Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung

Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine

Band: 123/124 (1944)

Heft: 4

Artikel: Das Druckverformungsgesetz in der Erdbaumechanik

Autor: Bendel, L.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-53984

Band 124 Der S. I. A. ist für den Inhalt des redaktionellen Teils seiner Vereinsorgane nicht verantwortlich Nr. 4

Das Druckverformungsgesetz in der Erdbaumechanik

Von Ing. Dr. L. BENDEL, Luzern, P.-D. an der E. I. L.

Inhaltübersicht. Das Hooke'sche Druckverformungsgesetz gilt nur für Festgestein, aber nicht für bindige und nichtbindige Lockerböden. Im folgenden wird daher ein in der Erdbaumechanik allgemein gültiges Druckverformungsgesetz, das für Lockerböden und Festgestein Gültigkeit hat, abgeleitet.

Der Elastizitätsmodul bei Festgestein und Lockerböden. Jedem Ingenieur und Techniker ist das durch Tausende von Versuchen bestätigte Hooke'sche Gesetz bekannt, wonach die Verformung (s) bei Stahl, Beton und Festgesteinen direkt proportional der Spannung σ ist, d. h. es ist

$$ds = \alpha\, d\sigma \quad \ldots\ldots\ldots \quad (1)$$

Der Elastizitätmodul $1/\alpha = E$ wird hierbei als ein gleich gross bleibender Festwert, sowohl bei einer Zunahme der Belastung ($+ d\sigma$) als auch bei einer Entlastung ($- d\sigma$) angenommen. Bei den Lockerböden (bindige und nichtbindige Bodenarten) hingegen ändert der Elastizitätsmodul E in Abhängigkeit von der Grösse der Belastung; auch variiert seine Grösse, ob es sich um eine Belastung ($+ d\sigma$) oder eine Entlastung ($- d\sigma$) handelt. Im folgenden wird dieser Tatsache Rechnung getragen, indem nach Fröhlich für die Elastizitätsziffer bei der Zusammendrükkung der Buchstabe M_E = Zusammendrückungsmodul und für die Elastizitätsziffer bei der Entlastung der Wert E = Schwellmodul eingeführt wird.

Die mathematische Auswertung von Verformungsversuchen in Lockerböden. Der Verfasser hat über tausend in der Fach-Literatur angegebene Drucksetzungsversuche, sowie zahlreiche eigene Versuchsergebnisse an Lockerböden systematisch zusammengestellt und nach den Regeln der mathematischen Statistik ausgewertet. Dabei ergab sich als mathematischer Ausdruck für das allgemein gültige Druckverformungsgesetz:

$$(\sigma + c) = b\, e^{as} \quad \ldots\ldots \quad (2)$$

In Gleichung (2) bedeuten:
σ = die auf den Boden gebrachte Belastung in kg/cm²;
s = Setzung, ausgedrückt in % der Versuchshöhe h;
e = Basis des natürlichen Logarithmus;
a, b und c Festwerte, abhängig von der Bodenbeschaffenheit.

Bei der genauen Analyse des Aufbaues der Formel (2) ergab sich, dass die Werte (b) und (c) beinahe gleich gross sind und dass sie die Dimension von kg/cm² haben. Infolge dessen lässt sich Formel (2) auch schreiben, indem $b = c = \sigma_a$ gesetzt wird:

$$(\sigma + \sigma_a) = \sigma_a e^{as} \quad \ldots\ldots \quad (3)$$

oder logarithmiert:

$$\log\,(\sigma_a + \sigma) = \log \sigma_a + a\, s \log e \quad \ldots \quad (4)$$

oder

$$s = K \log \left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a}\right) = K' + K \log\,(\sigma_a + \sigma) \quad \ldots \quad (5)$$

wobei $K = \dfrac{1}{a \log e}$ und $K' = - K \log \sigma_a$ bedeuten.

