

UNTERSUCHUNGEN
ÜBER
DEN ERDDRUCK AUF STÜTZWÄNDE

ANGESTELLT

MIT DER FÜR DIE TECHNISCHE HOCHSCHULE IN BERLIN
ERBAUTEN VERSUCHS-VORRICHTUNG.

VON

AD. DONATH,

REGIERUNGSRATH IM KAISERL. PATENTAMT,
PRIVATDOCENT AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN BERLIN.

MIT 1 TAFEL.

(SONDERDRUCK AUS DER ZEITSCHRIFT FÜR BAUWESEN, JAHRG. 1891.)



BERLIN 1891.

VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN.

(FORMALS ERNST & KORN.)

Nr.....

Schrank.....

Fach.....

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



100000300804

UNTERSUCHUNGEN
ÜBER
DEN ERDDRUCK AUF STÜTZWÄNDE

ANGESTELLT

MIT DER FÜR DIE TECHNISCHE HOCHSCHULE IN BERLIN
ERBAUTEN VERSUCHS-VORRICHTUNG.

VON

AD. DONATH,

REGIERUNGSRATH IM KAISERL. PATENTAMT,
PRIVATDOCENT AN DER TECHNISCHEN HOCHSCHULE IN BERLIN.

MIT 1 TAFEL.

(SONDERDRUCK AUS DER ZEITSCHRIFT FÜR BAUWESEN, JAHRG. 1891.)



Nr. 616.

BERLIN 1891.

VERLAG VON WILHELM ERNST & SOHN.

(VORMALS ERNST & KORN.)



III 18138

Alle Rechte vorbehalten.



1. Allgemeines.

Unter den Fragen, welche gegenwärtig in der Theorie des Bauwesens noch am dringendsten der Aufklärung bedürfen, ist die nach der Gröfse und Richtung des Druckes, welchen eine Erdmasse auf eine sie stützende Wand ausübt, jedenfalls eine der wichtigsten. Nach dem gegenwärtigen Stande unserer Kenntnifs ist es nicht möglich, auf diese Frage eine befriedigende Antwort zu geben. Die ältere, von Coulomb und Poncelet herrührende Theorie vom Prisma des gröfsten Drucks, die in der Praxis noch ziemlich allgemein üblich ist, leidet, wie von Mohr, Winkler, Weyrauch u. A. nachgewiesen ist, an einer ganzen Reihe innerer Widersprüche und Mängel. Andererseits lehrt die neuere, vom Gleichgewicht der Erdelemente ausgehende Erddrucktheorie von Rankine und Winkler zwar, den Druck auf eine beliebige, durch das zusammenhangslose, unbegrenzte Erdreich gelegte Ebene in streng mathematischer Weise zu bestimmen; über die Frage aber, ob und in welchem Umfange diese Lehre auf Stützwände anwendbar sei, gehen die Meinungen der Forscher bekanntlich weit auseinander. Und doch wäre gerade die Entscheidung dieser letzteren Frage nach der Anwendbarkeit der Theorie des unbegrenzten Erdreichs auf Stützwände nicht nur von grossem praktischen Werthe, sondern auch derjenige Schritt, der zunächst geschehen müfste, um die Erddruckfrage ihrer endgültigen Lösung näher zu bringen. Von weiteren wissenschaftlichen Untersuchungen freilich möchte ihre Aufklärung kaum noch zu erwarten sein, vielmehr dürfte hier allein der Weg des planmäfsigen, methodischen Versuchs — also eine aufmerksame und gründliche Beobachtung der Wirklichkeit — zum Ziele führen, eine Ansicht, die auch von anerkannten Forschern auf diesem Gebiete getheilt wird. So spricht sich z. B. Schäffer in seinem bemerkenswerthen Aufsatz: Ueber Erddruck und Stützwände (Zeitschrift für Bauwesen 1878, S. 538) hierüber wie folgt aus: „Eine weitere theoretische Erörterung dieser Frage erscheint als sehr müfsig, während die Anstellung von sachgemäfsen Versuchen, durch welche mindestens der einfachste Fall zu einer klaren Lösung gebracht wird, sich als eine dringende Forderung darstellt.“

Nun ist zwar bereits eine grofse Reihe von Versuchen über Erddruck angestellt worden;*) leider sind diese aber wegen des dabei beobachteten Verfahrens für die Entscheidung

*) Zusammenstellung und ausführliche Besprechung derselben siehe Winkler, Neue Theorie des Erddrucks, S. 117 u. f.

der hier vorliegenden Frage durchweg unbrauchbar. Bei allen diesen Versuchen wurde nämlich derart vorgegangen, dafs die um ein unteres oder oberes Gelenk drehbare (bisweilen auch auf Rollen gesetzte) bewegliche Wand durch Gegengewichte gegen den von der Erde ausgeübten Druck im Gleichgewicht erhalten wurde. Diese Gegengewichte waren zunächst übermäfsige, und wurden allmählich so lange verringert, bis das Gleichgewicht überschritten war, d. h. bis der Umsturz der Wand (bezw. das Fortrücken derselben) erfolgte. Die bei diesem Vorgange auftretenden Kräfte sind nun aber unzweifelhaft wesentlich andere als diejenigen, welche in Wirklichkeit bei einer standfesten Stützmauer, also bei ruhender Wand und unbewegter Erdmasse entstehen, wie dies bereits früher von Mohr ausdrücklich hervorgehoben worden ist, der sich hierüber (Hannov. Zeitschrift 1871, S. 365) wie folgt ausspricht: „Ein scheinbar gröfseres Gewicht hat ein zweiter Einwand, die Thatsache nämlich, dafs die Ergebnisse der über den Erddruck angestellten Versuche mit denjenigen der älteren Theorie, von welcher der volle Reibungswiderstand an der Wandfläche in Rechnung gezogen wird, besser übereinstimmen, als mit denjenigen der neuen Theorie. Dieser Einwand wird jedoch beseitigt durch die Bemerkung, dafs bei allen bisher angestellten Versuchen der Erddruck gemessen wurde in dem Augenblick, in welchem eine Bewegung des gestützten Erdkörpers bemerkt wurde, also nachdem dieselbe bereits eingetreten war. Der beobachtete Zustand war also nicht der Grenzzustand des Gleichgewichts, sondern ein Bewegungszustand. In dem bezeichneten Zeitpunkte kommen die Reibungswiderstände an der Wandfläche zur vollen Wirkung, und es ist daher wohl erklärlich, dafs die Versuchsergebnisse mit solchen Rechnungen übereinstimmen, welche jenen Widerstand berücksichtigen. Der Zustand, in welchem sich eine ruhende Stützmauer befindet — und um eine solche handelt es sich doch bei allen Anwendungen — stimmt demnach keineswegs überein mit dem bei den Versuchen beobachteten Zustande, und die Versuchsergebnisse haben aus diesem Grunde offenbar keinen solchen Werth, dafs sie über die Richtigkeit der einen oder der anderen Theorie entscheiden könnten.“*)

*) Eine Ausnahme machen die im Jahre 1885 von dem französischen Ingenieur Leygue angestellten, sehr umfangreichen Versuche (vgl. Annal. des ponts et des chaussées 1885, II, S. 788), von welchen ein Theil in der alten Weise, ein Theil aber nach einem Verfahren gemacht wurde, welches eine Bestimmung des Erddrucks bei ruhender Wand gestattete. Die Wand wurde nämlich bei diesen

Es handelt sich also, wenn man die oben gestellte Frage nach der Anwendbarkeit der Theorie des unbegrenzten Erdreichs auf Stützwände einer näheren Untersuchung unterziehen will, zunächst darum, ein Verfahren zu finden, welches ermöglicht, den Druck zu messen, den eine Erdmasse auf eine im Ruhezustand befindliche Stützwand ausübt, die es also gestattet, das zu bestimmen, was man den Ruhedruck der Erde nennen kann. Verfasser hat nun versucht, ein solches, auf der Benutzung des hydrostatischen Drucks beruhendes Verfahren durchzuführen, und nach dem hierzu von ihm schon vor längerer Zeit gefassten Plan für die Technische Hochschule in Charlottenburg im Laufe des Jahres 1889 eine Versuchs-Vorrichtung erbaut, deren Grundzüge im Nachfolgenden kurz angegeben werden sollen. Hieran schließt sich eine ausführliche Beschreibung der auf Blatt 51 dargestellten Vorrichtung, sowie eine Besprechung der bisher damit angestellten Versuche.

2. Grundzüge der Versuchs-Vorrichtung.

Ist K (Abb. 1) ein mit Erde gefüllter Kasten, W die ihn vorn abschließende bewegliche Wand, welche um eine untere, durch ein Schneidenpaar gebildete Drehachse d drehbar sein möge, und denkt man sich zunächst die Wand gegen den Druckkolben D eines geschlossenen, mit Wasser oder Quecksilber gefüllten Cylinders C gelehnt, so würde, da die Zusammenpressung der Flüssigkeit verschwindend klein ist, eine Bewegung der Wand infolge des Erddrucks nicht stattfinden; man brauchte daher nur den in dem Cylinder herrschenden Druck mittels eines Druckmessers zu bestimmen, um den Erddruck gegen die in Ruhe befindliche Wand zu erhalten. Bei diesem Verfahren würde aber die Kolbenreibung an den Seitenwänden des Cylinders unvermeidlich eine so unsichere, wenig bestimmbare, und namentlich auch so veränderliche Größe bilden, daß jede Genauigkeit der Messung aufhören und die Versuche keine brauchbaren Ergebnisse liefern würden. Um dies zu vermeiden, ist bei der vorliegenden Vorrichtung die Anordnung so getroffen, daß Kolben und Cylinderwände mit einander gar nicht in Berührung gebracht sind, vielmehr der Kolben außerhalb des Cylinders gelagert ist. Es ist nämlich (nach dem Vorbilde einer Festigkeitsmaschine, welche bereits 1865 von Desgoffes in Paris nach denselben Grundzügen erbaut wurde) der nur wenige Centimeter tiefe gußeiserne Cylinder C (Abb. 2) wagrecht auf die Oberplatte eines Holzgerüsts L gelagert und bis zu seinem Rande mit Quecksilber gefüllt, über welches eine feine Kautschukhaut gespannt ist, die an den Rändern des Cylinders mittels eines Prefsringes festgehalten wird. Auf dieses

Versuchen gegen Spiralfedern gelehnt, welche sich gegen ein festes, mit der Wand gleichlaufendes Brett stützten. Infolge der Zusammenpressung der Federn durch den Erddruck traten kleine, an der Wand befestigte Pflöcke durch Löcher, welche in dem erwähnten Brett ausgeschnitten waren, mehr oder minder weit hervor, woraus sich auf die Größe des Erddrucks schließen liefs. Obgleich diese Versuche für die Praxis von Werth sind, wie die sehr brauchbaren Futtermauern zeigen, welche Leygue auf Grund derselben hergestellt hat, so dürften sie doch wissenschaftliche Schlüsse kaum gestatten, weil die hierbei benutzte Vorrichtung wie die a. a. O. veröffentlichte Beschreibung zeigt, von so kleinen Abmessungen und in so sehr unvollkommener Weise angeordnet war, daß die damit gewonnenen Versuchsergebnisse nothwendigerweise mit großen Fehlern behaftet gewesen sein müssen. Dazu kommt noch, daß bei dem dort beobachteten Verfahren die Wand, bevor sie in den Ruhezustand kam, infolge der Zusammenpressung der Federn eine beträchtliche Bewegung ausführen mußte, durch welche der Erddruck bereits wesentlich verändert wurde — die Versuche also keineswegs den wahren Ruhedruck der Erde gegen die Wand ergaben.

Häutchen ist eine flache, kreisrunde Scheibe S gelegt, deren Durchmesser um etwa 1 mm kleiner ist, als der lichte Durchmesser des Cylinders; auf diese, die Stelle des Kolbens vertretende Druckscheibe wird nun die Wand durch ein Hebelwerk gestützt und so der von der Erde auf die Wand ausgeübte Druck auf das Quecksilber übertragen. Zu diesem Zwecke geht (Abb. 2) von der Wand der versteifte, wagerechte Arm A aus, während quer über die Druckscheibe der wagerechte Hebel H läuft, welcher an seinem hinteren Ende einen festen, von einer Schneide gebildeten Drehpunkt m hat und bei n mittels einer zweiten Schneide auf die über dem Quecksilber liegende Scheibe S drückt; zwei Zugstangen $z z$, welche den Hebel H vorn umfassen, vermitteln die Verbindung zwischen dem Arm A und dem Hebel H , indem sie oben und unten durch Plättchen verbunden sind, in deren Kerben entsprechende Schneiden greifen, die an dem Arm bzw. Hebel angebracht sind. Kippt nun die Wand infolge eines auf sie ausgeübten seitlichen Druckes um die untere Drehachse d , so dreht sich der Hebel H um seinen hinteren Drehpunkt m , drückt so auf die Scheibe S und überträgt den auf die Wand wirkenden Druck auf das Quecksilber. Diese Uebertragung erfolgt ohne jeden störenden Einfluß, da die Drehung der einzelnen Theile durchweg um Stahlschneiden erfolgt und die zur Dehnung des Quecksilberhäutchens erforderliche Kraft bei der nur außerordentlich kleinen Bewegung, welche die Druckplatte auszuführen hat, verschwindend gering ist; man braucht daher nur den Druck auf den Quecksilberspiegel mittels eines Druckmessers zu bestimmen, um den auf die Wand wirkenden Druck berechnen zu können. Zu diesem Zweck ist neben dem Cylinder C (Abb. 2) ein gläsernes, oben offenes Standrohr R aufgestellt, welches mit dem Cylinder durch ein Stahlrohr F verbunden und mit einer Millimetertheilung versehen ist. Wird nun auf die Scheibe S ein Druck geübt, so steigt das Quecksilber in diesem Standrohr so lange, bis der hydrostatische Druck dem äußeren das Gleichgewicht hält. Nachdem man also den Stand der Quecksilbersäule mittels Nonius und Lupe mit möglichster Genauigkeit abgelesen hat, kann man unmittelbar den auf die Wand wirkenden Druck berechnen.

Das Ganze stellt sonach gewissermaßen eine hydrostatische Wage dar, welche sich selbstthätig ins Gleichgewicht setzt, sobald auf die Wand ein seitlicher Druck ausgeübt wird. Immerhin muß aber die Wand, bevor dieser Gleichgewichtszustand eintritt, unvermeidlich eine Bewegung, nämlich eine Drehung um ihren unteren Drehpunkt, ausführen. Das Verfahren würde daher kaum bessere Ergebnisse liefern, als die früher angewandten Methoden zur Bestimmung des Erddrucks, wenn dieser Uebelstand nicht in nachfolgender Weise ausgeglichen wäre.

