

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Bobe, R.

Iterative Berechnung von Gründungsbalken und einachsig ausgesteiften Gründungsplatten bei unregelmäßigen Baugrundverhältnissen

Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe
Wasser- und Grundbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/106081>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Bobe, R. (1967): Iterative Berechnung von Gründungsbalken und einachsig ausgesteiften Gründungsplatten bei unregelmäßigen Baugrundverhältnissen. In: Mitteilungen der Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau; Schriftenreihe Wasser- und Grundbau 20. Berlin: Forschungsanstalt für Schifffahrt, Wasser- und Grundbau. S. 85-108.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



S/ Dk 624.45.1.5
: 624.072.233.5

Flachgründung
: Elastische Bettung

Iterative Berechnung von Gründungsbalken und ein-
achsig ausgesteiften Gründungsplatten bei unregel-
mäßigen Baugrundverhältnissen

Prof.Dr.-Ing.habil. R. Bobe
Direktor des Instituts für Geotechnik an der
Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List"
Dresden

1. Einleitung

Die Ermittlung der Sohldruckverteilung unter Gründungskörpern erfolgt heute vorwiegend nach der Steifzahltheorie. Ihr liegt die Bedingung zugrunde, daß die Biegelinie bzw. Biegefläche des Gründungskörpers und die Setzungsmulde des Baugrundes übereinstimmen müssen. Die gebräuchlichen Steifzahlverfahren setzen jedoch horizontale Schichtgrenzen im Untergrund und konstante Steifzahlen für die einzelnen Baugrundsichten voraus. Sind im Untergrund geneigte Schichtgrenzen vorhanden oder will man für die Setzungsberechnungen Steifzahlen, die von den jeweiligen Vertikalspannungen im Baugrund abhängig sind, benutzen, ist eine geschlossene Lösung der Aufgabe mit einem so beträchtlichen Rechenaufwand verbunden, daß sie selbst bei Einsatz der maschinellen Rechentechnik große Schwierigkeiten bereitet.

Hier bietet sich nun eine Berechnungsmöglichkeit in Form eines Iterationsverfahrens an, mit dem man sich durch oftmalige Wiederholung eines im allgemeinen verhältnismäßig einfachen Rechenganges an die Lösung mit gewünschter Genauigkeit herantastet. Ein solches Berechnungsverfahren ist zudem für einen Rechenautomaten besonders günstig.

Für den Sonderfall halbrahmenartiger Schleusenkörper ist vom Verfasser 1958 eine Berechnungsmethode vorgelegt worden, die bereits auf dem Grundgedanken des im folgenden zu erläuternden Verfahrens basierte /1/, /2/. Damals konnten aber elektronische Rechenmaschinen noch nicht eingesetzt werden, so daß die Berechnungsmethode auf eine Unterteilung der Schleusensole in nur 3 Teilabschnitte und auf den Fall symmetrischer Belastung beschränkt bleiben mußte.

Nachdem nunmehr elektronische Rechenmaschinen in größerer Zahl und mit den entsprechenden Speicherkapazitäten zur Verfügung stehen, konnte ein für Gründungsbalken und einachsige ausgesteifte Gründungsplatten allgemein anwendbares Iterationsverfahren ausgearbeitet werden.

2. Grundzüge des Iterationsverfahrens

Im Gegensatz zu den üblichen Steifzahlverfahren verzichtet man bewußt auf die mathematische Verknüpfung der Formänderungsbedingungen des Gründungskörpers und des Untergrundes und nimmt in erster Näherung unter Berücksichtigung der Verteilung der äußeren Belastung und der Steifigkeitsverhältnisse eine plausible Sohldruckverteilung an. Die Sohlspannungslinie wird - wie dies auch bei dem Verfahren von OHDE /3/ und bei anderen Verfahren üblich ist - durch eine Stufenlinie ersetzt. Die Sohldruckordinaten $p_{s1} \dots p_{sn}$ müssen lediglich so festgelegt werden, daß die Gleichgewichtsbedingungen erfüllt sind (Bild 1a).

Durch die Vorgabe einer bestimmten Sohldruckverteilung ist eine sehr einfache Ermittlung der Biegemomente und der Biegelinie des Gründungsbalkens bzw. Gründungstreifens möglich. Ohne Angabe einzelner Zahlenwerte ist im Bild 1b der prinzipielle Verlauf einer Momentenlinie unter Berücksichtigung der angenommenen äußeren Belastung dargestellt. Bild 1c zeigt den prinzipiellen Verlauf der zugehörigen Biegelinie.

Die gleiche Sohldruckverteilung wird anschließend als Belastung des Untergrundes aufgebracht und erzeugt eine Setzungsmulde (Bild 1d). Die Setzungsberechnung teilt sich wie üblich in zwei Einzelaufgaben, und zwar in die Ermittlung der Vertikalspannungen σ_z , die aus der Bauwerkslast herrühren, und in die Ermittlung der Zusammendrückung der einzelnen Baugrundsichten, deren Summe die Setzungsordinaten liefert. Dabei muß allerdings zwischen Gründungsbalken und Gründungsplatten unterschieden werden, da in beiden Fällen verschiedene Beziehungen für die Vertikalspannungen im Baugrund benutzt werden müssen.