Wird der Wert σ_a genauer untersucht, so ergibt sich, dass σ_a zusammengesetzt ist aus den beiden Werten σ_0 und σ_v d. h. es ist:

$$\sigma_a = \sigma_0 + \sigma_v \quad \ldots\ldots \quad (6)$$

In den obigen Formeln haben die Werte σ_0, σ_v, σ_a und K auch folgende physikalische Bedeutung. Der Wert σ_0 ist ein Festwert, dessen Grösse von den physikalischen, chemischen und elektrochemischen Eigenschaften des Bodens abhängt, oder anders ausgedrückt: σ_0 bedeutet in der Bodenmechanik die Grösse des Druckes, der durch die Kapillarkräfte, durch die molekularen Anziehungskräfte und durch die chemisch-physikalischen Kräfte auf das sedimentierte Material ausgeübt wird, wenn es vom zähflüssigen (viskosen) Zustand in den elastisch-plastischen Zustand übergeht. Aus den bisherigen Versuchen konnte festgestellt werden, dass dies bei bindigen Böden der Fall ist, wenn deren Wassergehalt praktisch demjenigen an der sogenannten Fliessgrenze entspricht. Die Fliessgrenze wird auch obere Plastizitätsgrenze oder untere Elastizitätsgrenze genannt. Die Fliessgrenze wird bei bindigen Bodenarten nach Atterberg mit Hilfe des Casagrande'schen Fliessgerätes bestimmt. Es wäre jedoch wünschenswert, die definierte, physikalische Grenze durch ein geeigneteres Gerät zu erfassen und zu bestimmen.

Wird beim Druckverformungsversuch von der Atterberg-schen Fliessgrenze ausgegangen, so wird σ_v in Gl. (6) gleich 0, d. h. es wird $\sigma_a = \sigma_0$ und Gl. (5) geht über in

$$s = K \log \left(\frac{\sigma_0 + \sigma}{\sigma_0}\right) \quad \ldots\ldots \quad (7)$$

Wird z. B. beim Oedometerversuch ein Bodenmaterial mit einem Wassergehalt, der der Atterberg'schen Fliessgrenze entspricht, als Ausgangspunkt gewählt, werden verschieden grosse Werte der Belastung σ aufgebracht und die dazu gehörenden Setzungswerte (s) am Oedometer abgelesen, so können die Werte σ_0 und K aus Gl. 7 errechnet werden.

Zahlenwerte für σ_0. Der σ_0-Wert schwankt je nach dem Gehalt an kolloidalen Bestandteilen im Boden zwischen $\sigma_0 = 0{,}01$ bis 1 kg/cm².

Der K-Wert gibt Aufschluss über die Grösse der Zusammendrückbarkeit des Bodens. Weiche, meist bindige Bodenarten weisen grosse K-Werte auf. Kleine K-Werte zeigen wenig verformbare Böden, wie Felsen usw.

Zahlenwerte für K:

Bodenart	K bei Belastung	K bei Entlastung
Ton, Lehm	0,05 bis 0,6	0,01 bis 0,10
Mergeliger Boden mit organischen Beimengungen	0,01 bis 0,2	0,002 bis 0,02
Feinster Quarzsand	0,01 bis 0,15	0,005 bis 0,02
Feiner Sand	0,05 bis 0,10	0,003 bis 0,006

Bei Verfestigung des Bodens, z. B. bei Injektionen oder bei elektrochemischer Bodenverfestigung von torfig-mergeligen Schichten ist der K-Wert von 0,055 auf 0,02 gesunken. — Je höher der Glimmergehalt eines Sandes ist, desto grösser wird der K-Wert.

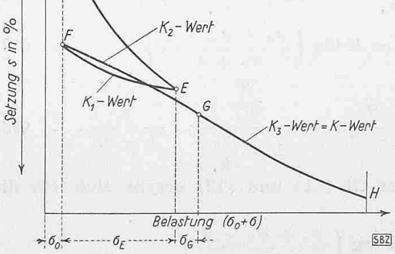

Abb. 1. Gültigkeit der K-Werte in der Gleichung (7), und zwar gilt K im Bereich, in dem die Drucksetzungs-Gleichung (7) Gültigkeit hat; K_1 für die Entlastungshebungs-Gleichung $K_1 < K$; K_2 für die Wiederbelastung $K_1 < K_2 < K$; $K_3 = K$ für den Ast G-H der Kurve, der erstmalig belastet wird

Wird der Boden entlastet, so erhält man an Stelle des K-Wertes einen neuen K_1-Wert, siehe den Kurvenast $E - F$ in der Abb. 1. K_1 ist kleiner als der K-Wert. Wird der Boden wieder belastet, so erhält man einen neuen Wert K_2; siehe Kurvenast $F - G$ in Abb. 1. K_2 ist grösser als K_1, aber kleiner als K; d. h. $K_1 < K_2 < K$. Für den Kurvenast $G - H$, der die Fortsetzung des Kurvenastes $A - E$ ist, wird der Wert K_3 gleich gross wie der Wert K; d. h. es ist $K_3 = K$.

