroffen wird.

Unregelmäßigkeiten, welche sich bei Messung der Durchbiegungen des Bodens *E* ergaben, können zu einem Teile auch noch davon herrühren, dass der Boden von Hand und nicht durch Pressen hergestellt worden war, infolgedessen er Unregelmäßigkeiten in der Form aufwies, wie oben bereits angeführt worden ist. So kann beispielsweise die Unregelmäßigkeit bei  $p = 8$  Atm. in Fig. 45 damit in Zusammenhang gebracht werden, dass der mittlere Bodenteil im ursprünglichen Zustande etwas nach innen gewölbt war.

Die Bestimmung der Krümmungshalbmesser *R* für den mittleren Bodenteil (vergl. das auf S. 4 hierüber Gesagte) ergab bei

$p = 10 \ 11 \ 12 \ 13 \ 15 \ 17 \ 20 \ 25 \ 30 \text{ Atm.}$   
 $R = 4565 \ 4265 \ 4040 \ 3815 \ 3400 \ 3020 \ 2440 \ 1570 \ 1260 \text{ mm}$

$p = 35 \ 40 \ 45 \ 50 \text{ Atm.}$   
 $R = 1135 \ 1040 \ 980 \ 945 \text{ mm.}$

#### Weitere Beobachtungen bei der Untersuchung des Bodens E.

Bei der Entlastung des mit 5 Atm. gepressten Bodens durch Ablassen des Wassers macht sich das Zurückfedern erstmals dem Ohr bemerkbar, und zwar bei der Manometerangabe von 2,8 Atm. Beim Zurückgehen von  $p = 6 \text{ Atm.}$  tritt dieser dumpfe Ton bei etwa 1 Atm. auf, während des Entlastens von  $p = 7 \text{ Atm.}$  bei ungefähr 0,5 Atm. Während der Entlastung von  $p = 8 \text{ Atm.}$  wurde ein Ton nicht bemerkt, dagegen wieder bei Entlastung von  $p = 9 \text{ Atm.}$ , ebenso während der Entlastung von  $p = 10 \text{ Atm.}$ , und zwar in letzterem Falle nahe bei  $p = 0,1 \text{ Atm.}$

Der Einfluss der Zeitdauer auf die gesamten Durchbiegungen beginnt sich bei  $p = 9 \text{ Atm.}$  geltend zu machen.

Spuren des Abspringens von Zunder an der Außenfläche des Bodens wurden bei  $p = 18 \text{ Atm.}$  beobachtet, und zwar an einzelnen Stellen der Zone  $xy$  der Krümmung, Fig. 52. Hieran ändert sich nichts, bis bei  $p = 30 \text{ Atm.}$  die Zone sich etwas nach unten, d. h. nach der Messstelle des Stiftes 4 hin verbreitert, ohne dass sie sich jedoch über den ganzen Umfang erstreckt; erst bei  $p = 40 \text{ Atm.}$  ist Abblättern des Zunders am ganzen Umfang zu bemerken. Dies dürfte im Zusammenhange damit stehen, dass der Boden von Hand hergestellt war und deshalb Unregelmäßigkeiten in der Form besaß. Bei  $p = 50 \text{ Atm.}$  reicht die Zone des Zunderabblätterns bis etwa 15 mm über die Messstelle des Stiftes 6 hinaus.

Eine weitere Steigerung des Druckes war nur bis 53 Atm. möglich; die Undichtheiten an der Fuge bei  $c$ , Fig. 52, wurden dann zu bedeutend, um mit der Handpumpe eine fernere Pressungserhöhung erreichen zu können.

#### Zweiter Teil.

### Versuche mit gusseisernen Böden, welche mit den Hohlzylindern, die sie abschließen, aus einem Stück bestehen.

Die Versuchseinrichtung sowie die 4 Böden: I, II, III und IV, auf die sich die Versuche erstrecken, sind in den Textfig. 53 bis 56 dargestellt. Der Untersatz ist der gleiche wie bei den im ersten Teil besprochenen Untersuchungen. Die Versuche mit gusseisernen Böden bezwecken vorzugsweise die Bestimmung der Pressung, welche den Bruch herbeiführt.

Die Böden wurden aus grauem Gusseisen, wie es zu zähem Maschinenguss Verwendung findet, bei demselben Guss hergestellt.

#### Boden I, Fig. 53.

Der Bruch erfolgt bei 13 Atm. Pressung derart, dass der Boden an der Innenfläche da, wo er sich an den Cylinder anschließt, wie in Fig. 53 bei  $a$  und  $b$  angedeutet ist, ein-

reißt. Die genau aufgenommene, nur an der Innenfläche sichtbare Risslinie ist in Fig. 57 eingetragen; die mittlere Wandstärke, die durch Anbohren an verschiedenen Stellen bestimmt wurde, ergab sich zu 20,2 mm.

Fig. 53.

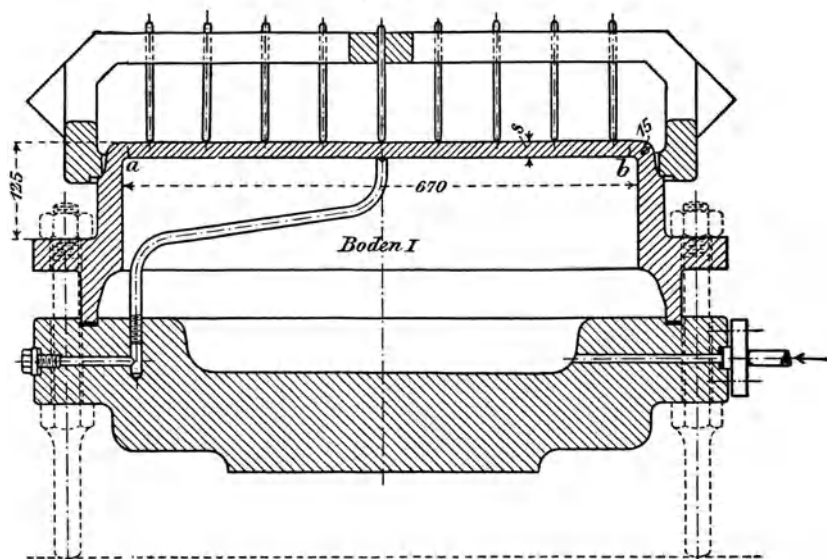


Fig. 54.

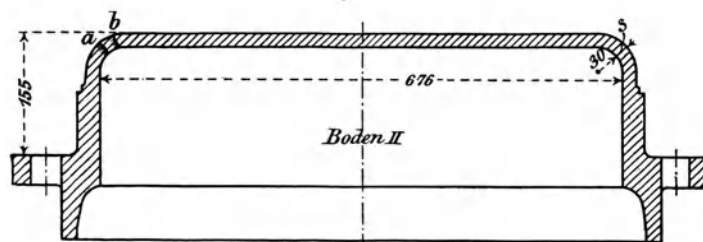


Fig. 55.