Zum Vergleich mit den Biegelinienordinaten des Gründungsbalkens werden nicht die absoluten Setzungsbeträge s_1 , sondern die auf eine gemeinsame Bezugsebene reduzierten Setzungsdifferenzen s_1' benötigt. Wie aus Bild 1d ersichtlich, soll die Bezugsebene durch die beiden Enden des Gründungsbalkens bestimmt sein. Selbstverständlich kann man dafür auch andere Stellen, z.B. die Mitten

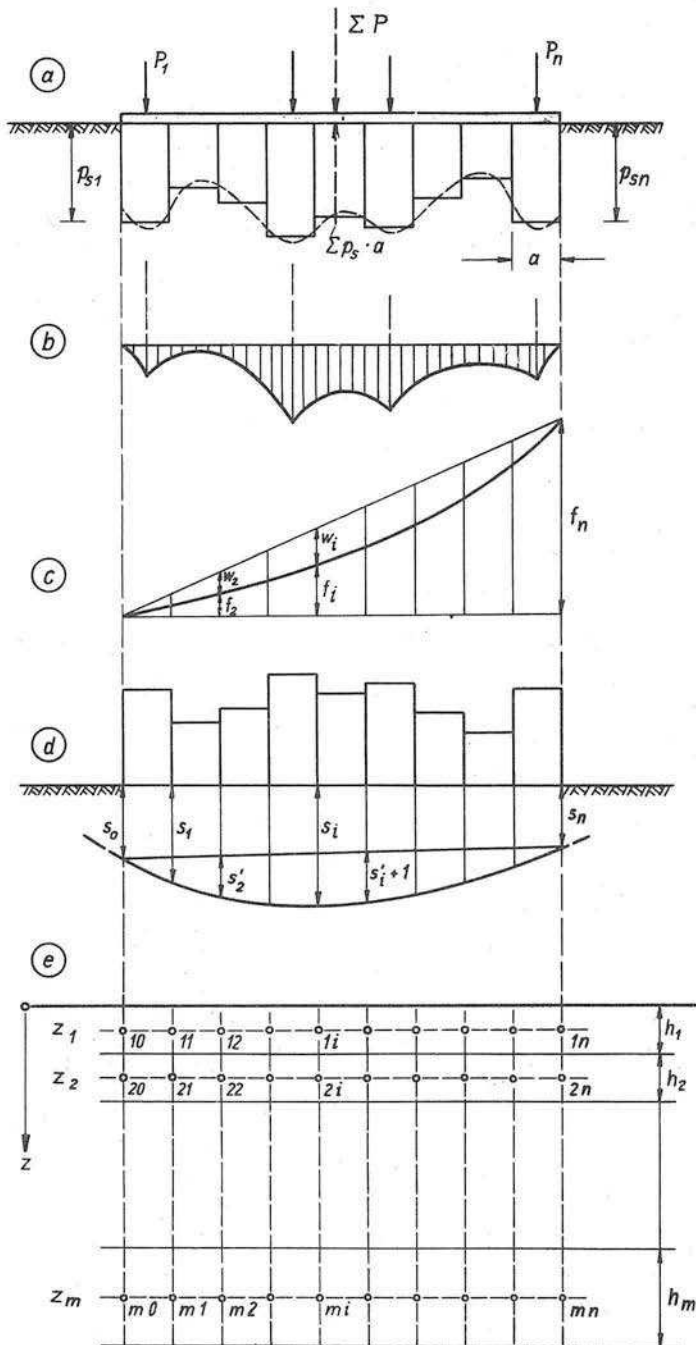


Bild 1

des ersten und letzten Teilfeldes, festlegen. Dies würde sich dann anbieten, wenn man die Setzungsordinaten auch jeweils für die Feldmitten berechnet. Es wird aber vorgeschlagen, die Setzungen unter den Feldgrenzen zu ermitteln, da sich in diesem Falle die Berechnung der Vertikalspannungen σ_z infolge Bauwerkslast sowohl bei Gründungsbalken als auch bei einachsrig ausgesteiften Gründungsplatten einfacher gestaltet.

Die Spannungsermittlung muß für alle Punkte im Untergrund vorgenommen werden, die sich aus der Feldteilung des Balkens und der Unterteilung des Baugrundes in einzelne Teilschichten (Lamellen) ergeben (Bild 1e). Für den Fall, daß im Untergrund geneigte Schichtgrenzen vorhanden sind, müssen die betreffenden Lamellendicken h_k für jeden Vertikalschnitt $i = 0 \dots n$ gesondert ermittelt werden (Bild 2). Die Ordinaten z zur Berechnung der Vertikalspannungen im Baugrund ergeben sich jeweils für die Mitte der einzelnen Lamellen zu

$$z_k = \sum_{j=1}^{k-1} h_j + \frac{h_k}{2} \quad (1)$$

Für die Spannungsermittlung werden die bekannten, auf BOUSSINESQ zurückgehenden Gleichungen für den elastisch-isotropen Halbraum verwendet, ohne daß die Beeinflussung der Spannungsverteilung durch die unterschiedliche Steifigkeit einzelner Baugrundsichten erfaßt wird. Es sind zwar hierfür bereits einige mathematische Beziehungen bekannt, jedoch ist der Rechenaufwand noch so erheblich, daß er in keinem Verhältnis zu den sonstigen Unsicherheiten und Vereinfachungen steht.

Die Zusammendrückung der einzelnen Teilschichten des Baugrundes wird mit Hilfe von Drucksetzungsdiagrammen bestimmt. Bei diesem Iterationsverfahren kann aber auch mit Vorteil von mathematischen Beziehungen für die Steifzahl E_s Gebrauch gemacht werden, wobei insbesondere die von OHDE angegebene Gleichung

$$E_s = v \cdot p^w \quad (2)$$

in Betracht kommen wird. Selbstverständlich sind auch andere Beziehungen möglich und können bei einer Programmierung des Verfahrens berücksichtigt werden.

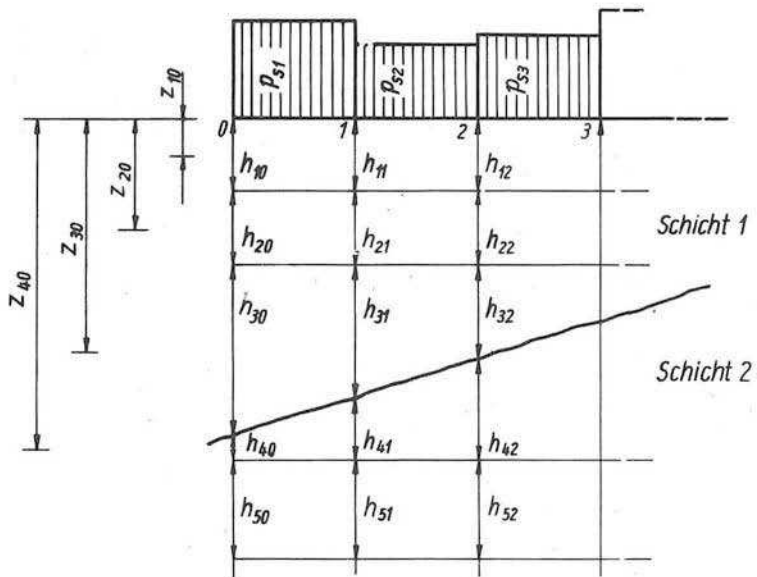


Bild 2

Nachdem in der geschilderten Art und Weise für die erste Annahme einer Sohldruckverteilung sowohl die Biegelinienordinaten w_i als auch die Setzungsdifferenzen s_i' ermittelt worden sind, werden beide miteinander verglichen. Da sich wohl kaum bei dem ersten Versuch Biegelinie und Setzungsmulde decken werden, muß aus den Differenzen

