

U/272

Bobylev, L.M.

VERTEILUNG DER SPANNUNGEN, VERFORMUNGEN UND DER DICHTEN BEIM VERDICHTEN
VON AUFSCHÜTTUNGEN MIT STAMPFPLATTEN

Deutsche Vollübersetzung aus:

Osnovanijs, fundamenty i mehanika gruntov.
Moskva, 5(1963), Nr. 6. S. 1 - 4.

Russ.: Распределение напряжений, деформаций и плотности
в грунте при уплотнении насыпей трамбуемыми плитами
Raspredelenie naprjaženij, deformacij i plotnosti
v grunte pri uplotnenii nasypej trambujuščimi plitama

Die nachstehend beschriebenen Versuche wurden im Auftrag des Moskauer Kraftfahrzeug- und Verkehrsweseninstitut (MADI) unter Leitung von N.P. Voščinin durchgeführt, um auf wissenschaftliche Weise die Kennwerte der Bauteile von Verdichtungsmaschinen und ihre Arbeitsweise beim Verdichten von Aufschüttungen bestimmen zu können. Die Versuche wurden auf 2 m hohen, 40 m langen und 5 m breiten Aufschüttungen aus sandigem Lehm angestellt. Fallhöhe, Eindringung und Vorschub der Stampfplatten wurden auf einem Spezialprüfstand festgehalten.

Die Stampfplatten variierten innerhalb folgender Werte: Plattengewicht Q von 0,5 - 3 t variiert mit je 0,5 t; Fallhöhe H von 0,5 - 3 m variiert mit je 0,5 m; Plattenfläche $F = 20,5; 1; 1,5; 2 \text{ m}^2$; Schlagzahl n von 1 bis 7 je nach Versuchsdurchführung. Mit hydraulischen Gebern wurden die Spannungen im Boden an der Plattensohle gemessen. Die Meßdosen waren von D.S. Baranov und dem Verfasser [1] konstruiert und überprüft worden.

Technische Kennwerte der Meßdose

Maximal meßbarer Druck, p , kg/cm^2	Dicke der Meßmembrane in mm	Durchbiegung der Meßmembrane beim Druck p je 1 kg/cm^2 in mk	rechnerischer Verformungsmodul der Meßdose E in kg/cm^2
20	1,0	1,3	100 00

Aufgrund der großen Härte der Meßdose beim Eichen wurde bei Entlastung im Boden eine lineare Abhängigkeit zwischen Druck und Verformung ohne Hysterese ermittelt. Die Meßgenauigkeit der Meßdose für den Erddruck schwankte um nur 7 %.

Zur Bestimmung der Spannungen im Boden wurde ein Oszillograph benutzt. Diese verwendet man gewöhnlich zum Messen von nichtelektrischen Werten mittels DMS. Das zeitliche Setzen des Bodens wurde durch Zeitrafferaufnahmen festgehalten (1 600 Bilder/s).

In einigen Versuchen wurde nach jedem Stoß die resultierende Setzung der verschiedenen Bodenschichten gemessen. Hierzu wurden Verformungsgeber benutzt, die aus zwei ineinandergleitenden Duraluminiumrohren bestanden. Die Wirkung des Gebers beruhte auf dem Prinzip der gespannten Saite mit Gleitkontakt zu einem der Arme einer Brückenschaltung, die auf dem Feld 7 liegt. Durch Verschieben des Kreuzkopfs am Feld wurde die Brücke elektrisch ausgeglichen. Je nach Verschiebung des Kreuzkopfs auf der Skala wurde nach dem Stoß die Setzung bestimmt.

Abb. 1 zeigt die Schaltung der Meß- und Aufzeichnungsanlagen, die in den Versuchen verwendet wurde. Zum automatischen Einschalten des Oszillographen und der Filmkamera zum Aufzeichnen des Stoßvorgangs wurden die Vorrichtungen 12 und 13 benutzt; es waren Hebel mit elektrischen Kontakt (Abb. 1).