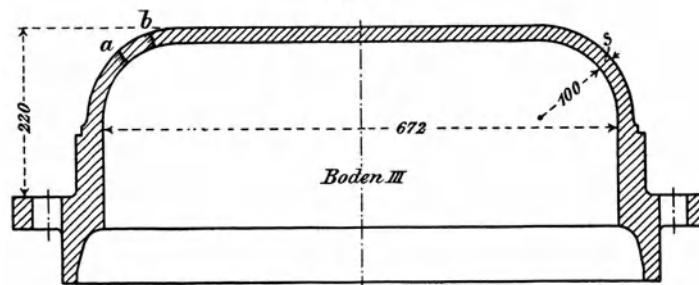


Fig. 56.

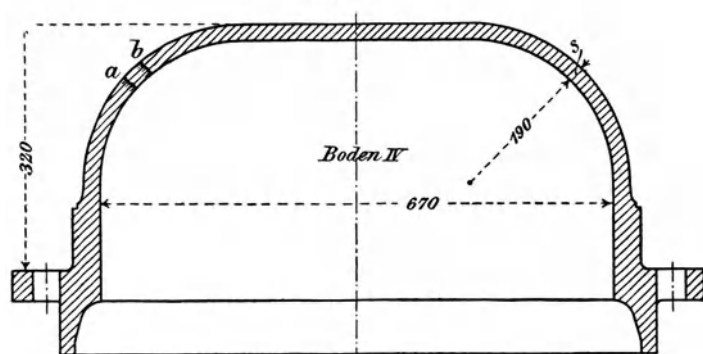


Fig. 57.

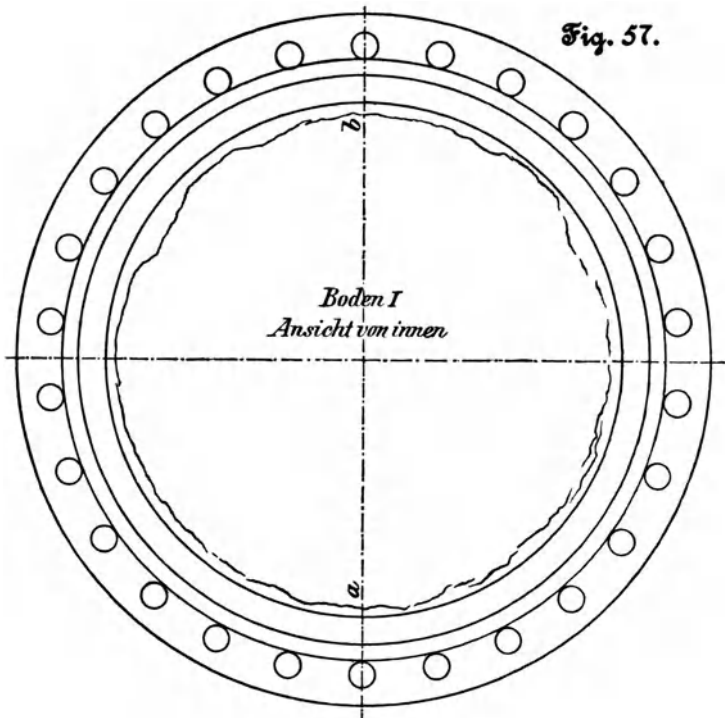


Fig. 58.

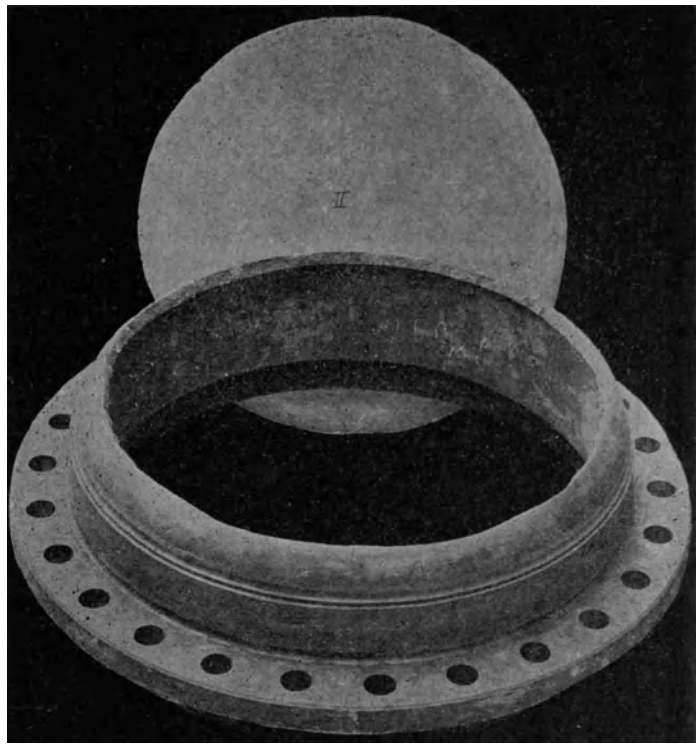


Fig. 60.

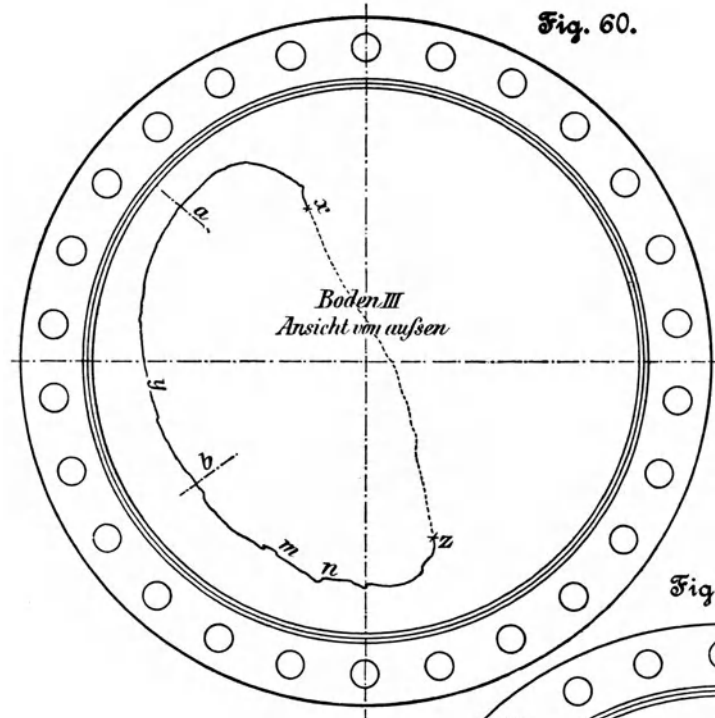


Fig. 59.