$$\Delta w_i = w_i - s_i' \quad (3)$$

auf eine zweckmäßige Korrektur der zuerst angenommenen Sohldruckverteilung geschlossen werden. Die Berechnung wird daraufhin mit einer entsprechend veränderten Sohldruckverteilung in analoger Weise wiederholt, und dieses Vorgehen wird solange fortgesetzt, bis eine genügend genaue Übereinstimmung zwischen Biegelinie und Setzungsmulde erreicht ist. Es sei besonders betont, daß es zweckmäßig ist, die Veränderungen in den Biegemomenten mit zu verfolgen, da hieraus am besten erkannt werden kann, bis zu welcher Genauigkeit eine Korrektur der Sohldruckverteilung sinnvoll ist.

3. Formelmäßige Ableitung für eine Feldteilung $n = 5$

Obwohl für das Iterationsverfahren in erster Linie der Einsatz elektronischer Rechenmaschinen in Frage kommen wird, kann in einfachen Fällen auch eine Berechnung von Hand - ggf. unter Zuhilfenahme einer Tischrechenmaschine - vorgenommen werden, wobei man sich allerdings mit einer verhältnismäßig groben Feldteilung begnügen muß. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß auch bei manchen praktischen Aufgaben eine Feldteilung $n = 5$ genügen wird.

Grundsätzlich kann der Gründungkörper beliebig belastet sein (Einzellasten, Streckenlasten, Momente). Auch feldweise veränderliche Trägheitsmomente (Plattendicken) können bei einer maschinellen Berechnung ohne Schwierigkeit berücksichtigt werden. Diese Programnteile können unmittelbar aus vorhandenen Programmen (840 - 09 bzw. 840 - 12) übernommen werden.

Für die folgenden Ableitungen sei jedoch eine Vereinfachung dahingehend vorgenommen, daß wir uns auf in Feldmitte angreifende Einzellasten und konstantes Trägheitsmoment für den Gründungskör-

per beschränken und die Berechnung auf einen 1 m breiten, aus einer einachsig ausgesteiften Gründungsplatte herausgeschnittenen Streifen bzw. auf einen 1 m breiten Gründungsbalken beziehen. In den folgenden Gleichungen kann somit die Breite ($b = 1$) herausgelassen werden.

Die vor Beginn der Berechnung festzulegende Sohldruckverteilung (1. Annahme) muß folgende Gleichgewichtsbedingungen erfüllen (Bild 3a):

$$\begin{aligned}\sum V &= 0: a (p_{s1} + p_{s2} + p_{s3} + p_{s4} + p_{s5}) - \sum P = 0 \\ \sum M_A &= 0: \frac{a^2}{2} (p_{s1} + 3 p_{s2} + 5 p_{s3} + 7 p_{s4} + 9 p_{s5}) - \\ &\quad - \frac{a}{2} (P_1 + 3 P_2 + 5 P_3 + 7 P_4 + 9 P_5) = 0\end{aligned}\quad (4)$$

Dies gilt selbstverständlich auch für die nach jeder Iterationsstufe verbesserte Sohldruckverteilung. Die Biegemomente (Bild 3b) ergeben sich zu

$$\begin{aligned}M_0 &= 0 \\ M_1' &= \frac{a^2}{2} \frac{p_{s1}}{4} \\ M_1 &= \frac{a^2}{2} p_{s1} - \frac{a}{2} P_1 \\ M_2' &= \frac{a^2}{2} (2 p_{s1} + \frac{p_{s2}}{4}) - \frac{a}{2} 2 P_1 \\ M_2 &= \frac{a^2}{2} (3 p_{s1} + p_{s2}) - \frac{a}{2} (3 P_1 + P_2) \\ M_3' &= \frac{a^2}{2} (4 p_{s1} + 2 p_{s2} + \frac{p_{s3}}{4}) - \frac{a}{2} (4 P_1 + 2 P_2)\end{aligned}\quad (5)$$

usw.

Um die Durchbiegungen (Bild 3c) des Gründungskörpers zu ermitteln, kann die Methode der elastischen Gewichte angewendet werden. Unter Hinweis auf Bild 4 dürfte es im allgemeinen genügen, die Momentenlinie als einen gebrochenen Linienzug durch Ermittlung der Momente in Feldmitte und an den Feldgrenzen zu erfassen. Die Biegelinie kann dann in der bekannten Weise mit den "Trapezformeln" berechnet werden.