Zunächst ist nämlich die Anordnung derart getroffen, daß diese unvermeidliche, schädliche Drehung der Wand so gering wie irgend möglich ausfällt. Zu diesem Zwecke ist der Durchmesser der über dem Quecksilber liegenden Scheibe S verhältnißmäßig sehr groß gewählt, gegenüber dem Querschnitt des Steigrohrs R , dessen Querschnitt so klein ist, wie dies aus praktischen Gründen (namentlich mit Rücksicht auf die Capillarität) nur immer zulässig war. Da nun die Steighöhe des Quecksilbers lediglich von dem Druck auf die Flächeneinheit des Quecksilberspiegels abhängt, dieser Einheitsdruck aber unter sonst gleichen Umständen um so geringer wird, je größer der Spiegel ist, so wird bei dieser Anordnung die Steighöhe verhältnißmäßig gering sein, also nur wenig Quecksilber aus dem

Cylinder in das Steigrohr verdrängt werden, folglich auch die Senkung der Druckscheibe und die Drehung der sich auf dieselbe stützenden Wand nur eine geringe werden. Ferner ist es nicht erforderlich, daß der ganze, von der Erde auf die Wand ausgeübte Druck auf den Druckmesser übertragen wird, vielmehr kann der größte Theil desselben (etwa $\frac{3}{4}$) in gewöhnlicher Weise durch Gegengewichte aufgehoben, und nur der noch verbleibende Rest einer Messung mittels des Steigrohrs unterzogen werden; je geringer aber der Druck auf den Quecksilberspiegel, desto kleiner wird offenbar die Steighöhe und daher auch die Wandbewegung werden. Es sind daher die an die Wand angeschraubten Arme *B*, mittels welcher sich dieselbe auf die Lager stützt, über diese letzteren hinaus nach rückwärts verlängert und tragen an ihren Enden zwei Gewichtsschalen *G*, durch deren Belastung die Wand an den Kasten angepreßt wird und so ein beliebiger Theil des Erddrucks aufgehoben werden kann. — Endlich sind alle Theile des Hebelerwerks, welches den Druck von der Wand auf den Druckmesser überträgt, im Verhältniß zu den Kräften, die sie aufzunehmen haben, außerordentlich kräftig und steif gebaut, sodaß ihre elastische Formänderung verschwindend klein ist und fast gar keinen Einfluß auf die Wandbewegung hat. Durch alle diese Maßnahmen ist es gelungen, wie die mittels eines Mikroskops gemachten Beobachtungen zeigten, die Wandbewegung so sehr einzuschränken, daß die 60 cm hohe Wand während des Versuchs bis zum Eintritt des Gleichgewichts nur eine Bewegung von etwa 0,05 bis 0,06 mm (an ihrer Oberkante gemessen) machte, was, da der Drehungshalbmesser 720 mm beträgt, einer Drehung derselben um 14 bis 16 Secunden entspricht, also äußerst gering ist.

Immerhin wird aber diese Drehung, so klein sie auch ist, den ursprünglichen Erddruck bei ruhender Wand ein wenig verändern, und man wird daher noch immer nicht den dem vollkommenen Ruhezustand der Wand entsprechenden Druck erhalten. Aber auch dieser Fehler läßt sich (nach einer Idee, die dem Verfasser noch von dem leider so früh dahingegangenen Professor Winkler mitgetheilt wurde) in folgender Weise nachträglich berichtigen. Macht man nämlich mit derselben Füllung des Kastens, und bei derselben Lage der Wand nach einander eine Reihe von Versuchen, bei welchen man die Wandbewegung immer mehr zunehmen, also die Wand immer weiter nach vorn kippen läßt (was sich einfach durch allmähliches Verringern der Gegengewichte auf den hinteren Gewichtsschalen erreichen läßt), so wird der Erddruck infolge dieses immer weiteren Kippens der Wand stetig langsam abnehmen, und man erhält, wenn man die zusammengehörigen Werthe von Druck und Wandbewegung zusammenstellt, den Erddruck als Function der Wandbewegung. Trägt man daher die für letztere gefundenen Werthe als Abscissen, die zugehörigen Drücke als Ordinaten auf, und verlängert die so erhaltene Linie nach rückwärts bis zum Nullpunkt, so erhält man den dem vollkommenen Ruhezustand der Wand entsprechenden Druck. Wie die nach diesem Verfahren angestellten Versuche gezeigt haben, genügt eine nachträgliche Berichtigung der Versuchsergebnisse um 6 bis 7 pCt., um den Einfluß der unvermeidlichen kleinen Anfangsbewegung der Wand auszugleichen, und man gelangt so zu Ergebnissen, welche von dem Drucke bei vollkommen ruhender Wand wohl nur noch sehr wenig verschieden sein können.

Nach diesen Grundzügen ist die in Abb. 3 und 4 im Grundrifs und in der Seitenansicht dargestellte Versuchs-Vorrichtung ausgeführt worden. Was ihre Abmessungen anlangt, so erschien es geboten, dieselben möglichst groß zu wählen, so groß als nur irgend zulässig, wenn die Versuche nicht gar zu mühsam und zeitraubend ausfallen sollten. Wenn, wie bei den meisten älteren Vorrichtungen dieser Art, die Wand nur eine geringe Höhe von 20 bis 30 cm bei entsprechend geringer Breite hat, so werden zunächst schon die unvermeidlichen kleinen Ungenauigkeiten in der Ausführung der Vorrichtung die Versuchsergebnisse nicht unerheblich beeinflussen und merkliche Fehler erzeugen; dazu kommt ferner, daß je kleiner die Sandmasse ist, mit welcher man arbeitet, um so größer der Einfluß der Zufälligkeiten sein wird, welche bei der Aufschüttung des Sandes in der Lagerung der einzelnen Theilchen unvermeidlich eintreten werden; bei geringer Sandmasse werden daher, auch wenn diese Aufschüttung mit der denkbarsten Sorgfalt geschieht, die Versuche unter einander große Abweichungen zeigen, während bei größerer Masse diese Unregelmäßigkeiten sich unter einander nahezu ausgleichen und die Versuchsergebnisse übereinstimmender ausfallen werden. Es ist daher der Wand eine Höhe von 60 cm und eine ebenso große Breite gegeben worden; die Länge des Kastens beträgt 110 cm, wird jedoch für gewöhnlich, als überflüssig groß, durch eine eingesetzte Zwischenwand auf ebenfalls 60 cm eingeschränkt. Eine noch weitere Steigerung der Abmessungen erschien nicht rathsam, weil sonst das Arbeiten zu mühsam und schwerfällig, namentlich das Füllen des Kastens zu zeitraubend geworden wäre. Schon jetzt wiegt die zur Füllung des ganzen Kastens erforderliche Sandmasse rund 600 kg, die zur Füllung des, wie oben angegeben verkleinerten Raumes erforderliche Menge 350 kg; das Einfüllen dieser letzteren Masse nach dem später noch zu besprechenden, eine möglichste Gleichmäßigkeit der Schüttung verbürgenden Verfahren beansprucht immerhin schon eine volle Stunde.

Der ganze Kasten ruht, wie Abb. 3 und 4 zeigen, auf einer starken, schmiedeeisernen Welle, die wiederum auf einem kräftigen Holzgerüst gelagert und mittels Schnecke und Schneckenrad drehbar ist. Man kann daher die Wand, da ihre Lager am Kastenboden befestigt sind, samt dem Kasten beliebig drehen und unter jedem gewünschten Winkel einstellen. Mit besonderer Sorgfalt wurde ferner darauf geachtet, daß nirgend störende Reibungswiderstände entstanden, welche die Richtigkeit der Versuchsergebnisse beeinträchtigen könnten. Leitrollen und ähnliche, einen schädlichen Widerstand ausübende Theile sind daher nirgend angewandt, vielmehr geschieht die Uebertragung der Kräfte durchweg durch Hebel, welche sich um Stahlschneiden drehen. Endlich ist die Anordnung so getroffen, daß es möglich ist, vor Beginn der Versuche eine Prüfung der Vorrichtung auf ihre Richtigkeit und Genauigkeit im ganzen wie in ihren einzelnen Theilen vorzunehmen. Dies geschieht derart, daß bei leerem Kasten an die beiden nach vorn vorspringenden Arme *vv* (vgl. Abb. 2, sowie die Abb. 3 und 4) Gewichtsschalen angehängt werden, durch deren Belastung künstlich ein der Größe nach bekanntes Drehmoment auf die Wand ausgeübt wird, dessen Bestimmung nun mittels des Druckmessers, ganz als ob es sich um das unbekannte Umsturzmoment des Erddrucks handelte, erfolgt. Solche Proben wurden nicht nur vor Beginn der Versuche angestellt, sondern auch im Verlaufe derselben öfters

wiederholt, um sich fortdauernd von der Zuverlässigkeit der ganzen Vorrichtung zu überzeugen.

Die Drehung der Wand erfolgt, wie angegeben, um ein Stahlschneidenpaar, welches in den Kerben zweier kleiner Stahllager ruht; diese Schneiden liegen 12 cm unterhalb der Unterkante der Wand, und zwar genau in der Verlängerung der Hinterfläche derselben. Bei dieser Anordnung kann, wenn die Wand um diese Schneiden kippt, niemals ein schädliches Scheuern zwischen Wand und Kastenwänden bzw. -Boden stattfinden, vielmehr bewegt sich hierbei die Wand einfach von dem Kasten hinweg. Da die mit der Hinterfläche der Wand gleichlaufende Seitenkraft des Erddrucks gegen diese Drehachse keinen Hebelsarm hat, so ergibt sich aus dem beobachteten Momente unmittelbar die Größe der senkrecht zur Wandfläche gerichteten Seitenkraft des Erddrucks, indem der Angriffspunkt derselben als bekannt, nämlich auf ein Drittel der Wandhöhe liegend, anzunehmen ist. *)

Was nun die Ermittlung der anderen, der Wand parallel gerichteten Seitenkraft des Erddrucks anlangt, so könnte sie derart erfolgen, daß man die Wand, nach Senkung der sie stützenden Auflager, auf ein zweites, in derselben Höhe, aber weiter rückwärts gelegenes Schneidenpaar setzte (vgl. Abb. 5) und das Moment des Erddrucks, gegen diese zweite Drehachse, gegen welche die parallele Seitenkraft des Erddrucks nun ebenfalls einen Hebelsarm hat, bestimmte. Indessen würde dieses Verfahren, wie eine nähere Betrachtung zeigt, zu keinen brauchbaren Ergebnissen führen, vielmehr äußerst ungenaue, ja gänzlich falsche Werthe für diese Kraft ergeben. Bezeichnet nämlich bei senkrechter Wand H (Abb. 5) die wagerechte, v die senkrechte Seitenkraft des Erddrucks, M_I das Moment des Erddrucks gegen die erste, M_{II} das Moment desselben gegen die zweite Drehachse, endlich h_0 die Höhe, in welcher der Angriffspunkt des Erddrucks über der ersten bzw. zweiten Drehachse liegt, sowie d den Abstand der beiden Achsen von einander, so ist:

$$M_I = Hh_0$$

$$M_{II} = Hh_0 + Va,$$

daher:

$$V = \frac{M_{II} - M_I}{a}.$$

Es erscheint also V als der Unterschied der beiden beobachteten Momente. Da nun jedes dieser Momente unvermeidlich mit einem kleinen Fehler behaftet sein wird, so muß, falls nicht dieser Fehler zufällig bei beiden Momenten in demselben Sinne ausgefallen ist (z. B. sich beide etwas zu groß ergeben haben), für den Unterschied beider Größen nothwendigerweise ein größerer Fehler entstehen. Hat man z. B. das eine Moment gegen die Wirklichkeit um 3 bis 4 pCt. zu groß, das andere um ebenso viel zu klein gefunden, so erhält man bei dem hier vorliegenden gegenseitigen Verhältniß beider Größen, wie angestellte Proberechnungen zeigten, für den Unterschied bereits einen Fehler von 20 bis 25 pCt. Man würde also auf diese Weise zu keinen brauchbaren Werthen für die senkrechte Sei-

*) Zwar will Leygue durch seine bereits erwähnten Versuche gefunden haben, daß dieser Angriffspunkt nicht auf ein Drittel der Wandhöhe, sondern im allgemeinen höher (in manchen Fällen bis zur Mitte der gedrückten Fläche steigend) liege; indessen dürfte dieses, allen bisherigen Theorien widersprechende Ergebnis wohl lediglich eine Folge der Fehler sein, mit welchen seine mit sehr unvollkommenen Vorrichtungen gemachten Beobachtungen behaftet waren und so lange kein Vertrauen verdienen, als nicht andere, mißvollkommeneren Vorrichtungen angestellte Untersuchungen ein ähnliches Ergebnis liefern.

tenkraft des Erddrucks gelangen. Es ist daher, um diese Kraft mit möglichster Genauigkeit zu bestimmen, folgendes Verfahren eingeschlagen worden (vgl. Abb. 6): Oberhalb der senkrecht stehenden Wand und quer über dieselbe laufend, ist (nach Entfernung des vorderen, hierbei hinderlichen Wandarmes A , Abb. 2) der bisher zur Uebertragung des Drucks auf den Quecksilberspiegel benutzte Hebel H so gelagert, daß er sich mit der einen seiner beiden Endschnitten auf einen quer über den Kasten gestreckten Balken b , mit der anderen auf die Druckscheibe S des Druckmessers stützt. An die mittlere Schneide dieses Hebels ist dann die Wand mittels Zugstangen aufgehängt, sodafs sie, sobald man die sie stützenden Lager senkt, frei schwebend vor dem Kasten hängt. Oben und unten sind an der Wand wagerechte Schnüre xx angebracht, welche mit ihrem hinteren Endpunkte am Kasten befestigt sind und hier durch Plättchen und Keile beliebig angespannt werden können. Diese Schnüre sind indessen absichtlich nicht genau wagerecht, sondern etwas nach hinten fallend geführt, sodafs sie einer kleinen Bewegung der Wand nach abwärts keinen Widerstand entgegensetzen. Füllt man nun den Kasten mit Sand, und senkt die die Wand bis dahin stützenden Lager, so wird die wagerechte Seitenkraft des Erddrucks durch die Schnüre aufgenommen, während im senkrechten Sinne zwei Kräfte wirken, nämlich das Eigengewicht G der Wand und die unbekannt senkrechte Seitenkraft V des Erddrucks. Beide Kräfte zusammen werden eine gewisses Steigen der Quecksilbersäule hervorrufen. Da aber G bekannt ist, so kann man aus der Höhe, um welche die Quecksilbersäule steigt, unmittelbar auf die Größe der unbekannt Kraft V schließen.