Beim Herablassen der Stampfplatte klappten der obere und untere Hebel um und schalteten die Kontakte 12 und 13 der Elektromotoren der Filmkamera 9 und

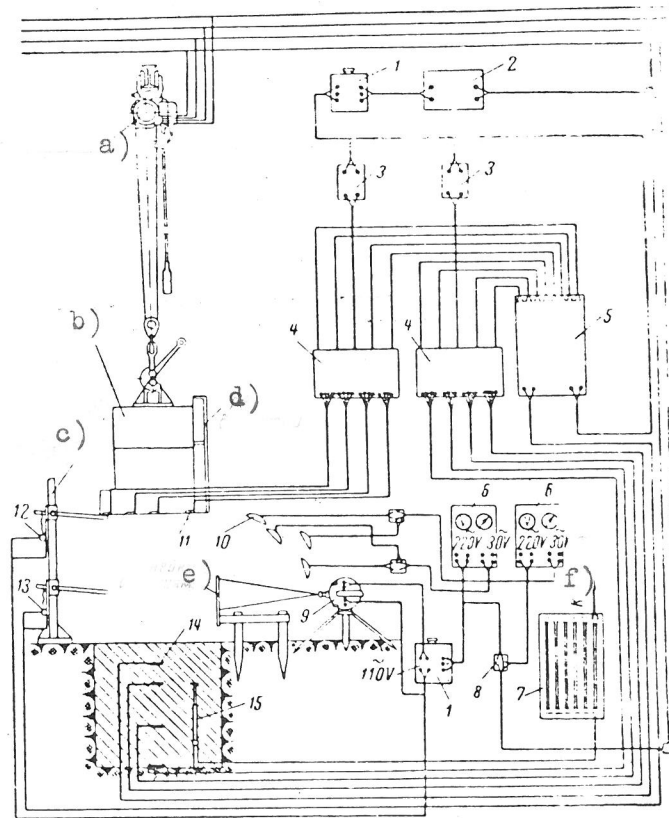


Abb. 1. Anschlußschema der Meß- und Aufzeichnungsanlagen.

1) Latr 1; 2) Spannungsstabilisator; 3) Gleichrichter; 4) Verstärker UT-4; 5) Oszillograph; 6) Spartransformator KAT-15; 7) Geberfeld für die Verformung; 8) Übertragungskasten; 9) Filmkamera SKS-1; 10) Projektionslampe; 11) Meßdose in der plattensohle; 12) Kontakte zur automatischen Einschaltung des Oszillographen; 14) Meßdose im Boden; 15) Verformungsgeber; a) Elektroflaszengzug; b) Stampfplatte; c) Vorrichtung zum automatischen Einschalten der Filmkamera und des Oszillographen; d) Rahmen mit Skala; e) Lineal mit Skala; f) zum Verstärker.

des Oszillographen 5 ein. Beim Aufschlagen der Stampfplatte auf dem Boden wurden die Signale von den Meßdosen 11 und 14 durch den Verstärker 4 verstärkt und auf dem Oszillographenband aufgezeichnet.

Die Setzung des Erdbodens während des Schlagvorgangs wurde folgendermaßen aufgezeichnet. An der Stampfplatte wurde ein mit Papier überzogener Rahmen aus

Profilstahl befestigt (siehe Abb. 1). Auf das Papier war eine Skala mit Unterteilung in cm aufgezeichnet. Dieselben Maße wurden auf die Skala eines Lineals übertragen, das starr im Boden befestigt wurde.

Beim Herablassen der Platte wurde der Schlagvorgang filmisch aufgezeichnet. Beim Betrachten der Vergrößerungen des Films wurden die Verschiebungen auf dem starren Lineal festgehalten. Beim Abspielen des laufenden Films über Projektor (Geschwindigkeit 21 Bilder pro Sekunde) konnte man das Aufschlagen der Platte auf dem Boden verzögert beobachten. Nach den Bildern des Films wurden die graphischen Darstellungen über den Weg der Stampfplattensohle während des Schlagvorgangs erstellt (Abb. 2).

Der Weg eines jeden Schlags wurde auf 700 Bildern festgehalten, d.h. es gab 700 Versuchspunkte. Die Kurve wurde anhand von 200 Bildern konstruiert, jedoch wurden die wichtigsten Abschnitte der Kurve nach allen Bildern erstellt. Durch Differenzierung der Wegfunktion wurden danach die Funktionen für die Geschwindigkeit und die Beschleunigung der Platte gezeichnet, und aus der Beschleunigung wurde die Spannung im Boden berechnet.

Die Versuche wurden folgendermaßen durchgeführt. Es wurde ein 1,05 D tiefer Graben ausgehoben (wobei D der Plattendurchmesser ist). Die Meßdosen und Verformungsgeber wurden in der Plattenachse in 0, 20 40, 60, 120 cm von der Bodenoberfläche angebracht. Auf diesen Höhen wurden vor und nach den Versuchen die Dichte (je Messung ein Ring) und Feuchtigkeit bestimmt. Beim Auffüllen des Grabens wurde darauf geachtet, daß die Dichte innerhalb der gesamten Aufschüttung gleichbleibend war (Verdichtung durch manuelles Stampfen). Die Dichte der Aufschüttung wich um 0,85 von der Norm ab (Norm - $1,71 \text{ g/cm}^2$).