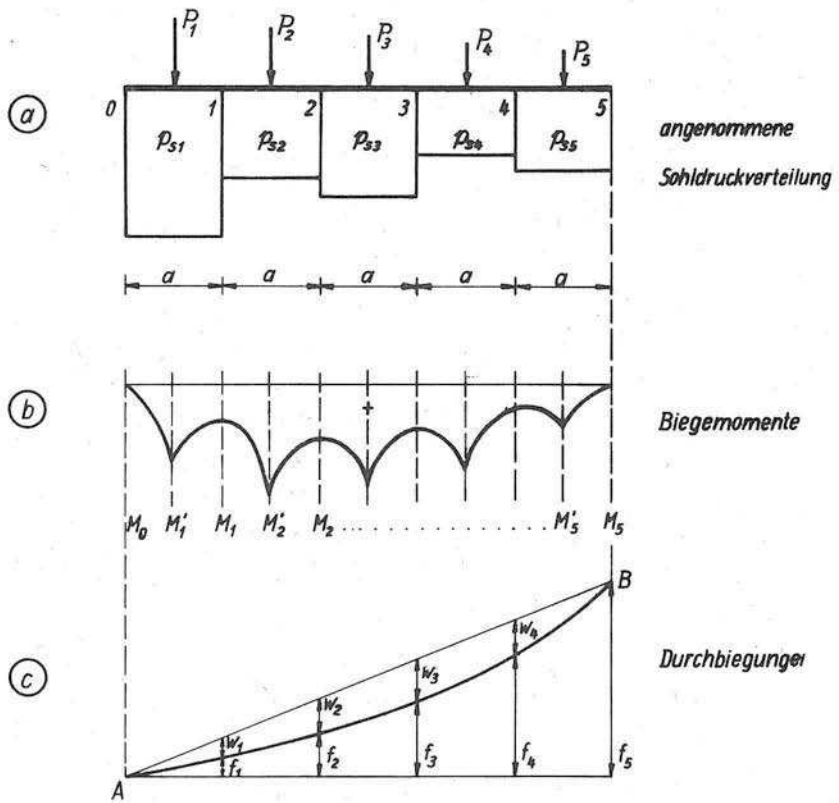


Bild 3

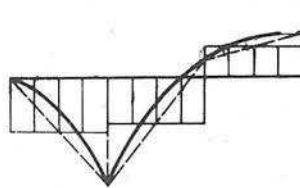


Bild 4

Bei einer Berechnung von Hand kann man aber auch, ohne daß wesentliche Abweichungen entstehen, die Dreiecke und Trapeze in flächengleiche Rechtecke umwandeln, worauf die folgenden Gleichungen basieren. Man darf nicht aus dem Auge verlieren, daß im Hinblick auf die notwendigen Vereinfachungen und Näherungen bei der Erfassung der bodenphysikalischen Kennwerte und der Baugrundsichtung sowie bei der Spannungsermittlung im Untergrund eine Verfeinerung nur einzelner Berechnungsstufen wenig sinnvoll ist.

Die Durchbiegungen f können dann angeschrieben werden als

$$f_0 = 0$$

$$f_1 = \frac{1}{EJ} \frac{M_0 + M_1'}{2} \frac{3a^2}{8} + \frac{1}{EJ} \frac{M_1' + M_1}{2} \frac{a^2}{8} \quad (6)$$

und analog $f_2 \dots f_5$.

Mit $\alpha = \frac{a^2}{16 EJ}$ und $M_0 = M_5 = 0$ ergeben sich folgende Beziehungen:

$$f_1 = \alpha (4 M_1' + M_1) \quad (7)$$

$$f_2 = \alpha (12 M_1' + 8 M_1 + 4 M_2' + M_2)$$

$$f_3 = \alpha (20 M_1' + 16 M_1 + 12 M_2' + 8 M_2 + 4 M_3' + M_3)$$

$$f_4 = \alpha (28 M_1' + 24 M_1 + 20 M_2' + 16 M_2 + 12 M_3' + 8 M_3 + 4 M_4' + M_4)$$

$$f_5 = \alpha (36 M_1' + 32 M_1 + 28 M_2' + 24 M_2 + 20 M_3' + 16 M_3 + 12 M_4' + 8 M_4 + 4 M_5')$$

Die auf die Bezugsebene A - B bezogenen Biegelinienordinaten w_i ergeben sich zu:

$$w_0 = \frac{0}{5} f_5 - f_0 = 0$$

$$w_1 = \frac{1}{5} f_5 - f_1$$

$$w_2 = \frac{2}{5} f_5 - f_2$$

$$w_3 = \frac{3}{5} f_5 - f_3$$

$$w_4 = \frac{4}{5} f_5 - f_4$$

$$w_5 = \frac{5}{5} f_5 - f_5 = 0 \quad (8)$$

Nach kurzer Zwischenrechnung erhalten wir

$$w_1 = \alpha (3,2 M_1' + 5,4 M_1 + 5,6 M_2' + 4,8 M_2 + 4,0 M_3' + 3,2 M_3 + 2,4 M_4' + 1,6 M_4 + 0,8 M_5')$$

und analog $w_2 \dots w_4$. In Matrixschreibweise:

$$\begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ w_4 \end{pmatrix} = \alpha \begin{pmatrix} 3,2 & 5,4 & 5,6 & 4,8 & 4,0 & 3,2 & 2,4 & 1,6 & 0,8 \\ 2,4 & 4,8 & 7,2 & 8,6 & 8,0 & 6,4 & 4,8 & 3,2 & 1,6 \\ 1,6 & 3,2 & 4,8 & 6,4 & 8,0 & 8,6 & 7,2 & 4,8 & 2,4 \\ 0,8 & 1,6 & 2,4 & 3,2 & 4,0 & 4,8 & 5,6 & 5,4 & 3,2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} M_1 \\ M_1 \\ M_2 \\ M_2 \\ M_3 \\ M_3 \\ M_4 \\ M_4 \\ M_5 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Nach Kenntnis der Biegelinie des Gründungsbalkens für eine angenommene Sohlendruckverteilung ist nun die Setzungsmulde des Baugrundes unter den gleichen Sohlpressungen $p_{S1} \dots p_{S5}$ zu bestimmen. Hierfür stehen die bekannten Berechnungsverfahren zur Verfügung.

