

# Versuche zur Bestimmung der Spannungsverteilung in Gründungssohlen

Autor(en): **Hruban, K. / Hacar, B.**

Objektyp: **Article**

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

Band (Jahr): **2 (1936)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-2881>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

## VIII 2

### Versuche zur Bestimmung der Spannungsverteilung in Gründungssohlen.

### Essais pour déterminer la distribution des efforts dans la surface d'appui d'une fondation.

### Experiments to Determine the Distribution of Pressure over a Foundation.

Ing. Dr. techn. K. Hruban und Ing. Dr. techn. B. Hacar,  
Prag.

#### 1. Zweck der Versuche.

Die Boussinesq'sche Lösung für den elastischen Halbraum, dessen horizontale Oberfläche durch einen starren Zylinder senkrecht belastet wird, ist bekannt. Falls die Einsenkungen im ganzen Bereiche der Lastfläche gleich sind, ist die Druckspannung in irgendeinem Punkte M

$$\nu_M = \frac{a}{2 \sqrt{a^2 - x^2}} \cdot p,$$

wobei  $p$  den Durchschnittswert der Druckbeanspruchung bedeutet. Für das zwei-dimensionale Problem wird der analoge Ausdruck nach *Sadowsky*

$$\nu_M = \frac{2a}{\pi \sqrt{a^2 - x^2}} \cdot p.$$

Die beiden Gleichungen ergeben die Verteilung der Spannungen, die durch die Linie  $\nu$  wiedergegeben wird (Fig. 1). Das Druckminimum befindet sich im

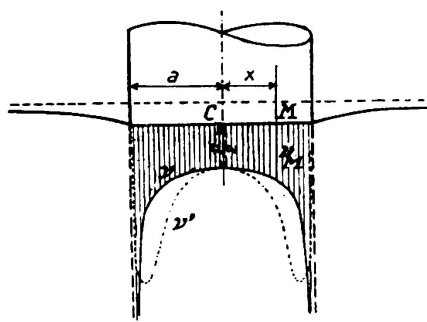


Fig. 1.

Theoretische Spannungsverteilung.

wobei die beiden Druckmaxima sich in der Nähe des Randes der belasteten Fläche befinden und von den Gleitbewegungen abhängen, die sich im Inneren der beiden sich berührenden Körper vollziehen.

Ist nun unter Fundamenten, die auf nachgiebigem Boden ruhen, das gleiche

Mittelpunkt C und kann den Wert  $\frac{p}{2}$  bis  $0,637 p$  annehmen, je nach der Form der Belastungsfläche. In Wirklichkeit können die Beanspruchungen nicht unendlich groß werden. In der Nähe des Randes der Lastfläche werden sich Veränderungen vollziehen, die durch die plastischen Verformungen verursacht werden, und man muß die punktierte Linie  $\nu'$  als angenähertes Bild der tatsächlichen Spannungsverteilung annehmen. Die Kurve ist sattelförmig,

der Fall? Diese Frage wurde während der letzten Jahre lebhaft erörtert. Die Versuche von *Kögler* und *Scheidig*,<sup>1</sup> die an der Oberfläche einer Sandmasse ausgeführt wurden, haben das Druckmaximum im Mittelpunkt der Belastungsplatte ergeben. Spannungsmessungen in den Gründungssohlen von Pfeilern in Ludwigshafen<sup>2</sup> und in Niederfinow<sup>3</sup> zeigen jedoch im Gegenteil sehr deutlich eine sattelförmige Druckverteilung, die mit der Theorie des elastischen Halbraums übereinstimmt. Endlich scheinen die Versuche von *Preß*<sup>4</sup> zu bestätigen, daß beide Fälle sich unter gewissen Bedingungen einstellen können.

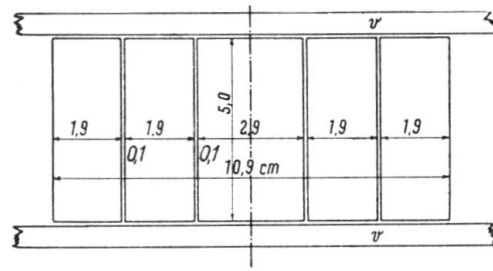


Fig. 2.  
Belastungsplatte, zerlegt in 5 Einzelteile  
v = Glaswände.

