Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Untersuchungen über Gründungen und Bodenmechanik

Autor: Housel, W.S.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-2884

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

VIII 5

Untersuchungen über Gründungen und Bodenmechanik.

L'étude des fondations et la mécanique du sol.

Research in Foundations and Soil Mechanics.

W. S. Housel,
Civil Engineering Department, University of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA.

A. Neuzeitliche Entwicklung von Belastungsversuchen.

Seitdem Ingenieure und Baumeister der Eignung des Untergrundes zur Aufnahme von Belastungen aus Bauwerken mehr als ein gelegentliches Interesse entgegengebracht haben, sind Belastungsversuche das überzeugendste Verfahren zur direkten Ermittlung der Tragfähigkeit. In der Vergangenheit hat der Mangel an Kenntnis der besonderen Erfordernisse, die bei der Ausführung von Belastungsversuchen und ihrer Auswertung zur Erzielung eines brauchbaren Ergebnisses berücksichtigt werden müssen, dieses Verfahren in einigen Mißkredit gebracht. Selbst heute wird von denen, die mit der letzten Entwicklung nicht vertraut sind, an den Belastungsversuchen Kritik geübt, und diese werden aus keinem anderen einleuchtenden Grund abgelehnt, als daß sich aus ihrer ungeeigneten Anwendung Fehler ergeben haben.

Während der letzten 10 Jahre ist in Europa und Amerika ein wesentlicher Fortschritt in der Anwendung von Belastungsversuchen durch eine Reihe von Forschungen erzielt worden. Dementsprechend gibt es heute eine Anzahl von genau erkannten Grundsätzen, die für die praktische Ausführung maßgebend sind, und die auch eine Erklärung dafür bieten, daß die ersten Versuche zur Ermittlung der Tragfähigkeit fehlgeschlagen sind. Zum Beispiel ist es bekannt, daß die Tragfähigkeit sich mit der Größe und Form der belasteten Fläche verändert. Dementsprechend ist es selbstverständlich, daß keine ausreichenden Meßergebnisse des Bodenwiderstandes durch Belastung einer einzigen Belastungsfläche von irgendeiner zufälligen Form und Größe erzielt werden können. Schon allein die Anerkennung dieser unbestreitbaren Wahrheit läßt die große Mehrheit der Belastungsversuche, die in der Vergangenheit ausgeführt wurden, und gleichfalls eine beträchtliche Anzahl derjenigen, die heute in der allgemeinen Baupraxis vorgenommen werden, als wertlos erscheinen. Es gibt verhältnismäßig wenige Beispiele, für die eine umfassende Reihe von Belastungsversuchen in voller Erkenntnis dieses ersten Grundsatzes eines gesunden Verfahrens ausgeführt worden ist.

Daneben gibt es noch eine Reihe von anderen Umständen, die man erkannt haben und richtig prüfen muß. Das Verfahren des Aufbringens der Last auf die Belastungsfläche und das Messen der sich ergebenden Setzungen muß mit

einem viel höheren Grad von Sorgfalt ausgeführt werden als dies gewöhnlich üblich ist. Das Zeitelement muß sorgfältig berücksichtigt werden, um die richtige Beziehung zwischen Last und Setzung ohne dynamische Einwirkungen festzustellen. Die zu belastende Oberfläche muß ohne Störung des darunter liegenden Bodens und ohne Veränderung seiner Eigenschaften durch Anfeuchten oder Austrocknen vorbereitet werden. Wenn die Versuche ungehindert vorgenommen werden sollen, d. h. ohne Berücksichtigung des Einflusses der daneben liegenden Auflast, muß die Versuchsgrube nach allen Seiten hin groß genug sein, um irgendeinen hindernden Einfluß zu beseitigen. Wenn die Versuche die umliegende Auflast berücksichtigen sollen, müssen besondere Vorsichtsmaßnahmen ergriffen werden, um jede Möglichkeit auszuschließen, daß der Boden neben der Belastungsplatte emporgequetscht werden kann. Die Vernachlässigung der Kontrolle irgend einer dieser Versuche beeinflussenden Bedingungen kann den Wert der Versuche vermindern. Eine sorgfältige Beobachtung dieser Einzelheiten ist also von grundlegender Wichtigkeit.

Jedoch ist es nicht schwierig, jeder dieser Anforderungen unter praktischen Bedingungen zu genügen, und nach einiger Erfahrung werden sie ein Teil des üblichen Versuchsverfahrens. Die Ergebnisse, die man dann erlangt, sind brauchbar und ihre Auswertung führt zu praktischen Folgerungen, auf die man sich verlassen kann.

Der größte Vorteil der Belastungsversuche liegt in der Tatsache, daß der Boden an Ort und Stelle unter den wirklichen Verhältnissen, unter denen er durch die Last des auf ihn zu errichtenden Bauwerkes beansprucht wird, geprüft wird. Weiterhin wird die Tragfähigkeit direkt als Last je Flächeneinheit ermittelt. Solche Ergebnisse verlangen keine Umrechnung mittels Formeln, die physikalische Beziehungen als Grundlage haben, die nur unvollständig erfaßt werden können und sich oft widersprechen. Eine Serie von Belastungsversuchen ist ein tatsächliches Messen der Tragfähigkeit, welche direkt alle die verborgenen Eigentümlichkeiten und Eigenschaften des Bodens erfaßt, die sein Verhalten unter Last beeinflussen.

Es muß zugegeben werden, daß die belasteten Flächen sehr viel kleiner sind als die wirklichen Fundamente, die das Bauwerk tragen, und daher den Bodenwiderstand nur bis zu einer verhältnismäßig geringen Tiefe erfassen, die vermutlich nicht viel größer ist, als der Durchmesser der belasteten Fläche beträgt. Infolgedessen werden zusätzliche Versuche notwendig, wenn eine deutliche Veränderung in der Bodenschicht in größerer Tiefe vorhanden ist; diese Tatsache wird auch in der Baupraxis berücksichtigt. Nichtsdestoweniger ist der Teil des Untergrundes, welcher durch die belastete Fläche unter Spannung gesetzt ist, eine kennzeichnende Probe, die ausgedehnter ist, als eine Bodenprobe, die im Laboratorium untersucht werden kann. Es ist deshalb nicht recht einzusehen, daß Laboratoriumstechniker Belastungsversuche deshalb ablehnen, weil sie nicht groß genug sind, um einen kennzeichnenden Versuch darzustellen, während sie gleichzeitig Zutrauen haben zu Versuchen mit viel kleineren Proben, die ihren natürlichen Bedingungen im Boden an Ort und Stelle entzogen und ins Laboratorium gebracht worden sind.

Die Untersuchungen über Bodenmechanik und Gründungen an der Universität Michigan, die während der letzten 9 Jahre vorgenommen wurden, haben die

Grundlage für die vorhergehenden allgemeinen Ausführungen über Belastungsversuche abgegeben. Der größte Teil der Arbeit ist in Verbindung mit Bauprojekten ziemlicher Größe ausgeführt worden, und die Lieferung von Angaben für den entwerfenden Ingenieur war hierbei dringend notwendig. Laboratoriumsuntersuchungen mittels geeigneter Verfahren der Bodenmechanik liefen parallel zu den Baustellenversuchen, und es wurden hieraus viele wertvolle und aufschlußreiche Erkenntnisse gewonnen. So interessant auch die Laboratoriumsuntersuchungen waren, so muß doch festgestellt werden, daß die praktischen Werte, die von den entwerfenden Ingenieuren verlangt wurden, aus den Baustellenversuchen gewonnen wurden und daß aus den Laboratoriumsuntersuchungen nur ergänzende Angaben gemacht werden konnten. In der nachfolgenden Besprechung soll so kurz wie möglich das Versuchsverfahren und das Verfahren der Auswertung und Auslegung der Belastungsversuche, wie sie im Laufe dieser Untersuchungen entwickelt wurden, erläutert werden.

I. Prüfverfahren.

Vorläufige Untersuchungen.

Die erste Anforderung bei einer umfassenden Bodenprüfung unter Baustellenbedingungen ist eine vorhergehende Prüfung der Fragen, die durch die in Aussicht genommene Konstruktion auftreten, und eine Besichtigung der Gründungsverhältnisse auf der Baustelle. Diese Untersuchung sollte die allgemeine Bodenbeschaffenheit, das Vorhandensein von Grundwasser, die Notwendigkeit, ob die Versuchsgrube ausgebohlt oder ausgesteift werden soll, und die allgemeine Eignung der Baustelle zur Ausführung von Tragfähigkeitsversuchen bestimmen. Solch eine vorläufige Untersuchung kann durch Bohrungen vorgenommen werden, die zweifellos später doch notwendig werden, oder durch Ausheben einer Schürfgrube, die später zur Ausführung von Belastungsversuchen benutzt werden kann. Sehr oft können die notwendigen Aufschlüsse zur näheren Festlegung des Prüfverfahrens aus Erfahrungen bei früheren Bauausführungen und der allgemeinen Kenntnis der Bodenbeschaffenheit an der besonderen Stelle gewonnen werden.

Sorgfältig entnommene Bodenproben können einem erfahrenen Ingenieur eine ziemlich genaue Kenntnis der Art des Bodens vermitteln, jedoch kann das Ergebnis einer solchen Untersuchung durch Augenschein keineswegs als Maßstab für die physikalischen Eigenschaften des Materials dienen. Obgleich es wahr ist, daß viele Bauwerke auf Grund von Bohrergebnissen entworfen sind, und wichtige Entscheidungen danach getroffen wurden, sollte dieses Verfahren aufgegeben werden, wenn ein tatsächlicher Fortschritt in Richtung einer wissenschaftlichen Behandlung von Gründungsfragen erzielt werden soll. Erkenntnisse auf Grund von Bohrungen sollten nur als vorläufig angesehen werden, bis eine umfassende Bestimmung der Bodeneigenschaften vorgenommen ist.

Eine ganz genaue Kenntnis der beabsichtigten Bauausführungen muß zusammen mit der Kenntnis der allgemeinen Bodenbeschaffenheit vorhanden sein, um ein vernünftiges Versuchsprogramm aufzustellen. Eine Schätzung der vermutlichen Größe der Lasten, die Art der Konstruktion, ob diese starr ist oder ohne Schädigung gewisse unterschiedliche Setzungen aushalten kann, die Höhenlage der voraussichtlichen Gründung und der Zweck des Bauwerkes sind deshalb

notwendige Faktoren einer vorläufigen Untersuchung. Häufig läßt die Berücksichtigung der verschiedenen Gesichtspunkte, die Wahl der Art der Fundierung oder die Höhenlage der Fundierung bis auf eine oder wenige Möglichkeiten einschränken, welche dann nur noch durch Aufschlüsse in geeigneter Weise zahlenmäßig geprüft werden müssen, die durch richtige Belastungsversuche zu erlangen sind.