Für den Vergleich mit der Biegelinie des Gründungskörpers werden nicht die absoluten Setzungsbeträge s_i , sondern die Setzungsdifferenzen s_i' bezüglich einer festzulegenden Bezugsebene gebraucht und wie folgt ermittelt:

$$s_0' = s_5' = 0$$

$$s_1' = s_1 - \frac{4}{5} s_0 - \frac{1}{5} s_5$$

$$s_2' = s_2 - \frac{3}{5} s_0 - \frac{2}{5} s_5 \quad (10)$$

$$s_3' = s_3 - \frac{2}{5} s_0 - \frac{3}{5} s_5$$

$$s_4' = s_4 - \frac{1}{5} s_0 - \frac{4}{5} s_5$$

4. Zahlenbeispiel

Um das soeben erläuterte Iterationsverfahren zu veranschaulichen, sollen die Ergebnisse eines durchgerechneten Zahlenbeispiels vorgelegt werden. Da die Berechnung - lediglich unter Zuhilfenahme einer Tischrechenmaschine - von Hand ausgeführt wurde und da es in erster Linie darauf ankam, die praktische Anwendbarkeit zu zeigen, wurden einfache Verhältnisse sowohl für die äußere Belastung als auch für den Baugrund gewählt.

Ein Gründungsbalken von 10 m Länge, 1 m Breite und 0,40 m Dicke wird durch drei symmetrisch angeordnete Einzellasten belastet (Bild 5). Das Eigengewicht des Gründungsbalkens und die Gründungstiefe bleiben bei der Berechnung unberücksichtigt. Der Baugrund wird bis in größere Tiefe als homogen vorausgesetzt. Die Setzungsberechnung wird stark vereinfacht, indem nur eine Schicht von 10 m Mächtigkeit ohne Unterteilung in Lamellen und mit konstanter Steifzahl $E_s = 300 \text{ Mp/m}^2$ erfaßt wird.

Die Vereinfachung hinsichtlich der Setzungsberechnungen kann sich zwar in einem gewissen Grade auf die Verteilung der Sohlpressungen auswirken, nicht aber auf den prinzipiellen Gang der Berechnung, der an Hand dieses Beispiels gezeigt werden soll.

Für die erste Annahme über die Größe der Sohlpressungen $p_{s1} \dots p_{s5}$ (für das Zahlenbeispiel erfolgte eine Beschränkung auf $n = 5$ Teilfelder) standen außer den Gleichgewichtsbedingungen einige Erfahrungen aus den an anderer Stelle beschriebenen Vergleichsberechnungen zur Verfügung /4/, /5/. Infolge der Symmetrie genügte die Festlegung von 3 Sohldruckkoordinaten:

$$\begin{aligned} p_{s1} &= p_{s5} = 15,0 \text{ Mp/m}^2 \\ p_{s2} &= p_{s4} = 9,0 \text{ Mp/m}^2 \\ p_{s3} &= 12,0 \text{ Mp/m}^2 \end{aligned}$$

Hiermit wurden die Biegemomente, die Biegelinie und die Setzungsmulde berechnet. Die Durchbiegung in der Mitte des Gründungsbalkens beträgt rund 17 mm, die Setzungsdifferenz für die gleiche

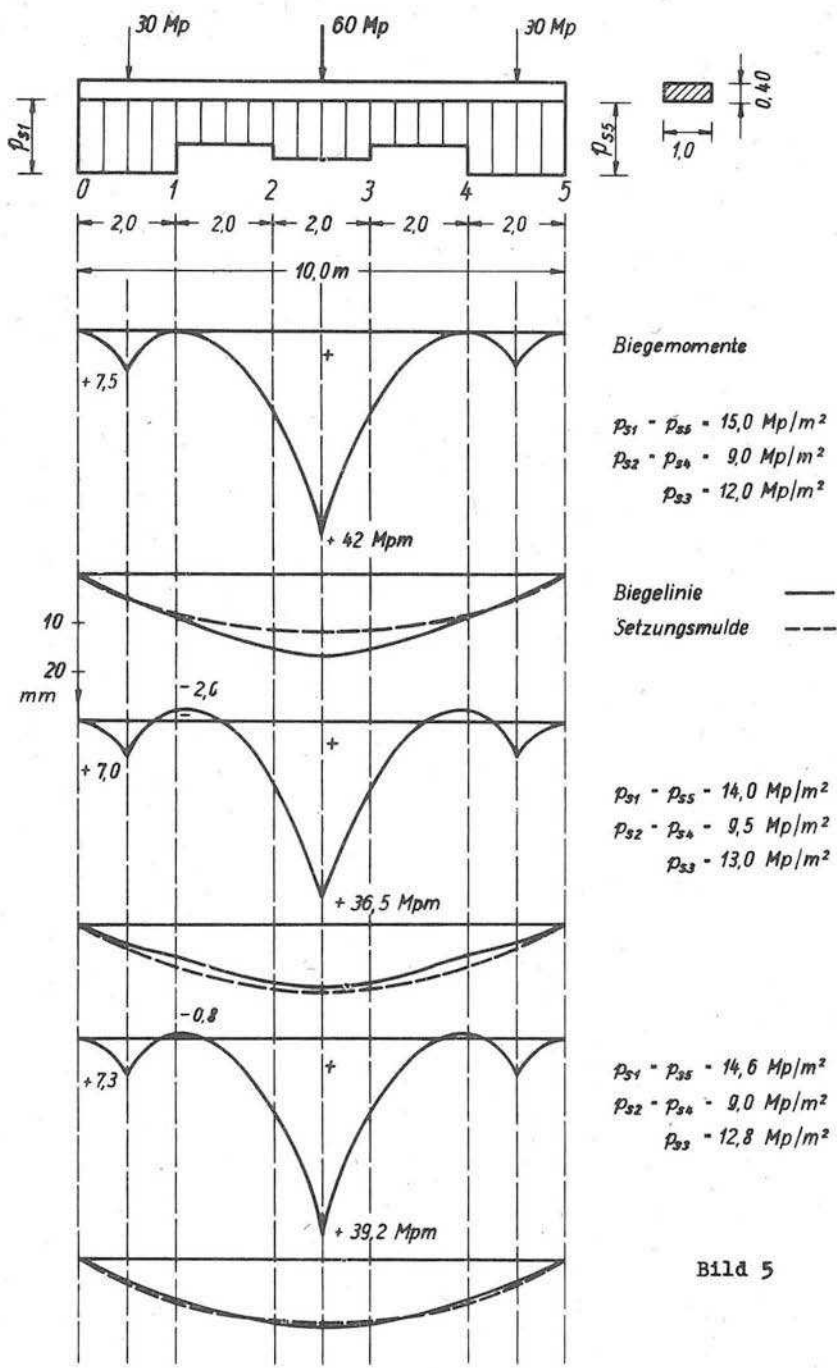


Bild 5

Stelle rund 12 mm.