3. Beschreibung der Einzeltheile der Versuchs-Vorrichtung.

1. Der Kasten.

Der zur Aufnahme des Sandes bestimmte, aus 3 cm starken Kiefernbohlen hergestellte Kasten hat, wie die Abb. 3 und 4 zeigen, im Längenschnitt eine trapezförmige Gestalt erhalten, und zwar beträgt die vordere Höhe 60 cm, die hintere 100 cm i. l., bei einer Länge des Kastens von 110 cm. Es hat diesen Zweck, bequemer zu den unter dem Boden liegenden, verstellbaren Schraubenlagern kommen zu können, ohne gezwungen zu sein, das den Kasten tragende Untergestell übermäßig hoch zu machen. Um den Kasten, dessen Breite 60 cm i. l. beträgt, an seinem vorderen, offenen Ende vor Ausbiegen zu schützen, läuft rings um ihn ein 7 cm im Geviert starkes Gurtholz, dessen vordere Enden mit Schlitz versehen sind, durch die ein Querbalken durchgesteckt ist, der mittels Keile angezogen werden kann. Dieser Querbalken trägt in seiner Mitte eine starke wagerecht stehende Schraube, durch welche man die den Kasten vorn abschließende drehbare Wand an die Seitenwände anpressen und so feststellen kann. *)

Um den Sand bequem aus dem Kasten auslassen zu können, ist in dem Kastenboden vorn in etwa 10 cm Abstand von der Wand ein schmaler, durch einen Schieber verschließbarer

*) Diese Vorrichtung bewährte sich bei den Versuchen nicht, weil die Schraube, wie die Beobachtungen am Mikroskop zeigten, beim Anziehen die Wand immer ein wenig von den Lagern in die Höhe hob, sodafs sie beim Lösen der Schraube vor Beginn eines Versuchs stets eine störende kleine Abwärtsbewegung machte; es wurden daher statt der Schrauben zwei Holzkeile benutzt, welche zwischen Wand und Querholz eingesteckt wurden.

Schlitz angebracht, durch welchen der Sand mittels eines darunter befestigten Blechtrichters in untergehaltene Säckchen läuft; eine bewegliche Klappe gestattet, den Trichter beliebig abzuschließen und dadurch das Auslaufen des Sandes zu unterbrechen.

Der Kasten ist mittels zweier 10 cm hoher Grundbalken auf eine 70 mm starke, schmiedeeiserne Vierkantwelle gelagert; kräftige Bügel und Schrauben verbinden Balken und Welle mit einander. Letztere ruht in Augenlagern, welche auf den oberen Balken eines 68 cm hohen, sehr kräftig gebauten Untergestells angeschraubt sind, und kann mittels Schnecke und Schneckenrad-Bogen beliebig gedreht werden. Die Drehung erfolgt in sehr bequemer Weise durch ein an der Schneckenwelle angebrachtes Schaltwerk mit Rechts- und Linksschaltung; mit Hilfe eines in dasselbe eingesteckten hölzernen Hebels kann man den Kasten auch im gefüllten Zustande durch Hin- und Herbewegen des Hebels leicht drehen und unter jedem gewünschten Winkel einstellen. Um dies mit möglichster Genauigkeit ausführen zu können, ist an der dem Schneckenrade gegenüber liegenden Seite des Kastens ein in Sechstelgrade getheiltes Messinghalbkreis angebracht, dessen Durchmesser so groß ist, daß man Zwölftelgrade noch bequem schätzen kann.

Um endlich den Kasten samt der Wand vor Beginn der Versuche genau wagerecht stellen zu können, ist das ganze Untergestell auf einen kräftigen Schwellenrahmen gesetzt, welcher wiederum auf drei starken Schrauben ruht.

2. Die Wand.

Die bewegliche, den Kasten vorn abschließende Wand hat eine Höhe von 60 cm bei ebenso großer Breite; sie besteht aus einem äußeren, aus 5 cm starken quadratischen Hölzern zusammengesetzten Rahmen, und aus der 1,5 cm starken, die eigentliche Wand bildenden Wandtafel; letztere ist mit dem Rahmen nicht fest verbunden, sondern in eine an demselben angebrachte Führung eingeschoben, sodaß man sie leicht auswechseln kann. Um zwischen Wand und Kastenwänden einen möglichst dichten Schluß zu erzielen, der auch nicht durch das unvermeidliche Werfen der Holztheile beeinträchtigt wird, sind sämtliche Berührungsflächen in Eisen hergestellt und diese Eisentheile derart mit dem Holz verbunden, daß sie an einem etwaigen Werfen desselben nicht Theil nehmen können. Zu diesem Zwecke ist die Innenfläche des Wandrahmens an der unteren, sowie an den beiden Seitenkanten mit kleinen Winkel-eisen gesäumt, welche zugleich als Führung für die einzuschiebende Wandtafel dienen, während die Vorderkanten des Bodens und der Seitenwände des Kastens mit 3 mm starken Blechen gesäumt sind, die 40 mm über diese Kanten hinausragen. Auf diese Weise schlägt überall Eisen gegen Eisen, und es ist gelungen, dauernd eine vollständige Dichtung der Fugen zu erreichen.

Die Wand stützt sich durch zwei kräftige, an ihre Vorderfläche angeschraubte schmiedeeiserne Arme auf die unterhalb liegenden, am Kastenboden befestigten Lager. Die Anordnung ist derart getroffen, daß diese Arme etwa 30 cm unter der Wandunterkante im rechten Winkel abgebogen und um rund 55 cm nach hinten verlängert sind; an ihren Enden tragen sie zwei Schneiden, welche zur Anhängung der die Gegengewichte aufnehmenden Gewichtsschalen bestimmt sind.

Die Anordnung der die Schneiden aufnehmenden Schraubenlager ist aus Abb. 7 ersichtlich. Der das eigentliche Lager bildende, oben mit einer Kerbe versehene kleine Stahlklotz ist auf vier Schrauben gesetzt, von denen die mittlere in den Lagerklotz unten eingelassen ist und als Stellschraube dient; man kann durch diese den zwischen zwei kleinen Führungsbacken beweglichen Klotz beliebig heben und senken. Die drei anderen Schrauben dienen als Stützschrauben und werden unter den Stahlklotz geprefst, sobald mittels der Stellschraube die richtige Einstellung erreicht ist. Die Anordnung ist so getroffen, daß der kleine Stahlklotz zwischen den Führungsbacken nicht ganz stramm geht, sondern daß hier, ebenso wie an der Stelle, wo die Stellschraube den Klotz faßt, etwas Beweglichkeit vorhanden ist; tritt nun während des Einstellens ein Klemmen des Klotzes in der Führung ein, so kann man es leicht durch Eingreifen mit der Hand beseitigen. Zugleich wird es hierdurch möglich, durch Anpressen der Stützschrauben die Kerbe des Lagers mit der zugehörigen Schneide zu vollständiger Berührung zu bringen, was sonst nur schwer zu erreichen wäre. Endlich ist bei jedem Lager auch noch eine Einstellung im wagerechten Sinne vorgesehen, zu welchem Ende der das Lager bildende Stahlklotz aus zwei Stücken zusammengesetzt ist, von denen das obere in einer schwalbenschwanzförmigen Führung des Unterstücks sich bewegt und mittels einer wagerechten Schraube eingestellt werden kann. Diese Vorrichtung hat hauptsächlich den Zweck, die erste Aufstellung zu erleichtern da sonst ein genaues Zusammenfallen der Lagerkerben mit den zugehörigen Schneiden nur schwer zu erreichen gewesen wäre. Die Schneiden haben eine Höhe von 21 mm bei einer Breite von 28 mm; sie sind sämtlich, gleich den sie aufnehmenden Lagerklötzen, aus gehärtetem Stahl hergestellt. Die Lager sind samt den sie stützenden Schrauben an zwei starken senkrechten Blechplatten befestigt, welche an die Innenseiten der den Kasten tragenden Grundbalken angeschraubt sind. Um diese Platten vor Ausbiegen zu schützen, sind sie vorn durch eine Querstange verbunden.

3. Der Druckmesser.

Der auf einem kräftigen Untergestell und einem leichteren, aufgesetzten Obergestell ruhende Druckmesser besteht aus einer gußeisernen 20 mm starken Platte von 340 mm im Geviert, welche auf drei Stellschrauben gesetzt und in ihrer Mitte mit einer angegossenen 20 mm tiefen cylindrischen Höhlung zur Aufnahme des Quecksilbers versehen ist. Die über den Quecksilberspiegel gespannte feine Kautschukhaut wird durch einen aufgelegten Prefsring von 45 mm Breite festgehalten. Ein gebogenes Stahlrohr verbindet die das Quecksilber enthaltende Vertiefung mit einer senkrechten, oben offenen Glasröhre von rund 600 mm Höhe, auf der eine Millimeter-Theilung von 500 mm Länge unmittelbar angebracht ist, was den Vortheil hat, daß eine etwaige Veränderung der Theilung durch die Wärme nicht berücksichtigt zu werden braucht, da der Ausdehnungswerth des Glases außerordentlich gering ist. Der für die Ablesung dienende Nonius nebst Lupe ist an einer röhrenförmigen Führung verschiebbar angebracht und gestattet, $\frac{1}{10}$ mm abzulesen und $\frac{1}{20}$ mm zu schätzen. Nach den bei den Präzisions-Barometern der meteorologischen Beobachtungsstellen gemachten Erfahrungen muß, um eine so weitgehende Genauigkeit der Ablesung zu erreichen, der innere Durchmesser der Glasröhre mindestens 8 mm betragen, welches Maß denn auch

hier gewählt ist. Der ganze Druckmesser ist in der rühmlichst bekannten Werkstatt des Mechanikers Fuess in Berlin ausgeführt, von der auch die Füllung desselben mit gereinigtem Quecksilber besorgt wurde. Bei dieser war selbstverständlich sorgfältig darauf zu achten, daß keine Luftschicht zwischen Quecksilber und Kautschukhaut verblieb.

Eine besondere Ueberlegung erforderte die Größe des Durchmessers, welchen man dem Quecksilberspiegel, bezw. der auf demselben liegenden Druckscheibe geben wollte. Wählt man diese Abmessung verhältnißmäßig klein, so genügt schon ein sehr geringer Druck, um das Quecksilber um die kleinste, eben noch meßbare Größe ($\frac{1}{10}$ mm) in die Höhe zu treiben, und die Genauigkeit der Messung wird daher eine große. Auf der anderen Seite wird aber, wie bereits früher auseinandergesetzt ist, die unvermeidliche schädliche Bewegung der Wand um so kleiner, je größer dieser Durchmesser gewählt wird. Beide Bedingungen widersprechen einander also, und es wurde daher für die Größe der Druckscheibe ein mittleres Maß gewählt, nämlich der Durchmesser des das Quecksilber aufnehmenden Cylinders = 130 mm gemacht, während der Druckscheibe ein um 2 mm kleinerer Durchmesser gegeben wurde. Die Fläche der letzteren ist daher:

$$F = \frac{\pi \cdot 128^2}{4} = \text{rund } 12800 \text{ qmm.}$$

Es entspricht also einem Atmosphärendruck von rund 128 kg eine Steighöhe des Quecksilbers von 760 mm, folglich entspricht der kleinsten noch meßbaren Steighöhe von $\frac{1}{10}$ mm ein Druck

$$P_{\min} = \frac{128}{760 \cdot 10} = 0,0169 \text{ kg.}$$

Es ist daher ein Druck von rund 17 gr mittels des Druckmessers noch meßbar, während die Hälfte dieser Größe noch zu schätzen ist, was in Anbetracht der verhältnißmäßig großen Kräfte, um die es sich bei den Versuchen handelt, eine sehr bedeutende Genauigkeit ist.

Die Anordnung des Hebelwerks, durch das der auf die Wand ausgeübte Druck auf den Druckmesser übertragen wird, ist schon besprochen worden; erwähnt mag noch werden, daß die beiden Zugstangen, welche die Verbindung zwischen dem von der Wand ausgehenden Arme und dem auf den Quecksilberspiegel drückenden Hebel herstellen, an ihren oberen Enden mit feinen Gewinden und Schraubenmuttern versehen sind, sodafs man vor Beginn des Versuches jedesmal ihre Länge genau so regeln kann, daß das unten hängende Plättchen mit der zugehörigen Schneide eben zur Berührung kommt, was sich durch das Steigen der Quecksilbersäule sofort bemerklich macht. Auch bei geneigter Stellung der Wand läßt sich diese Vorrichtung benutzen, indem das den Druckmesser tragende Gerüst dann entsprechend verschoben wird. Ist nun die Wand nach hinten geneigt, also der Abstand zwischen den beiden, durch die Zugstangen zu verbindenden Schneiden verkürzt, so benutzt man dieselben Zugstangen und stellt die Verkürzung einfach dadurch her, daß man die Schraubenmuttern weiter anzieht und die oberen Enden der Zugstangen (welche auf dem größten Theil ihrer Länge mit Gewinde versehen sind) über dieselben herausragen läßt; ist umgekehrt die Wand nach vorn geneigt, also dieser Abstand vergrößert, so benutzt man ein zweites Paar Zugstangen, deren Länge so bemessen ist, daß dieselbe der größten vorkommenden Entfernung der beiden Schneiden entspricht.

4. Ermittlung der Verhältnißzahlen und Prüfung der Vorrichtung.

Bevor zu den Versuchen geschritten werden konnte, handelte es sich zunächst darum, die Verhältnißzahlen der Vorrichtung zu bestimmen, sowie letztere sowohl in ihren einzelnen Theilen, wie auch im ganzen einer genauen Prüfung auf ihre Richtigkeit und Zuverlässigkeit zu unterziehen.

Zu diesem Zwecke wurde zunächst das Gewicht der Wand nebst allen daran befestigten Eisentheilen auf einer genauen Wage ermittelt; dies ergab sich, einschließlic der eingeschobenen hölzernen Wandtafel, zu 37,317 kg.

Ferner handelte es sich darum, die Abstände der in die Wandarme eingesetzten Schneiden von einander sowie von der Unterkante der Wand mit Genauigkeit fest zu stellen, da sich aus diesen Abständen die Hebelsarme für die später zu bestimmenden Momente des Erddrucks und der Gegengewichte ergeben. Weil es bei der Ausführung doch nicht gelungen wäre, diesen Schneiden gleich von vorn herein genau die beabsichtigten Abstände zu geben, so waren sie absichtlich nur annähernd richtig eingesetzt worden, und die genaue Ermittlung dieser Maße erfolgte nun nachträglich mittels eines Kathetometers, welches der Vorsteher der mit der Technischen Hochschule in Charlottenburg verbundenen mechanisch-technischen Versuchsanstalt, Herr Professor Martens, die Güte hatte, dem Verfasser zur Verfügung zu stellen. Die Wand wurde zu diesem Zwecke herausgenommen, freistehend aufgestellt, und hierauf wurden mittels des Instrumentes, welches $\frac{1}{25}$ mm angab, sowohl die wagerechten als auch die senkrechten Abstände der Schneiden von einander und von der Unterkante der Wand gemessen; die letzteren Abstände sind bei geneigter Stellung der Wand zur Ermittlung der Hebelsarme für die zu bestimmenden Momente erforderlich. In gleicher Weise wurden die Abstände der drei, in dem großen Hebel sitzenden Schneiden bestimmt, der, quer über den Druckmesser laufend, den Druck auf den Quecksilberspiegel überträgt.