Die Tiefe, in der die Versuche notwendigerweise vorzunehmen sind, kann durch Untersuchung von Proben der verschiedenen Bodenschichten bestimmt werden, besonders, wenn deutliche Unterschiede im Material in verschiedenen Tiefen vorhanden sind. Andererseits kann die Höhenlage endgültig durch die Anforderungen der in Aussicht genommenen Konstruktion bestimmt werden, wobei die Höhenlage der Fundierung manchmal einen maßgebenderen Einfluß hat, als die Tragfähigkeit des Bodens in der sich ergebenden Höhenlage des Fundamentes. Nach Festlegung der Höhenlage, in der der Boden untersucht werden soll, muß der sorgfältigen Ausführung des Versuchs volle Aufmerksamkeit zugewandt werden.

Versuchsgeräte.

Bei den unter Leitung des Verfassers durchgeführten Versuchen wurden zwei Arten von Versuchsgeräten benutzt. Sie sind in folgenden Figuren wiedergegeben:

Fig. 1 ist eine Fotografie eines 60 t Untersuchungsgerätes des Waagebalkentyps, das bei den meisten Versuchsreihen benutzt wurde.

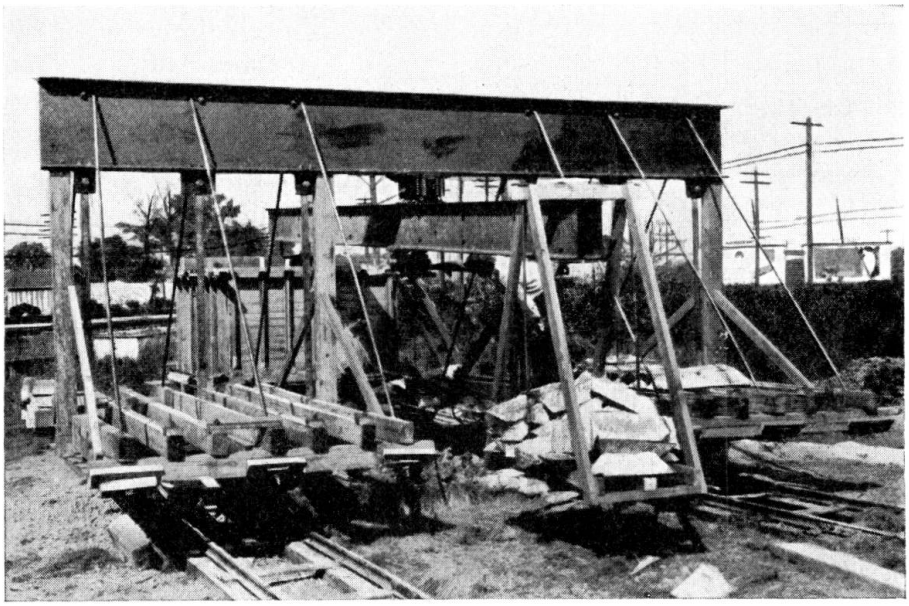

Fig. 1.
60 t Bodenuntersuchungsgerät.

Fig. 2 ist das Schema des gesamten Gerätes. Bei der Ausführung eines Versuchs werden die Ankerbühnen mit Eisenbarren belastet und die Belastungsplatte und der Druckstempel sind in der Versuchsgrube in der angegebenen Weise angeordnet. Beim Aufbringen der verschiedenen Belastungsstufen auf die

Belastungsplatte wird zunächst der Waagebalken durch Berichtigen des Gegengewichts ins Gleichgewicht gebracht, und der Preßkolben bis zur Berührung angehoben. Sodann werden Laststeigerungen dadurch hervorgerufen, daß eine abgemessene Wassermenge in den Behälter eingelassen und die Presse so betätigt wird, daß die horizontale Lage des Waagebalkens erhalten bleibt. Das gesamte Gerät ist auf Rollwagen montiert und ein kleiner Gerätewagen ist vorhanden, um ein leichtes Verschieben von einer Versuchsgrube zu der anderen zu ermöglichen.

Die Setzungen werden mit Hilfe eines Zeigers auf eine Karte gezeichnet (Fig. 2). Wenn sich der Druckstempel senkt, werden die Bewegungen des Hebel-

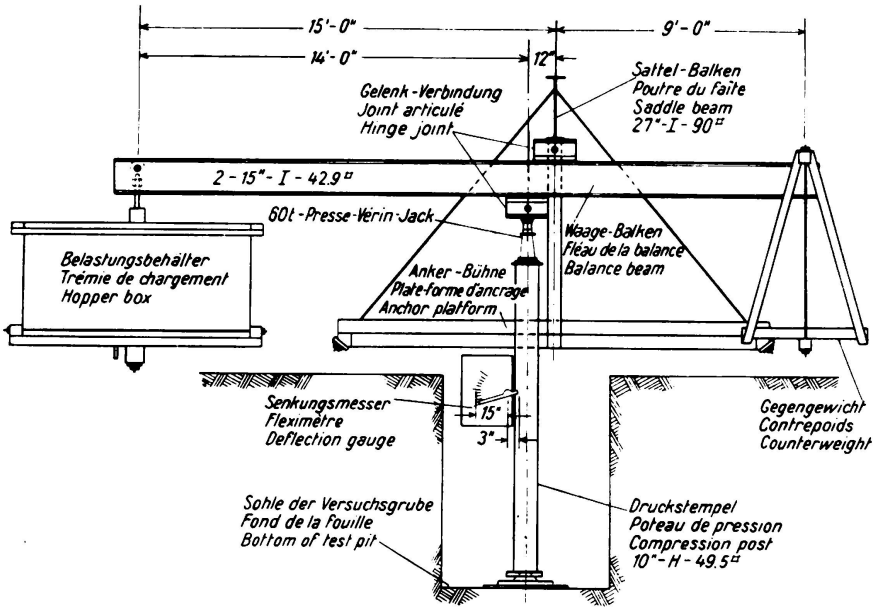

Fig. 2.

Schema des Bodenuntersuchungsgerätes.

armes auf der Karte aufgezeichnet, woraus sich eine fortlaufende Aufzeichnung der Setzungen während des Versuchs ergibt. Diese einfache Anordnung ermöglicht es, rasch und zu jedem Augenblick die Setzungen zu ermitteln und liefert eine Genauigkeit der Setzungsmessung von 100stel Zoll. Der abgebildete Apparat hat sich als völlig zufriedenstellend erwiesen und erfüllt alle Anforderungen, um geeignete Werte für Bodenprüfungen zu erhalten. Die Laststeigerungen können genau und rasch ohne störende Stöße aufgebracht werden, und der Waagebalken erhält die Last auf der Belastungsfläche konstant, wenn Setzungen sich vollziehen. Der Apparat kann ohne neue Montage oder ohne neues Be- und Entlasten der Ankerbühnen von einer Prüfgrube zu der anderen bewegt werden. Die Setzung wird in jedem Augenblicke des Belastungsversuchs genau angezeigt, so daß es möglich ist zwischen der Setzung, die sich unmittelbar nach Aufbringen der Last vollzieht, und der sich in längeren Zeiträumen vollziehenden Setzung zu unterscheiden.

Fig. 3 zeigt ein anderes Verfahren zur Ausführung von Belastungsversuchen, bei denen die Last durch eine hydraulische Presse, die sich gegen einen be-

lasteten Behälter oder Plattform abstützt, aufgebracht wird. Die Laststeigerungen werden durch einen Druckmesser angezeigt und die Setzungen werden durch das in Fig. 2 wiedergegebene und bereits besprochene Gerät aufgezeichnet. Das direkte Belasten der Belastungsplatte hat sich als ziemlich befriedigend erwiesen, jedoch ist die Genauigkeit, mit der die Laststeigerungen aufgebracht werden können, nicht so groß wie bei Verwendung eines Waagebalkens. Die hydraulischen Druckanzeiger, die im Handel erhältlich sind, sind nicht so empfindlich, wie es manchmal wünschenswert wäre, und es bildet sich ein gewisses Schwanken der aufgebrachten Last heraus, selbst wenn die Druckpumpe, die die Presse betätigt, ziemlich gleichmäßig arbeitet. Trotz dieser Nachteile hat dieses Verfahren Ergebnisse geliefert, die innerhalb der Grenzen des praktisch Notwendigen liegen, so daß es verwendet werden kann, wenn der sonst vorzuziehende Apparat mit Waagebalken nicht verfügbar ist.

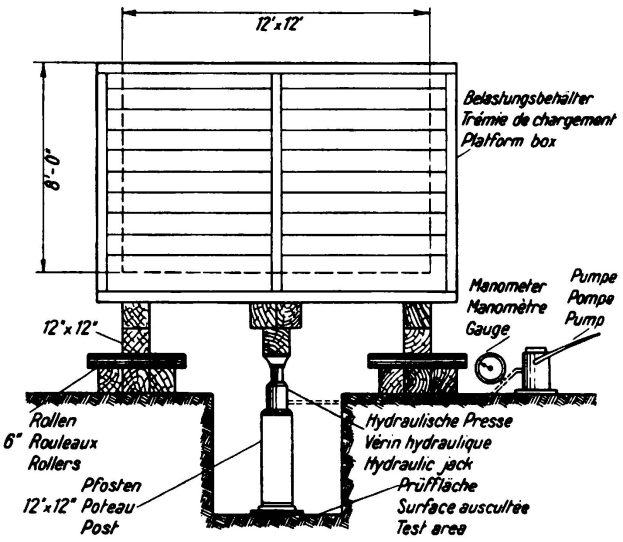

Fig. 3.
Bodenbelastungsversuch mit hydraulischer Presse.

Größe und Gestalt der Prüfflächen.

Die Größe und Gestalt der Belastungsflächen ist von größter Bedeutung bei dem Prüfverfahren; bei den bisher durchgeführten Versuchen wiesen sie eine Größe von 1 bis 9 Quadratfuß auf. Bei den Versuchen wurden verschiedene Plattenformen benutzt mit dem Ergebnis, daß die runden Belastungsplatten für das normale Prüfverfahren ausgewählt wurden. Die Auswirkung der Verschiedenheit der Gestalt der Platte wird in Fig. 4 gezeigt, welche das Last-Setzungsdiagramm für 3 Prüfflächen von 4 Quadratfuß zeigt bei runder, quadratischer und rechteckiger Gestalt der Fläche, wobei das Rechteck ein Verhältnis der Länge zur Breite von 7:1 aufwies.

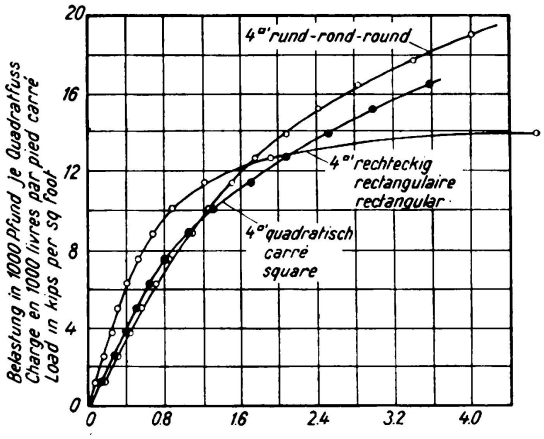

Fig. 4.
Tragfähigkeit infolge von Belastungsplatten verschiedener Formen.