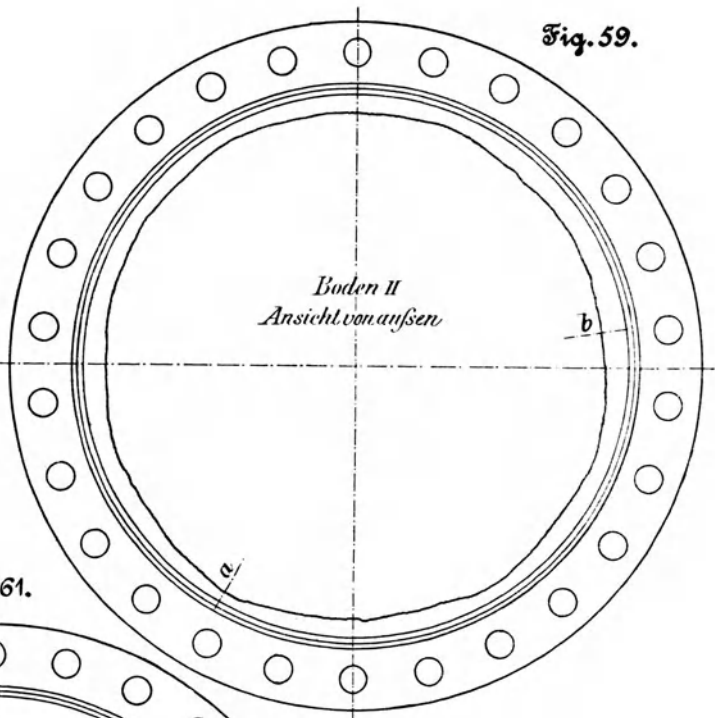
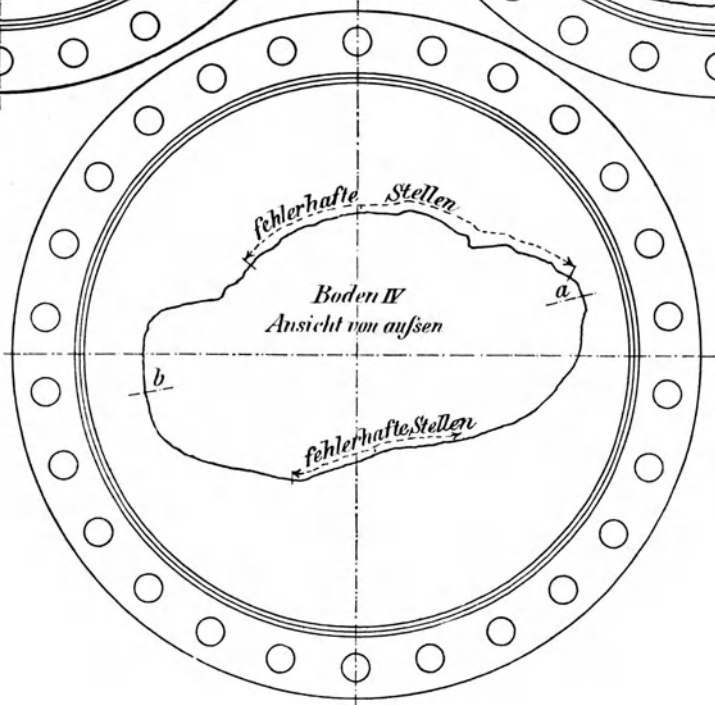


Fig. 61.



### Boden II, Fig. 54.

Der Bruch erfolgt bei 9,25 Atm. in der Krempung über den ganzen Umfang derart, dass der Boden herausgeschleudert wird. Die Bruchfläche verläuft dabei zwischen den in Fig. 54 mit  $a$  und  $b$  bezeichneten Querschnitten nach Maßgabe der Bruchlinie in Fig. 59 (Ansicht von aufsen).

Das photographische Bild Fig. 58 zeigt die Bruchfläche sowie das herausgesprungene Bodenmittelstück und giebt in anschaulicher Weise Auskunft darüber, dass der am stärksten beanspruchte Ringquerschnitt in der Krempung liegt. Die mittlere Wandstärke betrug im Bruchquerschnitt 17,2 mm.

Aus dem herausgesprungenen Mittelstück wurden 3 Flachstäbe von rd. 60 mm Breite und 20 mm Stärke herausgearbeitet und hierauf bei 500 mm Auflagerentfernung der Biegeprobe unterworfen. Die Stäbe besaßen an den breiten Seitenflächen die Gusshaut. Es ergab sich:

für den Stab 1): 60,3 mm breit und 20,1 mm hoch, Bruchlast 860 kg, somit Biegezugfestigkeit, in der üblichen Weise berechnet,

$$= \frac{860 \cdot 50}{4 \cdot \frac{1}{6} \cdot 6,03 \cdot 2,01^2} = 2647 \text{ kg/qcm};$$

für den Stab 2): 60,1 mm breit und 19,3 mm hoch, Bruchlast 780 kg, somit Biegezugfestigkeit

$$= \frac{780 \cdot 50}{4 \cdot \frac{1}{6} \cdot 6,01 \cdot 1,93^2} = 2613 \text{ kg/qcm};$$

für den Stab 3): 60,7 mm breit und 19,5 mm hoch, Bruchlast 800 kg, somit Biegezugfestigkeit

$$= \frac{800 \cdot 50}{4 \cdot \frac{1}{6} \cdot 6,07 \cdot 1,95^2} = 2600 \text{ kg/qcm}.$$

Hiernach beträgt die Biegezugfestigkeit des betreffenden Gusseisens in der Stärke von rd. 20 mm mit Gusshaut

$$\frac{2647 + 2613 + 2600}{3} = 2620 \text{ kg/qcm}.$$

### Boden III, Fig. 55.

Der Bruch erfolgt bei 20,5 Atm. innerhalb der Krempungsquerschnitte  $a$  und  $b$ , Fig. 55, nach der in Fig. 60 ausgezogenen Linie  $xyz$ . In der Strecke  $xz$  bleibt der Zusammenhang mit dem Boden bestehen; von  $m$  bis  $n$  zeigt der Guss kleine Hohlräume. Zum Zwecke der Bestimmung der Wandstärke im Bruchquerschnitt wird das gebrochene Bodenstück  $xyz$  mit der Winde herausgedrückt, wobei die Bruchlinie, wie punktiert angegeben ist, verläuft. Die mittlere Wandstärke auf die Erstreckung  $xyz$  schwankt zwischen 19,5 und 22,0 mm; im Mittel beträgt sie 20,6 mm.