Mit der Zeitrafferkamera ermittelten wir nach jedem Aufschlag der Platte die Angaben über die Setzung des Bodens unter der Platte je nach Verschiebung der beweglichen Skala zur unbeweglichen Skala. Nach Abschluß der Versuche wurden beim Ausgraben der Geräte Verschiebung und Dichte des Bodens in Höhe der Geräte gemessen.

Die Dichte nach den Schlägen (mit Ausnahme der Ringe) wurde ebenfalls nach dem "Verdichtungskoeffizienten" gemessen, d.h. nach der Relation zwischen dem ursprünglichen Bodenvolumen in der Schicht (oder seiner Höhe) und dem Bodenvolumen nach dem Verdichten. Insgesamt wurden 46 Versuche (263 Stöße) durchgeführt.

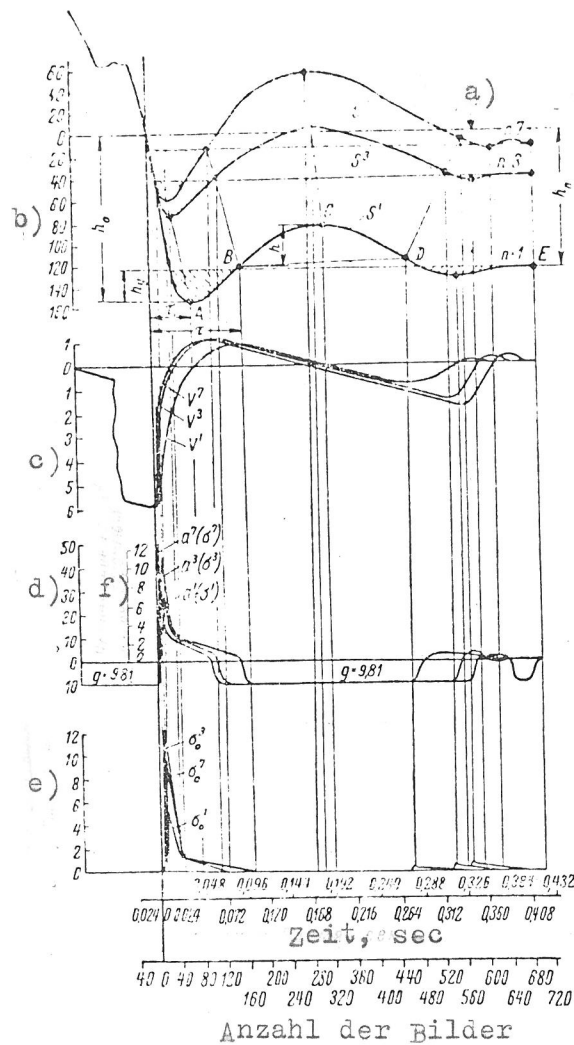


Abb. 2. Graphische Darstellung des Weges, der Geschwindigkeit und Beschleunigung der Platte und der Spannung an der Bodenoberfläche während des Schlagvorganges nach den Ergebnissen des Zeitrafferfilmes und den Angaben der Meßdosen. Kennwerte der Platte: $G = 2,5 \text{ t}$; $H = 2 \text{ m}$; $F = 1 \text{ m}^2$.

a) ursprüngliche Bodenoberfläche; b) Weg, mm; c) Geschwindigkeit, m/sec; d) Beschleunigung, $g(\text{m}/\text{sec}^2)$; e) über Meßdosen gemessene Spannung, kg/cm^2 ; f) Spannung an der Oberfläche, kg/cm^2 .

Nach den Versuchsergebnissen wurden sowohl einige allgemeine Gesetzmäßigkeiten über den Verlauf des Schlages beim Verdichten von Erdboden mit Stampfplatten aufgestellt als auch der Einflußgrad des Gewichts, der Fallhöhe, der Plattenfläche und der Stoßzahl pro Platte auf die Verteilung der Spannungen, Verformungen und Dichte im Boden abgeleitet.