Die genauen Werte an den Feldgrenzen sind:

$$\Delta w_1 = w_1 - s_1' = 8,43 - 8,38 = 0,05 \text{ mm} \quad (= \Delta w_4)$$

$$\Delta w_2 = w_2 - s_2' = 15,40 - 11,30 = 4,10 \text{ mm} \quad (= \Delta w_3)$$

Diese positiven Differenzbeträge lassen erkennen, daß eine gewisse Verlagerung der Sohlpressungen nach der Mitte angezeigt ist. Eine zweite Berechnung mit

$$p_{s1} = p_{s5} = 14,0 \text{ Mp/m}^2$$

$$p_{s2} = p_{s4} = 9,5 \text{ Mp/m}^2$$

$$p_{s3} = 13,0 \text{ Mp/m}^2$$

hat zum Ergebnis, daß beide Differenzen nunmehr negativ werden, d.h. die Durchbiegungen des Balkens sind geringer als die entsprechenden Setzungsdifferenzen.

$$\Delta w_1 = 6,02 - 8,86 = -2,84 \text{ mm} \quad (= \Delta w_4)$$

$$\Delta w_2 = 11,32 - 12,40 = -1,08 \text{ mm} \quad (= \Delta w_3)$$

Damit steht bereits fest, daß das endgültige Ergebnis zwischen den durch die ersten beiden Iterationsstufen gezogenen Grenzen liegen wird. Die negativen Differenzen können durch eine entgegengesetzte Maßnahme (Verlagerung der Sohlpressungen wieder etwas nach außen) verringert werden.

Eine dritte Berechnung mit

$$p_{s1} = p_{s5} = 14,6 \text{ Mp/m}^2$$

$$p_{s2} = p_{s4} = 9,0 \text{ Mp/m}^2$$

$$p_{s3} = 12,8 \text{ Mp/m}^2$$

bringt eine weitere Annäherung. Setzungsmulde und Biegelinie überschneiden sich und liefern Differenzbeträge von

$$\Delta w_1 = 7,33 - 8,57 = -1,24 \text{ mm} \quad (= \Delta w_4)$$

$$\Delta w_2 = 13,51 - 12,76 = +0,75 \text{ mm} \quad (= \Delta w_3)$$

Es ist selbstverständlich möglich, eine noch bessere Annäherung mit ein oder zwei weiteren Berechnungsstufen zu erzielen. Man muß sich indes die Frage vorlegen, welche Genauigkeit man mit Rücksicht auf die unvermeidlichen Schwankungen und Fehler bei der Erfassung der Baugrundeigenschaften erreichen kann bzw. vorschreiben soll. Wenn wir uns für die drei Iterationsstufen die Unterschiede bei den Biegemomenten ansehen, die letztlich zusammen mit den Querkräften für die Bemessung des Gründungskörpers maßgebend sind, so darf man sich bei dem vorliegenden Beispiel ganz offensichtlich bereits mit der 3. Berechnung begnügen, da nur noch unwesentliche Änderungen zu erwarten sind.

Für die spätere maschinelle Berechnung darf man hieraus schlußfolgern, daß auch dort eine verhältnismäßig bescheidene Grenze für die Differenzen Δw_1 genügen dürfte, daß man aber gut daran tun wird, von der Maschine zusätzlich die Veränderungen der Biegemomente verfolgen zu lassen und auch hierfür eine Grenzbedingung vorzuschreiben.

5. Schlußbemerkungen

5.1 Zahl der Teilfelder

Beim Einsatz einer elektronischen Rechenmaschine für das Iterationsverfahren wird eine Unterteilung des Gründungsbalkens oder Gründungstreifens in $n = 8$ oder $n = 10$ Teilfelder empfohlen. Eine feinere Unterteilung ist, wie die schon erwähnten Vergleichsuntersuchungen ergeben haben, nicht sinnvoll. Außerdem würde dann die für den Übergang von einer Iterationsstufe zur nächsten erforderliche Rechenvorschrift, für die eine gerade Zahl von Teilfeldern gewisse Vorteile bringt, sehr kompliziert.

5.2 Korrektur der Sohldruckverteilung nach den einzelnen Iterationsstufen

Bei der maschinellen Berechnung muß natürlich die am Schluß jeder Iterationsstufe notwendige Korrektur der Sohldruckverteilung automatisch erfolgen, wofür ein geeigneter Algorithmus vor-

zugeben ist. Wie aus dem Zahlenbeispiel hervorgeht, sind die Korrekturen aus der Größe und dem Vorzeichen der Differenzen Δw_1 abzuleiten, wobei selbstverständlich die gewählte Vorzeichenregelung zu beachten ist. Positive Differenzen zeigen an, daß die Sohlpressungen nach der Mitte zu verlagern, d.h. im mittleren Bereich zu vergrößern sind, während bei negativen Differenzen die Sohldruckordinaten an den Rändern vergrößert werden müssen, stets unter Beachtung der Gleichgewichtsbedingungen.

Wechselnde Vorzeichen bei den Differenzen $\Delta w_1, \Delta w_2 \dots \Delta w_n$ deuten darauf hin, daß schon eine weitgehende Annäherung an die maßgebende Sohldruckverteilung erreicht ist. In diesem Falle kann durch geringfügige Korrekturen benachbarter Sohldruckordinaten eine weitere Verminderung der Differenzen erfolgen, also eine noch bessere Anpassung von Biegelinie und Setzungsmulde erreicht werden. Die Biegelinie reagiert übrigens viel stärker auf eine Veränderung der Sohldruckverteilung als die Setzungsmulde. Auf alle Fälle müssen die Veränderungen der Biegemomente bei den einzelnen Iterationsstufen beachtet werden, da hiefaus am besten zu erkennen ist, wann die Iteration abgebrochen werden kann.