### Boden IV, Fig. 56.

Der Bruch erfolgt bei 41,5 Atm. nach der in Fig. 61 eingezeichneten Linie. Der Bruchquerschnitt zeigt, wie ebenfalls eingetragen, auf größere Erstreckungen fehlerhafte Stellen. Der durch die Bruchlinien abgegrenzte Teil wurde herausgeschleudert. Dass die Bruchlinie weniger in der Krempung geblieben ist, liegt an dem Vorhandensein der ausgedehnten schlechten Stellen im mittleren Bodenteil.

Die Wandstärke schwankt zwischen 21,4 mm und 23,2 mm; ihr Mittel beträgt in der Krempung 22,5 mm.

### Dritter Teil.

## Zusammenfassung der Versuchsergebnisse und Folgerungen aus denselben.

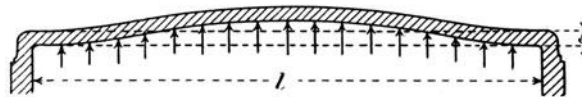
#### 1) Ort der stärksten Beanspruchung.

Die größte Beanspruchung findet statt an der Innenfläche der Krempung, und zwar in ringförmigen Querschnitten, welche bei den eingieteteten Böden aus Flusseisen:  $A$  (Fig. 12, Taf. XXI),  $B$  (Fig. 22, Taf. XXI),  $C$  (Fig. 32, Taf. XXI),  $D$  (Fig. 42, Taf. XXI) und  $E$  (Fig. 52, Taf. XXII), zwischen den Messstellen  $a$  und  $b$  liegen, bei den gusseisernen Böden: II (Textfig. 54 und 59), III (Textfig. 55) und IV (Textfig. 56), zwischen den daselbst links eingetragenen Bruchlinien  $a$  und  $b$  schwanken, also durch einen Halbmesser  $x$  (Abstand von der Cylinderachse) bestimmt sind, für den gilt:  $a > x > a - r$ . Bei dem gusseisernen Boden I (Textfig. 53) ohne Krempung mit der nur innerlich sich zeigenden Bruchlinie — bei  $a$  und  $b$  in Textfig. 53 sowie aus Textfig. 57 ersichtlich — tritt die größte Inanspruchnahme da auf, wo der Boden an den Cylinder anschließt.

Dieses Ergebnis entspricht durchaus dem, was die Ueberlegung erwarten lässt, wie im Nachstehenden kurz ausgeführt sei.

Schneiden wir, einem Durchmesser folgend, aus dem flachen Boden, etwa zunächst aus dem in Textfig. 53 dargestellten, einen Streifen von der Breite 1 heraus und denken wir uns ihn durch eine gleichförmig verteilte Kraft  $p$  auf die Längeneinheit von unten nach oben belastet, wie in Fig. 62 darge-

Fig. 62.



stellt, so verhält sich dieser Streifen ähnlich wie ein gleichmäßig belasteter Stab, der an den Enden eingespannt ist: die größte, von der Biegung herrührende Anstrengung tritt auf in dem Einspannungsquerschnitt auf derjenigen Seite, welche belastet ist, also auf der inneren Seite; sie entspricht dem biegenden Moment  $\frac{p l^2}{12}$  und liefert somit nach den Sätzen der Biegelehre unter Voraussetzung, dass Proportionalität zwischen Spannungen und Dehnungen besteht, die größte Biegezugspannung  $\sigma_b$  aus

$$\frac{p l^2}{12} = \sigma_b \frac{1}{6} s^2$$

zu

$$\sigma_b = \frac{1}{2} p \left( \frac{l}{s} \right)^2 \dots \dots \dots (1).$$

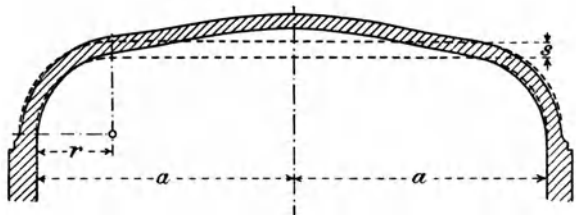
In der Mitte des Streifens besitzt das Moment entgegengesetzten Sinn und die Größe  $\frac{p l^2}{24}$ ; somit findet hier die größte Biegezuganstrengung aufsen statt und beträgt nur die Hälfte der durch Gl. 1 festgesetzten Spannung. Zwischen der Mitte des Streifens und den beiden Enden geht das biegende Moment durch Null hindurch, entsprechend einem Wendepunkt in der elastischen Linie. Dieser Wendepunkt steht bei vollkommener Einspannung um  $0,2113 l$  von dem Einspannungsquerschnitt ab.

Handelt es sich um einen Boden mit Krempung, so wird bei dem hier herausgeschnittenen Streifen infolge der Formänderung, welche die anschließenden gewölbten Enden erfahren,

<sup>1)</sup> Vergl. z. B. des Verfassers »Elastizität und Festigkeit« § 18 Ziff. 3.

vergl. Fig. 63, der am stärksten beanspruchte Querschnitt in

Fig. 63.

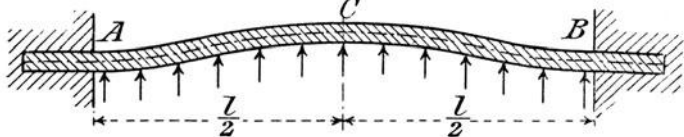


die Krümmung hineinrücken müssen; auch wird sich der Wendepunkt, da diese Formänderung auf eine Nachgiebigkeit der Einspannung hinauskommt, nach den Enden des Streifens hin verschieben<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Wie diese Andeutung und wie alle Abbildungen der durchgebogenen Böden in den Figuren 12, 22, 32, 42 und 52 erkennen lassen, verhalten sich solche Böden nicht ganz so, als ob sie am Umfange vollkommen eingespannt wären. Die Nachgiebigkeit, die hier zu beobachten ist, hängt u. a. ab von der verhältnismäßigen Stärke der Krümmung und des cylindrischen Fortsatzes des Bodens zu derjenigen des Versuchscylinders, in den der Boden eingietet ist, wie auch von der Widerstandsfähigkeit dieser Verbindung. Es ist von Interesse und zur Beurteilung der Inanspruchnahme flacher Wandungen von Wert, zu beachten, dass die Größe der Biegungsanstrengung des Bodens bis zu einem gewissen Grade der Nachgiebigkeit hin durch die letztere vermindert wird, wie sich aus folgender Betrachtung ergibt.

Der an den Enden befestigte und auf die Längeneinheit mit  $p$  belastete Stab ist bei vollkommener Einspannung, d. h. bei

Fig. 64.