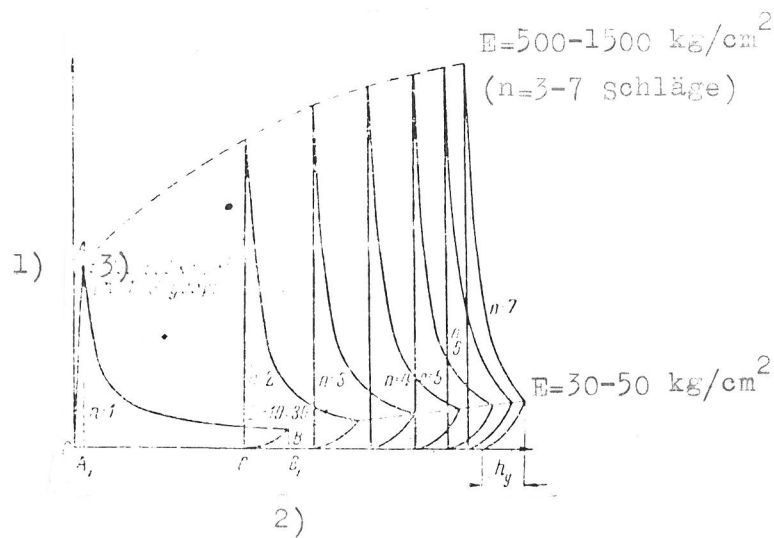


Abb. 3. Diagramm über die Veränderung der Spannung, Setzung und des Verformungsmoduls des Bodens beim Stoß.

1) spannung σ_0 in der Bodenoberfläche; 2) setzung der platte, s; 3) $E=250-590 \text{ kg/cm}^2$, $n= 1-3$ schläge.

Nachstehend werden einige Versuchsergebnisse angegeben. Als Beispiel stehen in Abb. 2 für einen Versuch die Kurven über die Veränderung des Weges S , der Geschwindigkeit v , der Beschleunigung a der Platte und der Spannungen σ in der Bodenoberfläche während des Stoßes nach Auswertung des Zeitrafferfilms und der Spannungen σ_0 nach den Angaben der Meßdosen in der Plattenmitte.

Wie aus Abb. 2 hervorgeht, nimmt die Geschwindigkeit der Platte mit der Eindringtiefe im Boden ab und wird am tiefstem Punkt A gleich null. Aufgrund der Bodenelastizität beginnen sich Platte und verdichteter Boden gemeinsam zu heben. Bei Punkt B löst sich die Platte vom Boden und geht in eine freie Sprungbewegung über wie ein Körper, der mit einer bestimmten Geschwindigkeit hochgeworfen wird. Bei Punkt C ist die Geschwindigkeit der Platte gleich Null, und die Platte beginnt frei zu fallen bis zum Punkt D, wo sie abermals auf den Boden schlägt und sich weiter abwärts bewegt. Nachdem sie abermals den Boden belastet hatte, bewegt sie sich zusammen mit dem Boden aufwärts bis zum völligen Stillstand bei Punkt E. Die beschriebene Bewegung der Platte

war in allen Versuchen gleich. Wie ebenfalls aus Abb. 2 hervorgeht, nimmt beim Übergang vom lockeren (1 Stoß) zum festen Boden (7 Stöße), d.h. mit zunehmender Zahl der Plattengröße der Wert der Restverformung h_n und der Gesamtverformung h_o ab. Dies erklärt auch die mit jedem Stoß zunehmende Verdichtung des Bodens. Der Wert der elastischen Verformung h_y nimmt nur unwesentlich zu. Mit zunehmender Anzahl der Stöße wird die Stoßzeit, d.h. die Zeit zwischen dem Augenblick, wo die Platte den Erdboden berührt, bis zu dem Zeitpunkt, wo sie am tiefsten in den Boden eingedrungen ist, T_1 , sowie die Gesamtstoßzeit geringer.

Bemerkt sei, daß die Zunahme der Dichte mit jedem weiterem Stoß und folglich auch der Elastizität zu einer Zunahme der Sprunghöhe h der Platte führt und natürlich auch zu einer Zunahme der Zeit der freien Bewegung der Platte bei dieser Sprungbewegung.

In allen Versuchen stimmten die Spannungen in der Bodenoberfläche, die mit den Meßdosen gemessen wurden, gut mit den Spannungen überein, die aus Zeitrafferaufnahmen abgeleitet wurden. Dies nicht nur bezüglich Größe, Zeit der Spannungszunahme und des Spannungsabfalls, sondern auch bezogen auf die Fläche des Spannungsbildes (siehe Abb. 2).

Die ermittelten experimentellen Kurven $S, V, \alpha(\sigma)$ ermöglichen eine richtige Darstellung der Zeitfunktion, wie der Stoßvorgang abläuft. Diese Zeitfunktion weicht beträchtlich von der bisher geltenden Vorstellung über diese Erscheinung ab.