Bei der Durchführung von Belastungsversuchen wurde beobachtet, daß für die niedrigen Belastungsstufen die Druckkonzentration längs des Umrisses der belasteten Fläche gewöhnlich den größeren Teil des Widerstandes ausmacht. Bei den höheren Belastungsstufen dringen die Platten in den Boden ein und es zeigen sich verschiedene Gleitflächen an den

Kanten, die bewirken, daß der Widerstand sich gleichmäßiger über die gesamte belastete Fläche verteilt.

Der anteilige Einfluß des an dem Umfang der Belastungsfläche entwickelten Widerstandes und der Widerstand, der unabhängig von der Umfangslinie ist, wird zweckmäßigerweise durch das Umfang-Flächenverhältnis ausgedrückt. In dem angeführten Beispiel beträgt das Umfang-Flächenverhältnis für die runde, quadratische und rechteckige Fläche 1,77, 2,00 und 3,04. Dementsprechend ist die bei einer gegebenen Setzung aufnehmbare Last bei den niedrigeren Belastungsstufen verhältnismäßig größer für die größeren Umfang-Flächenverhältnisse. Bei den höheren Laststufen ist die Größenordnung der entsprechenden Widerstandsfähigkeiten umgekehrt, und es zeigt sich, daß die Platten mit einem größeren Umfang-Flächenverhältnis verhältnismäßig weniger Belastung aufnehmen können.

Dieser Wechsel in der Tragfähigkeit, der von der Form der Platte abhängt, ist bei der Ermittlung der natürlichen Spannungszustände des Bodens als Mangel der quadratischen und rechteckigen Form zu betrachten. In einem Körper von unendlicher Ausdehnung, der durch Oberflächenlasten beansprucht wird, werden Punkte gleicher Spannung in gleichen Abständen von der konzentrierten Last entstehen, d. h. die Spannungsflächen in horizontalen Schnitten sind kreisförmig. Eine runde Belastungsfläche entwickelt gleiche Druckspannungen an allen Punkten ihres Umfanges, während quadratische oder rechteckige Flächen den Boden an den Ecken überbeanspruchen, bevor an anderen Punkten des Umfanges der höchste Widerstand erreicht wird. Man kann sagen, daß bei den niedrigeren Belastungsstufen die rechteckigen Formen dazu neigen, Einflußflächen zu entwickeln, die durch einen um die Fläche umschriebenen Kreis dargestellt werden können. Bei den höheren Belastungsstufen wird die beeinflußte Fläche sich einem eingeschriebenen Kreis nähern, da die Spannungshäufungen an den Ecken ihren Einfluß auf die Tragfähigkeit verlieren.

Bei dem Versuch, die Tragfähigkeit unter Berücksichtigung der Auswirkung der Größe der belasteten Fläche zahlenmäßig in Formeln auszudrücken, ist es wichtig, daß dieselbe Plattenform bei jeder der Versuchsreihen angewendet wird. Es wird weiterhin als zweckmäßig betrachtet, runde Belastungsflächen zu verwenden, da sie den Einfluß der Plattenform beseitigen, wie z. B. die Eckverluste, die nicht so sehr eine Funktion der Bodeneigenschaften sind, als eine durch das Prüfverfahren hervorgerufene Unregelmäßigkeit bedeuten.

Einfluß der umliegenden Auflast.

Der nächste bei den Versuchen zu berücksichtigende Umstand ist der Einfluß der umliegenden Auflast. Wenn die Versuche zu dem Zweck vorgenommen werden, die Tragfähigkeit des Bodens auf Grund der Kohäsion allein zu erfassen, müssen sie auf einer freien Oberfläche ausgeführt werden, bei der auf den Flächen neben der belasteten Fläche keine Auflast vorhanden ist. Um dies zu erreichen, muß die Versuchsgrube wenigstens den dreifachen Durchmesser der Belastungsfläche aufweisen.

Versuche, welche die umliegende Auflast voll berücksichtigen, sollten in Versuchsgruben ausgeführt werden, die die genauen Abmessungen der Belastungsfläche aufweisen. In weicheren Böden hat es sich als notwendig erwiesen, eine

Hülse oder ein Rohr von derselben Größe wie die Belastungsfläche einzurammen und die Versuche am Boden der Hülse auszuführen. Bei kohärenten Böden ist die Tendenz des Bodens, sich hochzudrücken und über die Belastungsplatte zu quellen geringer, und die volle Wirkung der statischen Auflast kann erreicht werden, ohne die Seitenflächen der ausgehobenen Prüfgrube zu sichern.

Untersuchungen, welche sowohl Versuche mit und ohne umliegende Auflast einschließen, um die Wirkung der Auflast zu erfassen, zeigen, daß der durch eine Belastungsfläche aufnehmbare Druck sich um einen Betrag vergrößert, der zum mindesten gleich der Höhe der Auflast ist. Weiterhin ist jedoch eine zusätzliche Tragfähigkeit vorhanden, die den Reaktionen am Umfang zuzuschreiben ist; jedoch ist diese Wirkung von geringerer Größenordnung. In den Fällen, wo Versuche ohne umliegende Auflast als Grundlage für tiefliegende Fundamente benutzt wurden, hat sich die allgemeine Regel, die auftretende Druckspannung um einen Betrag zu vergrößern, der gleich dem Druck der umliegenden Auflast ist, als ein gesundes Verfahren erwiesen und kann sowohl theoretisch als auch versuchsmäßig gerechtfertigt werden. Wo allerdings endgültig feststeht, daß die Fundamente der in Aussicht genommenen Konstruktion dauernd unter der Einwirkung umliegender Auflast stehen, ist es jedoch wünschenswert, die Versuche in einer Weise durchzuführen, wie sie den genauen Bedingungen, denen die Fundamente unterworfen sind, entspricht.

Berücksichtigung des Faktors Zeit.

Der Faktor Zeit hat bedeutenden Einfluß auf das Versuchsverfahren. Nach umfangreichen Untersuchungen wurde festgestellt, daß es für die bei den Belastungsversuchen verwendete Größe der Belastungsflächen genügt, die Last während 1 Stunde konstant zu erhalten, um bei Belastungen, die unterhalb der Tragfähigkeitsgrenze des Bodens oder seiner Fließgrenze liegen, die gesamte Setzung bis auf eine vernachlässigbare Größe zu messen. Für Belastungen jenseits der Fließgrenze nimmt selbstverständlich die Setzung dauernd zu, und ist es deshalb von wesentlicher Bedeutung, daß die Zeitintervalle für alle Laststeigerungen und bei allen Größen der Belastungsflächen konstant gehalten werden. Die konstante Zeitdauer ferner ist äußerst wichtig bei der Ermittlung der Veränderung in der Tragfähigkeit durch verschiedene Größe der Belastungsflächen und dementsprechend für die Feststellung der in dem Bodenkörper auftretenden Spannungen.

Messungen von Last und Setzung.

Beim Versuch muß die Last in genügend kleinen Stufen gesteigert werden, damit eine Reihe von Punkten des Last-Setzungs-Diagramms ermittelt werden kann, bevor die Fließgrenze erreicht wird. Die Größe der Laststeigerung muß aus vorhergehenden Untersuchungen geschätzt oder durch einen Vorversuch bestimmt werden.

Die Setzung wird auf der Setzungskarte in der bereits beschriebenen Art aufgezeichnet und zwar unmittelbar vor und nach jedem Aufbringen der Last und weiterhin in genügend häufigen Zwischenräumen, bevor eine weitere zusätzliche Last aufgebracht wird. Die dadurch erzielte kontinuierliche Aufzeichnung der

Setzung stellt deutlich das Verhalten des Bodens während der verschiedenen Belastungsstadien dar und ermöglicht es dem Untersuchenden, die allmähliche Annäherung an das Stadium der fortschreitenden Setzung zu bestimmen.

II. Auswertung der Versuche.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse umfaßt vier veränderliche Faktoren, die in die Beobachtungen bei den Belastungsversuchen eingehen. Diese sind: *Zeit, Belastung, Setzung und Größe der Belastungsfläche.*

Die auf der Baustelle gemachten Beobachtungen sind so vorgenommen worden, daß der Faktor Zeit bei der nachfolgenden Auswertung insofern ausgeschieden werden kann, als alle Belastungen und Setzungen sich auf die gleichen Zeiträume beziehen. Man kann annehmen, daß die gemessenen Setzungen bei Belastungen, die beträchtlich unterhalb der Fließgrenze liegen, die gesamte Setzung unabhängig von der Zeit darstellen, während Belastungen jenseits der Fließgrenze immerhin einen Maßstab für die Geschwindigkeit der Setzung für jede gegebene Größe der Belastung ergeben. Das Ziel der nachfolgenden Untersuchung, die die drei bleibenden Veränderlichen umfaßt, ist, die Last zu bestimmen, bei der eine fortschreitende Setzung eintritt, unter Berücksichtigung der Abmessungen der Belastungsfläche, die die Spannungsreaktionen und damit die Tragfähigkeit beeinflussen.

Zeit-Last-Setzungsdiagramme.

Der erste Schritt beim Auswerten der Ergebnisse ist eine Darstellung der Beziehung zwischen Zeit, Last und Setzung für jede Belastungsfläche, um ein klares Bild des Verhaltens des Bodens zu gewinnen. Ein typisches Zeit-Last-Setzungsdiagramm gibt Fig. 5 wieder.

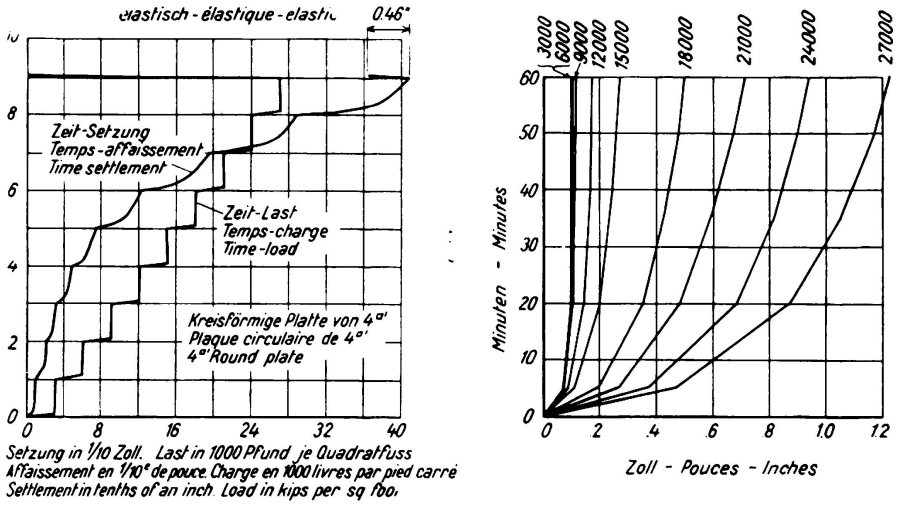

Fig. 5.
Zeit-Last-Setzungsdiagramme.