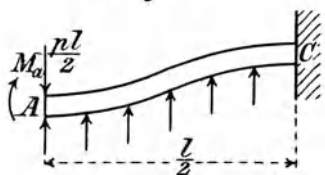


solcher Befestigung, dass an der Einspannstelle die elastische Linie von der ursprünglich geraden Stabachse berührt wird, dass also in diesem Punkte letztere Tangente an der elastischen Linie ist, beansprucht — wie bereits oben bemerkt — an der Einspannstelle  $A$  durch das rechtsdrehende Moment  $M_a = \frac{p l^2}{12}$  und die senkrechte

Kraft  $\frac{p l}{2}$ , in der Mitte  $C$  durch das linksdrehende Moment  $M_c = -\frac{p l^2}{24}$ . Gibt die Befestigungsstelle  $A$  soweit nach, dass das

Moment hier auf einen Wert  $M_a < \frac{p l^2}{12}$  sinkt, so findet sich unter

Fig. 65.



Beachtung von Fig. 65 das Moment in der Mitte  $C$  zu

$$M_c = M_a - \frac{p l l}{2 \cdot 2} + \frac{p l l}{2 \cdot 4} = M_a - \frac{p l^2}{8},$$

worin  $M_a$  zwischen  $\frac{p l^2}{12}$  (Stab vollkommen eingespannt) und 0 (Stab frei aufliegend) schwanken kann; somit beispielsweise

$$\text{für } M_a = \frac{p l^2}{12} \quad \frac{p l^2}{15} \quad \frac{p l^2}{16} \quad \frac{p l^2}{24} \quad \frac{p l^2}{48} \quad 0$$

$$- M_c = \frac{p l^2}{24} \quad \frac{7 p l^2}{120} \quad \frac{p l^2}{16} \quad \frac{p l^2}{12} \quad \frac{5 p l^2}{48} \quad \frac{p l^2}{8}$$

Wie ersichtlich, nimmt  $M_a$  ab, und der absolute Wert von  $M_c$  wächst, bis für  $M_a = \frac{p l^2}{16}$  beide gleich geworden sind; d. h. insbesondere für einen Stab mit rechteckigem Querschnitt: Gibt die Befestigung an den Stabenden gegenüber dem Zustande vollkommener Einspannung soweit nach, dass hier das biegende Moment von  $\frac{p l^2}{12}$

**2) Größe der Anstrengung an der am stärksten beanspruchten Stelle.**

a) Eingenietete Böden aus Flusseisen.

Wie aus den Fig. 6, 15 Taf. XXI, Fig. 25 Taf. XXII, Fig. 35 Taf. XXI und Fig. 45 Taf. XXII geschlossen werden kann, beginnt die bleibende Durchbiegung (in der Bodenmitte), ausgeprägt zu wachsen

beim Boden  $A \quad B \quad C \quad D \quad E$   
unter der Pressung  $p = 5,5 \quad 5 \quad 7 \quad 18 \quad 8$  *Atm.*

Wird die Spannung, von welcher an sich bleibende Formänderungen in merkbarer Größe einstellen, d. h. die Elastizitätsgrenze<sup>1)</sup>, für das vorliegende Material zu 1800 kg/qcm angenommen, so darf mit Annäherung geschlossen werden, dass unter Einwirkung der genannten Flüssigkeitspressungen die am stärksten beanspruchten Stellen eine Anstrengung von 1800 kg/qcm erfahren haben. Demgemäß wird, wenn man für zähes Flusseisen eine Anstrengung von 800 kg/qcm für zulässig erachtet,

für den Boden  $A \quad B \quad C \quad D \quad E$   
die zulässige Betriebsspannung des betreffenden Kessels betragen dürfen  $p \frac{800}{1800} = \dots \dots \dots \frac{2,4 \quad 2,2}{2,3} \quad 3,10 \quad 8,0 \quad 3,6$  *Atm.*

Die Hamburger Normen (nach den Vorschriften des »Bureau Veritas« ohne Rücksicht auf die Größe des Wölbungshalbmessers  $r$  aufgestellt) geben für nicht feuerberührte, gekrümmte Domböden als zulässige Betriebsspannung

$$\frac{s^2 K_z}{0,36 d^2}, \dots \dots (2)$$

woraus mit  $K_z = 4000$  kg/qcm und  $d = 70$  cm folgt  $2,13 \quad 2,45 \quad 9,07 \quad 2,60$  »

Die vom Verfasser für eingieteteten Böden aus Flusseisen aufgestellte Gleichung<sup>2)</sup>

$$k_b \geq \left\{ \frac{1}{2} \frac{r}{s} + \varphi \left( \frac{a - 0,5 r \left( 1 + \frac{r}{a} \right)}{s} \right)^2 \right\} p \dots \dots (3)$$

liefert mit  $\varphi = \frac{1}{3}$ <sup>3)</sup>,  $k_b = 800$  kg/qcm und

	$a$	$r$	$s$
für Boden $A$ u. $B$	34,2	4,0	0,97 cm
» » $C$	34,1	6,5	1,04 »
» » $D$	33,1	3,2	2,00 »
» » $E$	34,1	11,9	1,07 »

die zulässige Betriebspressung  $2,19 \quad 2,81 \quad 9,67 \quad 3,93$  *Atm.*

auf  $\frac{p l^2}{16}$  sinkt, sich also im Verhältnis von  $16 : 12 = 4 : 3$  vermindert, so vermindert sich auch die größte Inanspruchnahme des Stabes  $n$  dem gleichen Verhältnis, oder die Tragfähigkeit erhöht sich von 3 auf 4. Ist die Nachgiebigkeit der Befestigung eine weitergehende, so wird die größte Beanspruchung, die nunmehr nach  $C$  gerückt ist, wieder wachsen bis auf  $\frac{p l^2}{8}$  für  $M_a = 0$ .

Für  $M_a = -M_c = \frac{p l^2}{16}$  liegt der Wendepunkt um  $0,1465 l$  von dem Stabende entfernt, gegen  $0,2113 l$  bei  $M_a = \frac{p l^2}{12}$ .

<sup>1)</sup> Vergl. Fußbemerkung 1) S. 4

<sup>2)</sup> Maschinenelemente, 6. Aufl. 1897, S. 688. Bei den üblichen Böden ist  $r$  verhältnismäßig klein gegen  $a$  und damit das erste Glied im Klammerausdruck der Gleichung 3, welches die Zuganstrengung misst, klein gegenüber dem zweiten Glied, das die Biegungsanspruchnahme bestimmt, sodass die vereinfachte Beziehung

$$k_b \geq \varphi \left( \frac{a - 0,5 r \left( 1 + \frac{r}{a} \right)}{s} \right)^2 p \dots \dots (3a)$$

benutzt werden darf.