Zur Ermittlung des Schwerpunktes der Wand, dessen Kenntniß erforderlich war, um das von dem Eigengewicht der Wand gegen die untere Drehachse ausgeübte Moment berechnen zu können, wurde die Wand (vgl. Abb. 2), nachdem die Wandtafel eingeschoben und die Verbindung mit dem Druckmesser durch Entfernung der Zugstangen \approx unterbrochen worden war, genau senkrecht eingestellt. Hierauf wurden auf das hintere Schneidepaar Nr. II die beiden zur Aufnahme der Gegengewichte bestimmten Gewichtsschalen aufgehängt und so lange belastet, bis die Wand, die zunächst das Bestreben hatte, nach vorn zu kippen, sich im Gleichgewicht befand, also eben frei stand. Es liefs sich dies mit großer Genauigkeit feststellen; ein Gewicht von 2 gr auf jeder der beiden Schalen mehr oder minder genügte, um die Wand entweder zum Stehen, oder zum langsamen Umklappen zu bringen. Da das Gewicht der Wand und ebenso der Abstand der Schneiden I von den Schneiden II bekannt war, so konnte man aus den aufgelegten Gegengewichten für diese Lage der Wand sofort das Moment derselben gegen die untere Drehachse berechnen, woraus sich der Schwerpunktsabstand von dieser Achse zu 48,83 mm ergab. Hierauf wurde der ganze Kasten samt der Wand um 20° nach vorn gedreht, und die Wand in dieser neuen Lage wieder, wie oben angegeben, ausgewogen; es ergab sich jetzt der Schwerpunktsabstand zu 110,69 mm. Nachdem so die Lage zweier Schwerlinien bekannt war, konnte man hieraus leicht die senkrechte Höhe des

Schwerpunkts über der ersten Drehachse berechnen; dieselbe wurde zu 189,53 mm ermittelt. Zur Probe der Richtigkeit drehte man den Kasten, nachdem die Gewichtsschalen abgenommen waren, soweit nach rückwärts, bis die Wand sich wieder im Gleichgewichtszustande befand, also weder das Bestreben hatte, nach rückwärts noch nach vorwärts zu fallen; diese Lage, welche sich mit großer Sicherheit feststellen liefs, trat ein, als die Hinterfläche der Wand mit der Senkrechten einen Winkel von $14^{\circ} 27'$ bildete, während dies nach der Rechnung bei $14^{\circ} 26' 30''$ der Fall sein sollte. Die Bestimmung des Schwerpunkts war also mit großer Genauigkeit gelungen.

Schliesslich wurde noch eine weitere Untersuchung vorgenommen, um zu prüfen, ob bei dem Kippen der Wand um ihren unteren Drehpunkt auch die nöthige Empfindlichkeit vorhanden sei, ob also die freie Beweglichkeit der Wand nicht etwa durch störende Widerstände infolge Klemmens oder dergl. gehindert werde. Zu diesem Zwecke wurden sowohl auf das hintere Schneidenpaar Nr. II, als auch auf das vordere Nr. III (vgl. Abb. 2) Gewichtsschalen aufgehängt und die hinteren Schalen zunächst soweit belastet, bis das Ganze bei leeren vorderen Schalen sich genau im Gleichgewicht befand; hierauf wurde untersucht, ein wie großes Gewicht man auf die vorderen Schalen auflegen mußte, um die Wand zum Umklappen zu bringen. Dieses Verfahren wurde dann für verschiedene Belastungen der vorderen Schalen in gleicher Weise wiederholt, wobei immer auf die hinteren Schalen gleichzeitig soviel Gegengewichte aufgelegt wurden, als rechnermässig zum Gleichgewicht erforderlich waren. Es zeigte sich übereinstimmend, dafs ein sehr geringes Uebergewicht genügte, um die beabsichtigte Wirkung hervorzubringen. Legte man auf jede der beiden vorderen Schalen ein Mehrgewicht von 1 bis 2 gr auf, so klappte die Wand langsam um, entfernte man dieses Gewicht, so blieb sie wieder stehen. Die Empfindlichkeit war also eine große.

Was ferner im allgemeinen die störenden Einflüsse betrifft, welche bei dem Druckmesser zu berücksichtigen sind und eine Berichtigung des Beobachtungsergebnisses nothwendig machen könnten, so kommen in dieser Hinsicht in Betracht: 1. die Capillarität, 2. die Aenderung der Wärme während der Versuche, 3. die Aenderung des Luftdrucks während derselben — während der störende Einfluss der zu überwindenden Dehnbarkeit der Kautschukhaut bei den hier eintretenden außerordentlich geringen Bewegungen verschwindend klein ist und vernachlässigt werden kann.

1. Die Wirkung der Capillarität besteht darin, dafs die Quecksilberkuppe infolge der starken Oberflächenspannung gegen den dem äufseren Drucke entsprechenden Stand etwas herabgedrückt werden wird. Eine Berücksichtigung dieses Fehlers ist jedoch im vorliegenden Falle nicht erforderlich, da es sich bei den Versuchen immer um den Unterschied zweier Ablesungen, nämlich der Anfangsablesung, bevor die Wand frei gemacht ist, und der Endablesung, nachdem der Erddruck zur Wirkung gelangt ist, handelt, der Einfluss der fraglichen Senkung sich also aufhebt. Allerdings ist hierbei die Vorsicht zu beobachten, dafs man die Kuppe in beiden Fällen unter denselben Verhältnissen entstehen läfst, damit sie sich in gleicher Weise ausbilde. Da bei der zweiten, das Ergebnifs des Versuchs liefernden Ablesung die Kuppe sich unter Hebung des Quecksilbers bildet, so muß dies auch bei der ersten, dem Versuche vorhergehenden Ablesung der Fall sein; es ist daher

bei den Versuchen stets so verfahren worden, dafs, bevor man die erste, den Nullstand der Quecksilbersäule gebende Ablesung machte, die Kuppe immer erst etwas angehoben wurde, was einfach durch Auflegen eines kleinen Gewichtes auf die über dem Quecksilberspiegel liegende Druckscheibe geschah.

2. Was den Einfluss einer etwa eintretenden Wärmeänderung während des Versuchs anlangt, so ist zu berücksichtigen, dafs die Druckscheibe sowie der auf derselben ruhende Hebel zunächst durch ihr eigenes Gewicht die Quecksilbersäule um ein Gewisses anheben werden; diese wird daher bei jeder Wärme im Standrohr um soviel höher stehen, als diesem Gewichte entspricht. Aendert sich nun die Wärme, z. B. steigt sie, so wird sich das Quecksilber im Cylinder wie im Standrohr ausdehnen; wäre der Cylinder fest verschlossen, so würde sich also der Stand im Rohre, wie bei einem Thermometer, entsprechend erhöhen; da dies aber nicht der Fall ist, die Druckscheibe vielmehr sich beliebig nach oben heben kann, so wird sie ein wenig steigen, und zwar wird die Gröfse dieser Hebung, da die räumliche Ausdehnung des Quecksilbers für $100^{\circ} \text{C.} = \frac{1}{55}$ ist und die Tiefe des Cylinders 20 mm beträgt, für 1°C.

$$\Delta = \frac{20}{5500} = 0,0036 \text{ mm}$$

betragen, wobei die Ausdehnung der geringen, im Standrohr befindlichen Quecksilbermenge unberücksichtigt bleiben kann. Entsprechend wird also auch die Säule im Standrohr steigen; selbst wenn man daher annimmt, dafs während des Versuchs eine Aenderung der äufseren Wärme um mehrere Grade eintritt, so würde die daraus entstehende Störung dennoch verschwindend klein sein und keiner Berücksichtigung bedürfen.

3. Zu einem gleichen Ergebnifs gelangt man in Bezug auf den äufseren Luftdruck, wie die nachfolgende Ueberlegung zeigt. Aendert sich der Luftdruck während eines Versuchs nicht, so ist es, da das Standrohr oben offen ist, gleichgültig, welches seine Gröfse an und für sich ist, da es sich bei den Messungen lediglich um Unterschiede im Quecksilberstande handelt. Aendert sich dagegen der Barometerstand während eines Versuchs, so fragt es sich zunächst, ob die Kautschukhaut luftdicht oder luftdurchlässig ist. Im ersteren Fall sind wieder zwei Annahmen möglich. Entweder man nimmt an, dafs zwischen Haut und Quecksilberspiegel keine Luftschicht vorhanden sei — alsdann entsteht, da das Standrohr oben offen ist, eine gleich große Zunahme des Drucks auf die Scheibe wie auf die Quecksilbersäule, sodafs alles unverändert bleibt; oder man nimmt an, dafs zwischen Haut und Quecksilberspiegel eine Luftschicht eingeschlossen sei, dann wird bei der Zunahme des äufseren Luftdrucks eine kleine Zusammendrückung dieser Luftschicht stattfinden, bis dieselbe die größere Spannung der äufseren Luft angenommen hat. Indessen wird hierdurch nur eine verschwindend kleine Hebung der Quecksilbersäule eintreten. Das Ergebnifs ist daher, dafs in beiden Fällen eine Berücksichtigung des Barometerstandes nicht erforderlich ist. — Will man annehmen, dafs die Kautschukhaut luftdurchlässig sei, so ist eine Aenderung des äufseren Luftdrucks offenbar erst recht von keinem Einfluss auf den Stand des Quecksilbers.

Indem nun weiter zur näheren Untersuchung des Druckmessers geschritten wurde, handelte es sich hierbei namentlich darum:

1. festzustellen, ob das Steigen der Quecksilbersäule thatsächlich genau im gleichen Verhältnisse mit der Zunahme des Drucks auf den Quecksilberspiegel erfolge, und

2. die Größe dieser Steigung für einen Druck von 1 kg, also die Verhältniszahl der Vorrichtung zu bestimmen.

Beide Untersuchungen wurden gleichzeitig, und zwar in folgender Weise ausgeführt. Der auf die Druckscheibe wirkende Hebel H (vgl. Abb. 2) wurde eingelegt und auf die an seinem vorderen Ende befindliche Schneide (nach Entfernung der hier hängenden Zugstangen xx) eine Gewichtsschale angehängt. Durch das Eigengewicht derselben stieg die Quecksilbersäule um ein Gewisses, welcher Stand als Nullstand bezeichnet wurde. Nun legte man auf diese Gewichtsschale so viel Gewichte, daß nach dem bekannten Verhältniß der Hebelsarme der hierdurch erzeugte Druck auf den Quecksilberspiegel gerade 2 kg betrug, und beobachtete dann den neuen Stand der Quecksilbersäule. In dieser Weise wurde, immer von 2 zu 2 kg steigend, fortgefahren, bis ein Druck von 20 kg erreicht war. Darüber hinauszugehen erschien nicht erforderlich, weil größere Drücke bei den Versuchen kaum vorkommen werden. Zwischen je zwei Belastungen wurde jedesmal entlastet, d. h. es wurden alle auf der Schale befindlichen Gewichte einen Augenblick abgenommen, sodafs die Quecksilbersäule wieder auf den Nullpunkt zurückging. Es zeigte sich, daß sich dieser ursprüngliche Stand der Säule stets mit großer Genauigkeit wiederherstellte, störende Einflüsse in dieser Hinsicht also nicht vorlagen. Dieses Verfahren wurde viermal wiederholt, aus den so gefundenen Steighöhen (welche unter einander nur ganz geringe Abweichungen zeigten) die Mittelwerthe gebildet und aus diesen diejenige Steighöhe berechnet, welche sich den Beobachtungen am besten anschloß. Dieselbe ergab sich zu 5,455 mm für einen Druck von 1 kg auf den Quecksilberspiegel. Legte man diesen Werth den beobachteten Steighöhen zu Grunde, und berechnete hieraus rückwärts die wirksam gewesenen Drücke, so ergaben sich nur Abweichungen von 0,14 bis 0,55 pCt. gegenüber den wirklich vorhanden gewesenen Drücken, sodafs sich also die Genauigkeit des Druckmessers als eine sehr befriedigende ergab.

Es entspricht daher einer Steighöhe von 1 mm ein Druck auf den Quecksilberspiegel von $\frac{1}{5,455} = 0,1834$ kg, welcher Werth allen nachfolgenden Untersuchungen zu Grunde gelegt wurde.

Schließlich folgte noch eine Untersuchung, ob die Steighöhe auch dann mit dem Drucke genau gleichmäfsig wächst, wenn der letztere nicht, wie bisher, sprungweise, sondern allmählich zunimmt. Zu diesem Zwecke wurde auf die Gewichtsschale fünfmal hintereinander ein Gewicht von je 120 gr aufgelegt, ohne dazwischen zu entlasten, und die zugehörigen Steighöhen beobachtet. Dieser Versuch wurde zweimal mit einer Anfangsbelastung der Schale = 0, zweimal mit einer solchen = 6 kg wiederholt. Es zeigte sich, daß der Unterschied zweier auf einanderfolgenden Steighöhen, welcher rechnungsmäfsig 0,88 mm betragen sollte, zwischen 0,85 und 0,90 mm schwankte, also dem berechneten Werthe fast genau entsprach.

Die Angaben des Druckmessers können daher als durchaus zuverlässige gelten. Erwähnt mag indessen werden, daß dieses günstige Ergebnifs erst nach mehrfachen Abänderungen der ursprünglichen Anordnung erreicht wurde, die zwar nur in Kleinigkeiten bestanden, aber von erheblichem Einflufs auf die Genauigkeit waren. So erwies sich namentlich anfangs der Spielraum zwischen der Druckscheibe und dem Pressringe als zu groß und mußte bis auf $\frac{1}{2}$ mm verkleinert werden, weil sonst

das geprefte Quecksilber diesen freien Ring der Kautschukhaut übermäfsig ausdehnte, wodurch die Richtigkeit der Steighöhen merklich beeinflusst wurde.

Es konnte nun schließlichsich dazu geschritten werden, den Druckmesser mit der beweglichen Wand zu verbinden und das Zusammenwirken der ganzen Vorrichtung zu prüfen. Da das hierbei beobachtete Verfahren indessen genau dasselbe ist, welches später bei der Ermittlung des Erddrucks selbst angewandt wurde, so kann die Besprechung der Ergebnisse dieser Prüfung hier übergangen werden.

5. Der Versuchssand.

Als Stoff für die Versuche wurde der bei der Prüfung von Portland-Cement benutzte sogenannte „Normalsand“ gewählt, weil man sicher sein konnte, daß dieser Sand infolge seiner sorgfältigen Behandlung vollkommen frei von allen lehmigen und erdigen Bestandtheilen, daher ganz cohäsionslos, auch bei Mehrbedarf stets wieder in derselben Beschaffenheit leicht erhältlich sei. Man gewinnt diesen Sand, wie bekannt, dadurch, daß man reinen Quarzsand durch ein Sieb von 60 Maschen auf 1 qcm siebt, wodurch die gröbsten Theile ausgeschieden werden, und dann aus dem so erhaltenen Sande mittels eines Siebes von 120 Maschen auf 1 qcm noch die feinsten Theile entfernt, sodafs der schließlich gewonnene Sand etwa gerade die Mitte zwischen grobem und feinem Sande hält. Die zu den Versuchen angeschaffte Sandmenge wurde zunächst mehrere Monate in dem ganz trockenen und wohl geheizten Versuchsraume gelagert, damit alle etwa angesogene Feuchtigkeit beseitigt werde.