Die Abhängigkeit der Bodensetzung von der Größe der Kontaktspannungen beim Stoß ist in Abb. 3 dargestellt. Hier sind auch die Werte des Verformungsmoduls des Bodens E angegeben. Diese (verallgemeinerte) Graphik wurde anhand von acht Versuchen konstruiert. Die Gerade OA entspricht hier den zunehmenden Spannung im Boden, und die Kurve ABC gibt den Verlauf der Druckaufnahme während des Stoßvorgangs wieder. Der Kurvenabschnitt AB entspricht der Abwärtsbewegung der Stampfplatte zusammen mit dem Boden; BC entspricht der Aufwärtsbewegung von Stampfplatte und Boden bis zu dem Zeitpunkt, wo sich die Stampfplatte völlig vom Boden löst und der elastische Teil der Bodenverformung eintritt. OC stellt die bleibende Setzung des Bodens dar, OB die Endsetzung.

Aus der Untersuchung der Graphiken in den Abb. 2 und 3 geht hervor, daß das Spannungsmaximum nahe beim Zeitpunkt der Anfangssetzung liegt. Die Dauer der

Druckzunahme bis zum Maximalwert ist 20 - 50 mal geringer als die Gesamtzeit der Bodenbelastung beim Stoß und 10 - 20 mal geringer als die Zeit, die bis zum Erreichen der maximalen Verformung vergeht. Die Geschwindigkeit der Spannungszunahme liegt um ein Vielfaches über der Geschwindigkeit der Verformungszunahme des Bodens, wobei die maximale Verformung bereits bei äußerst geringen Spannungen festgestellt wird. Sie betragen 10 - 15 % der Maximalspannungen.

Aus Abb. 3 geht auch hervor, daß sich der Wert des Verformungsmoduls E des Bodens während der Stöße wesentlich ändert. sowohl während eines einzigen Stoßes als auch beim Übergang von einem Stoß zum nächsten.

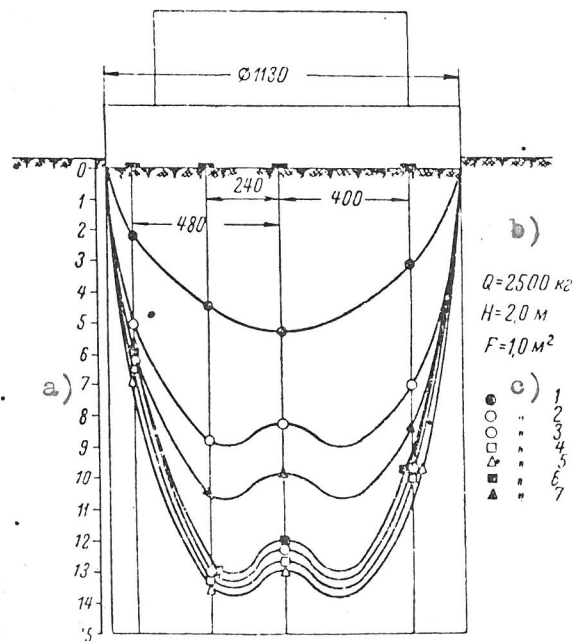


Abb. 4. Verteilung der Spannungen an der Sohle der Stampfplatte beim Stoß.

a) Spannung, kg/cm^2 ; b) Kennwerte der Stampfplatte; c) Stöße.

Abb. 4 zeigt graphisch die Verteilung der Spannungen an der Sohle der Stampfplatte beim Stoß in einem Versuch. Die Spannungen wurden an vier Stellen gemessen. Der Charakter des Spannungsbildes ist bei 8 Versuchen (56 Stöße) fast identisch, und das Bild ging je nach Verdichtung von einer Parabel beim ersten Stoß in eine Sattelform bei den darauffolgenden Stößen über.