<sup>3)</sup> Der Wert  $\varphi$  hängt ab von der Nachgiebigkeit des Cylinders, in den der Boden eingietet ist, und von der Nachgiebigkeit der Nietverbindung (vergl. Fußbemerkung, diese Seite, linke Spalte).

Wird aus der Betrachtung der Fig. 6, 15, 25, 35 und 45 geschätzt, dass die bei rd. 2400 kg/qcm liegende Streckgrenze des Bodenmaterials gerade überschritten wird, wenn die Pressung gestiegen ist

bei Boden . . . . .	A	B	C	D	E
auf . . . . .	7	6,5	9,5	25	11
so würden sich die Betriebspressungen durch Multiplikation dieser Zahlen mit $\frac{800}{2400} = \frac{1}{3}$ ergeben <sup>1)</sup> zu . . .		$2,33$	$2,17$	$3,17$	$8,33$
		$2,35$			$3,67$

Wenn der Versuch bei dem Boden D eine erheblich geringere Betriebspressung liefert als Gl. (3), so dürfte dies zu einem großen Teile auf Rechnung des Umstandes zu setzen sein, dass es sich da, wo die größte Inanspruchnahme auftritt, d. h. in der Krepung, um einen gekrümmten Körper handelt, und dass bei einem solchen unter sonst gleichen Umständen die Beanspruchung um so stärker ausfällt, je größer die Wandstärke  $s$  im Vergleich zu  $r$  ist. Es kommt dabei, weil die innerste Faser die am stärksten beanspruchte ist, auf den Quotienten

$$\frac{\frac{s}{2}}{r} = \frac{s}{2r}$$

an<sup>2)</sup>. Dieser beträgt beim Boden D

$$\frac{2}{2 \cdot 3,2} = \frac{1}{3,2}$$

dagegen beim Boden A und B

$$\frac{0,97}{2 \cdot 4} = \frac{1}{8,2}$$

Wird dieser Umstand, welchem der Konstrukteur dadurch Rechnung zu tragen haben wird, dass er entweder den Wölbungshalbmesser  $r$  mit der Wandstärke wachsen lässt, oder dass er, falls ein kleiner Wölbungshalbmesser (im Vergleich zu  $s$ ) gewählt werden muss, bei Benutzung der Gl. (3) oder (3a) einen angemessenen kleinen Wert für  $k_b$  in die Rechnung einführt, berücksichtigt, so darf die Uebereinstimmung zwischen den Zahlen, die aus den Versuchen abgeleitet wurden, nämlich

	A	B	C	E
	2,4	2,2	3,1	3,6
	$2,3$			
bezw.	2,33	2,17	3,17	3,67
	$2,25$			

und den Werten, welche Gl. (3) bietet, d. i.

	2,19	2,81	3,93
--	------	------	------

als eine ausreichende bezeichnet werden. Für Boden D würde Gl. (3) mit  $k_b = 680 \text{ kg/qcm}$  liefern  $p = 8,2 \text{ Atm.}$

Die Gl. (3) und (3a) lassen deutlich erkennen, was zu geschehen hat, um geringe Bodenstärken  $s$  zu erhalten: der Wölbungshalbmesser  $r$  der Krepung muss entsprechend groß gewählt werden. Die bisher über die Stärke von flachen Böden aufgestellten Vorschriften lassen diesen wesentlichen Punkt ganz unbeachtet.

Im Falle der Einnietung des Bodens wird bei großen Werten von  $r$  die Anstrengung des Materials an der Verbindungsstelle, woselbst der Bodenmantel durch die Nietlöcher verschwächt ist, für die Wandstärke maßgebend.

### b) Gusseiserne Böden.

Der Bruch erfolgte

beim Boden . . . . .	I	II	III	IV
unter der Pressung von . . . . .	13	9,25	20,5	41,5

<sup>1)</sup> Da die Proportionalität zwischen Dehnungen und Spannungen nicht bis zur Streckgrenze reicht, so ist diese Schlussfolgerung auch nicht mehr streng richtig. Zu einer gewissen Prüfung kann sie aber immerhin dienen.

<sup>2)</sup> Vergl. hierüber z. B. des Verfassers »Elastizität und Festigkeit« § 54 und 55.

Die vom Verfasser für solche Böden aus dem bezeichneten Material aufgestellte Gleichung<sup>1)</sup>

$$k_b \geq 0,8 \left\{ \frac{r}{s} + \left( \frac{a - 0,5 r \left( 1 + \frac{r}{a} \right)^2}{s} \right) \right\} p \quad \dots (4)$$

liefert, wenn für  $k_b$  die im zweiten Teil (Boden II) ermittelte Biegezugfestigkeit von 2620 kg/qcm eingeführt und wenn gesetzt wird

für Boden	I	II	III	IV
zu	33,5	33,8	33,6	33,5
»	0	3	10	19
»	2,02	1,72	2,06	2,25

die Flüssigkeitspressung, bei welcher der Boden zum Bruche gelangen müsste,

beim Boden	I	II	III	IV
zu	11,9	9,3	18,4	42,6
Beobachtet wurde	13	9,25	20,5	41,5
Unterschied	+ 1,1	- 0,05	+ 2,1	- 1,1
d. i. in Hunderteilen der beobachteten Pressung	+ 8,5	- 0,5	+ 10,2	- 2,7

Wird berücksichtigt, dass bei Herstellung solcher Böden Gusspressungen sich nicht vermeiden lassen, so muss die Uebereinstimmung, welche zwischen den aus den Versuchen abgeleiteten Zahlen und denjenigen Werten besteht, die Gl. (3) liefert, als eine befriedigende bezeichnet werden.

Bei Benutzung der Gl. (4) zu Konstruktionszwecken ist für  $k_b$  die zulässige Biegezuganstrengung für Gusseisen zu setzen.

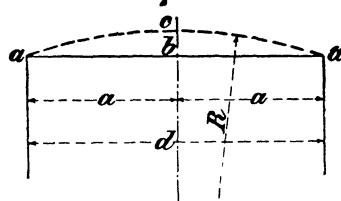
### 3) Die Clark'sche Berechnungsweise ebener Böden.

Es ist hier der Ort, dieser Berechnungsweise zu gedenken, nachdem sie auch in die deutsche Litteratur (Häder, Bau und Betrieb der Dampfkessel, 1893 S. 78 u. f., 1895 S. 102 u. f.) Aufnahme gefunden hat. Nach ihr wird die Widerstandsfähigkeit flacher Böden proportional der ersten Potenz der Wandstärke  $s$  und umgekehrt proportional der ersten Potenz vom Durchmesser gesetzt.