Aus obigen Feststellungen ergibt sich, dass der K-Wert und der K_2-Wert die Vorbelastungsgeschichte eines Bodens wiederspiegeln. Für die weitaus grösste Anzahl der Drucksetzungsversuche genügt es aber, den K-Wert für die Kurve A-E-H zu bestimmen. Die Kurve A-E-H erhält man bei der Erstbelastung des Bodens.

Der σ_v*-Wert* bedeutet diejenige Belastung, mit der der Boden vor Beginn der Untersuchung bereits vorbelastet gewesen war, z. B. infolge Gletscherdruckes; oder wenn die Bodenprobe aus

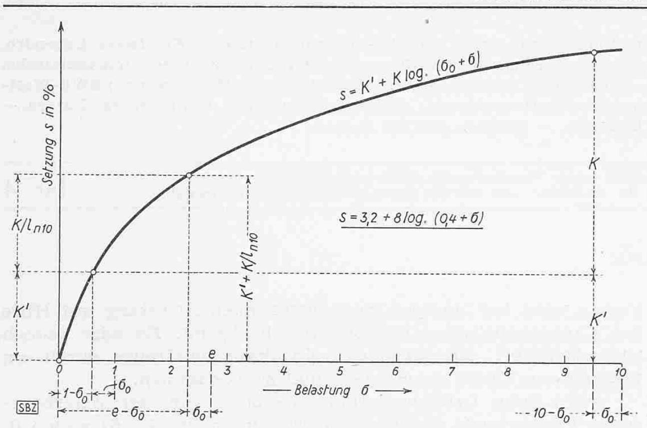

Abb. 3. Druckverformungsgesetz $s = K' + K \log(\sigma_0 + \sigma)$ in natürlichem Masstab. s bezogen auf Höhe h_0 der Probe unter Belastung σ_0

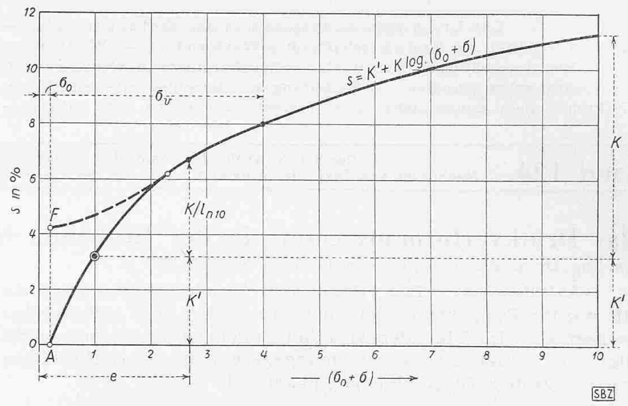

Abb. 4. Wie Abb. 3, mit der Axe $x = \sigma_0 + \sigma$. Im vorliegenden Beispiel ist $s = 3{,}2 + 8 \log(0{,}4 + \sigma)$, in %

der Tiefe t entnommen wurde, hat sie bereits die Vorbelastung $\sigma_v = \gamma_e t$ in kg/cm² erhalten.

Versuchstechnische Bestimmung der Werte K und σ_a. Um die Werte K und σ_a in der Formel (5) $s = K \log\left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a}\right)$ ermitteln zu können, wird aus dem Boden ein Körper von der Höhe h gestochen. Dieser wird unter verhinderter Seitenausdehnung mit verschiedenen Werten σ belastet und die jeweilige Setzung $S = S'_{\text{gemessen}}$ bestimmt.