Vor Beginn der Versuche wurde das Gewicht der Raumeinheit, sowie der natürliche Böschungswinkel des Sandes bestimmt. Das erstere ergab sich, wenn man ein Litergefäß mit Sand füllte, ohne es zu schütteln, zu 1448 bis 1478 gr, im Mittel von vier Versuchen zu 1461 gr. Indessen war dieses Gewicht in der Schüttung natürlich bedeutend größer, im einzelnen jedoch, wie angestellte Versuche zeigten, ganz von der Höhe und Art der Aufschüttung abhängig, sodafs sich auch nicht annähernd ein Durchschnittswerth, der für alle Fälle gepafst hätte, angeben liefs. Es blieb daher nichts übrig, als vor Beginn einer Versuchsreihe jedesmal die ganze, zum Einschütten in den Kasten bestimmte Sandmasse, welche zu diesem Zwecke in kleine Säckechen gefüllt wurde, auf einer Decimallwaage zu wiegen, und so den für die betreffende Schüttungshöhe gültigen Einheitswerth zu bestimmen; derselbe schwankte je nach der Höhe der Schüttung zwischen 1586 und 1627 kg für 1 cbm Sand.

Die Ermittlung des natürlichen Böschungswinkels des Sandes geschah in einfacher Weise derart, daß der Sand in einen Kasten von 35 cm Höhe, 31 cm Breite und 75 cm Länge geschüttet wurde, dessen Boden vorn mit einem einige Centimeter breiten Schieber zum Auslassen des Sandes versehen war. Nachdem der Kasten mittels einer Libelle sorgfältig wagerecht gestellt und bis zu seinem Rande mit Sand gefüllt war, wurde der Schieber schnell und möglichst ohne Erschütterungen herausgezogen, sodafs ein Theil des Sandes abfloß. Die dadurch entstehende Böschung, welche sich immer sehr regelmäfsig, vollkommen eben und genau unter demselben (durch einen Bleifederstrich an der inneren Seitenwand des Kastens bezeichneten) Neigungswinkel ausbildete, wurde gemessen, woraus sich die

Tangente des Böschungswinkels ergab. Dieselbe bestimmte sich aus sechs Versuchen übereinstimmend zu

$$\operatorname{tg} \varphi = 0,667,$$

daher ist der natürliche Böschungswinkel selbst:

$$\varphi = 33^{\circ} 42'.$$

Es handelte sich schliesslich noch darum, den Reibungswinkel zwischen Wand und Erde $= \varphi_1$ zu bestimmen. Da die beabsichtigten Versuche den Zweck hatten, festzustellen, in wie weit die Theorie des unbegrenzten Erdreichs auf Stützwände anwendbar sei, so erschien es wünschenswerth, der Hinterfläche der Wand einen solchen Rauigkeitsgrad zu geben, dass dieser Winkel gerade gleich dem natürlichen Böschungswinkel, also $\varphi = \varphi_1$ würde. Die Erfüllung dieser Bedingung machte indessen anfangs Schwierigkeiten; der Versuch, dies dadurch zu erreichen, dass man die Hinterfläche der Wand mit Leim bestrich und hierauf dick mit Sand bestreute, erwies sich als unbrauchbar, da die Reibungsziffer für diese Wandfläche einen nicht unerheblich (um etwa 6 pCt.) zu kleinen Werth ergab, indem offenbar der zwischen den Sandkörnern sitzende Leim den Rauigkeitsgrad etwas verringerte. Ein günstigeres Ergebniss wurde erst erzielt, als man die Wand an ihrer Hinterfläche mit grober Schmirgelleinwand bekleidete; die Reibungsziffer schwankte jetzt zwischen 0,651 als niedrigstem, und 0,694 als höchstem Werth, und ergab sich im Mittel aus zehn Versuchen

$$\operatorname{tg} \varphi_1 = 0,666,$$

also fast genau so gross, wie beabsichtigt. Diese so bekleidete Wandtafel wurde nun bei allen nachfolgenden Versuchen benutzt.

Die Bestimmung der Reibungsziffer geschah mittels einer kleinen Hilfsvorrichtung, welche in Abb. 8 im Längenschnitt dargestellt ist. Auf einem Schwellwerk aus leichten Hölzern ist eine hölzerne Platte A von 45 cm Länge und 30 cm Breite gelagert, um welche ringsherum eine Leiste läuft, die einen niedrigen Rand bildet. In diesen letzteren passt ein 8 cm hoher Rahmen B aus dünnen Brettchen, der an den Seiten mit zwei Griffen versehen ist. Füllt man den so entstehenden Kasten mit Sand, streicht die Oberfläche mit einem Lineal glatt und hebt den Rahmen vorsichtig in die Höhe, so läuft der Sand von den Böschungen ab und es bleibt eine vollkommen ebene Sandoberfläche zurück. Auf diese wird nun die Wandtafel (die der Bequemlichkeit halber aus zwei der Höhe nach getrennten Theilen besteht, deren jeder also 30 cm hoch und 60 cm breit ist) mit ihrer inneren, mit Smirgelleinwand überzogenen Fläche gelegt, und mit Gewichten belastet. Es handelt sich nun darum, die Kraft zu messen, welche zu einer Verschiebung dieser Tafel auf der Sandoberfläche nothwendig ist, indem sich aus dem Verhältniss derselben zum Wandgewicht unmittelbar die Reibungsziffer ergibt. Dies erfolgt mittels eines kleinen Winkelhebels C , der aus einer 40 cm langen Welle d besteht, die an ihren Enden mit schneidenförmigen Zapfen versehen ist, welche in den Kerben zweier kleiner, auf den Grundbalken der Vorrichtung aufgeschraubter Lager ruhen; an ihren Enden trägt diese Welle zwei senkrecht stehende Arme ee , von denen Zugdrähte xx nach der Wand laufen, während ein in der Mitte der Welle angebrachter wagerechter Arm f eine Gewichtsschale g trägt. Sowohl die Drähte, als auch die Gewichtsschale greifen an kleinen Schneiden an, sodass nirgend Reibung entsteht, wenn der Hebel umklappt, den man ausserdem bei Beginn des Versuchs mittels einer Stellschraube h

genau senkrecht einstellen kann. Die Messung der Reibungsziffer geschah (nachdem das Uebersetzungsverhältniss des Hebels durch Messung der Schneidenabstände mittels des Kathetometers genau ermittelt worden war) nun derart, dass auf die Gewichtsschale g ein Blechgefäss gesetzt und in dieses, nach Entfernung der Stellschraube h , so lange Schrot eingeschüttet wurde, bis sich die auf der Sandfläche liegende Wandtafel in Bewegung setzte, und der Hebel umklappte. Diese Versuche wurden bei verschiedenen Belastungen der Wandtafel, welche, einschliesslich des Eigengewichts derselben, zwischen 6 und 12 kg schwankten, durchgeführt, und ergaben im Mittel von zehn Versuchen für die Reibungsziffer den oben angegebenen Werth von 0,666, wobei die grösste Abweichung der Versuche untereinander $6\frac{1}{2}$ pCt. betrug.

6. Das bei den Versuchen beobachtete Verfahren.

Was das bei den Versuchen beobachtete Verfahren anlangt, so kommen hierbei hauptsächlich folgende Punkte in Betracht:

- a) die Art der Füllung des Kastens mit Sand,
- b) die Berücksichtigung der Reibung des Sandes an den Seitenwänden des Kastens,
- c) die Messung der während des Versuchs eintretenden Bewegung (bezw. Drehung) der Wand,
- d) die Art, in welcher die hinteren, die Gegengewichte tragenden Schalen allmählich entlastet werden und der Erddruck auf den Druckmesser übertragen wird.

a) Die Füllung des Kastens mit Sand.

Um brauchbare und bei Wiederholung desselben Versuchs nur wenig von einander abweichende Ergebnisse zu erhalten, war darauf Bedacht zu nehmen, die Füllung des Kastens mit Sand in einer möglichst gleichmässigen, alle Zufälligkeiten ausschliessenden Weise erfolgen zu lassen. Hätte man diese Füllung durch Aufschüttung des Sandes mit der Hand vornehmen wollen, so wären die dabei eintretenden Unregelmässigkeiten unvermeidlich sehr grosse geworden, sie musste deshalb auf mechanische Weise geschehen, derart, dass sie das eine Mal genau wie das andere erfolgte. Zu diesem Zwecke wurde ein Füllkasten von 15 cm Höhe, der im übrigen dieselbe Länge und Breite hatte wie der Versuchskasten, hergestellt und auf den letzteren aufgesetzt. Der Boden dieses Kastens wurde von einer Anzahl schmaler Schieber gebildet, die sich zwischen Leisten bewegten und leicht heraus zu ziehen waren. Dieser Kasten wurde bis zum Rande mit Sand gefüllt und abgestrichen, worauf die Schieber von zwei Personen gleichzeitig möglichst schnell und gleichmässig herausgezogen wurden, sodass der Sand in den unteren Kasten fiel. Um dieses Herausfliessen noch langsamer und gleichmässiger zu machen, war unmittelbar über den Schiebern ein Drahtnetz gespannt, dessen Maschenweite so gewählt war, dass es den Sand nicht an dem Durchfallen hinderte, aber seine Bewegung langsamer und gleichmässiger machte. Nachdem sich der Füllkasten entleert hatte, wurde das eben beschriebene Verfahren so oft wiederholt, bis die gewünschte Höhe der Schüttung erreicht war.

Die Entleerung des Kastens nach beendeter Versuche geschah, wie schon erwähnt, durch Oeffnen des Schiebers, welcher in dem Kastenboden in der Nähe der Wand angebracht war; ein Blechtrichter, welcher die dadurch frei gewordene Oeffnung umschloß, leitete den Sand in untergehaltene kleine Säckchen

von etwa 12 bis 15 kg Inhalt. Mittels einer in diesem Trichter angebrachten drehbaren Klappe konnte man das Ausfließen des Sandes beliebig unterbrechen.

b) Reibung des Sandes an den Seitenwänden des Kastens.

Die Größe des Einflusses, den die Reibung des Sandes an den Seitenwänden des Kastens auf das Versuchsergebnis hat, wurde, wie dies schon bei den älteren Versuchen dieser Art geschehen ist, derart bestimmt, daß in der Mitte des Kastens eine Mittelwand parallel den Seitenwänden eingesetzt, der Kasten gefüllt, und die Versuche zunächst mit der Mittelwand angestellt wurden; hierauf wurde diese entfernt, die Schüttung erneuert und eine neue Versuchsreihe ohne Mittelwand gemacht. Indem im ersteren Falle der Sand sich an vier, im letzteren nur an zwei Seitenflächen reibt, muß die Zunahme, die sich für das Moment des Erddrucks im zweiten Falle ergibt, offenbar den Einfluß der Reibung des Sandes an der Mittelwand, oder, was dasselbe ist, an den beiden Seitenwänden des Kastens auf dieses Moment darstellen. Als Mittelwand wurde eine Zinktafel von nur 1 mm Stärke benutzt, welche durch kleine im Innern des Kastens angeschraubte Winkel und außerdem durch wagerechte Steifen an ihrer Oberkante in ihrer Lage gehalten wurde. Da der Sand fast ganz gleichmäßig aus dem Füllkasten fiel, trat eine Verbiegung dieser Wand während des Füllens trotz ihrer geringen Stärke in merklicher Weise nicht ein; es entstand aber hierdurch der Vortheil, daß man bei der im Verhältniß zur Breite des Kastens (594 mm) fast verschwindend geringen Stärke der Mittelwand die Breite der Schüttung bei den Versuchen mit und ohne Mittelwand als gleich annehmen konnte, wodurch die Berechnung des Erddrucks sich vereinfachte. Selbstverständlich wurden die Seitenwände des Kastens innen ebenfalls mit Zinkblech bekleidet.

c) Messung der Wandbewegung.

Um den Erddruck auf den dem Ruhezustand der Wand entsprechenden Werth zurückführen zu können, war es, wie bereits in der Einleitung auseinandergesetzt ist, nothwendig, denselben als Function der Wandbewegung darzustellen, also bei jedem Versuche die Größe der Wandbewegung zu beobachten, und für etwa vier oder fünf verschiedene Werthe derselben die zugehörigen Momente des Erddrucks zu bestimmen. Die zusammengehörigen Werthe von Moment und Wandbewegung wurden dann aufgezeichnet und durch Verlängerung der so gefundenen Curve nach rückwärts der Nullwerth des Moments bestimmt. Zur Messung der Wandbewegung, bei welcher es sich ja nur um Bruchtheile eines Millimeters handelt, wurde an der einen Seitenwand des Kastens, der Oberkante der Wand gegenüber, ein mit einer Mikrometerschraube versehenes Mikroskop so angeschraubt, daß es auf die feine Theilung einer kleinen, an der Oberkante der Wand befestigten Silberplatte gerichtet war. Die Drehung der Schraube um einen Theilstrich der auf der Schraubentrommel angebrachten Theilung entsprach einer Verschiebung des Fadenkreuzes im Mikroskop um $\frac{1}{800}$ mm; wenn nun auch wegen der Unsicherheit der Sehnlinie diese Größe in Wirklichkeit nicht genau abzulesen war, so konnte doch eine Bewegung der Wand um vier Theilstriche, also um $\frac{1}{200}$ mm, mit vollkommener Sicherheit bestimmt werden. Bei den Versuchen schwankte die Größe der zu messenden Wandbewegung zwischen 0,04 und etwa 0,30 mm.

d) Entlastung der hinteren Gewichtsschalen.

Vor Beginn eines jeden Versuches wurden die beiden hinteren, auf den Schneiden II hängenden Gewichtsschalen (vgl. Abb. 2), durch deren Belastung die Wand an den Kasten angepreßt und der Erddruck aufgehoben wird, zunächst absichtlich übermäßig belastet, sodafs der entstehende Erddruck hierdurch jedenfalls mehr als aufgewogen wurde. Es handelte sich nun darum, diese Belastung während des Versuchs allmählich so weit zu verringern, daß ein Theil des Erddrucks auf den Druckmesser übertragen und das Quecksilber zum Steigen gebracht wurde; während dieses Vorganges waren in vier bis fünf aufeinander folgenden Augenblicken die Höhe der Steigung sowie die gleichzeitig entstehende Wandbewegung abzulesen.

Diese Uebertragung des Drucks mußte ganz allmählich und vollkommen stofffrei erfolgen, denn bei einer plötzlichen Entlastung der Gewichtsschalen oder bei einer Erschütterung derselben würde die Wand unvermeidlich über die Gleichgewichtslage mehr oder minder weit hinausgeschossen sein und hätte die Quecksilbersäule übermäßig in die Höhe getrieben; eine nachträgliche Rückwärtsbewegung der Wand bis zur Gleichgewichtslage wäre aber unmöglich gewesen, da hierbei der passive Erddruck hätte überwunden werden müssen. Außerdem mußte die Anordnung so getroffen werden, daß man jederzeit die Größe der noch auf den Gewichtsschalen verbliebenen Gewichte bestimmen konnte, ohne dieselben von den Schalen zu entfernen, da aus diesen Gewichten und der gleichzeitig eingetretenen Steigung der Quecksilbersäule das Moment des Erddrucks in jedem Augenblicke berechnet werden mußte.