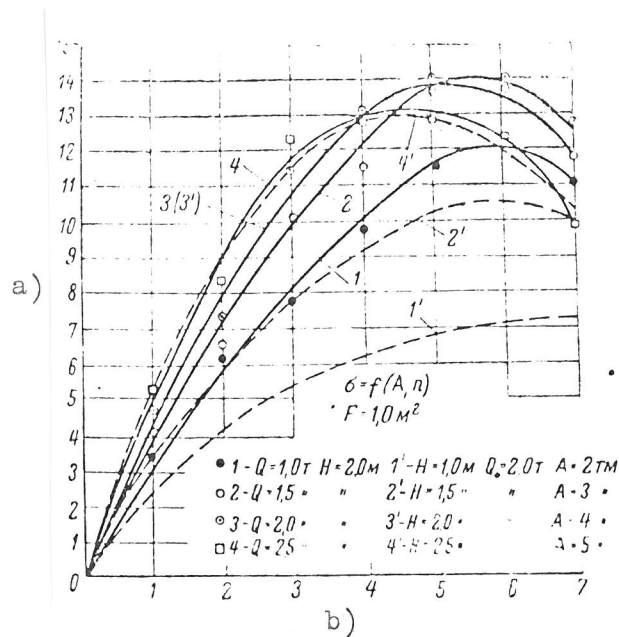


Abb. 5. Graphische Darstellung der Veränderung der Spannungen auf der Bodenoberfläche in Abhängigkeit vom Arbeitsaufwand und der Stoßzahl.

----- verteilung der spannungen bei veränderung von H und $Q = \text{const}$; ——— verteilung der spannungen bei veränderung von Q und $H = \text{const}$.

a) spannung an der oberfläche, kg/cm^2 ; b) stoßzahl.

Um festzustellen, welchen Einfluß die Kennwerte der Bauteile auf den Verdichtungsvorgang haben, wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, deren Ergebnisse Abb. 5 wiedergibt. In dieser Abbildung ist die Veränderung der Spannungen an der Bodenoberfläche in der Plattenmitte in Abhängigkeit vom Arbeitsaufwand und der Stoßzahl graphisch dargestellt. Daraus folgt, daß die Kurven bei beliebigem Gewicht Q von 1 bis 2,5 t und beliebiger Abwurfhöhe H von 1 bis 2,5 m ein Maximum besitzen, das sich mit Zunahme von Q und H nach links verschiebt. Bei konstanter Arbeit ($A = QH$) sind dabei die maximalen Spannungswerte bei denjenigen Platten größer, bei denen sich das Gewicht ändert. Der geringere Wert der Spannungen nach dem Maximum läßt sich dadurch erklären, daß wahrscheinlich die Festigkeitsgrenze des Bodens erreicht und in den oberen Schichten überschritten wurde. Abb. 6 zeigt die Kurven der Veränderung der Spannungen in der Tiefe in Abhängigkeit vom Arbeitsaufwand. Daraus geht hervor, daß mit zunehmendem Arbeitsaufwand die Spannungen zunehmen. Wie nach Abb. 5 sind auch hier die Werte der Spannungen bei konstanter Arbeit bei denjenigen Plattenkennwerte größer, bei denen sich das Gewicht ändert. Abb. 7

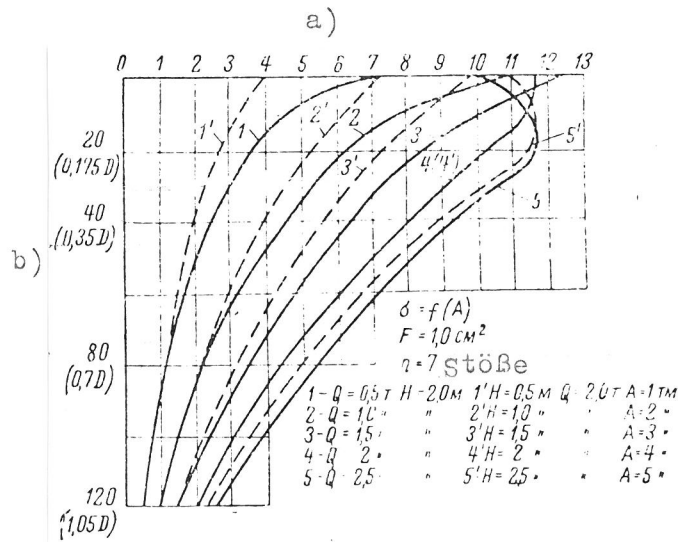


Abb. 6. Graphische Darstellung der Spannungsänderung über die Verdichtungstiefe der Bodenschicht in Abhängigkeit vom Arbeitsaufwand.

----- Verteilung der Spannungen bei Veränderung von H und $Q = \text{const}$; ———— Verteilung der Spannungen bei Veränderung von Q und $H = \text{const}$.

a) Spannung, kg/cm^2 ; b) Tiefe, cm.