Für die Berechnung von ausgedehnten Gründungssohlen oder durchgehenden Fundamentplatten ist es sehr wichtig, die tatsächliche Verteilung der Bodenreaktionen zu kennen. Um zur Klärung dieses Problems beizutragen, hat die Tschechoslowakische Forschungsgesellschaft Versuche angestellt, über die wir hier kurz berichten wollen.

## 2. Versuchsanordnung.

Die Setzung einer Gründung ist auf zwei verschiedene Erscheinungen zurückzuführen:

1. die elastische Zusammendrückung des Bodens,
2. die bleibenden Veränderungen seiner inneren Struktur.

Diese hängen von dem Verhältnis der gesamten Hauptspannungen ab, die sich sowohl aus der Wirkung der Auflast wie aus dem Gewicht der über der Ebene der Lastfläche liegenden oberen Schichten der angrenzenden Bodenmasse ergeben.

Um das Verhalten des Bodens an einem Modell in verkleinertem Maßstabe untersuchen zu können, ist es also unbedingt erforderlich, den Versuchsboden in denselben Spannungszustand zu versetzen, welchen er bei einer wirklichen Gründung annimmt. Es muß also nicht allein ein Versuchsmaterial von einer der Wirklichkeit entsprechenden Dichte verwendet werden,

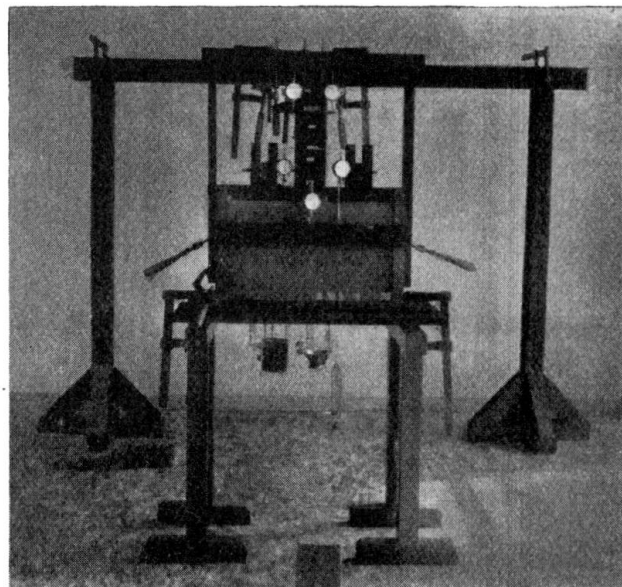


Fig. 3.  
Allgemeine Versuchsanordnung.

<sup>1</sup> Bautechnik 1929, S. 268, 828.

<sup>2</sup> Bautechnik 1932, S. 595, Bauingenieur 1933, S. 242, 473.

<sup>3</sup> Bautechnik 1934, S. 522.

<sup>4</sup> Bautechnik 1934, S. 569.

sondern es muß gleichfalls neben der Belastungsplatte eine Belastung aufgebracht werden, welche die überlagernde Masse ersetzt. Unter Berücksichtigung dieser Grundsätze sollte unser Modell einen Teil einer langen Mauer darstellen, die in gewöhnlicher Tiefe gegründet war. Als Versuchsmaterial haben wir feine Sande gewählt, deren zulässige Beanspruchung man im allgemeinen mit ungefähr  $1 \text{ kg/cm}^2$  annimmt. Eine ähnliche Versuchsreihe wurde auf einer Gummilage durchgeführt.