Die Lösung dieser Aufgabe, von deren Gelingen der ganze Erfolg der Versuche abhing, bot anfangs beträchtliche Schwierigkeiten. Der zuerst gemachte Versuch, dies durch Aufsetzen von mit Schrot gefüllten Blechkästen auf die Gewichtsschalen zu erreichen, aus denen nach Oeffnen eines Schiebers das Schrot herauslief, erwies sich als unbrauchbar, weil die hierbei entstehende Erschütterung der Schalen eine zu große war, auch die letzte der oben gestellten Bedingungen bei diesem Verfahren sich nicht erfüllen liefs. Es wurde daher zur Wasserbelastung geschritten, die sich als sehr brauchbar erwies, und zwar wurde hierbei in folgender Weise verfahren. Auf die Gewichtsschalen wurden zwei Blechkästen, deren jeder 15 kg Wasser faßte, gesetzt; dieselben waren vorn mit Ausflußöffnungen versehen, sodafs man das Wasser allmählich auslassen konnte. Um jedoch hierbei jede Erschütterung zu vermeiden, waren die diese Oeffnungen verschließenden Hähne an dem Ende eines eingeschalteten Stückes Gummischlauch angebracht, an dem sie in einem festen Lager auf einem vorderen Querbalken der Vorrichtung ruhten. Man konnte so das Wasser ganz allmählich und ohne die geringste Erschütterung der Schalen aus den Kästen auslassen, auch das Ausfließen desselben durch Schließen der Hähne beliebig unterbrechen. Eine im Innern der Blechkästen an der Hinterwand derselben angebrachte Theilung gestattete, indem man sie während des Versuchs mit einem Lichte beleuchtete, das Gewicht des noch in den Kästen zurückgebliebenen Wassers von Kilogramm zu Kilogramm anzugeben. Um die Genauigkeit dieser Ablesung möglichst zu steigern, waren die Blechkästen sehr schmal, aber verhältnißmäßig hoch gestaltet. Selbstverständlich wurden sie, sowie die sonst noch auf den Schalen stehenden Gewichte so gestellt, daß die Schalen

genau wagerecht standen, wovon man sich vor Beginn jedes Versuches durch Auflegen einer Libelle überzeugte.

Hiernach gestaltete sich der ganze Vorgang bei einem Versuche, um es nochmals im Zusammenhange zu wiederholen, folgendermaßen.

Nachdem der Kasten bei festgestellter Wand bis zur beabsichtigten Höhe der Schüttung mittels des Füllkastens mit Sand gefüllt worden war, wurden die auf den hinteren Gewichtsschalen stehenden Blechkästen mit Wasser gefüllt, und außerdem noch so viel Gewichte auf diese Schalen gesetzt, daß die gesamten Gegengewichte den Erddruck, dessen annähernde Größe durch Vorversuche für die betreffende Höhe der Schüttung bereits ermittelt worden war, um etwa 15 bis 20 kg übertrafen. Hierauf wurde die Wand frei gemacht, indem die vorn eingesteckten Keile vorsichtig herausgezogen wurden. Nachdem dann auf die Scheibe des Druckmessers zwei Gewichte von je 200 gr aufgelegt worden waren, um die Quecksilbersäule etwas anzuheben, wurde die Anfangsablesung am Druckmesser gemacht, sowie das zur Messung der Wandbewegung dienende Mikroskop eingestellt. Schliesslich wurde der Druckmesser mit der Wand verbunden, indem die beiden Zugstangen, welche die vordere Schneide des grossen Druckhebels umfassen, durch Anziehen der Schraubenmuttern solange verkürzt wurden, bis ein ganz geringes Steigen der Quecksilbersäule anzeigte, daß das an diesen Zugstangen unten hängende Plättchen mit der an dem Wandarm sitzenden Schneide zur Berührung gekommen war. Jetzt konnte der eigentliche Versuch beginnen, indem ein vor der Wand sitzender Gehülfe die Hähne der Blechkästen öffnete, so daß das Wasser auszuströmen anfang. Sobald das Quecksilber zu steigen begann, wurde noch solange gewartet, bis das Wasser gerade bis zu dem nächsten Theilstrich der in den Blechkästen angebrachten Theilung gesunken war, und hierauf das Ausfließen desselben unterbrochen und die erste Ablesung am Druckmesser sowie an dem Mikroskop gemacht. Hierauf wurden die Hähne wieder geöffnet und die nächste Beobachtung gemacht, sobald das Wasser bis zum nächsten Theilstrich gesunken, also eine weitere Wassermenge von zusammen 2 kg ausgeflossen war. In dieser Weise wurde fortgefahren, bis fünf bis sechs Beobachtungen vorlagen, worauf die Wand wieder festgestellt, die Zugstangen gelöst und der Kasten entleert wurde. Jeder Versuch beanspruchte einschliesslich des Füllens und Entleerens des Kastens eine Zeit von etwa drei Stunden.

Hauptsache hierbei war natürlich, jede, auch die geringste Erschütterung während des Versuches zu vermeiden, da die Vorrichtung hiergegen außerordentlich empfindlich war. Glücklicherweise lag der Versuchsraum in dieser Hinsicht sehr günstig, indem er ein zu ebener Erde gelegener und mit einem festen Steinfußboden versehener Raum an einem der inneren Höfe der Technischen Hochschule in Charlottenburg war, der von jeder StraÙe soweit entfernt liegt, daß auch durch Wagenverkehr keinerlei Erschütterungen entstehen konnten.

Bevor zu den Versuchen selbst geschritten werden konnte, wurde, wie schon oben erwähnt, zunächst noch eine genaue Prüfung der ganzen Vorrichtung in der Weise vorgenommen, daß man bei leerem Kasten auf die vorderen Schneiden III (vgl. Abb. 2) Gewichtsschalen aufhing und durch Belastung derselben ein künstliches Umsturzmoment von bekannter Größe auf die Wand ausübte, welches nun, ganz wie wenn es sich um das unbekannte Moment des Erddrucks gehandelt hätte, in

der ebenen beschriebenen Weise durch allmähliches Entleeren der Wasserkästen und gleichzeitige Ablesung am Druckmesser bestimmt wurde. Hierbei zeigte die Vorrichtung allerdings die Eigenthümlichkeit, daß das Steigen der Quecksilbersäule regelmäßig etwas zu früh begann, daß dieselbe also bereits ein wenig zu steigen anfang, wenn sich auf den hinteren Gewichtsschalen noch etwas mehr Gewichte befanden, als dem Gleichgewichtszustande entsprach. Diese Eigenthümlichkeit, welche jedenfalls eine Folge der elastischen Verbiegung der Wand, und der die Gewichte tragenden Theile war, deren Spannung nachließ, wenn die Kräfte sich dem Gleichgewichtszustande näherten, beeinträchtigte jedoch die Zuverlässigkeit der Ergebnisse nicht in nennenswerthem Maße, indem man nur nöthig hatte, diese „tote“ Steigung, deren Größe sich im Mittel auf 2,5 mm belief, von der beobachteten Steighöhe abzuziehen, um richtige Steighöhen zu erhalten. Unter Berücksichtigung dieser Berichtigung ergab die Prüfung des Zusammenwirkens der ganzen Vorrichtung durchaus befriedigende Ergebnisse, indem die berechneten und die wirklich vorhandenen Momente fast genau übereinstimmten, und nur zuweilen sich Abweichungen von 2 bis 3 pCt. zeigten.

Hieran schloß sich nun noch eine lange Reihe von Vorversuchen mit sandgefülltem Kasten, um das ganze Verfahren gründlich einzuüben, und diejenigen kleinen Handgriffe und Vorsichtsmaßregeln auszuprobieren, deren Beobachtung bei dem Arbeiten mit einer so empfindlichen Vorrichtung sich als erforderlich erwies, worauf schliesslich zu den endgültigen Versuchen geschritten werden konnte. Vor deren Besprechung möge hier die Ableitung der zur Berechnung des Erddrucks erforderlichen Formeln folgen.

7. Formeln zur Berechnung des Erddrucks.

Bezeichnet für eine beliebige Lage der Wand:

M_e das wahre Moment des Erddrucks, welches derselbe gegen die untere Drehachse der Wand ausüben würde, wenn die Schüttung durch keine Seitenwände begrenzt wäre,

M_m das beobachtete Moment, wenn in die Schüttung eine Mittelwand eingesetzt ist,

M_o das beobachtete Moment ohne diese Mittelwand, so drückt sich — da die Breite der Schüttung in beiden Fällen als gleich angenommen werden kann, indem die Stärke der Mittelwand (= 1 mm) nahezu verschwindend klein ist gegenüber der 594 mm betragenden Breite des Kastens — der Einfluß der Reibung an den beiden Seitenwänden des Kastens durch $(M_o - M_m)$ aus; es ist daher: $M_e = M_o + (M_o - M_m)$ oder

$$I. \quad M_e = 2M_o - M_m.$$

Bezeichnet ferner:

M_g das Moment der auf den hinteren Schalen stehenden Gegengewichte (einschliesslich des Eigengewichts der Schalen) gegen die untere Drehachse der Wand,

M_q das Moment, welches durch die während des Versuchs eingetretene Steigung q der Quecksilbersäule auf die Wand ausgeübt wird, auf dieselbe Drehachse bezogen,

M_w das Moment des Eigengewichts der Wand gegen diese Drehachse, so ist, wie eine Betrachtung der Abb. 2 unmittelbar zeigt,

$$II. \quad M_m \text{ (bez. } M_o) = M_g + M_q - M_w.$$

Bezeichnet endlich:

G das Gesamtgewicht der auf den hinteren Schalen befind-

lichen Gegengewichte (einschließlich Eigengewicht der Schalen) in kg,

so ergibt sich für senkrechte Wand (vgl. Abb. 9, in welche die mittels des Kathetometers ermittelten Hebelsarme eingetragen sind)

$$M_g = (G \cdot 42,044) \text{ cm/kg.}$$

Einer Steighöhe der Quecksilbersäule $q = 1 \text{ mm}$ entspricht ferner, wie die Untersuchung des Druckmessers ergeben hat, ein Druck auf den Quecksilberspiegel:

$$Q = 0,1834 \text{ kg.}$$

Daher ist (Abb. 9) für diese Steighöhe:

$$N = \frac{Q \cdot 69,034}{92,058} = 0,1376 \text{ kg,}$$

folglich: $M_q = q \cdot 0,1376 \cdot 104,677 = (14,4036 \cdot q) \text{ cm/kg,}$ worin q die Steighöhe in Millimetern.

Endlich ist, da das Eigengewicht der Wand 37,317 kg und der Schwerpunktsabstand von der Drehachse 4,883 cm beträgt, $M_w = 37,317 \cdot 4,883 = 182,219 \text{ cm/kg.}$

Folglich berechnet sich für senkrechte Wand M_m (bez. M_o) aus der Formel:

$$\text{III. } M_m \text{ (bez. } M_o) = G \cdot 42,044 + (14,4036 \cdot q) - 182,219 \text{ in cm/kg.}$$

Ist M_o aus M_m und M_o nach Formel I ermittelt, so berechnet sich die wagerechte Seitenkraft des Erddrucks H , wenn die Höhe der Schüttung h cm beträgt,

$$\text{IV. } H = \frac{M_o}{\frac{h}{3} + 11,944} \text{ kg.}$$

S. Die Versuche.

Die bisher mit der Vorrichtung angestellten Versuche beziehen sich vorläufig sämtlich nur auf den einfachsten Fall einer senkrechten Wand und einer wagerecht abgeglichenen Erdoberfläche.

Der Hinterfläche der Wand wurde hierbei, wie erwähnt, durch Aufkleben von Smirgelleinwand eine solche Rauigkeit gegeben, daß der Reibungswinkel zwischen Wand und Sand φ_1 genau gleich dem natürlichen Böschungswinkel φ wurde, also $\varphi = \varphi_1 = 33^\circ 42'$.

Bei der ersten der Versuchsreihen betrug die Höhe der Schüttung $h = 60 \text{ cm,}$ war also gleich der vollen Höhe des Kastens.

Das Gewicht der Raumeinheit für diese Schüttung ergab sich durch unmittelbare Wägung des eingeschütteten Sandes zu $\gamma = 1627 \text{ kg}$ für 1 cbm.

Nach der Rankineschen Theorie des unbegrenzten Erdreichs mußte der Erddruck in diesem Falle wagerecht gerichtet sein, und es berechnet sich seine Größe für 1 m Breite der Schüttung aus der Formel:

$$E = H = \gamma \frac{h^2}{2} \text{tg}^2 \left(45 - \frac{\varphi}{2} \right).$$

Da im vorliegenden Falle die Breite der Schüttung 0,594 m beträgt, so ergibt sich:

$$E = H = 0,594 \cdot \frac{1627 \cdot 0,6^2}{2} \text{tg}^2 (28^\circ 9') = 49,793 \text{ kg.}$$

Die Versuche wurden zuerst mit und hierauf ohne eingesetzte Mittelwand gemacht; die Ermittlung des dem Ruhezustand der Wand entsprechenden Druckes geschah, wie mehrfach erwähnt, derart, daß die beobachteten Wandbewegungen als Abscissen, und die gleichzeitig beobachteten Momente des Erd-

drucks als Ordinaten aufgetragen, und die so erhaltene Linie nach rückwärts bis zum Nullpunkt verlängert wurde, woraus man den Nullwerth des Momentes fand. Wir geben nachfolgend für zwei der Versuche beispielsweise die beobachteten Werthe der Momente und Wandbewegungen, sowie die entstehende Linie und zwar für einen Versuch mit, und einen ohne Mittelwand (vgl. Abb. 10).

Tabelle I.

Beobachtetes Moment des Erddrucks cm/kg	Beobachtete Wandbewegung (oben gemessen) mm	Drehungswinkel der Wand	Nullwerth des Moments cm/kg
Mit Mittelwand.			
714,64	0,050	0° 0' 14"	} 762,30
680,95	0,100	0° 0' 28"	
657,34	0,150	0° 0' 42"	
632,29	0,219	0° 1' 3"	
609,89	0,275	0° 1' 17"	
Ohne Mittelwand.			
885,68	0,067	0° 0' 17"	} 960,00
850,56	0,106	0° 0' 29"	
811,12	0,150	0° 0' 42"	
786,07	0,206	0° 0' 57"	
737,75	0,238	0° 1' 6"	

Wie man sieht, ist der Einfluss, den das allmähliche Vorwärtkippen der Wand auf den Erddruck hat, ein sehr bedeutender. Eine Drehung der Wand um rund 1 Minute genügt bereits, um eine Abnahme des Erddrucks um etwa 18 bis 20 pCt. zu bewirken, während eine solche von nur 1/4 Minute (dem kleinsten beobachteten Werthe) den Erddruck immerhin schon um 6 bis 7 pCt. vermindert.