Die Schnelligkeit der Konvergenz des Iterationsverfahrens wird wesentlich durch die Treffsicherheit der ersten Annahme für die Sohldruckverteilung beeinflusst. Hierfür stehen Untersuchungsergebnisse zur Verfügung, die von der Systemsteifigkeit und der Verteilung der äußeren Belastung auf die zu erwartende Sohldruckverteilung schließen lassen /4/, /5/.

5.3 Anpassung von Biegelinie und Setzungsmulde bei geschichtetem Baugrund

Bei geschichtetem Baugrund, also bei einer Wechsellagerung von nichtbindigen und bindigen Schichten, paßt sich die Setzungsmulde nicht so gut der Biegelinie an, wie das bei dem soeben behandelten Zahlenbeispiel der Fall ist. Die Übereinstimmung von Setzungsmulde und Biegelinie ist dann nicht in allen Punkten zu erreichen, und man wird sich meist damit begnügen müssen, daß ein "Flächenausgleich" der positiven und negativen Differenzen angestrebt wird.

Zur Veranschaulichung sei das Ergebnis eines Berechnungsbeispiels vorgelegt für einen symmetrisch belasteten Gründungsbalken auf einem geschichteten Untergrund, bei dem eine verhältnismäßig starke Weigung der Schichtgrenze (1 : 2) angenommen wurde (Bild 6).

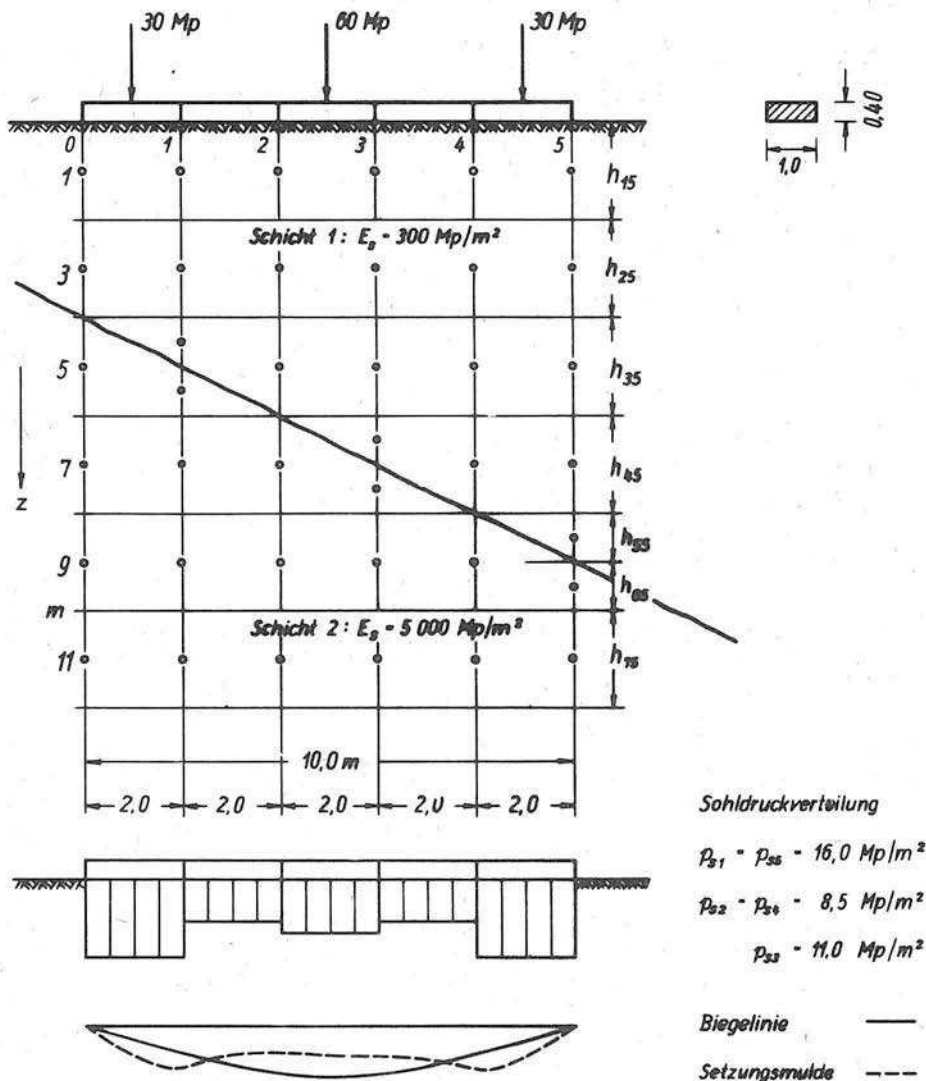


Bild 6

Wiederum wurde zur Vereinfachung die Gründungstiefe vernachlässigt und die Berechnung auf eine Feldteilung $n = 5$ beschränkt. Für die Setzungsberechnungen wurde hier aber der Untergrund in 2 m dicke Lamellen unterteilt.

Es soll an dieser Stelle nicht der Einfluß geneigter Schichtgrenzen diskutiert werden - hierzu sei auf /6/ verwiesen -, es sei aber darauf aufmerksam gemacht, daß natürlich auch in diesem Falle die Gleichgewichtsbedingungen erfüllt sein müssen. Bei symmetrischer äußerer Belastung muß also auch die Sohldruckverteilung symmetrisch sein. Dabei wird allerdings vom Endzustand der Konsolidation ausgegangen. Die Sohldruckverteilung während des Konsolidationsvorganges kann sich hiervon durchaus unterscheiden, was aber nicht Gegenstand dieser Ausführungen sein soll.

Im vorliegenden Beispiel ergibt sich übrigens, daß sich das rechte Ende des 10 m langen Gründungsbalkens um 7 mm mehr setzt als das linke, was bei der Auftragung aber nicht berücksichtigt wurde, um nicht bei den unterschiedlichen Maßstäben einen falschen optischen Eindruck zu erwecken. Die in Bild 6 eingetragene Sohldruckverteilung, Biegelinie und Setzungsmulde ist das Endergebnis der Iteration und stellt die unter den gegebenen Verhältnissen mögliche beste Anpassung dar. Bei einer Feldteilung $n = 10$ wäre möglicherweise eine etwas bessere Übereinstimmung zu erzielen.