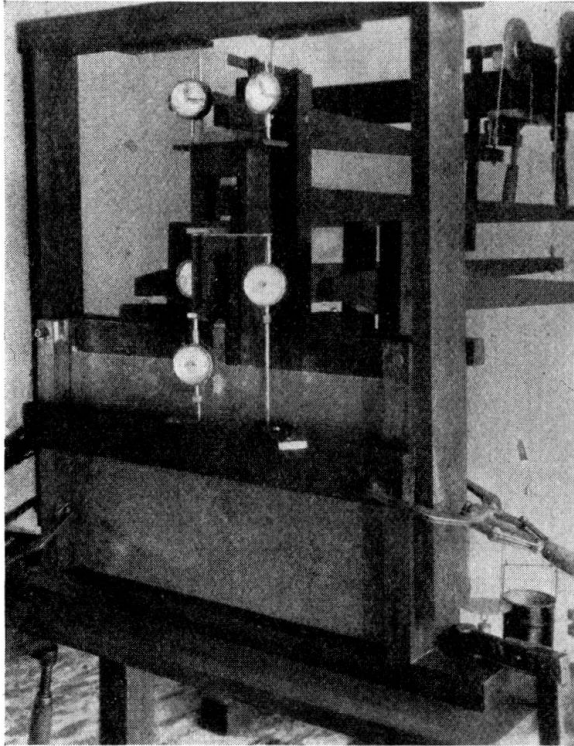


Fig. 4.  
Anordnung der Meßapparate.

Juli 1936 haben wir sechzehn Versuchsreihen durchgeführt, die durch A, B usw. bezeichnet sind, wobei jede sich aus mehreren Messungen a, b usw. zusammensetzte. Für jede Reihe mußte das Material neu zusammengesetzt werden, da die Zusammendrückbarkeit des Sandes sich nach jeder Belastung verändert. Augenscheinlich bilden sich Zonen größeren Widerstandes; die Folgen der bleibenden Verformung äußern sich anders unter jedem Einzelteil der Platte und die Setzung des Materials wirkte sich für jede Art der Spannungsverteilung verschieden aus.

### 3. Eigenschaften der verwendeten Materialien.

Die Grenze  $p_0$  der Proportionalität zwischen der Einsenkung des Mittelpunktes der Platte und der aufgetragenen Last zeigte sich deutlich, wenn der mittlere Druck in der Belastungsfläche ungefähr das Zweieinhalbfache der Belastung an den Seiten betrug.

Der Versuchskörper aus Gummi hatte die Abmessungen  $45 \times 14,3 \times 5,1 \text{ cm}$ . Er bestand aus zusammengeklebten Gummistreifen von einer mittleren Dicke von  $0,68 \text{ cm}$  und wurde auf einer verdichteten Schicht des Sandes IV von  $20 \text{ cm}$  Höhe gelagert. Die Umgebung der Belastungsfläche war unbelastet.

Die Anordnung unserer Versuche war folgende:

Die Belastungsplatte war in fünf Teile zerlegt (Fig. 2), welche unter Zwischenschaltung von drei starren Tischchen belastet wurden und sich unabhängig voneinander setzen konnten. Ihre Einsenkungen wurden durch sechs Apparate gemessen, die direkt eine Ablesung eines Hundertstel Millimeters gestatteten und eine Schätzung der Tausendstel zuließen. Die photographischen Wiedergaben (Fig. 3 und 4) zeigen die Einzelheiten dieser Anordnung.

Mit Hilfe dieser Einrichtung haben wir die Verschiebungen der Plattenteile untersucht, indem wir verschiedene Auflasten aufbrachten und die Gesamteinsenkungen (während der Einwirkung der Belastung) und die bleibenden Einsenkungen (nach der Beseitigung der Belastung) maßen. Bis zum

Bezeichnung	Spez. Gewicht kg/dm <sup>3</sup>	Kornzusammensetzung Rückstand auf den Sieben mit mm Lochweite						Wassergehalt % des Gewichts	Porenvolumen % des Gesamtvolumens	Porenziffer $\epsilon$
		2,0	1,0	0,5	0,25	0,1	<0,1			
		%	%	%	%	%	%			
Sand I	1,583	—	4,3	47,8	44,8	2,2	0,9	3,6	41,8	0,718
„ II	1,672	—	4,3	47,8	44,8	2,2	0,9	3,6	38,4	0,624
„ III	1,741	—	4,3	47,8	44,8	2,2	0,9	1,8	34,7	0,532
„ IV	1,768	24,6	20,7	26,7	25,5	2,0	0,5	0,9	33,2	0,497
„ V	1,567	—	4,3	47,8	44,8	2,2	0,9	0,5	40,9	0,693