Es wurden nun (aufser zahlreichen Vorversuchen zur Einübung des Verfahrens und zur annähernden Ermittlung der zu erwartenden Momente) schliesslich sechs endgültige Versuche mit, und ebenso viele ohne Mittelwand angestellt. Die hierbei gefundenen Nullwerthe der Momente sind (ihrer Größe nach geordnet) in nachfolgender Tabelle zusammengestellt, und die Mittelwerthe aus denselben berechnet.

Tabelle II.

Nr. des Versuchs	Moment des Erddrucks (Nullwerth) cm/kg	Mittelwerth cm/kg
Mit Mittelwand = M_m .		
1	716,30	} 744,80
2	730,50	
3	734,20	
4	756,40	
5	762,30	
6	769,10	
Ohne Mittelwand = M_o .		
1	903,80	} 936,20
2	910,50	
3	911,70	
4	950,60	
5	960,00	
6	980,50	

Hieraus berechnet sich nach der obigen Formel I das wahre Moment des Erddrucks M_o , welches derselbe gegen die untere Drehachse der Wand ausüben würde, wenn die Schüttung durch keine Seitenwände begrenzt wäre:

$$M_o = 2 M_o - M_m = 2 \cdot 936,20 - 744,80 = 1127,60 \text{ cm/kg.}$$

Es ergibt sich hieraus beiläufig, dafs die Reibung an den Seitenwänden den Erddruck um etwa 17 pCt. verminderte.

Die wagerechte Seitenkraft des Erddrucks berechnet sich daher nach obiger Formel IV zu:

$$H = \frac{1127,60}{\frac{60}{3} + 11,944} = 35,29 \text{ kg.}$$

Nach der Theorie des unbegrenzten Erdreichs sollte aber diese Kraft, wie oben berechnet, 49,79 kg betragen — sie ergibt sich demnach aus den Versuchen dieser Theorie gegenüber um fast 30 pCt. zu klein. Obgleich es sich also bei den vorliegenden Versuchen nicht um einen Bewegungszustand handelt, vielmehr der dem Ruhezustand der Wand entsprechende Druck ermittelt worden ist, zeigt sich dennoch gar keine Uebereinstimmung mit der obigen Theorie, und das Ergebnifs dieser Versuchsreihe ist also, dafs die Theorie des unbegrenzten Erdreichs auf den Fall einer senkrechten Stützwand und wagerechten Erdoberfläche nicht anwendbar ist.

Dieses Ergebnifs verdient vielleicht um so eher Vertrauen, als Verfasser, wie nicht geleugnet werden soll, an die Versuche mit der Ueberzeugung herantrat, dafs, entsprechend den Anschauungen Mohrs und Weyrauchs, die fragliche Theorie in diesem einfachsten Falle unbedingt zutreffen müsse, daher, durch das gegentheilige Ergebnifs aufs unangenehmste überrascht, anfangs geneigt war, dasselbe einer Unrichtigkeit der Messung zuzuschreiben; es wurde deshalb nicht nur die Vorrichtung von neuem geprüft, sondern es wurden auch die Versuche selbst vielfach abgeändert, in der Hoffnung, dadurch gröfsere Momente zu erzielen — was indessen in keiner Weise gelingen wollte.

Berechnet man den Erddruck nach der Coulomb'schen Theorie vom Prisma des grössten Drucks, so ergibt sich derselbe für eine Breite der Schüttung = 1 m aus der Formel:

$$E = \gamma \frac{h^2}{2} \frac{\cos^2 \varphi}{[\sqrt{\cos \varphi_1} + \sqrt{\sin \varphi \sin(\varphi + \varphi_1)}]^2},$$

daher im vorliegenden Falle, wo $\varphi = \varphi_1 = 33^\circ 42'$ und die Breite der Schüttung = 0,594 m beträgt:

$$E = 0,594 \cdot \frac{1627 \cdot 0,6^2}{2} \cdot 0,261 = 45,393 \text{ kg.}$$

Dieser Druck schliesft nach der angegebenen Theorie mit der Senkrechten zur Wand den Reibungswinkel φ_1 ein, daher berechnet sich seine wagerechte Seitenkraft:

$$H = E \cos \varphi_1 = 45,393 \cdot 0,832 = 37,770 \text{ kg.}$$

Hiermit stimmt der aus den Versuchen gefundene Werth von 35,29 kg sehr nahe überein (nur 6 pCt. kleiner), und es scheint also, als ob die Theorie vom Prisma des grössten Drucks, trotz der Mängel, welche ihr vom wissenschaftlichen Standpunkte aus anhaften, dennoch der Wahrheit sehr nahe kommt und jedenfalls für die Berechnung des Erddrucks auf senkrechte Stützwände weit brauchbarer ist, als die zu ganz unrichtigen Ergebnissen führende Rankinesche Theorie.

Um indessen sicher zu gehen, wurde noch eine zweite Versuchsreihe mit einer anderen Höhe der Schüttung, nämlich mit $h = 48$ cm gemacht. Das Gewicht der Raumeinheit ergab sich jetzt zu 1606 kg für 1 cbm; dann berechnet sich die wagerechte Seitenkraft des Erddrucks:

$$\text{nach Rankine zu } E = H = 31,42 \text{ kg,}$$

$$\text{nach Coulomb zu } H = 23,86 \text{ kg.}$$

Vier endgültige Versuche mit, und vier ohne Mittelwand ergaben die in nachfolgender Tabelle zusammengestellten Nullwerthe der Momente:

Tabelle III.

Nr. des Versuchs	Moment des Erddrucks (Nullwerth) cm/kg	Mittelwerth cm/kg
Mit Mittelwand.		
1	412,30	} 427,40
2	420,50	
3	430,70	
4	435,90	
Ohne Mittelwand.		
1	500,80	} 516,80
2	510,70	
3	515,50	
4	540,30	

Hieraus ergibt sich

$$M_e = 2 \cdot 516,80 - 427,40 = 606,20 \text{ cm/kg.}$$

Daher:

$$H = \frac{606,20}{\frac{48}{3} + 11,944} = 21,70 \text{ kg.}$$

Es zeigt also dieser Werth wieder gegen die Theorie von Rankine eine Abweichung von mehr als 30 pCt, während er sich gegen die Coulombsche Theorie um etwa 9 pCt. zu klein ergibt. — Auch diese Versuchsreihe bestätigt daher das oben gefundene Ergebnifs. —

Zur Ermittlung der senkrechten Seitenkraft des Erddrucks wurde nunmehr die Vorrichtung, wie bereits oben angegeben, derart umgestaltet, dafs die Wand freischwebend vor dem Kasten hing, während gleichzeitig wagerecht gespannte Schnüre sie nach hinten festhielten. Hierzu wurde (vgl. Abb. 6) — nach Entfernung des vorn angeschraubten, hierbei hinderlichen Wandarmes — der bisher zur Uebertragung des Druckes auf den Quecksilberspiegel dienende Hebel H so gelagert, dafs er sich mit der einen seiner beiden Endschnitten auf einen quer über den Kasten gestreckten Balken b , mit der anderen auf die über dem Quecksilberspiegel liegende Druckscheibe S stützte, während an seiner mittleren Schneide die Wand mittels Zugstangen aufgehängt wurde. Senkte man nun bei leerem Kasten die beiden, die Wand bis dahin stützenden Lager, so stieg die Quecksilbersäule infolge des Eigengewichts der Wand (welches nach Entfernung des erwähnten Wandarmes zu 34,13 kg ermittelt wurde) um eine gewisse Höhe. Diese dem Eigengewicht der Wand entsprechende Steighöhe schwankte, wie die angeestellten Versuche zeigten, zwischen 48,20 und 48,70 mm, und ergab sich im Mittel aus sechs Versuchen zu 48,44 mm.

Hierauf wurde der Kasten mit Sand gefüllt, wobei die Wand während der Füllung wieder fest auf den Lagern stand. Senkte man nun nach beendeter Füllung die letzteren, so konnten zwei Möglichkeiten eintreten: falls nämlich, wie Rankine behauptet, die senkrechte Seitenkraft des Erddrucks gleich Null ist (oder, was dasselbe bedeutet, falls die die Wand nach abwärts treibende Kraft der Sandkörnchen gerade ebenso grofs ist, wie die Reibung derselben an der Hinterfläche der Wand), so mußte jetzt genau dieselbe Steighöhe des Quecksilbers wie zuvor eintreten. Wenn dagegen, wie Coulomb annimmt, der Erddruck eine nach unten geneigte Richtung hat (also die

abwärts wirkende Kraft überwiegt), so mußte die Steigung eine größere als bei leerem Kasten werden.

Die Versuche zeigten nun die Richtigkeit der ersteren Annahme, indem sich — abgesehen von den unvermeidlichen kleinen Ungenauigkeiten — stets dieselbe Steighöhe des Quecksilbers wie bei leerem Kasten ergab. Zwar stieg die Säule meist noch um 1 bis 2 mm höher, indessen liefs sich leicht nachweisen, daß dies lediglich die Folge der unvermeidlichen kleinen Stöße und Erschütterungen war, welche während der Senkung der Lager trotz aller Vorsicht eintraten. Es liefs sich dieser Zusammenhang unzweifelhaft dadurch feststellen, daß man durch schnelles und unvorsichtiges Senken der Lager dieses Mehr an Steighöhe beliebig steigern konnte, während der Unterschied gegen die ursprüngliche Höhe um so geringer wurde, und oft bis auf Bruchtheile eines Millimeters abnahm, wenn man die Senkung ganz langsam, gleichmäßig und allmählich ausführte.

Hieraus dürfte klar hervorgehen, daß eine senkrechte Seitenkraft des Erddrucks nicht vorhanden war, daß derselbe also bei senkrechter Wand und wagerechter Erdoberfläche in der That, wie Rankine behauptet, wagerecht gerichtet ist.

Die Versuche wurden mit einer Höhe der Schüttung von 60 cm angestellt, und zwar wurden — außer zahlreichen Vorversuchen — fünf endgültige Versuche mit, und ebenso viele ohne eingesetzte Mittelwand gemacht. Die hierbei gefundenen Steighöhen der Quecksilbersäule sind in der nachfolgenden Tabelle IV zusammengestellt.

Der aus diesen zehn Versuchen sich ergebende Mittelwerth von $\frac{49,78 + 49,92}{2} = 49,85$ mm unterscheidet sich nur um etwa 3 pCt. von der bei leerem Kasten gefundenen Steighöhe von 48,44 mm.

Tabelle IV.

Nr. des Versuchs	Beobachtete Steighöhe	Mittelwerth
	mm	mm
Mit Mittelwand		
1	48,50	} = 49,78
2	48,60	
3	49,80	
4	50,10	
5	51,90	
Ohne Mittelwand		
1	49,00	} = 49,92
2	49,10	
3	49,40	
4	51,00	
5	51,10	