Last und Setzung sind als Abszissen aufgetragen und die Zeit als Ordinate. Das Zeit-Lastdiagramm zeigt die Etappen, in denen die Last aufgebracht wurde, und das kontinuierliche Zeit-Setzungsdiagramm zeigt das Entstehen der gesamten Setzung. Das Zeit-Last-Setzungsdiagramm ist nur eine graphische Darstellung

der Versuchswerte und ist zur Auswertung nicht unbedingt notwendig. Es gibt jedoch ein klares Bild der Versuchsergebnisse, das für die weitere Auswertung eine wertvolle Grundlage abgibt. Die Zeitabschnitte, während deren die Last konstant erhalten ist, betragen 1 Stunde, und die Zunahme der Setzung für jede Laststufe ist auf der rechten Seite der Fig. 5 durch eine Kurvenschar dargestellt, bei denen die Setzung im Verhältnis zur Zeit für die verschiedenen Belastungen aufgetragen ist. Die für diese Abbildung benutzten Versuche betrafen eine runde Tragfläche von 4 Quadratfuß Größe, und sind eine der drei Versuche umfassenden Reihen, die bei der weiteren Auswertung benutzt wurden. Die Setzung für die ersten drei Laststufen von 3000, 6000 und 9000 Pfund je Quadratfuß sind praktisch gleich und ergeben eine gradlinige Beziehung zwischen Last und Setzung, die typisch für ein elastisches Verhalten ist. Ein großer Prozentsatz der Setzungen vollzog sich in dem Augenblick, wo die Last aufgebracht wurde, und die Gesamtsetzung vollzog sich innerhalb der ersten 20 Minuten. Durch diese Versuche wurden deutlich elastische Eigenschaften angezeigt und gleichfalls zeigte der elastische Rückgang von 0,46 Zoll, der am Schluß des Versuches auftrat, ein elastisches Verhalten an. Nachdem die Last auf 12000 Pfund je Quadratfuß erhöht worden war, nahm die Setzung während des ganzen Zeitraums von 1 Stunde, während der die Last konstant erhalten wurde, dauernd zu. Bei jeder folgenden Laststeigerung war eine entsprechende Zunahme des Ausmaßes der Setzung zu verzeichnen. Aus dem Last-Setzungsdiagramm würde sich die Tragfähigkeitsgrenze für die 4 Quadratfuß große Fläche zwischen 9000 und 12000 Pfund je Quadratfuß ergeben. Die später wiedergegebene Auswertung der Versuchsergebnisse bestätigt diese Schlußfolgerung und zeigt, daß die Tragfähigkeitsgrenze für die 4 Quadratfuß große Fläche 9630 Pfund je Quadratfuß beträgt.

Last-Setzungsdiagramme.

Der nächste Schritt in der Auswertung ist, die gesamte Setzung, die für jede Laststeigerung gemessen wurde, im Verhältnis zu der Last in Pfund je Quadratfuß aufzutragen und den Faktor Zeit zu eliminieren. Eine Reihe von unkorrigierten Last-Setzungsdiagrammen sind in Fig. 6 wiedergegeben. Die Beziehung zwischen Last und Setzung für die ersten geringen Laststeigerungen sind in einem großen Maßstabe in Fig. 6b aufgetragen. Es müssen noch zwei Korrekturen vorgenommen werden, bevor die Versuchsergebnisse für die weitere Auswertung verwendet werden können. Erstens ist zu berücksichtigen, daß durch das Gewicht der Belastungsplatte, des Druckstempels und der Presse auf den Boden eine tote Last aufgebracht worden ist, bevor irgendeine Setzungsmessung vorgenommen werden konnte. Zweitens muß eine Korrektur für nicht normale vorhergehende Setzungen vorgenommen werden, um sämtliche Kurven auf den gleichen Ausgangspunkt zu beziehen. Eine nicht normale vorhergehende Setzung entsteht dadurch, daß es unmöglich ist, eine vollkommen dichte Berührung zwischen der Platte und dem Boden zu erzielen, bevor die erste Last aufgebracht wird. Dies ist besonders bei den größeren Platten zu beachten, wo die Pressung, die auf das tote Gewicht zurückzuführen ist, verhältnismäßig gering ist. Bei den kleineren Platten reicht das tote Gewicht vielfach aus, um die Platte in feste Berührung mit dem Boden zu bringen, bevor eine weitere Last aufgebracht wird.

Die Korrektur für die tote Last wird dadurch vorgenommen, daß man der gemessenen Setzung einen Betrag zuzählt, der proportional dem Druck des toten Gewichts ist, und am besten durch die gradlinige Beziehung von Last und Setzung für die ersten geringen Steigerungen der Auflast zu ermitteln ist. Die nicht normale vorhergehende Setzung wird durch den Schnitt der die gradlinige Beziehung am besten wiedergebenden Geraden mit der horizontalen Achse der Setzung ermittelt und muß von den gemessenen Setzungen abgesetzt werden. Die reine Korrektur ist die Summe der beiden Teilkorrekturen für die Setzung. Diese absolute Korrektur kann graphisch in einem Arbeitsgang, wie in Fig. 6b gezeigt ist, vorgenommen werden, indem man die gerade Linie, die die Beziehung

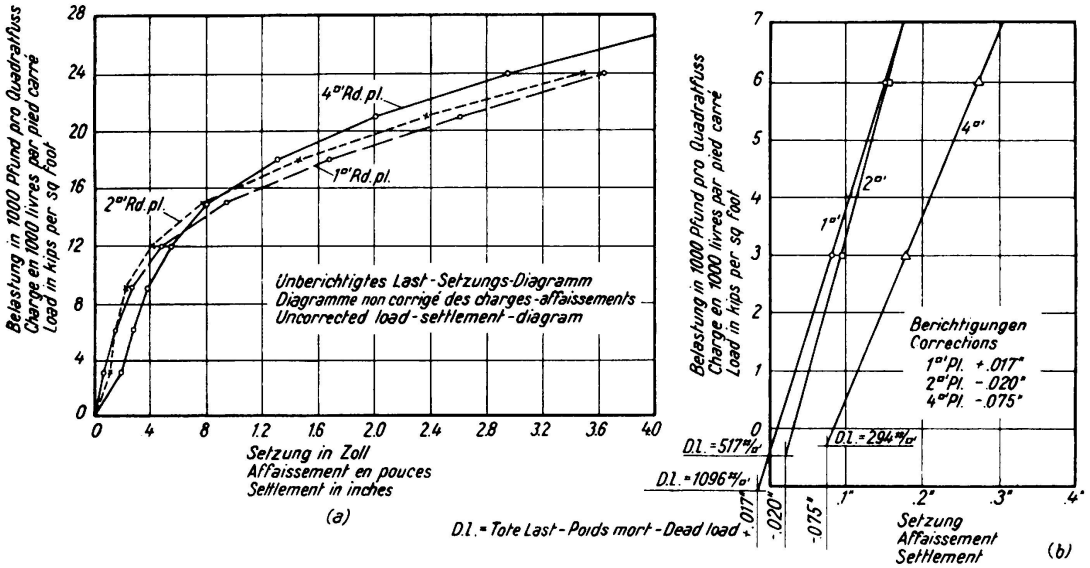

Fig. 6.

Unberichtigtes Last-Setzungsdiagramm und Verbesserungen.

von Last und Setzung darstellt, unter der Achse der Nullast um einen Betrag verlängert, der dem toten Gewicht entspricht, und die reine Korrektur als die Setzung ermittelt, die zuzuzählen oder abzuziehen ist, um den Ursprungspunkt der Linie auf die Nullachse der Setzung zu bringen.

Die korrigierten Last-Setzungsdiagramme, die in Fig. 7 wiedergegeben sind, sind durch Auftragen der korrigierten Setzung gegenüber der Gesamtbelastung, also des toten Gewichts zuzüglich der Auflasten entstanden. Diese Diagramme geben die Versuchsergebnisse wieder, welche nun dazu benutzt werden müssen, die Spannungsreaktionen zu bestimmen, die durch eine Veränderung in der Lasthöhe, bei verschiedenen Größen der Belastungsflächen und verschiedenen Umfangs-Flächenverhältnissen eintreten.

Beziehungen für die Tragfähigkeit.

Um die Veränderung der Tragfähigkeit mit der Größe der belasteten Fläche zu ermitteln, werden die bei den verschiedenen Setzungen aufgenommenen Lasten aus dem korrigierten Last-Setzungsdiagramme abgelesen. Eine Gleichung, die diese Veränderung ausdrückt, ist durch statistische Verfahren aufgestellt worden. Die Auswertung von etwa 15 Reihen von Versuchen zur Bestimmung der Trag-

fähigkeit hat ergeben, daß die Annahme einer linearen Beziehung zwischen Belastung und Umfangs-Flächenverhältnis sich mit der versuchsmäßigen Beobachtung deckt.

Solch eine lineare Gleichung ist auf der Grundlage aufgestellt, daß die gesamte durch eine gegebene Belastungsfläche aufgenommene Last als die zusammen-

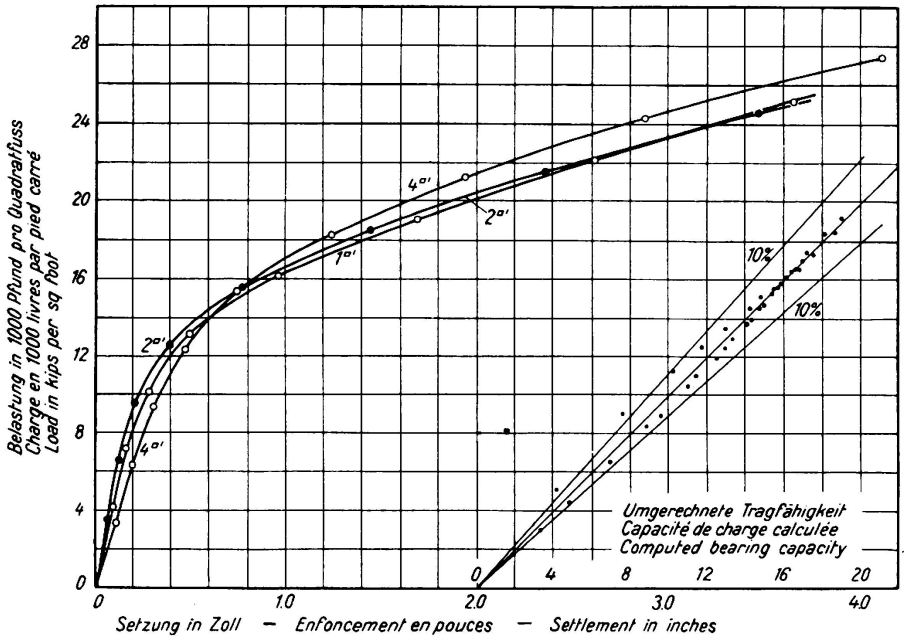

Fig. 7.

Berichtigtes Last-Setzungsdiagramm.

gesetzte Wirkung von 2 Spannungsreaktionen ausgedrückt werden kann, die als Umfangsscherkraft und als Kraft inf. des entwickelten Flächendruckes bezeichnet werden können.