4. Gleichmäßige Verteilung der Last.

Die Fig. 5 zeigt die Zusammenpressungen der Gummischicht. Die Linie T (bzw. I) stellt die gesamten (bzw. die bleibenden) Einsenkungen der Plattenteile dar, die durch eine gleichmäßige Beanspruchung von 0,53 kg/cm<sup>2</sup> hervorgerufen wurden. Die unterschiedlichen Eigenschaften des Sandes äußerten sich in dem

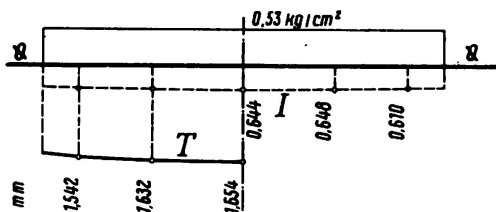


Fig. 5.

Gleichmäßig verteilte Last auf der Gummilage, Versuch Qa T = Gesamteinsenkungen, I = bleibende Einsenkungen.

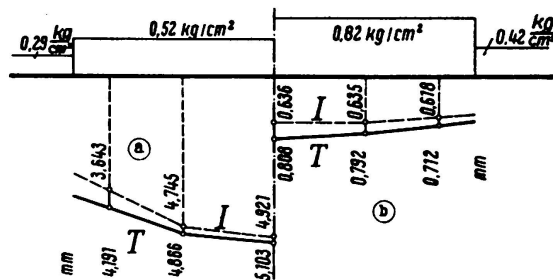


Fig. 6.

Gleichmäßig verteilte Last a) Sand I, Versuch Eb ( $p_0 \approx 0,5 \text{ kg/cm}^2$ ), b) Sand III, Versuch Ha ( $p_0 \approx 1,0 \text{ kg/cm}^2$ ) T = Gesamteinsenkungen, I = bleibende Einsenkungen.

überwiegenden Anteil der bleibenden Einsenkungen, welche auch die Form der Kurve T (Fig. 6) bestimmt haben werden. Es ergibt sich daraus, daß die Spannungsverteilung unter einer starren Platte vor allem vom Gleichgewichtszustand des Bodens unter ihren Umrißlinien abhängt, das heißt von der Beziehung  $p : p_0$ .

a) Wenn die Versuchsanordnung den allgemeinen Verhältnissen der Praxis entsprach, war das Verhältnis der Gesamteinsenkung der Plattenränder zu derjenigen des Mittelpunkts 0,68 bis 0,98 (0,88 als Mittel von elf Versuchen mit einer Belastung der Druckfläche von 0,5 bis 1,1 kg/cm<sup>2</sup>, wobei die auf den Seitenflächen ruhende Belastung 0,23 bis 0,49 kg/cm<sup>2</sup> betrug, was einer Gründungstiefe von 1,5 bis 3 m bei einem Erdboden entspricht, der dem Versuchsmaterial gleichwertig ist).

Um zu gleichen Einsenkungen über der ganzen Plattenfläche zu kommen (Fall einer starren Gründung) ist es deshalb notwendig, die Belastungen in der Nähe der Ränder zu erhöhen. Wenn man annimmt, daß der Druck am Rande der Platte ebenso groß wird wie der daneben, erhält man eine sattelförmige Ver-

teilungslinie, was den vorerwähnten Meßergebnissen in der Sohle von Pfeilern entspricht.

b) Wenn man eine genügend große Last auf die freie Oberfläche des Sandes aufbringt, bemerkt man, daß die Linie T eine umgekehrte Form erhält. Das Minimum der Einsenkung befindet sich dann im Zentrum der Platte. Die Fig. 7

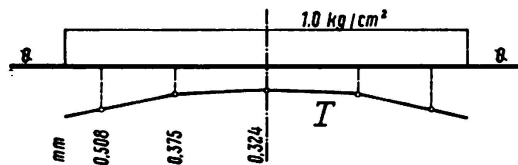


Fig. 7.