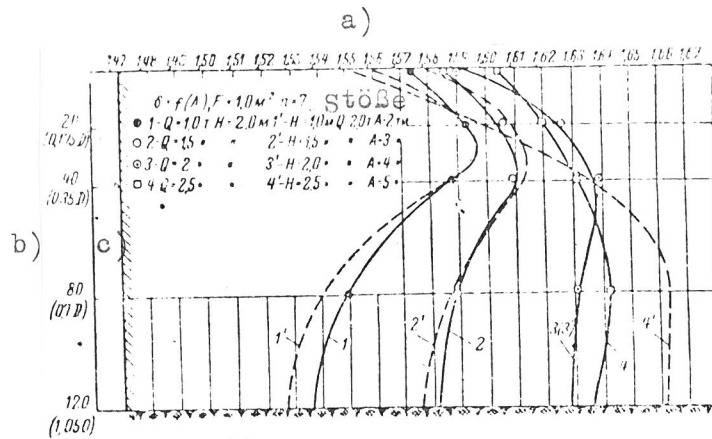


Abb. 7. Graphische Darstellung der Veränderung der Bodendichte in Schichttiefe in Abhängigkeit vom Arbeitsaufwand.

----- Verteilung der Dichte bei veränderlichem H und $Q = \text{const}$; ———— Verteilung der Dichte bei veränderlichem Q und $H = \text{const}$.

a) Dichte, g/cm^3 ; b) Tiefe, cm; c) Dichte zuvor.

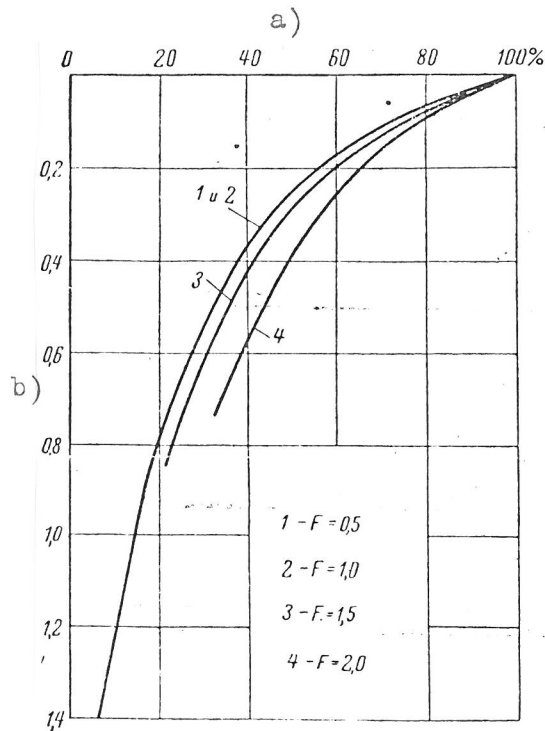


Abb. 8. Veränderung der Spannungen über die Tiefe der Verdichtungsschicht in Abhängigkeit von der Plattenfläche.

a) Spannungen in % der Spannungen an der Oberfläche; b) Tiefe, bezogen auf den Plattendurchmesser D.

zeigt die Kurven der Veränderung der Bodendichte über die Tiefe nach dem siebten Stoß. Daraus folgt, daß mit zunehmender Arbeit die Dichte über die Tiefe zunimmt und (bis zu einem bestimmten Wert) über die gesamte Dicke der Verdichtungsschicht gleichmäßiger wird. Die gleichmäßigste Verdichtung wurde in den genannten Versuchen bei einer Arbeit mit 3 tm erreicht. Für alle Stoßkennwerte weicht die Dichte an der Oberfläche der Verdichtungsschicht nur unwesentlich voneinander ab. Bemerkte wurde, daß die Bodendichte mit zunehmendem Arbeitsaufwand in den oberen Schichten bis auf 0,2 D Tiefe zunimmt. Dabei verschiebt sich die größte Dichte sozusagen in die Tiefe. Vergleicht man Abb. 6 und Abb. 7, erkennt man, daß der Charakter der Veränderung der Spannungen und der Dichte über die Tiefe unterschiedlich ist. So kann eine höhere Bodendichte bei geringen Spannungen erreicht werden. Abb. 8 gibt die Spannungsänderungen über die Tiefe in Abhängigkeit von der Plattenfläche wieder,