Diese Gleichung lautet folgendermaßen:

$$W = mP + nA \tag{1}$$

wobei W = Gesamtlast in Pfund,
m = Umfangsscherkraft in Pfunden auf einen Fuß des Umfanges,
n = entwickelter Flächendruck in Pfunden je Quadratfuß,
P = Umfang in Fuß,
A = Fläche in Quadratfuß.

Fig. 8 stellt die Verhältnisse, unter denen sich die Spannungsreaktionen an der belasteten Fläche entwickeln, dar. Die Zone, welche die Belastungsfläche unterstützt, wird im allgemeinen als Druckkegel bezeichnet. Dieser Teil ist weiterhin aufgeteilt, indem man jenen Teil, der unmittelbar unter der Belastungsfläche liegt, als die Mittelsäule bezeichnet. Wenn die Belastungsfläche belastet ist, wird ein Teil der Last durch den Scherwiderstand am Umfange auf jenen Teil des Druckkegels übertragen, der die Mittelsäule umgibt. Dies ist die Gesamtheit des Scherwiderstandes, der auf die Umfangsfläche wirkt und diese Umfangs-Spannungsreaktion ergibt, die als Umfangsscherkraft bezeichnet wurde. Bis

heute ist die Verteilung dieses Scherwiderstandes mit der Tiefe noch nicht festgestellt worden. Infolgedessen ist in der Gleichung dieser Teil des Widerstandes für die Tragfähigkeit als zusammengefaßte am Umfang wirkende Kraft eingeführt und in Pfund je linearen Fuß ausgedrückt.

Wenn die Belastung zunimmt, reicht der Umfangsscherwiderstand nicht mehr aus, um die senkrechte Kraft seitlich zu übertragen und weitere Laststeigerungen werden als Druckspannung durch die Mittelsäule aufgenommen. Diese Konzentration der Last auf die Mittelsäule setzt sich fort, bis die Tragfähigkeit der Mittelsäule für senkrechte Lasten erschöpft ist. Ihre Tragfähigkeit ergibt sich aus zwei Quellen. Einmal kann sich die senkrechte Konzentration der Last vergrößern und nach unten weiter übertragen, bis der Unterschied zwischen dem senkrechten und dem seitlichen Druck den Scherwiderstand des Bodens an geneigten Ebenen der größten Scherkraft überschreitet. Weiterhin können, ohne daß ein Nachgeben eintritt, weitere Lasten aufgebracht werden, solange der seitliche Druck, der durch das umliegende Material auf die Mittelsäule ausgeübt wird, nicht überschritten wird. Diese verschiedenen Faktoren werden in einer einzigen Spannungsreaktion zusammengefaßt, die als entwickelter Flächendruck bezeichnet wird und von der Größe der Belastungsfläche unabhängig ist.

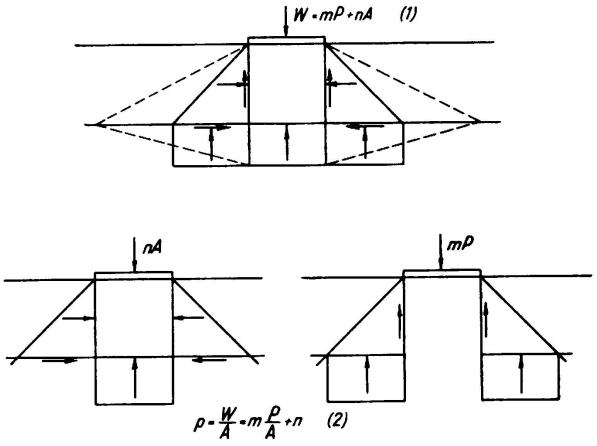

Fig. 8.
Spannungsreaktionen in der linearen Gleichung für die Tragfähigkeit.

Da es in der Baupraxis üblich ist, die Tragfähigkeit in Pfund je Quadratfuß auszudrücken, muß die Gleichung für die Gesamtlast zweckmäßig auf einer Durchschnittsdruckspannung aufgebaut werden, die als Tragfähigkeit bezeichnet wird. Diese Gleichung für die Tragfähigkeit kann man erhalten, indem man beide Seiten der Gleichung für die Gesamtlast durch die Lastfläche dividiert und sie ergibt sich dann wie folgt:

$$p = m \frac{P}{A} + n \tag{2}$$

In der linearen Gleichung (2), die bei der Auswertung von Belastungsversuchen benutzt wird, sind die Spannungsreaktionen m und n unbekannt und müssen durch die Lösung einer Reihe von Gleichungen ermittelt werden, welche die Lasten in Pfund je Quadratfuß angeben, die bei einem gegebenen Betrag der Setzung durch verschiedene Belastungsflächen aufgenommen werden. Je zwei Gleichungen sind für eine Bestimmung der Spannungsreaktionen m und n ausreichend. Es hat sich jedoch als zweckmäßig erwiesen, drei oder mehr Belastungsflächen zu untersuchen, um einen besseren Durchschnittswert für diese Faktoren zu erhalten. Die Veränderung in den Spannungsreaktionen für die ganze Reihe der Versuche wird durch die Lösung einer solchen Reihe von Gleichungen für verschiedene Setzungsbeträge ermittelt.

In Fig. 9 sind die Werte für die Spannungsreaktionen m und n für die Versuchsreihen angegeben, welche die drei Versuchsflächen, die in Fig. 7 wiedergegeben wurden, umfassen. Die Genauigkeit, mit der die Gleichung (2) die Versuchsergebnisse wiedergibt, kann durch Einsetzen der wahrscheinlichsten Werte von m und n festgestellt werden, indem man die Ergebnisse mit der tatsächlich gemessenen Belastung je Flächeneinheit für jede Belastungsfläche vergleicht.

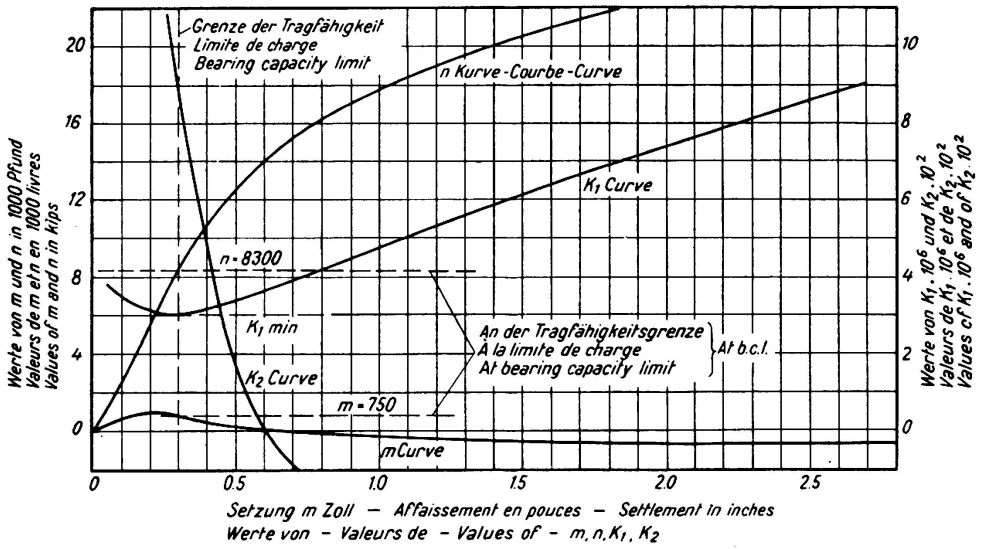

Fig. 9.

Spannungsreaktionen und Kennziffern des Bodenwiderstandes.

Solch ein Vergleich ist in Fig. 7 gezeigt, wobei die errechneten Werte der Tragfähigkeit gegenüber den gemessenen Belastungen aufgetragen sind. Mit Ausnahme von einigen Punkten im niedrigen Bereich der Belastung ist die Übereinstimmung zwischen der Gleichung und der Beobachtung gut und umfaßt eine Fehlerspanne von 10%, wodurch weiterhin die Gültigkeit der Gleichung (2) innerhalb der Versuchsgenauigkeit beim Prüfverfahren bewiesen wird.

Kennziffern für den Bodenwiderstand.

Der Zweck jeder Auswertung von Versuchsergebnissen von Böden ist, die Höchstlast zu bestimmen, welche ohne außergewöhnliche Setzung aufgenommen werden kann. Es genügt zu berücksichtigen, daß es zwei Stadien des Verhaltens des Bodens gibt, die durch die Versuchsergebnisse angezeigt werden. Das erste Stadium ist dasjenige, wo der Boden die aufgebrachte Last ohne fortschreitendes oder übermäßiges Setzen aufnimmt. Im zweiten Stadium wird der Boden über seine Fließgrenze beansprucht, was sich in fortschreitendem Setzen äußert, das ziemlich gleichmäßig anhält, solange die Belastungsverhältnisse unverändert bleiben. Der Übergangspunkt zwischen diesen beiden Stadien kann als *Tragfähigkeitsgrenze* bezeichnet werden, deren Bestimmung der hauptsächlichste Zweck der Belastungsversuche ist, und auf die die Auswertung der Versuche gerichtet ist. Die in Fig. 9 gezeigten m und n Kurven liefern keine Kennziffer für die Tragfähigkeitsgrenze des Bodens. Um sie zu bestimmen ist es vielmehr erforderlich, die Bodenwiderstandskennziffern K_1 und K_2 zu benutzen, welche sich wie im Anhang gezeigt wird, aus den gemessenen Setzungswerten Δ, m und n ab-

leiten lassen. K_1 ist das Verhältnis der Setzung zum entwickelten Flächendruck und wird als *Setzungskennziffer* bezeichnet $\left(K_1 = \frac{\Delta}{n}\right)$. Diese entspricht der bekannten Bettungsziffer mit dem Unterschied, daß sie die gesamte Setzung als Volumenveränderung in dem Bodenkörper ausdrückt, den der Druckkegel einschließt, statt die Verformung je Volumeneinheit anzugeben. K_2 ist das Verhältnis der Umfangsscherkraft dividiert durch den entwickelten Flächendruck und wird als Spannungsreaktionskennziffer bezeichnet $\left(K_2 = \frac{m}{n}\right)$. Sie drückt das gegenseitige Verhältnis der beiden Spannungsreaktionen, die die Tragfähigkeit beeinflussen, aus.