Man darf dem Umstand, daß Biegelinie und Setzungsmulde nicht vollständig zur Deckung gebracht werden können, aber keine zu große Bedeutung beimessen. Bei Benutzung der gebräuchlichen Steifezahlverfahren ist dies nämlich auch der Fall, es kommt dort nur nicht zur Geltung. Man kann es jedoch leicht feststellen, indem man für einen Gründungsbalken mit der aus einem Steifezahlverfahren gewonnenen Sohldruckverteilung unabhängig voneinander sowohl die Biegelinie als auch die Setzungsmulde berechnet. Es zeigen sich dann in der Regel beträchtliche Differenzen, die ihre Ursache vor allem darin haben, daß bei der geschlossenen Lösung die Biegelinie aus einer viermaligen Differentiation der Belastungsfunktion errechnet wird. Auf diesen Umstand hat auch E. SCHULTZE /7/ schon hingewiesen.

5.4 Setzungsberechnungen im Grenzbereich von Wiederbelastung und Erstbelastung

Das Iterationsverfahren bietet auch die Möglichkeit, eine Berechnung in jenem Falle vorzunehmen, bei dem die mittlere Sohlpressung p_{VO} etwa in Größe der Vorbelastung liegt. Dann wird nämlich bei der fast immer ungleichmäßigen Sohldruckverteilung diese Vorbelastung durch einzelne Sohldruckkoordinaten unterschritten, durch andere dagegen überschritten. Für die Setzungsberechnung muß dementsprechend zwischen dem Bereich der Wiederverdichtung und dem der Erstverdichtung unterschieden werden.

Für diejenigen Sohlpressungen p_{S1} , die die Vorbelastung übersteigen, werden die Setzungen aus zwei Anteilen berechnet (Bild 7). Bis zur Größe der Vorbelastung ergibt sich ein erster Setzungsanteil, für den die Steifezahl aus dem Bereich der Wiederverdichtung maßgebend ist. Die darüber hinausgehende Sohlpressung liefert einen zweiten Setzungsanteil, hierfür ist die Steifezahl der Erstverdichtung einzusetzen.

Die Zusammendrückung einer Schicht k von der Dicke h_k , die in der Tiefe z unter der Gründungssohle liegt, ergibt sich somit zu

$$s_k = \left(\frac{\sigma_{pz1}}{E_{sw}} + \frac{\sigma_{pz2}}{E_{se}} \right) h_k \quad (11)$$

Zusammenfassung

Die gebräuchlichen Steifezahlverfahren zur Ermittlung der Sohldruckverteilung unter Gründungskörpern setzen horizontale Schichtgrenzen im Untergrund und konstante Steifezahlen für die einzelnen Baugrundsichten voraus. Mit Hilfe eines neu entwickelten Iterationsverfahrens kann eine Berechnung nach der Steifezahltheorie auch bei unregelmäßigen Baugrundverhältnissen und im Grenzbereich von Wiederbelastung und Erstbelastung vorgenommen werden, wobei auch von den Vertikalspannungen abhängige Steifezahlen verwendet werden können. Das Verfahren, das in erster Linie für elektronische Rechenmaschinen gedacht ist, wird an Hand einfacher Zahlenbeispiele erläutert.

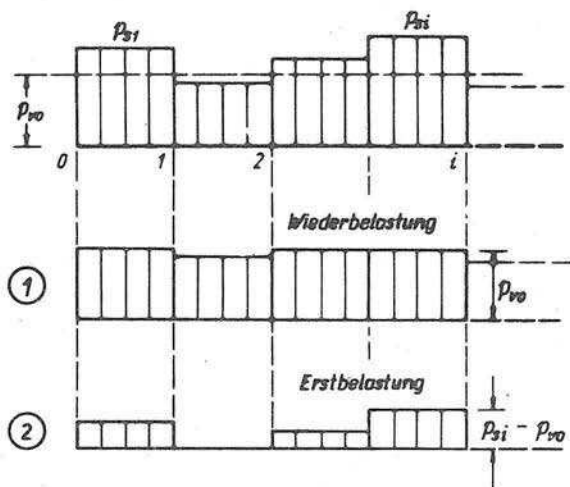


Bild 7

L i t e r a t u r

- /1/ Bobe, R. Die Sohl Druckverteilung unter halbrahmenartigen Schleusenkörpern. Wasserwirtschaft - Wassertechnik 1960, S. 261, S. 315
- /2/ Bobe, R. Der Einfluß des Erddruckes und der Sohl Druckverteilung auf die Spannungen in einer Schleusensole.
Wiss. Zeitschr. d. HfV 1959/60
H. 2, S. 419
- /3/ Ohde, J. Die Berechnung der Sohl Druckverteilung unter Gründungskörpern.
Der Bauingenieur (1942) H. 14/16, S. 99 bis 107 und H. 17/18, S. 122 bis 127
- /4/ Bobe, R. Untersuchungen über den Einfluß der Steifigkeit eines Gründungsbalkens, der Bau grundverhältnisse und der Verteilung der äußeren Belastung auf die Sohlspannungen, Setzungen und Biegemomente unter besonderer Berücksichtigung der Berechnungsmöglichkeiten mit elektronischen Rechenmaschinen. Habil.schrift Hochschule für Verkehrswesen "Friedrich List" Dresden, 1966
- /5/ Bobe, R. Ergebnisse maschineller Vergleichsberechnungen für Gründungsbalken.
Bauplanung - Bautechnik 1967, S. 220
- /6/ Bobe, R. und Dittmann, W. Die Sohl Druckverteilung unter Gründungsbalken bei geneigten Schichtgrenzen im Baugrund.
Wiss.Zeitschr. der HfV 1967, H. 2, S.451-453

/7/ Schultze, E. Probleme bei der Auswertung von Setzungs-
messungen.
Vorträge der Baugrundtagung 1962 in Essen,
S. 343