9. Ergebnifs der Versuche.

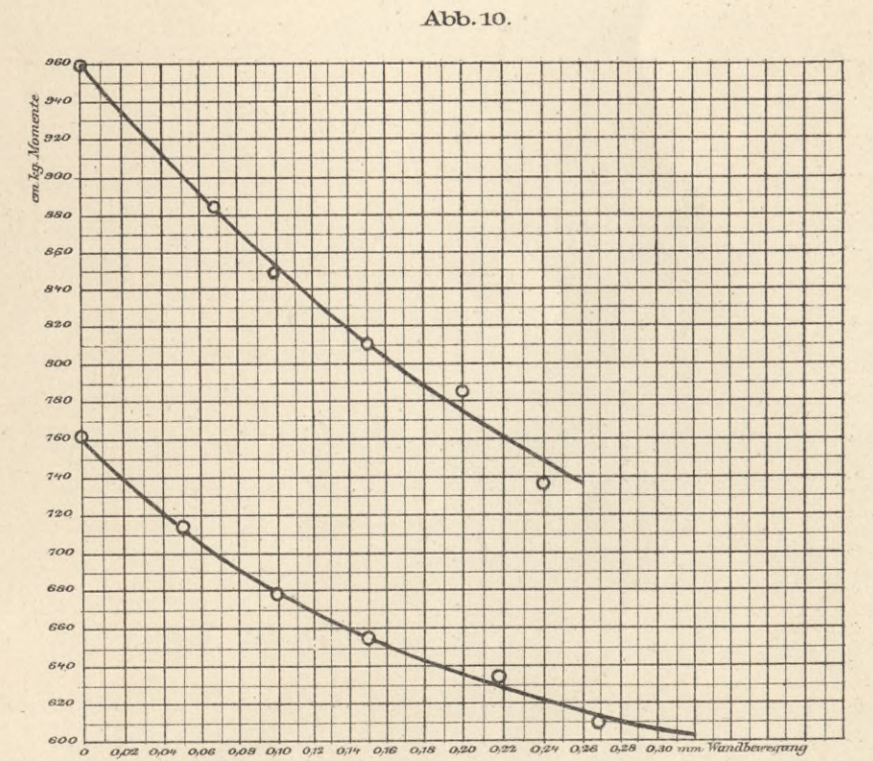
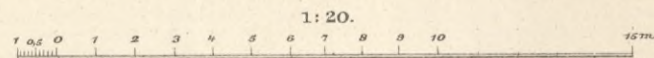
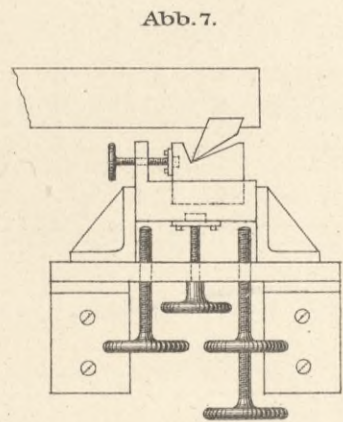
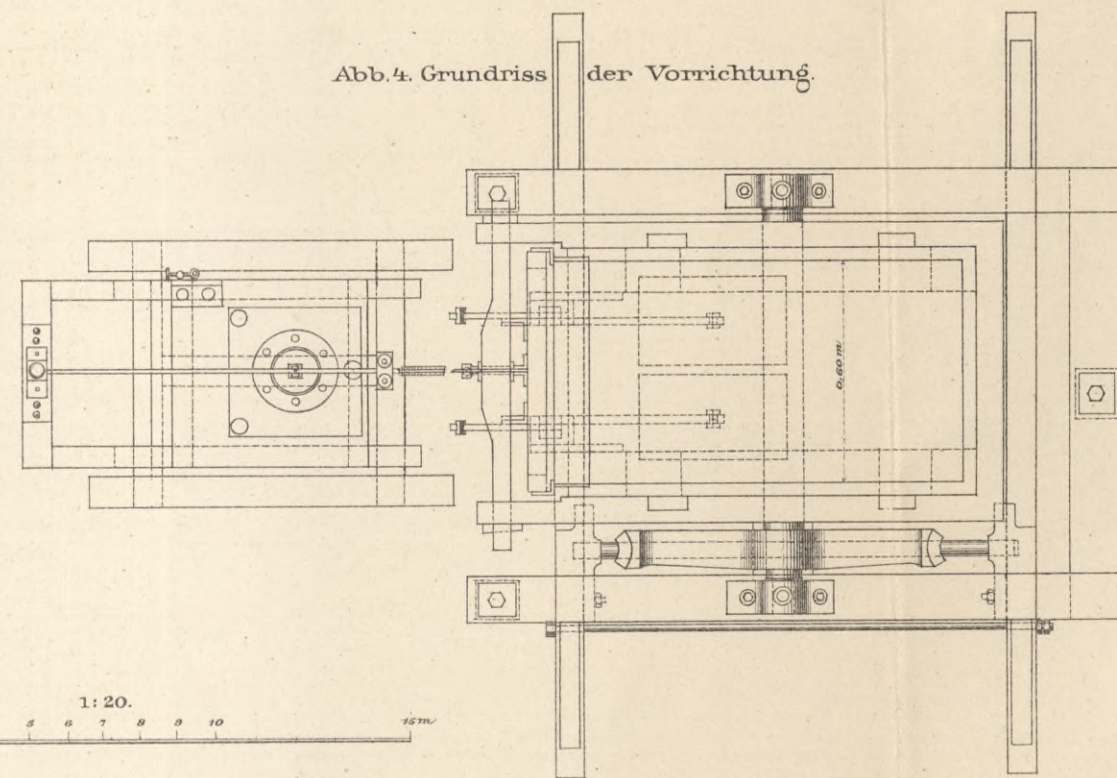
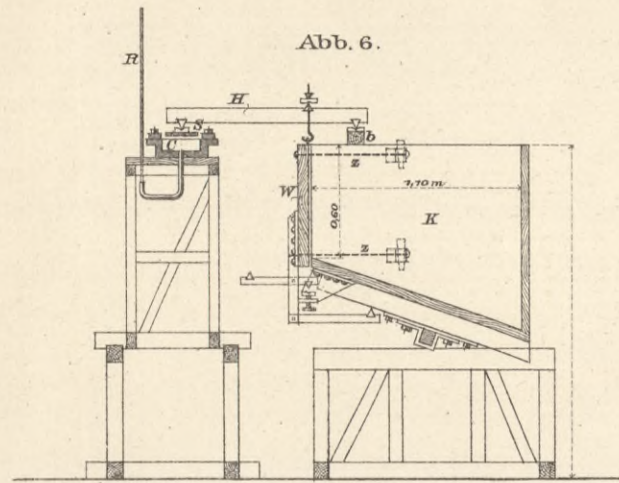
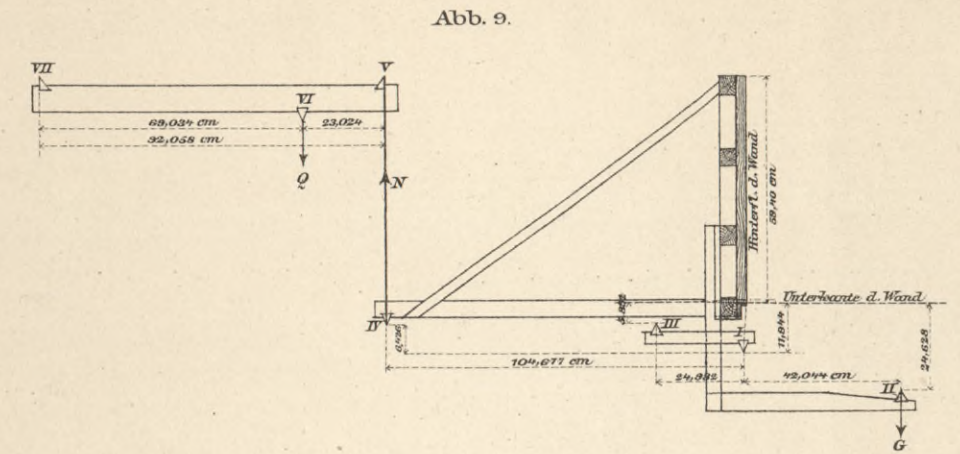
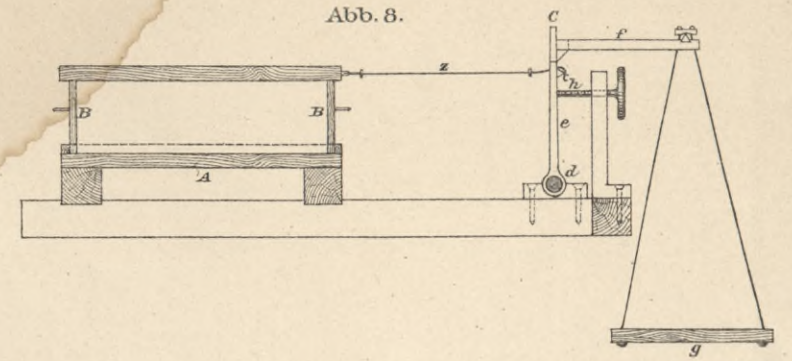
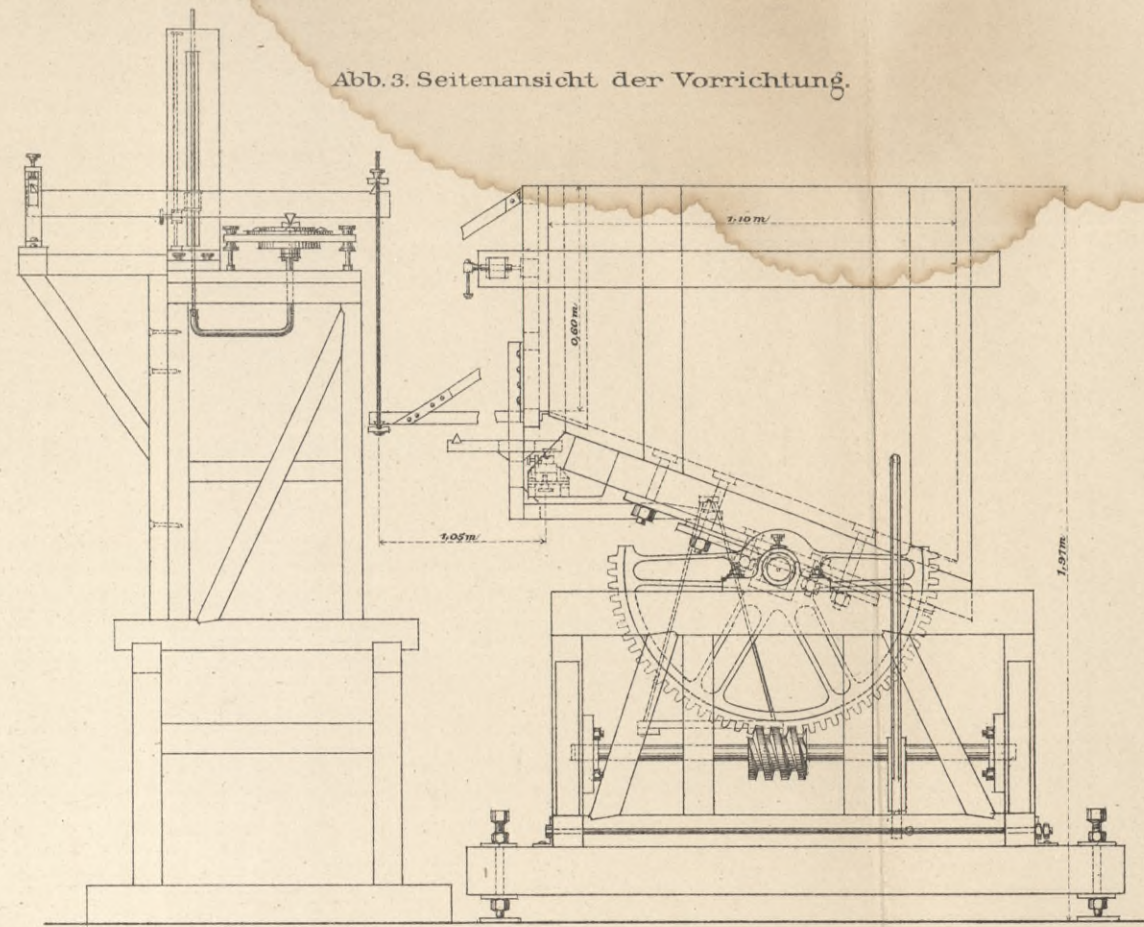
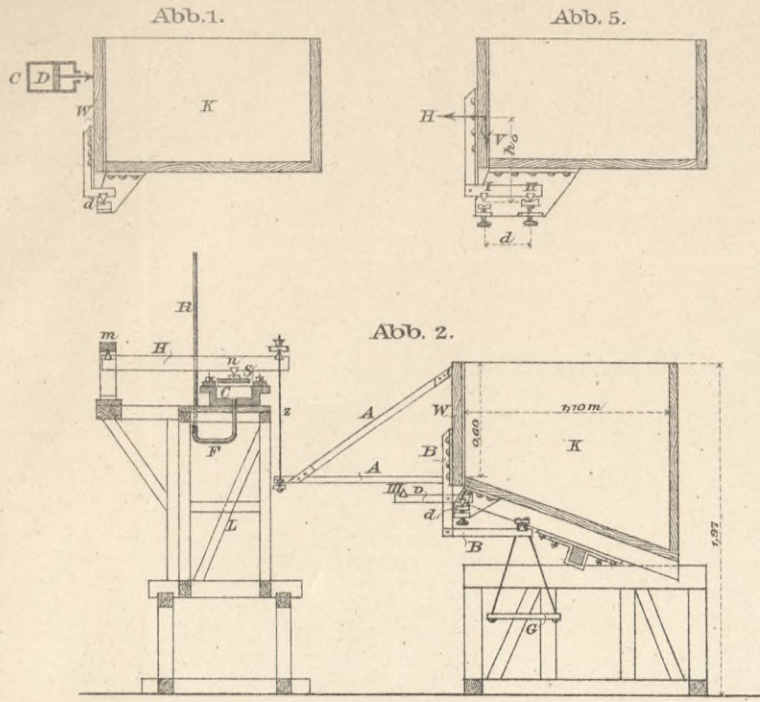
Nach Vorstehendem läfst sich das Ergebnifs der bisher angestellten Versuche kurz, wie folgt, zusammenfassen:

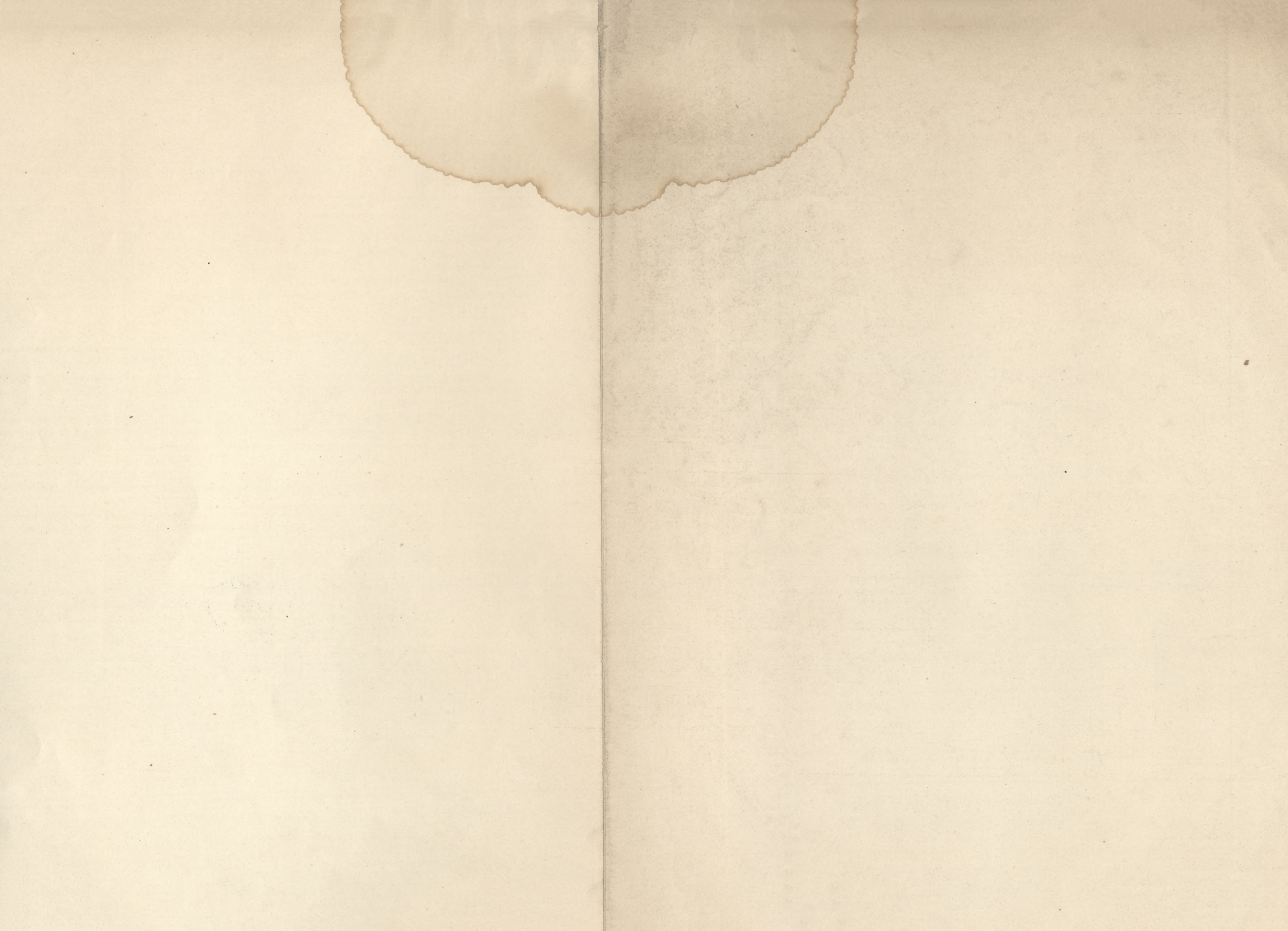
Für senkrechte Wand und wagerechte Erdoberfläche ergibt sich die Richtung des Erddrucks, der Theorie von Rankine entsprechend, als wagerecht, während seine Gröfse mit dieser Theorie gar keine Uebereinstimmung zeigt.

Dagegen ergibt sich, was die Gröfse, bez. das Moment des Erddrucks anlangt, eine sehr nahe Uebereinstimmung mit der Theorie von Coulomb, indem der durch die Versuche gefundene Werth von dem aus dieser Theorie berechneten nur um 6 bis 9 pCt. abweicht.

Weiteren Versuchen muß es nun vorbehalten bleiben, festzustellen, wie diese hier nur für den einfachsten Fall untersuchten Verhältnisse sich für andere Neigungen der Wand und der Erdoberfläche gestalten.







WYDZIAŁY POLITECHNICZNE KRAKÓW

BIBLIOTEKA GŁÓWNA

 18138

L. inw.

Druk. U. J. Zam. 356. 10.000.

Biblioteka Politechniki Krakowskiej



10000300804