Gleichmäßig auf der freien Oberfläche verteilte Last,  
Sand III Versuch Oa ( $p_0 = \emptyset$ ).

gibt ein beobachtetes Beispiel dafür wieder. Bei einer starren Platte wird die Verteilung vermutlich durch eine Linie von ungefährender Form einer Parabel gekennzeichnet, wie sie aus den Versuchen von Kögler bekannt ist.

##### 5. Verteilung zur Erzielung gleicher Einsenkungen.

Selbst bei festen elastischen Körpern wird diese Verteilung von den bleibenden Verformungen, welche sich unter den Plattenrändern herausbilden, abhängen. Es ist daher nicht möglich, die gegenseitigen Beziehungen der Teillasten aus dem Einfluß der Vergrößerung einer von ihnen zu berechnen, und man muß auf dem Versuchswege mit direkten Messungen vorgehen. Fig. 9 zeigt das Endergebnis, welches auf Gummi erreicht wurde. Der Unterschied zwischen den gemessenen Einsenkungen beträgt nur bis zu 0,003 mm (0,3 ‰), was an den Genauigkeitsgrenzen der Meßapparate liegt. Entsprechend der Höhe der aufgebrachten Lasten kommt man dazu, eine angenäherte Linie der Spannungs-

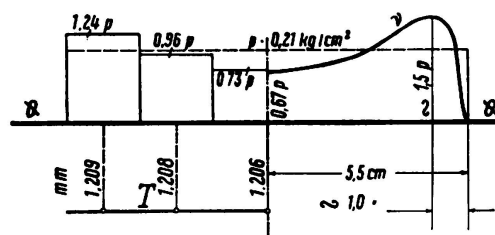


Fig. 8.

Lastverteilung zum Ausgleich der Einsenkungen.  
Zum erstenmal belastete Gummilage, Versuch Qh.

verteilung zu ermitteln ( $v$ , Fig. 8). Unsere Beobachtungen ergaben für die Spannung in der Mitte einen etwas größeren Wert (um rd. 5 ‰) als nach der Theorie.<sup>5</sup>

Mit den verschiedenen Sanden war es nicht möglich, eine derartige Genauigkeit zu erreichen und die erzielten Ergebnisse waren deshalb weniger regelmäßig.

<sup>5</sup> Es muß darauf hingewiesen werden, daß der Gummikörper eine etwas veränderte Linie ergibt wenn man die Belastung wiederholt.

Um die Verteilungslinien zu zeichnen, haben wir die Teillasten einer kleinen Korrektur unterzogen, welche mit Hilfe anderer Versuche errechnet wurde. Die Beispiele (Fig. 9) zeigen die Druckverteilung an, die mit mittleren Beanspruchungen erreicht wurden, welche bereits die Proportionalitätsgrenze um die

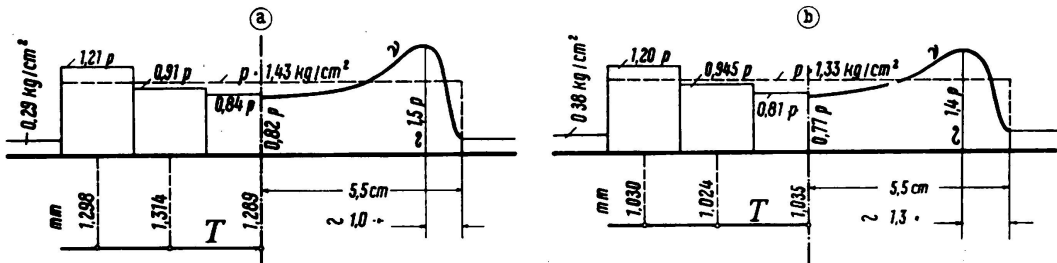


Fig. 9.

Lastverteilung zum Ausgleich der Einsenkungen.

- a) Sand II, Versuch Fn ( $p_0 \approx 0,8 \text{ kg/cm}^2$ )
- b) Sand III, Versuch Bl ( $p_0 \approx 0,9 \text{ kg/cm}^2$ ).