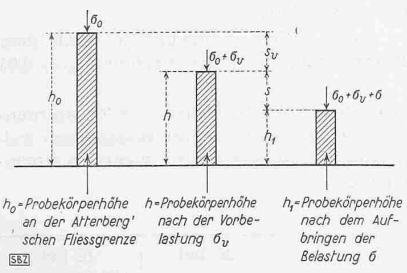

Abb. 2. Probekörperhöhen bei Belastung σ_0, $\sigma_0 + \sigma_v$, $\sigma_0 + \sigma_v + \sigma$

Für die nachfolgenden Betrachtungen bedeuten nach Abb. 2

$$s_v = \frac{S_v}{h_0} \qquad (8)$$

in %, bezogen auf die zunächst imaginäre Höhe h_0. h_0 bedeutet die Höhe, die der Probekörper beim Wassergehalt hat, die der Atterberg'schen Fliessgrenze entspricht. Das gleiche gilt für

$$s = \frac{S}{h_0} \text{ in } \% \qquad (9)$$

$$s' = \frac{S}{h} = \frac{S_{\text{gemessen}}}{h_{\text{gemessen}}} \qquad (10)$$

in %, bezogen auf die Höhe h des Versuchkörpers.

Dann ist

$$s_v = \frac{S_v}{h_0} = K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v}{\sigma_0}\right) \qquad (11)$$

$$s = \frac{S}{h_0} = K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v + \sigma}{\sigma_0 + \sigma_v}\right) \qquad (12)$$

$$s' = \frac{S}{h} = \frac{S}{h_0 - S_v} = \frac{\frac{S}{h_0}}{1 - \frac{S_v}{h_0}} = \frac{s}{1 - s_v} \qquad (13)$$

Unter Benützung der Gl. (11) und (12) ergibt sich für die Setzung s':

$$s' = \frac{K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v + \sigma}{\sigma_0 + \sigma_v}\right)}{1 - K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v}{\sigma_0}\right)} \qquad (14)$$

und für $S = S_{\text{gemessen}}$ bzw. $h = h_{\text{gemessen}}$ (Probehöhe) wird:

$$S_{\text{gemessen}} = h_{\text{gemessen}} \frac{K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v + \sigma}{\sigma_0 + \sigma_v}\right)}{1 - K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v}{\sigma_0}\right)} \qquad (15)$$

Wird im Nenner: $K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v}{\sigma_0}\right)$ klein, was oft der Fall ist, so geht Gl. (15) über in

$$s \cong s' = \frac{S_{\text{gemessen}}}{h_{\text{gemessen}}} = K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v + \sigma}{\sigma_0 + \sigma_v}\right) \qquad (16)$$

und für $\sigma_a = \sigma_0 + \sigma_v$ wird Gl. (16)

$$s = K \log\left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a}\right) \qquad (17)$$

Die zeichnerischen Auswertungen obiger Gleichungen gehen aus den Abb. 3 bis 5 hervor.

Zahlenbeispiel

Eine Bodenprobe (lehmhaltiger Feinsand) von der Probenhöhe $h = 100$ mm wurde einem Drucksetzungsversuch unterworfen. Es wurden folgende Setzungen in Abhängigkeit der Belastung σ bei verhinderter Seitenausdehnung ermittelt:

Belastung	Gemessene Setzung S_{gemessen}
$\sigma_1 = 1$ kg/cm²	$S_1{}'_{\text{gemessen}} = 0{,}74$ mm
$\sigma_2 = 2$ kg/cm²	$S_2{}'_{\text{gemessen}} = 1{,}24$ mm
$\sigma_3 = 3$ kg/cm²	$S_3{}'_{\text{gemessen}} = 1{,}65$ mm
$\sigma_4 = 4$ kg/cm²	$S_4{}'_{\text{gemessen}} = 1{,}98$ mm

Anmerkung: Da $h = 100$ mm gewählt wurde, ergab sich S_{gemessen} zu s' in %

Es ist

$$s_3' - s_2' = s_3'{}_{\text{gemessen}} - s_2'{}_{\text{gemessen}} = 1{,}65 - 1{,}24 = 0{,}41 \text{ mm}$$
$$= \log \frac{\sigma_a + \sigma_3}{\sigma_a + \sigma_2} \left(\frac{K h}{1 - K \log \frac{\sigma_0 + \sigma_v}{\sigma_0}}\right) \qquad (18)$$

$$s_4' - s_2' = s_4'{}_{\text{gemessen}} - s_2'{}_{\text{gemessen}} = 1{,}98 - 1{,}24 = 0{,}74 \text{ mm}$$
$$= \log \frac{\sigma_a + \sigma_4}{\sigma_a + \sigma_2} \left(\frac{K h}{1 - K \log \frac{\sigma_0 + \sigma_v}{\sigma_0}}\right) \qquad (19)$$