Die Tragfähigkeitsgrenze des Bodens kann als der Mindestwert von K_1 oder als der Höchstwert von K_2 bestimmt werden, je nach der Reihe, in der die beiden Arten von Widerstand entwickelt werden. Für einen verhältnismäßig stark zusammendrückbaren Boden ist der entwickelte Flächendruck für die niedrigen Laststufen gering, und der größte Teil der aufgebrachten Last wird durch die Umfangsscherkraft aufgenommen. Wenn die Setzung zunimmt und die Belastungsplatte in die Oberfläche eindringt, so nimmt der entwickelte Flächendruck zu und die Werte von K_1 nehmen ab, wie in Fig. 9 gezeigt wird. Die abnehmenden Werte von K_1 zeigen, daß der Flächendruck rascher zunimmt als die Setzung und zeigen eine Widerstandsgrenze an, an der die belastete Fläche im Gleichgewicht ist, wenn keine weitere Last mehr aufgebracht wird. Der Mindestwert von K_1 bestimmt den entwickelten Höchstdruck bei Böden, welche verhältnismäßig stark zusammendrückbar sind. Die folgenden zunehmenden Werte von K_1, bei denen die Setzung rascher zunimmt als die auftretende Druckspannung, zeigen, daß die Setzungen nicht mehr proportional der Zunahme des Widerstandes anwachsen, und kennzeichnen das Stadium der fortschreitenden Setzung. Währenddessen nehmen die Werte von K_2 ab und zeigen keinen kritischen Wechsel in ihrem Verhalten. Der Teil der Tragfähigkeit, der auf die Umfangsscherkraft entfällt, war im ersten Belastungsstadium vorhanden, und, nachdem er vollständig ausgenutzt ist, übt er keinen weiteren Einfluß im Stadium der fortschreitenden Setzungen aus.

In Fig. 9 liegt die Tragfähigkeitsgrenze für den Mindestwert von K_1 bei einer Setzung von 0,3 Zoll, wobei die Umfangsscherkraft $m = 750$ Pfund je linearen Fuß ist, und ein entwickelter Flächendruck von $n = 8300$ Pfund je Quadratfuß auftritt. Als Beispiel für die Verwendung der Versuchsergebnisse in der linearen Gleichung (2) soll die Tragfähigkeitsgrenze der 4 Quadratfuß großen runden Platte im folgenden errechnet werden:

$$p = m \cdot \frac{P}{A} + n \tag{2}$$

$$\frac{P}{A} = 1{,}77 \qquad m = 750 \qquad n = 8\,300$$

$$p = 750 \cdot 1{,}77 + 8300 = 9630 \text{ Pfund/Quadratfuß.}$$

Eine andere Reihe von Belastungsversuchen ist in Fig. 10 wiedergegeben als ein Beispiel, bei dem der Höchstwert von K_2 die Tragfähigkeitsgrenze bestimmt. In diesem Falle wurden die Belastungsversuche mit runden Belastungsplatten auf demselben Boden wie bei den im vorhergehenden Beispiel wiedergegebenen Ver-

suchen ausgeführt, jedoch war auf den umliegenden Flächen eine Auflast von ungefähr 1000 Pfund je Quadratfuß vorhanden. Der Flächendruck stieg bis zu 10000 Pfund je Quadratfuß und die Umfangsscherkraft bis zu 2400 Pfund je linearen Fuß an; die Tragfähigkeitsgrenze ergab sich bei einer etwas größeren Setzung von 0,45 Zoll. Die Übereinstimmung zwischen den gemessenen Belastungen in Pfund je Quadratfuß und der mit der linearen Gleichung errechneten Tragfähigkeit ist außerordentlich gut.

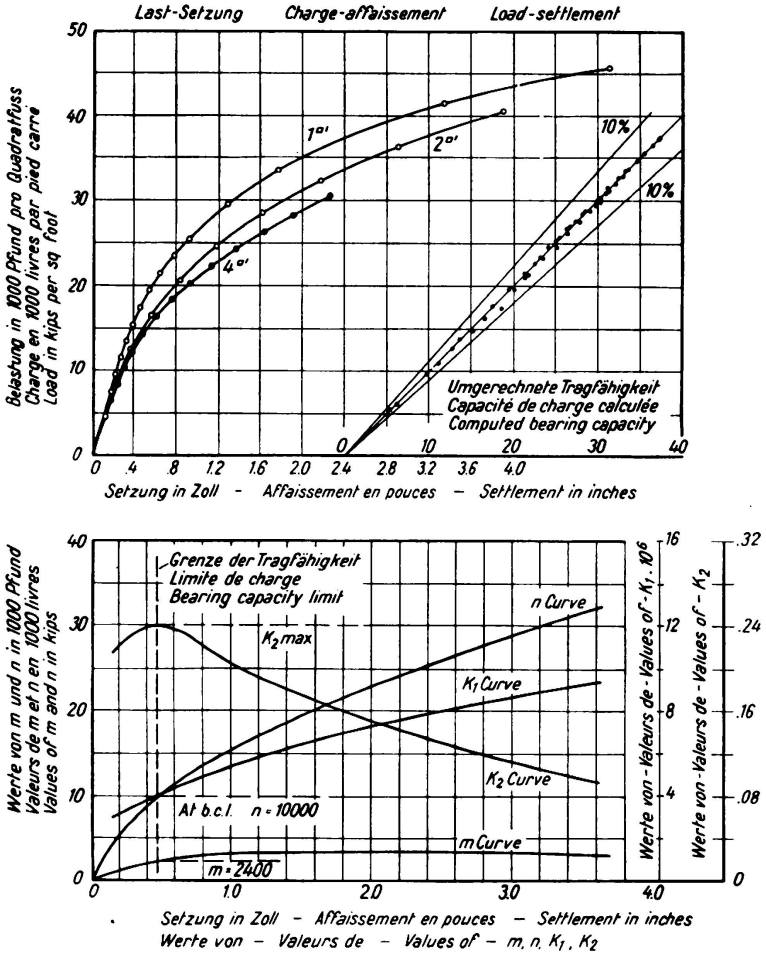

Fig. 10.

Kennziffer des Bodenwiderstandes für nicht zusammendrückbaren Boden.

In dem Falle, wo ein verhältnismäßig wenig zusammendrückbarer Boden vorliegt, bei dem die Tragfähigkeit im Verhältnis zur Volumenveränderung groß ist, ist der Flächendruck schon von vornherein vorhanden und die Umfangsscherkraft entwickelt sich erst bei zunehmender Setzung. Als Ergebnis der Umkehrung der Folge, in der die Spannungsreaktionen sich entwickeln, wird die Setzungskennziffer K_1 während des ganzen Verlaufs des Versuches größer, und es zeigt sich kein kritischer Wert. Die Spannungsreaktionskennziffer K_2 indessen nimmt während des ersten Stadiums zu und erreicht einen Höchstwert, welcher den Höchstbetrag der Last darstellt, die auf den Bodenkörper durch die Umfangsscherkraft übertragen werden kann. Der Höchstwert K_2 ist dann die Kennziffer für die Tragfähigkeitsgrenze.

III. Praktische Anwendung der Ergebnisse von Belastungsversuchen.

Wie in den vorhergehenden Beispielen dargelegt, können die Ergebnisse von Belastungsversuchen unmittelbar unter Verwendung der Gleichung (2) für die Tragfähigkeit auf den Entwurf von Gründungen angewendet werden, wenn man eine bestimmte Setzung annimmt.

Drei Beispiele sollen im Nachstehenden wiedergegeben werden, in denen Belastungsversuche in dieser Weise angewendet worden und für die auch Setzungsbeobachtungen an den fertigen Bauwerken vorhanden sind.

Überführung der Fort-Straße.

Fig. 11 zeigt die Werte von m, n, K_1 und K_2 für eine Reihe von Belastungsversuchen mit runden Platten unter Berücksichtigung der umliegenden Auflast, welche als Grundlage für den Entwurf von sechs Pfeilern für eine Straßenüber-

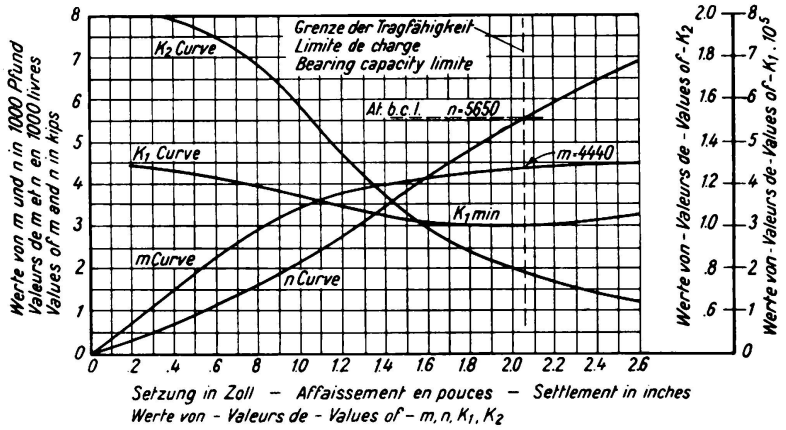

Fig. 11.

Ergebnisse von Belastungsversuchen für die Überführung der Fort-Straße.

führung in Detroit (Michigan) benutzt wurden. Die Werte aus den Belastungsversuchen an der Tragfähigkeitsgrenze waren folgende:

Setzung $\Delta = 2{,}05$ Zoll
Umfangsscherkraft $m = 4440$ Pfund/Fuß
entwickelter Flächendruck $n = 5650$ Pfund/Quadratfuß.

Die Pfeiler wurden für eine Setzung von einem Zoll bei Vollbelastung, also für ständige Last zuzüglich der angenommenen Verkehrslast entworfen. Die Setzungsmessungen wurden an jedem Pfeiler an drei Punkten vorgenommen. Ungefähr drei Monate, nachdem die ganze ständige Last der Konstruktion auf dem Boden wirkte, kamen die Pfeiler zur Ruhe und zeigten keine weiteren Anzeichen einer fortschreitenden Setzung unter diesen Lasten. Einen Vergleich der tatsächlichen Setzungen und der vorhergesagten Setzungen zeigt Tafel I. Die Werte von m und n bei Setzungen von 1,0, 0,9 und 0,8 Zoll sind aus den Ergebnissen der Versuche entnommen und die Tragfähigkeit ist für jeden Pfeiler unter Benutzung der Gleichung (2) errechnet. Die voraussichtliche Setzung für die aufgebrachte ständige Last wurde durch Interpolieren zwischen den errechneten Tragfähigkeiten für angenommene Setzungen gewonnen.

Tafel I.