Dieser Berechnungsweise liegt folgender Gedankengang zugrunde.

Von dem ebenen Boden  $aba$ , Fig. 67, wird angenommen, dass er sich unter Einwirkung

Fig. 67.



des inneren Ueberdruckes von  $p \text{ Atm.}$  so durchbiege, wie die Abbildung durch den Kreisbogen  $aca$  zeigt, d. h. in eine Kugelfläche vom Halbmesser  $R$  übergehe. Das setzt voraus, dass die Scheibe gewissermaßen gelenkartig an ihrem Umfange festgehalten wird und sich vollständig biegsam verhält, etwa wie eine dünne Gummis Scheibe. Wird sodann weiter angenommen, dass der Scheibenumfang  $2\pi a$  sich weder vergrößere noch verkleinere, so erfährt eine radiale Faser von der ursprünglichen Länge  $a$  infolge der Durchbiegung eine Verlängerung um  $\widehat{ac} - \widehat{ab}$ , entsprechend einer verhältnismäßigen Dehnung

$$\epsilon = \frac{\widehat{ac} - \widehat{ab}}{a} = \frac{\widehat{ac}}{a} - 1.$$

Clark erachtet nun  $\epsilon = \frac{1}{1000}$  noch für zulässig, was für einen geraden stabförmigen Körper, der nur in Richtung

<sup>1)</sup> Maschinenelemente, 6. Aufl. 1897, S. 688. Das in der Fußbemerkung Ziff. 2 S. 11 rechte Spalte für den Fall Gesagte, dass  $r$  klein gegen  $a$  ist, gilt auch hier. Dann ergibt sich die vereinfachte Beziehung

$$k_b \geq 0,8 \left\{ \frac{a - 0,5 r \left( 1 + \frac{r}{a} \right)^2}{s} \right\} p \quad \dots (4a).$$



seiner Achse auf Zug in Anspruch genommen wird, bei  $\alpha = \frac{1}{2000000}$  auf  $\sigma = 2000$  kg/qcm hinauskommen würde.

Hiernach ist

$$0,001 = \frac{\widehat{ac}}{ab} - 1,$$

$$\widehat{ac} = 1,001 ab = 1,001 a$$

und mit der Annäherung, mit welcher bei der Flachheit des Bogens

$$\widehat{ac}^2 = \overline{ab}^2 + bc^2$$

gesetzt werden darf,

$$(1,001 a)^2 = a^2 + bc^2,$$

$$\overline{bc}^2 = \infty 0,002 a^2,$$

woraus die Durchbiegung in der Mitte

$$\overline{bc} = 0,0447 a = y'$$

$$y' = \infty \frac{a}{22} = \frac{d}{44}.$$

Nun ist

$$\overline{ab}^2 = \overline{bc}(2R - bc) = \infty \overline{bc} \cdot 2R,$$

$$2R = \frac{\overline{ab}^2}{\overline{bc}} = \frac{a^2}{y'} = \frac{a^2}{\frac{a}{44}} = 22a,$$

$$R = 11a = 5,5d.$$

Mit der Unterstellung, dass sich die gedachte Kugel-  
fläche  $aca$  genau so verhalte wie eine ganze Halbkugel vom  
Halbmesser  $R$ , folgt

$$\pi R^2 p = 2\pi R s k_z,$$

$$p = 2 \frac{s}{R} k_z = 2 \frac{s}{5,5d} = 0,364 \frac{s}{d} k_z \quad \dots \text{(I)}.$$

Clark setzt die zulässige Anstrengung für Eisen 12 tons,  
für Stahl 14 tons auf den Quadratzoll engl.<sup>1)</sup>, entsprechend  
 $k_z = \text{rd. } 1900$  kg/qcm bzw.  $2100$  kg/qcm. Das würde in  
abgerundeten Zahlen geben

<sup>1)</sup> Daniel Kinnear Clark, The Steam Engine: a treatise on steam  
engines and boilers, London usw. 1891, Halbband II S. 622.

S. auch Minutes of Proceedings of the Institution of Civil  
Engineers, Bd. LIII Session 1877/78 Teil III S. 170 u. f.: »On  
the Strength of Flat Plates and Segmental Ends of Boilers and  
other Cylinders by Daniel Kinnear Clark, M. Inst. C. E.

$$p = 700 \frac{s}{d}, \text{ bzw. } p = 800 \frac{s}{d} \quad \dots \text{(II)},$$

sofern  $p$  in Atm. (kg/qcm) und  $d$  in cm eingeführt wird<sup>1)</sup>.

Ein Blick auf die Abbildungen Fig. 12, 22, 32, 42 und  
52 lehrt, dass keine Rede davon sein kann: es verhalte sich  
der ebene Boden bei der Durchbiegung so, als werde er am  
Umfange gelenkartig festgehalten und als sei er vollständig  
biegsam, etwa wie eine dünne Gummischeibe. Sämtliche  
Abbildungen zeigen vielmehr die dem eingespannten und  
durchgebogenen Balken eigentümliche Form. Die Biegungs-  
beanspruchung steht im Vordergrund, die radiale Zuginan-  
spruchnahme tritt bei den üblichen Werten von  $r$  zurück.  
Wenn Clark auf S. 623 des in der Fußbemerkung S. 13 linke  
Spalte zuerst genannten Werkes sagt: »Since the end-plate  
is thrown by deflection into a state of tension throughout its  
thickness, the resistance to bursting pressure follows the  
ratio of the thickness simply: not the ratio of the square of  
the thickness, as is assumed for the most part by writers  
on the resistance of flat surfaces«, so ist das eben ein Irr-  
tum, an dem auch eine später folgende Berufung auf  
Fairbairn nichts ändert. Sämtliche von mir bisher mit ebenen  
Platten und Böden durchgeführten Versuche, auch wenn die  
Auflagerung am Umfange eine freie war, weisen — ganz  
abgesehen von dem, was auf dem Wege der Ueberlegung  
gefunden werden kann — nach, dass unter sonst gleichen  
Verhältnissen die Widerstandsfähigkeit mit dem Quadrate  
und nicht mit der ersten Potenz der Wandstärke wächst<sup>2)</sup>.

In eine weitere Kritik des Gedankenganges, der zur  
Gleichung (I) sowie zu den Beziehungen (II) und (III) geführt  
hat, einzutreten, erscheint nicht nötig. Die Irrtümer liegen  
klar zutage.

Stuttgart, den 7. Juni 1897.