woraus folgt, daß die Spannungen über die Tiefe mit zunehmender Plattenfläche langsam abnehmen. Aufgrund der Versuche wurden noch einige andere experimentelle Aussagen gewonnen, nämlich: a) die Stoßzeit t_1 in Abhängigkeit von Q , H , F , n , die mit zunehmenden Q , H und n ansteigt; es wurde jedoch auch festgestellt, daß die Stoßzeit bei gleichem Wert des spezifischen Drucks kaum von der Plattenfläche abhängt; b) die Geschwindigkeit der Stoßwelle über die Tiefe, gemessen mit Meßdosen in Abhängigkeit von Q , H und n : mit zunehmenden Q , H und n steigt die Geschwindigkeit und veränderte sich bei den gewählten Plattenkennwerten von 50 auf 350 m/sec; c) die Bodendichte über die Schichttiefe in Abhängigkeit von der Plattenfläche bei gleicher Größe des statischen spezifischen Drucks: mit zunehmender Plattenfläche nimmt die Dichte in den Oberflächenschichten ab und, umgekehrt, in der Tiefe zu; d) Verschiebungen des Verdichtungsbodens an der Oberfläche und in der Tiefe in Abhängigkeit von Q , H , n ; e) Abhängigkeit der Spannung, Setzung, Dichte und Stoßdauer vom Stoßimpuls $I = mv$, wobei m die Plattenmasse bezeichnet, v die Fallgeschwindigkeit der Platte und des spezifischen Stoßimpulses $i = \frac{1}{F}$ (F - Plattenfläche). Mit zunehmendem I und i nehmen, bei konstanter Arbeit, die Spannungen, die Dichte und die Stoßzeit in der Tiefe nur unwesentlich zu.

Schlußfolgerungen

1. Aufgrund von Versuchen wurden Angaben über die Gesetzmäßigkeit der Spannungsänderungen, Verformungen und der Bodendichte während des Stoßvorgangs mit einer Stampfplatte ermittelt. Diese Angaben weichen in folgenden Punkten von den bisherigen Vorstellungen ab:

- a) die Einwirkungszeit der Stoßlast (von Null bis zum Spannungsmaximum) war 20 - 50 mal geringer als Gesamtzeit des Stoßes (gegenüber 1,5 - 2 mal);
- b) die Belastungsdauer (vom Spannungsmaximum bis Null) sowie die Zeit, in der eine maximale Verformung erreicht wurde, ist annähernd 10 - 20 mal größer als die Einwirkungszeit der Stoßlast (gegenüber 1,5 - 2 mal);
- c) die maximalen Werte der Bodenverformung beim Stoß mit einer Stampfplatte werden am Ende der Belastung erreicht, wo die Größe der Spannungen 10 - 15 % von den maximalen Spannungen beträgt (gegenüber 40 - 50 %).

2. Die Spannungsverteilung auf die Kontaktfläche der Stampfplatte und über die Tiefe der Aufschüttung (zu dem Zeitpunkt, wo der maximale Spannungswert erreicht wird) entspricht Spannungsverteilung bei statischer Belastung.

3. Bei konstanter Arbeit ist die Verdichtungswirkung (bei den in den Versuchen gewählten Kennwerten) annähernd gleich für beliebige Kombinationen von Gewicht und Fallhöhe. Für eine gleichmäßigere Verdichtung erhöht man jedoch besser das Gewicht der Stampfplatte und nicht die Höhe.

4. Bei den in den Versuchen geltenden Kennwerten für Stampfplatten nimmt die Dichte des Bodens in den oberen Schichten (bis zu 0,2 D Tiefe) mit zunehmendem Arbeitsaufwand nur unwesentlich zu. Die größte Zunahme der Dichte beobachtet man in den darunterliegenden Schichten. Bei einer Arbeit von 3 tm wurde die gleichmäßigste Verteilung der Dichte über die gesamte Dicke der Verdichtungsschicht erzielt.

5. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Stoßwelle und der Verformungsmodul des Bodens nehmen mit zunehmender Stoßzahl zu, die Stoßzeit und die Gesamtzeit der Stoßeinwirkung hingegen nehmen ab.

6. Die Versuchsergebnisse präzisieren somit die Angaben für Gleichungen zur Berechnung der Kennwerte der Bauteile von Verdichtungsgeräten für die Stampfverdichtung.

L i t e r a t u r

1. Д. С. Баранов. Развитие метода проволоочной тензометрии для исследования строительных конструкций. Труды ЦНИИОСБ, 1962.

Baranov, D. S.

Razvitie metoda provoločnoj tenzometry dlja issledovanija stroitel'nyh konstrukcij.

Trudy. Central'nyj naučno-issledovatel'skij institut stroitel'nyh konstrukcij. Moskva, 1962.

<Die Entwicklung des DMS-Verfahrens zur Untersuchung von Baukonstruktionen; russ.>

Stuttgart, den 25. Oktober 1983

übersetzt von

Ottmar Pertschi
(Ottmar Pertschi)
Dipl.-Übersetzer