Pfeiler	Abmessungen Länge	Abmessungen Breite	Fläche	Verhältnis $\frac{P}{A}$	Senkrechter Druck	Tragfähigkeiten für verschiedene Setzungen 1.0" n = 2225 m = 3500		0.9" n = 1940 m = 3270		0.8" n = 1675 m = 2970		Durch Interpolieren errechnete voraussichtliche Setzungen		Gemessene Setzungen	Gemessene Setzungen Mittel
	Fuß	Fuß	Quadrat-Fuß		Pfund/Quadrat-Fuß	$m\frac{P}{A}$	$m\frac{P}{A}+n$	$m\frac{P}{A}$	$m\frac{P}{A}+n$	$m\frac{P}{A}$	$m\frac{P}{A}+n$	Zoll	Fuß	Fuß	Fuß
1 Ost-Ende Mitte West-Ende	166	9	1494	0.234	2500	820	3045	765	2705	700	2375	0.84	0.070	0.061 0.980 0.060	0.073
2 Ost-Ende Mitte West-Ende	166	9	1494	0.234	2380	820	3045	765	2705	695	2370	0.80	0.067	0.074 0.0 4 0.075	0.078
3 Ost-Ende Mitte West-Ende	166	8	1328	0.262	2330	920	3142	860	2800	775	2450	0.76	0,064	0.074 0.078 0.066	0.073
4 Ost-Ende Mitte West-Ende	166	7	1162	0.297	2350	1040	3267	975	2915	885	2560	0.74	0.062	0.083 0.072 0.084	0.079
5 Ost-Ende Mitte West-Ende	150	9	1350	0.235	2550	825	3050	770	2710	700	2375	0.85	0.071	0.108 0.108 0.091	0.102
6 Ost-Ende Mitte West-Ende	150	8	1200	0.263	2600	920	3147	860	2800	780	2455	0.84	0.070	0.073 0.082	0.078

Die Übereinstimmung zwischen der Setzung der Pfeiler und der auf Grund der Belastungsversuche vorhergesagten Setzungen ist genügend genau, um einen überzeugenden Beweis der Verwendbarkeit von in richtiger Weise ausgeführten Belastungsversuchen zu bieten. Die einzige wesentliche Unstimmigkeit beim Pfeiler 5 muß vorwiegend Ausführungsschwierigkeiten zugeschrieben werden, welche sich dadurch ergaben, daß die Baugrube durch heftige Regen überflutet wurde. Der Boden in unmittelbarer Nachbarschaft der Fundamente war erheblich gestört und unter dem Fundament wurde vor dem Betonieren eine Schicht von grobem Kies eingebracht. Die Neigung des Tons, sich in Hohlräume des Kieses einzuquetschen, dürfte vermutlich die Ursache für die festgestellte größere Setzung sein.

Überführung der Miller-Straße.

In Fig. 12 sind die Werte von m, n, K_1 und K_2 für eine Reihe von Versuchen wiedergegeben, die durch die Wege-Kommission von Wayne-County in Zu-

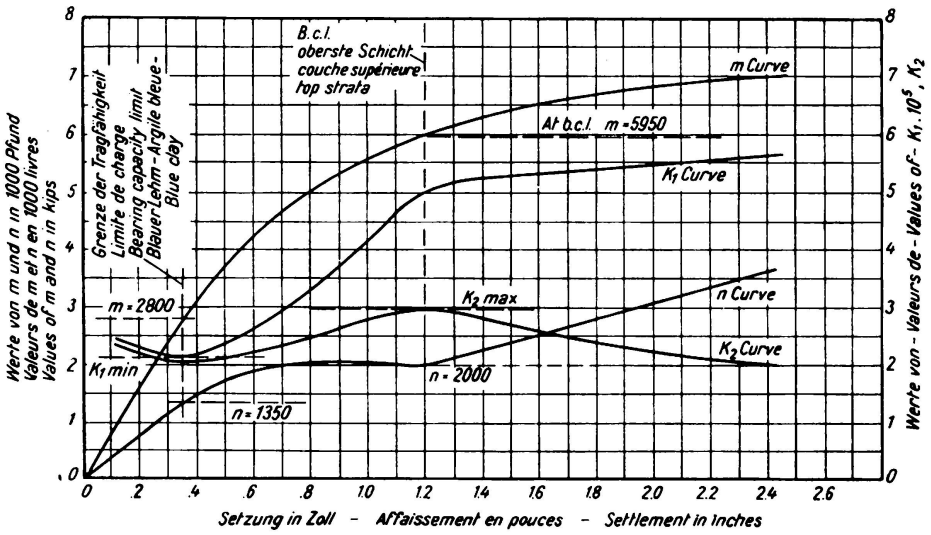

Fig. 12.

Ergebnisse von Belastungsversuchen für die Überführung der Miller-Straße.

sammenhang mit der Ausführung einer größeren Straßenüberführung in der Miller-Straße in Detroit ausgeführt wurde. Die Bodenverhältnisse waren etwas außergewöhnlich und waren für die Ausführung der großen in Aussicht genommenen Konstruktion sehr bedenklich. Es erwies sich als notwendig, die Pfeilerfundamente auf eine Lage von steifem rotem Ton zu gründen, die nur 18 Zoll dick war und unter der eine Schicht von stark plastischem blauem Ton lag, der bis in eine Tiefe von über 100 Fuß über festem Untergrund anstand.

Die Versuche wurden in der Höhenlage der Schicht des steifen roten Tones ausgeführt in der Hoffnung, daß die verteilende Wirkung dieser 18 Zoll starken Schicht ausreichen würde, um eine sichere Aufnahme der aufgebrachten Lasten zu gewährleisten. Die Ergebnisse dieser Versuche waren besonders aufschlußreich und ergaben zwei Tragfähigkeitsgrenzen bzw. kritische Punkte. Die erste kritische Tragfähigkeitsgrenze ist gekennzeichnet durch einen kleinen Wert von

K_1 bei einer Setzung von 0,35 Zoll. Der kleine Wert von K_1 $\left(K_1 = \frac{\Delta}{n}\right)$ stellt den Höchstdruck dar, den das darunter liegende Material aufnehmen kann, ohne daß eine fortschreitende Setzung eintritt. Die Werte von m und n sind 2800 Pfund/Fuß bzw. 1350 Pfund/Quadratfuß.

Wenn die Belastung fortgesetzt wird, vergrößert sich der entwickelte Flächendruck sehr langsam und für ein erhebliches Maß der Setzung bleibt er ungefähr konstant bei einer Größe von ca. 2000 Pfund/Quadratfuß, wobei er eher einen leichten Rückgang zeigt. Gleichzeitig zeigt die Umfangsscherkraft eine erhebliche Zunahme, worin sich die Scherfestigkeit der obersten Schicht von steifem rotem Ton äußert, und die erhebliche Eignung der obersten Schicht für eine Lastverteilung auf die untenliegende Schicht hervortritt. Der kritische Punkt in diesem zweiten Stadium wird gekennzeichnet durch einen Höchstwert von K_2 $\left(K_2 = \frac{m}{n}\right)$. Der zunehmende Wert von K_2 ist der Tatsache zuzuschreiben, daß m rascher zunimmt als n, wodurch die Spanne des Widerstandes angezeigt wird, die auf die Umfangsscherkraft zurückzuführen ist. Der Höchstwert von K_2 und die nachfolgenden abnehmenden Werte zeigen, daß diese Spanne erschöpft ist, und die Belastungsplatte an dem Punkt angelangt ist, wo sie sich durch die oberste Lage hindurchdrückt.

Auf Grundlage dieser Versuche wurden 48 Pfeiler mit Plattenfundamenten ausgeführt, die auf der Schicht des steifen roten Tones aufsaßen und eine Gesamtbodenpressung zwischen 1550 und 1700 Pfund/Quadratfuß aufwiesen. Setzungsablesungen wurden an einigen besonderen Pfeilern vorgenommen, nachdem die Lager für die Säulen versetzt worden waren. Die gemessene Setzung

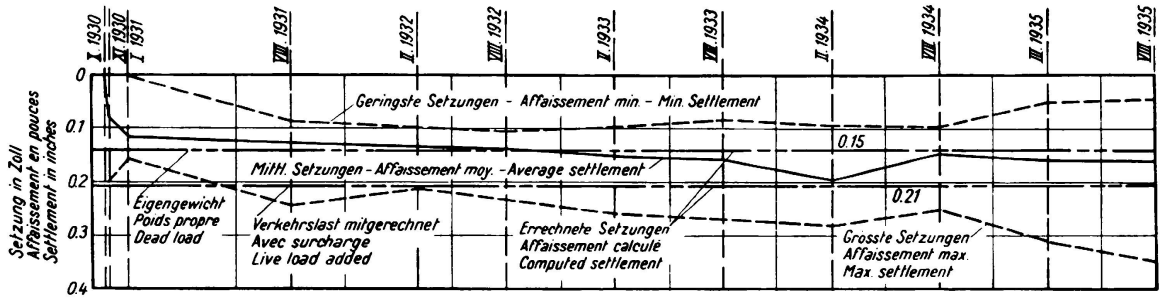

Fig. 13.

Setzungen der Pfeiler der Überführung an der Miller-Straße.

für die übrige aufgebrachte Last ist in Fig. 13 wiedergegeben. Die vorhergesagte Setzung ist für die ständige Last und die Nutzlast wiedergegeben. Die gute Übereinstimmung zwischen der gemessenen Setzung und der vorausgesagten Setzung für die ständige Last scheint anzuzeigen, daß die beweglichen Nutzlasten von geringerem Einfluß auf die Setzung sind. Es sind eine Durchschnittssetzung für alle Pfeiler angegeben und auch die größten und kleinsten Setzungen einzelner Pfeiler. Die durchschnittliche Gesamtsetzung beträgt z. Zt. 0,16 Zoll und ist etwas größer als die mit 0,15 Zoll errechnete Setzung für die ständige Last und etwas kleiner als die errechnete Setzung für die Gesamtlast.

Die in den verflossenen vier Jahren festgestellten Setzungen können vernach-

lässigt werden, da sie nur einige Hundertstel eines Zolls betrugen, also geringer sind als die Genauigkeitsgrenzen des Nivellements. Andererseits scheinen sie, da die Nivellements auf dem Durchschnitt einer großen Anzahl von Beobachtungen beruhen, eine leichte Neigung zu einer Vergrößerung der Setzungen anzuzeigen, die der zeitweiligen Einwirkung der Nutzlasten zuzuschreiben ist. Die Gesamtsetzung, die erwartet werden muß, wenn die beim Entwurf angenommene Nutzlast tatsächlich auftritt, beträgt 0,21 Zoll.

Nord-West-Hochbehälter.

Das dritte Beispiel eines Bauwerks, für das die Fundamente auf Grund von Belastungsversuchen entworfen wurden, ist in Fig. 14 wiedergegeben. Die Fundamente für diesen Behälter von einem Fassungsvermögen von 2 Mill. Gallonen wurden auf Grund der Reihen von Belastungsversuchen entworfen, die durch die Abteilung Wasserversorgung der Stadt Detroit vorgenommen wurden, und die in

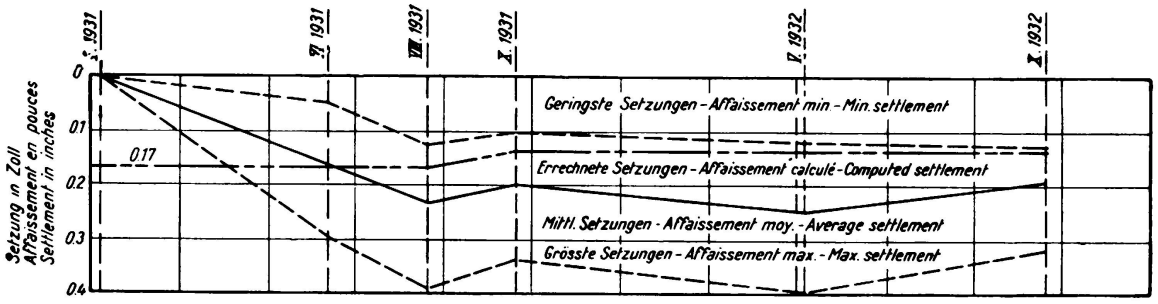

Fig. 14.
Setzung der Fundamente des Nord-West-Behälters.