<sup>1)</sup> Häder führt auf S. 80 (1893) bzw. S. 104 (1895) an:

$$\left. \begin{aligned} p &= 600 \frac{s}{d} \text{ für Schweifseisenbleche} \\ p &= 950 \frac{s}{d} \text{ » Flusseisenbleche} \\ p &= 1200 \frac{s}{d} \text{ » Flusstahlbleche} \\ p &= 400 \frac{s}{d} \text{ » gehämmerte Kupferbleche} \end{aligned} \right\} \dots \text{(III)}$$

<sup>2)</sup> Vergl. des Verfassers »Elastizität und Festigkeit« 1894 S. 428

## Zusammenstellung der Messergebnisse.

Zusammenstellung 1 bis 10 für Boden A

» 11 » 17 » » B  
» 18 » 24 » » C  
» 25 » 31 » » D  
» 32 » 38 » » E.

Zusammenstellung 1.  
Boden A.

Pressung <i>P</i> Atm.	Temperatur im Ver- suchsraum °C	Versuchstag	Größe der Strecken $x - a$ in mm an den Punkten										
			6	4	3	2	1	0	25	26	27	28	30
0	17,0	23. 10. 93	2,480	3,130	2,940	3,960	3,530	3,445	4,120	4,695	3,090	3,435	2,240
1	17,5	»	2,460	3,160	3,220	4,550	4,360	4,370	4,960	5,290	3,370	3,460	2,220
0	16,5	24. 10. 93	2,480	3,130	2,940	3,960	3,530	3,445	4,120	4,695	3,090	3,435	2,240
2	16,5	»	2,440	3,190	3,495	5,110	5,150	5,250	5,750	5,840	3,630	3,485	2,210
0	16,5	»	2,475	3,135	2,940	3,965	3,540	3,450	4,125	4,695	3,095	3,435	2,240
3	17,0	»	2,415	3,235	3,745	5,660	5,910	6,085	6,510	6,380	3,890	3,520	2,190
0	17,5	»	2,475	3,135	2,945	3,980	3,560	3,485	4,150	4,705	3,095	3,435	2,240
4	17,0	25. 10. 93	2,400	3,250	3,990	6,165	6,620	6,870	7,215	6,885	4,120	3,550	2,180
0	17,0	»	2,475	3,135	2,955	3,990	3,580	3,510	4,170	4,720	3,105	3,435	2,240

Zusammenstellung 2.  
Boden A.

Pressung <i>P</i> Atm.	Temperatur im Ver- suchsraum °C	Versuchstag	Größe der Strecken $x - a$ in mm an den Punkten										
			12	10	9	8	7	0	31	32	33	34	36
0	17,0	23. 10. 93	2,885	4,070	2,875	4,125	2,980	3,445	3,890	5,235	3,900	2,195	3,210
1	17,5	»	2,860	4,110	3,150	4,715	3,810	4,370	4,730	5,845	4,160	2,225	3,195
0	16,5	24. 10. 93	2,885	4,070	2,875	4,125	2,980	3,445	3,890	5,235	3,900	2,195	3,210
2	16,5	»	2,845	4,140	3,430	5,280	4,595	5,250	5,540	6,425	4,460	2,240	3,180
0	16,5	»	2,880	4,070	2,875	4,125	2,980	3,450	3,890	5,235	3,900	2,195	3,210
3	17,0	»	2,835	4,165	3,680	5,810	5,330	6,085	6,285	6,960	4,710	2,280	3,160
0	17,5	»	2,880	4,070	2,885	4,145	3,005	3,485	3,915	5,255	3,905	2,195	3,210
4	17,0	25. 10. 93	2,810	4,180	3,925	6,320	6,055	6,870	7,010	7,480	4,960	2,310	3,155
0	17,0	»	2,880	4,070	2,895	4,155	3,020	3,510	3,935	5,260	3,905	2,195	3,210

Zusammenstellung 3.  
Boden A.

Pressung <i>P</i> Atm.	Temperatur im Ver- suchsraum °C	Versuchstag	Größe der Strecken $x - a$ in mm an den Punkten										
			18	16	15	14	13	0	37	38	39	40	42
0	17,0	23. 10. 93	3,140	4,345	3,325	4,400	4,030	3,445	4,410	3,855	3,955	5,210	3,440
1	17,5	»	3,130	4,380	3,600	4,990	4,865	4,370	5,260	4,475	4,235	5,250	3,435
0	16,5	24. 10. 93	3,140	4,345	3,325	4,400	4,030	3,445	4,410	3,855	3,955	5,210	3,440
2	16,5	»	3,125	4,410	3,870	5,550	5,660	5,250	6,065	5,050	4,505	5,280	3,430
0	16,5	»	3,140	4,345	3,325	4,400	4,035	3,450	4,415	3,860	3,960	5,210	3,440
3	17,0	»	3,100	4,440	4,110	6,080	6,405	6,085	6,835	5,600	4,755	5,305	3,425
0	17,5	»	3,140	4,345	3,335	4,420	4,065	3,485	4,445	3,880	3,965	5,210	3,440
4	17,0	25. 10. 93	3,080	4,470	4,355	6,580	7,110	6,870	7,550	6,120	5,000	5,340	3,415
0	17,0	»	3,140	4,345	3,345	4,430	4,085	3,510	4,460	3,890	3,970	5,210	3,440

Zusammenstellung 4.  
Boden A.

Pressung <i>P</i> Atm.	Temperatur im Ver- suchsraum °C	Versuchstag	Größe der Strecken $x - a$ in mm an den Punkten										
			24	22	21	20	19	0	43	44	45	46	48
0	17,0	23. 10. 93	2,535	1,865	3,425	4,355	3,320	3,445	2,915	4,045	3,450	4,230	2,965
1	17,5	»	2,515	1,890	3,690	4,945	4,160	4,370	3,765	4,650	3,730	4,275	2,955
0	16,5	24. 10. 93	2,535	1,865	3,425	4,355	3,325	3,445	2,915	4,045	3,450	4,230	2,965
2	16,5	»	2,495	1,930	3,950	5,515	4,955	5,250	4,565	5,230	4,000	4,295	2,950
0	16,5	»	2,530	1,865	3,425	4,360	3,325	3,450	2,920	4,050	3,455	4,230	2,965
3	17,0	»	2,475	1,955	4,205	6,035	5,710	6,085	5,330	5,770	4,260	4,320	2,935
0	17,5	»	2,530	1,865	3,425	4,375	3,355	3,485	2,950	4,070	3,460	4,230	2,965
4	17,0	25. 10. 93	2,455	1,990	4,430	6,525	6,400	6,870	6,040	6,280	4,500	4,360	2,920
0	17,0	»	2,525	1,865	3,425	4,385	3,375	3,510	2,970	4,085	3,470	4,230	2,965

Additional material from *Untersuchungen über die Formänderungen und die Anstrengung flacher Böden*, ISBN 978-3-662-31798-3, is available at <http://extras.springer.com>