Aus Gl. (18) und (19) erhält man

$$\frac{s_3' - s_2'}{s_4' - s'_2} = \frac{0{,}41}{0{,}74} = \frac{\log \frac{\sigma_a + 3}{\sigma_a + 2}}{\log \frac{\sigma_a + 4}{\sigma_a + 2}} =$$
$$= \frac{\log(\sigma_a + 3) - \log(\sigma_a + 2)}{\log(\sigma_a + 4) - \log(\sigma_a + 2)} = 0{,}57 \qquad (20)$$

In Reihen entwickelt ergibt sich:

$$\frac{\ln \sigma_a + \frac{2 \cdot 3}{2\sigma_a + 3} - \ln \sigma_a - \frac{2 \cdot 2}{2\sigma_a + 2}}{\ln \sigma_a + \frac{2 \cdot 4}{2\sigma_a + 4} - \ln \sigma_a - \frac{2 \cdot 2}{2\sigma_a + 2}} = 0{,}57 \qquad (21)$$

Aus Gl. (21) errechnet sich

$$\sigma_a = 2 \text{ kg/cm}^2 \qquad (22)$$

d. h. der untersuchte Boden war schon *vor* der Untersuchung mit $\sigma_a = 2$ kg/cm² vorbelastet gewesen.

Nach Gl. (6) ist: $\sigma_a = \sigma_0 + \sigma_v$ (23)

Die Bestimmung des Wertes σ_0 ist anschliessend an Gl. (7) beschrieben. Ist σ_0 bestimmt, so kann auch $\sigma_v = \sigma_a - \sigma_0$ errechnet werden.

Die Drucksetzungsgleichung in veränderter Schreibweise

1. *Der K_0-Wert.* Gl. (17) kann auch geschrieben werden:

$$s' = K \log\left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a}\right) = K_0 \log \sigma \qquad (24)$$

In Gl. (24) ist K_0 eine Funktion von σ und kein Festwert mehr. Wird Gl. (24) in Reihen aufgelöst, so ergibt sich für K_0:

$$K_0 = K \frac{\sigma(\sigma + 1)}{[2(\sigma_0 + \sigma_v) + \sigma](\sigma - 1)} \qquad (25)$$

2. *Der K_e-Wert.* Wird für $\sigma = e = 2{,}7$ kg/cm² gesetzt und berücksichtigt man, dass der Wassergehalt W in Abhängigkeit des Bodendruckes σ ist:

$$W = W_0 - K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v}{\sigma_0}\right)$$

(W_0 = Wassergehalt an der Atterberg'schen Fliessgrenze)

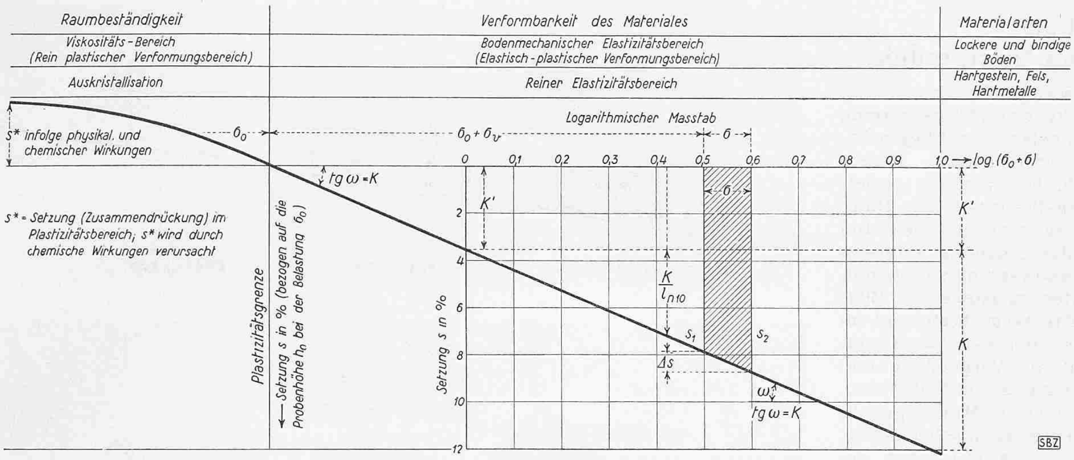

Abb. 5. Darstellung des Druckverformungsgesetzes nach Bendel: $s = K' + K \log(\sigma_0 + \sigma)$, mit der s-Axe und der $\log(\sigma_0 + \sigma)$-Axe

so geht Gl. (25) über in

$$K_0 = K_e = K\left(\frac{a + b\,W}{c + d\,W}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (26)$$

d. h. der K_e-Wert ist stark vom jeweiligen Wassergehalt des untersuchten Bodens, ausgedrückt in Vol. $^0/_0$, abhängig.