Fig. 10 wiedergegeben sind. Der Behälter wurde durch 20 in gleichem Abstand am Umfang verteilte Säulen getragen. Die Unterkonstruktion bestand aus einem durchlaufenden Eisenbetonring von 21 Fuß Breite und 3 Fuß Dicke. Der äußere Durchmesser des Ringes betrug 101,5 Fuß, und es ergab sich ein Flächenumfangverhältnis von 0,095. Die Fundamente erhielten eine Bodenpressung von 4600 Pfund/Quadratfuß, welche entsprechend den Ergebnissen der Bodenbelastungsversuche eine Setzung von ungefähr 0,17 Zoll hervorrufen würde.

In Fig. 14 sind die Ergebnisse der Setzungsmessungen der fertigen Konstruktion im Vergleich mit den vorausgesagten Setzungen dargestellt. Die Setzung ist als Durchschnittswert der an 20 Säulen vorgenommenen Ablesungen aufgetragen und gleichfalls sind die Höchst- und Mindestwerte der einzelnen Ablesungen wiedergegeben. Der Behälter wurde bis zum 12. Juni 1931 fertiggestellt und war von diesem Zeitpunkt bis zum 19. August 1931 gefüllt. Am 20. Oktober 1931 war der Behälter nur teilweise gefüllt und es trat ein Rückgang der Gesamtsetzung ein, die als elastische Erholung zu deuten ist. Die tatsächliche Last verändert sich von Zeit zu Zeit und hängt von der Füllung ab und diese Veränderungen spiegeln sich in den Setzungsmessungen. Die gesamte Durchschnittssetzung bis Oktober 1932 betrug nur 0,19 Zoll und geht nur wenig über die angenommene Setzung hinaus. Von 1932 bis zur Abfassung dieser Arbeit sind keine weiteren Setzungsangaben vorhanden. Die Abteilung Wasserversorgung

nimmt Setzungsmessungen an allen Behältern nur in Zeiträumen von Jahren vor. Sie haben keine augenfälligen Veränderungen in der Höhenlage der Fundamente dieser Bauwerke ergeben.

IV. Schlußfolgerung.

In der vorliegenden Abhandlung wurde der Versuch unternommen, nachzuweisen, daß Belastungsversuche, wenn sie sorgfältig ausgeführt und in vernünftiger Weise ausgewertet werden, nicht nur brauchbare Aufschlüsse ergeben, sondern weiterhin Werte liefern, die direkt zur Lösung der praktischen Fragen für den entwerfenden Ingenieur brauchbar sind. Der Verfasser sympathisiert stark mit dem Verlangen, daß die Wissenschaft der Bodenmechanik Werkzeuge entwickeln sollte, die von wirklichem praktischem Wert sind, anstatt eine solche Herausgabe zu vermeiden und den praktischen Ingenieur mit den verwickelten Zusammenhängen der Bodenphysik irrezuführen. Wenn dieser Anforderung genügt werden kann, ohne eine gründliche Behandlung und die gesunden Grundsätze der Bodenmechanik aufzugeben, so sollte ihr entsprochen werden. Wenn dieses Verlangen nur zu plumpen Methoden führt, die in ihrer Anwendung keinerlei geistige Arbeit voraussetzt, so verdient es nicht die gleiche Beachtung.

Gründungsprobleme können nicht durch allgemeingültige Formeln gelöst werden. Die große Anzahl von beeinflussenden Faktoren und die Verschiedenheit der angetroffenen Verhältnisse macht eine besondere Behandlung jedes einzelnen Problems erforderlich. Selbst bei den zufriedenstellendsten Meßverfahren und bei den vernünftigsten Theorien für die Verwertung der Meßergebnisse wird stets eine vernünftige Überlegung bei ihrer Anwendung erforderlich sein.

Soweit es die Belastungsversuche betrifft, ist ihre nutzbringende Verwendung in den angeführten Beispielen und in anderen berichteten Fällen klar durch ihre Brauchbarkeit erwiesen, die auch nicht durch eine Bekrittelung des Verfahrens und der bei seiner Anwendung gemachten Annahmen erschüttert wird. Es ist eine ehrliche Anstrengung gemacht worden, um Verfahren und Grundlagen zu entwickeln, die im größtmöglichen Maße vereinfacht sind, ohne gesunde Grundlagen zu opfern. Zur Zeit scheint dies die vernünftigste Grundlage zu sein, auf der sich die Spezialisten der Bodenmechanik und die praktischen Ingenieure begegnen sollten.

B. Allgemeine Gleichung für die Setzung einer belasteten Fläche.

Eine allgemeine Gleichung, welche die Beziehung zwischen Setzung, Größe der Belastungsfläche und Last darstellt, ist durch Erfassung der Bodenverformung innerhalb des Druckkegels abgeleitet worden. In Fig. 15 sind die Beziehungen, die dieser allgemeinen Gleichung zugrunde liegen, dargestellt. Das Problem umfaßt eine endliche Belastungsfläche, die als Quadrat von der Seitenlänge b angenommen ist. Die Zunahme in den seitlichen Abmessungen der belasteten Fläche ist durch r, der Tangente des Verteilungswinkels, dargestellt. In einer Tiefe h verteilt sich unter Annahme einer linearen Druckverteilung die Gesamtlast W über eine Fläche mit der Seitenabmessung $(b + 2\,rh)$. Die Kombination von rechtwinkliger und dreieckiger Verteilung ist als die befriedigendste Darstellung der Druckverteilung gewählt worden, in der sich die seitliche Aus-

breitung der senkrechten Last als Grenzphänomen in geeigneter Weise darstellt, und eine geeignete Grundlage für die Trennung der zwei verschieden auftretenden Spannungsreaktionen abgibt. Wenn man diese Druckverteilung annimmt, dann wird die Gesamtlast durch einen gleichwertigen Einheitsdruck über eine Fläche mit den gesamten Seitenabmessungen von $(b + rh)$ dargestellt, deren Fläche $(b + rh)^2$ ist.

In einer beliebigen Tiefe y unter der Oberfläche ist ein Element von der Dicke (dy) einem gleichmäßigen Einheitsdruck p_y unterworfen. Der Zusammendrückbarkeits-Modul I wird als Last je Flächeneinheit dividiert durch die Setzung oder die Verformung je Tiefeinheit definiert.

$$I = \frac{p_y}{d\Delta / dy} = \frac{W \cdot (b + ry)^2}{d\Delta / dy}$$

$\Delta =$ Gesamtsetzung in Fuß

$$d\Delta = \frac{W\,dy}{I\,(b + ry)^2}$$

$$\Delta = \int_0^h \frac{W\,dy}{I\,(b + ry)^2} = \frac{W}{I}\left[-\frac{1}{r\,(b + ry)}\right]_0^h$$

$$\Delta = \frac{Wh}{I\,(b^2 + brh)} \qquad (3\,a)$$

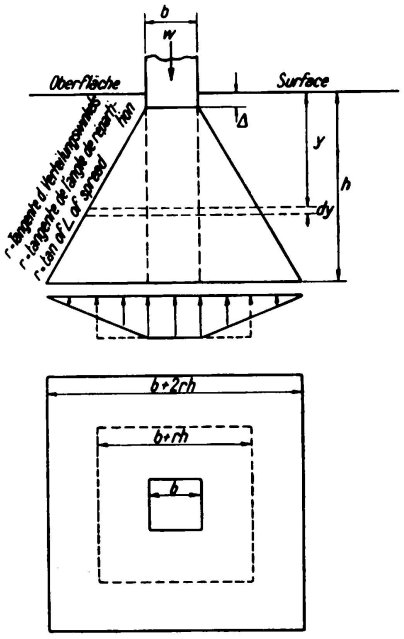

Fig. 15.
Druckverteilung und Setzung unter der belasteten Fläche.

Ausgedrückt durch die Tragfähigkeit p und das Umfang-Flächenverhältnis

$$\Delta = \frac{pAh}{I\left(A + P\frac{rh}{4}\right)} \qquad \begin{aligned} W &= pA \\ P &= 4\,b \\ A &= b^2 \end{aligned}$$

Durch Einsetzen von

$$\frac{h}{I} = K_1, \qquad \frac{rh}{4} = K_2$$

$$\Delta = \frac{K_1 p}{1 + K_2 \frac{P}{A}} \qquad (3)$$

Gleichung (3a) ist eine allgemeine Lösung, die zuerst von *C. C. Williams*[1] aufgestellt wurde. Diese Form ist einigen Einschränkungen unterworfen insofern, als sie die Größen r, h und I enthält, welche unter praktischen Verhältnissen nicht direkt gemessen werden können. Es ist weiterhin notwendig, die allgemeine Beziehung für die Setzung in Größen auszudrücken, die durch Versuche gemessen werden können. Dies kann durch Einführung der beiden Bodenwiderstands-Koeffizienten K_1 und K_2 geschehen, indem man für ihre

[1] The Science of Foundations — Its Present and Future", Erörterung von *C. C. Williams*, Trans.Am.Soc. C.E. Vol. 93, 1929, S. 309.

Beziehung die lineare Gleichung (2) benutzt. Die Gleichung (3) ist ein allgemeiner Ausdruck, welcher die Beziehung zwischen Setzung, Umfang-Flächenverhältnis und Tragfähigkeit zeigt. Um die Beziehung zwischen der linearen Gleichung (2) und der Gleichung (3) zu zeigen, ist es bloß notwendig, die Setzung Δ als konstant zu betrachten und die Tragfähigkeiten durch das Umfang-Flächenverhältnis auszudrücken.

$$K_1 p = \Delta + \Delta K_2 \frac{P}{A}$$

$$p = \frac{\Delta K_2}{K_1} \frac{P}{A} + \frac{\Delta}{K_1}$$

$$p = m \frac{P}{A} + n \tag{2}$$

$$m = \frac{\Delta K_2}{K_1} \qquad n = \frac{\Delta}{K_1}$$

$K_1 = \frac{\Delta}{n}$ $\qquad K_2 = \frac{m}{n}$ (Bodenwiderstands-Beiwerte).

Aus der Gleichung (3) ist ersichtlich, daß die einzigen Größen außer den Veränderlichen, nämlich Last, Setzung und Umfang-Flächenverhältnis die beiden Koeffizienten K_1 und K_2 sind. Aus der direkten Beziehung der Gleichung (2) ist es ersichtlich, daß K_1 und K_2 durch Δ, m und n ausgedrückt, die durch die Tragfähigkeitsversuche gemessen werden können. In der Auswertung wurden m und n für jede gegebene Setzung ermittelt, und es ergibt sich, daß K_1 und K_2 für dieselben Verhältnisse konstant sind. Die Werte von m und n, die Spannungsreaktionen, werden für verschiedene Arten von Böden und für verschiedene Laststufen veränderlich sein. Die Kennziffern K_1 und K_2 werden sich gleichfalls mit m und n verändern und damit werden sie zu Kennziffern, die die wesentlichen Eigenschaften des besonderen Bodens ausdrücken, und auf ihrer Grundlage kann das verschiedene Verhalten des Materials für verschiedene Belastungsstufen endgültig ermittelt werden.