Hälfte überschritten haben, was das Höchstzulässige in der Baupraxis darstellt. Wenn die Lasten geringer sind, nähert sich die Form der Linie  $v$  mehr der für den Gummi gefundenen Kurve. Nichtsdestoweniger dürfen diese zahlenmäßigen Ergebnisse nicht verallgemeinert werden, da jedes von ihnen von den Bedingungen des entsprechenden Versuchs abhängt. (Wir sind dabei, diese Versuche noch mit anderen Böden und in größerem Maßstabe in der Natur fortzusetzen.)

Um die Veränderungen beobachten zu können, die sich ergeben, wenn die Belastung das im allgemeinen zulässige Maß überschreitet, haben wir weiterhin eine Versuchsreihe mit trockenem Sand durchgeführt, der auf den Seitenflächen neben der Belastungsfläche wenig belastet war. Die Proportionalitätsgrenze  $p_0$  war hier wenig höher als  $0,5 \text{ kg/cm}^2$ , was auf eine zulässige Beanspruchung von  $0,75 \text{ kg/cm}^2$  hinweisen würde. Bei der Beanspruchung des

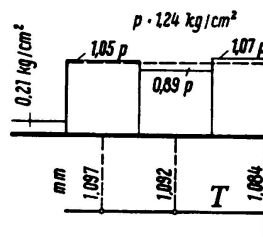


Fig. 10.

Lastverteilung zum Ausgleich der Einsenkungen.

Sand V, Versuch Ng ( $p_0 \approx 0,5 \text{ kg/cm}^2$ ).

Sandes durch einen mittleren Druck von  $1,24 \text{ kg/cm}^2$  (d. h.  $2,5 p_0$ ) haben wir eine für eine Ausgleichung der Einsenkungen notwendige Spannungsverteilung gefunden, wie in Fig. 10 wiedergegeben ist. Man bemerkt hier eine Konzentration der Beanspruchung nach dem Mittelpunkt zu. Es scheint, daß man mit stark zunehmender Belastung zu einer glockenförmigen Verteilungslinie kommt, welche derjenigen ähnlich ist, die man bei freier Oberfläche beobachtet.

### 6. *Schlußfolgerungen.*

Da das verwendete Modell von kleinen Abmessungen war, ist es nötig nachzuprüfen, ob die Ergebnisse mit den oben erwähnten unter wirklichen Gründungskörpern durchgeführten Messungen übereinstimmen. Es ist dies tatsächlich der Fall, denn bei dem dreidimensionalen Problem (Belastungsfläche quadratisch oder kein zu langes Rechteck) dürfte die Spannung im Zentrum ungefähr die Hälfte der durchschnittlichen Beanspruchung betragen. Unsere Versuche geben im übrigen eine Erklärung für die unterschiedliche Form der Druckspannungskurven, die in den verschiedenen Fällen beobachtet wurden.

Wir möchten noch ergänzen, daß durch zahlreiche Messungen, die von dem Institut Professor *Klokner* vorgenommen wurden, die Werte der elastischen und bleibenden Zusammendrückung von verschiedenen Gründungsböden bestimmt wurden. Die Berechnung zeigt, daß die Biegebungsbeanspruchung eines Eisenbetonfundaments eine Durchbiegung hervorruft, welche viel kleiner ist als die bleibende Zusammendrückung eines nachgiebigen Bodens. In diesem Fall kann man sämtliche Gründungsplatten als starr ansehen.

Wenn man annimmt, daß ein Fundament auf einer praktisch genommen homogenen Schicht aufruht, kommt man zu folgenden Schlußfolgerungen:

*Die Spannungsverteilung unter einem Gründungskörper ist veränderlich und hängt vom Gleichgewichtszustand des Bodens ab. Solange nicht die durchschnittliche Beanspruchung die Proportionalitätsgrenze um mehr als die Hälfte überschreitet, ist die Verteilungslinie sattelförmig und die Druckmaxima befinden sich in den äußeren Vierteln der Lastfläche. Eine darüber hinausgehende Beanspruchung verlagert das Druckmaximum gegen den Mittelpunkt.*