3. *Der Δ_e-Wert.* Die Gl. (24) kann auch geschrieben werden

$$s' = K \log\left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a + a}\right) = K_0' \log\left(\frac{\sigma}{a}\right) \quad . \; . \; . \quad (27)$$

Wird für $\sigma = e = 2{,}7$ kg/cm² genommen, und für $a = 1$ kg pro cm², so erhält man für K_e' definitionsgemäss den Δ_e-Wert von Haefeli. Vgl. SBZ, Bd. 111, 1938, Nr. 24/26. Allgemein wird auf Grund obiger Betrachtungen

$$\Delta_e = K_e - \alpha\,W \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (28)$$

In Worten heisst das, dass der Δ_e-Wert sehr stark vom jeweiligen Wassergehalt des Bodens bei Beginn des Drucksetzungs-Versuches abhängig ist. Der Δ_e-Wert darf nur verwendet werden, wenn der Boden während der Belastungsänderung keine nennenswerte Wassergehaltveränderung erfährt.

4. *Das allgemein gültige Druckverformungsgesetz in Beziehung zur Druckporenziffergleichung von Terzaghi.* Die Druckporenziffergleichung von Terzaghi kann in der Form geschrieben werden

$$\varepsilon = \varepsilon_0 - \alpha\,ln\left(\frac{\sigma_0 + \sigma}{\sigma_0}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (29)$$

$$\left.\begin{array}{l} \varepsilon = \text{Druckporenziffer} \\ \varepsilon_0 = \text{Druckporenziffer für } \sigma = 0 \end{array}\right\} \alpha = \text{Festwert}$$

Obige Gl. (7) kann auch geschrieben werden

$$s = K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma}{\sigma_0}\right) = n_0 - n \quad . \; . \; . \; . \quad (30)$$

Da $n = \dfrac{\varepsilon}{1 + \varepsilon}$ ist, ergibt sich

$$n_0 - n = \frac{\varepsilon_0}{1 + \varepsilon_0} - \frac{\varepsilon}{1 + \varepsilon} \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (31)$$

Wird für $\dfrac{1}{1 + \varepsilon_0}$ und für $\dfrac{1}{1 + \varepsilon}$ ein Mittelwert $\dfrac{1}{1 + \varepsilon_m}$ angenommen, so wird

$$(n_0 - n) = (\varepsilon_0 - \varepsilon)\left(\frac{1}{1 + \varepsilon_m}\right) = K \log\left(\frac{\sigma_0 + \sigma}{\sigma_0}\right) \quad (32)$$

und man erhält aus den Gl. (29) bis (32):

$$\varepsilon_0 - \varepsilon = \frac{K(1 + \varepsilon_m)}{ln\,10}\,ln\left(\frac{\sigma_0 + \sigma}{\sigma_0}\right) = \alpha\,ln\left(\frac{\sigma_0 + \sigma}{\sigma_0}\right) \quad (33)$$

Darnach steht der Festwert K in Beziehung zur Druckporen-Ziffergleichung im Verhältnis

$$K = \frac{ln\,10}{\dfrac{1}{\alpha}\,(1 + \varepsilon_m)} \quad . \; . \; . \; . \; . \; . \quad (34)$$

5. *Die Drucksetzungsgleichung von Fröhlich.* Fröhlich (Druck-Verteilung im Baugrund, Wien 1934, S. 88) setzt für den Wert

$$\frac{1}{ln\,10\,[1/\alpha\,(1 + \varepsilon_m)]} = \omega \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (35)$$

Wird die Schreibweise des Verfassers für das allgemein gültige Druckverformungsgesetz gewählt, so kann das Druckverformungsgesetz von Fröhlich auch in folgender Form geschrieben werden

$$s = \omega\,ln\left(\frac{\sigma_0 + \sigma_v + \sigma}{\sigma_0 + \sigma_v}\right) = K \log\left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a}\right) . \; . \; . \quad (36)$$

Bei Fröhlich bedeuten:

$\sigma_a = \sigma_0 + \sigma_v$
K = Funktion der jeweiligen mittleren Porenziffer, d. h. K ist bei Fröhlich in sehr engen Grenzen eine Variable;
$\sigma_0 = p_k$
p_k = Druckäquivalent der Konsistenzform;
$\sigma_v = \gamma_e\,(z + t)$
t = Gründungstiefe,
z = betrachtete Tiefe unter Fundament-Unterkante, γ_e = Raumgewicht der Erde.

6. *Das Hooke'sche Druckverformungsgesetz.* Wird die Gleichung:

$$s = K' + K \log(\sigma_0 + \sigma)$$

nach σ differenziert, so erhält man

$$d\,s = \frac{K}{ln\,10}\,\frac{1}{(\sigma_0 + \sigma)}\,d\,\sigma$$

Wird σ_0 gegenüber σ sehr gross, so erhält man

$$d\,s = \frac{K}{ln\,10}\,\frac{1}{\sigma_0}\,d\,\sigma = \frac{d\,\sigma}{E}$$

oder $s = \dfrac{\sigma}{E}$; das ist das Hooke'sche Gesetz.

7. *Drucksetzungsversuche von Voellmy 1937.* Voellmy hat drei Böden eingehend untersucht und für diese eine Beziehung gefunden, die sich nach einigen Umformungen schreiben lässt

$$s = K \log\left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a}\right)$$

Diese Formel stimmt mit dem vom Verfasser abgeleiteten allgemein gültigen Druckverformungsgesetz für Böden überein. Voellmy gibt für die von ihm untersuchten Böden folgende Werte:

Lehm, lose gefüllt	σ_a 0,2 kg/cm²	K 20 $^0/_0$
Lehm, gestampft	3 kg/cm²	3 $^0/_0$
Sand	6 kg/cm²	1,5 $^0/_0$

Schlussfolgerungen

1. Das allgemein gültige Druckverformungsgesetz des Verfassers, auf mathematisch-statistischem Wege aus einer Grosszahl von Versuchen abgeleitet, lautet:

$$s = K \log\left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a}\right) \quad . \; . \; . \; . \; . \quad (41)$$

s = spez. Setzung des Bodens, K = Bodenfestwert in $^0/_0$, σ_a = Vorbelastung des Bodens in kg/cm².

2. Das allgemein gültige Druckverformungsgesetz wurde in Beziehung zu der Druckporenziffergleichung von Terzaghi und zu den Drucksetzungsgleichungen von Fröhlich, Haefeli und Voellmy gebracht. Das Hooke'sche Elastizitätsgesetz ist ebenfalls ein Sonderfall des allgemein gültigen Druckverformungs-Gesetzes; es gilt nur für Festgestein.

3. Für die Durchführung von Setzungsanalysen gilt der Ansatz

$$S = \int d\,s = \int_0^t K \log\left(\frac{\sigma_a + \sigma}{\sigma_a}\right) d\,t \quad . \; . \; . \quad (42)$$

$d\,t$ = betrachtete Höhe der Bodenschicht.

4. Für die Gl. (41) bzw. (42) müssen die Werte K und σ_a versuchstechnisch bestimmt werden; dies geschieht am besten mit Hilfe eines Oedometerversuches. Für die genaue Ermittlung der K und σ_a-Werte im Versuchsraum betragen die Kosten zwischen 25 und 40 Franken. Daneben gebraucht der Verfasser auf der Baustelle ein vereinfachtes Verfahren, das wesentlich billiger zu stehen kommt.

5. Das Druck-Schubfestigkeitsgesetz lautet: $\tau = k' + k\,(\sigma_0 + \sigma)$ nach Coulomb; das Druck-Setzungsgesetz lautet $s = K' + K \log(\sigma_0 + \sigma)$ nach Bendel, d. h. Schubfestigkeitsgesetz und Setzungsgesetz unterscheiden sich neben den Festwerten k' und k, bzw. K' und K dadurch, dass die Schubfestigkeit vom Faktor $(\sigma_0 + \sigma)$ und das Setzungsgesetz vom $\log(\sigma_0 + \sigma)$ abhängig ist.

Bei der Ableitung des beschriebenen Druckverformungs-Gesetzes hat mir Dipl. Ing. Ch. Schaerer, bei den N. O. K. Baden wertvolle Dienste geleistet, was ihm auch an dieser Stelle bestens verdankt sei.