

**Zeitschrift:** Schweizerische Bauzeitung  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 123/124 (1944)  
**Heft:** 24

**Artikel:** Setzungen infolge Senkung, Schwankung und Strömung des Grundwassers  
**Autor:** Haefeli, R. / Schaad, W.  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-53967>

#### 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:** 09.01.2026

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

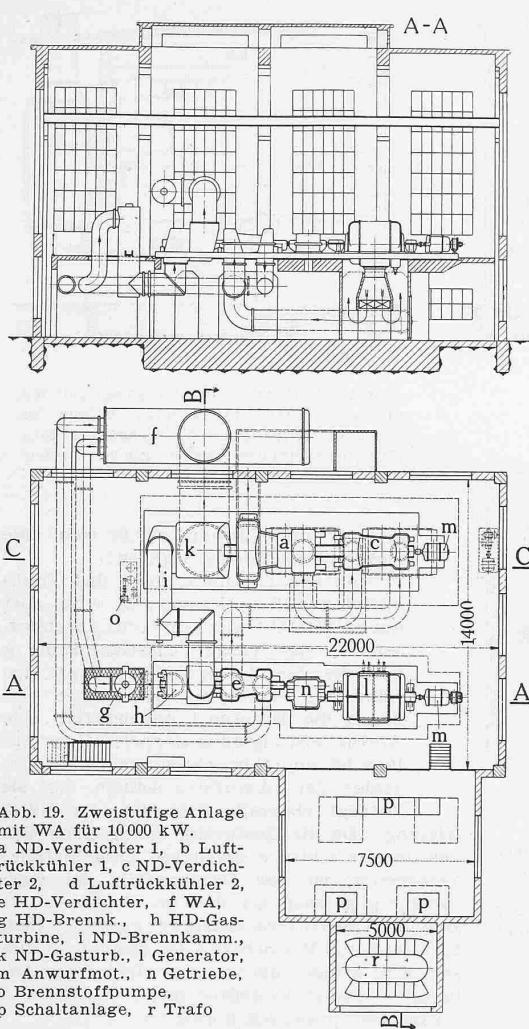


Abb. 19. Zweistufige Anlage mit WA für 10 000 kW.  
a ND-Verdichter 1, b Luft-  
rückkühler 1, c ND-Verdichter  
2, d Luftrückkühler 2,  
e HD-Verdichter, f WA,  
g HD-Brennk., h HD-Gas-  
turbine, i ND-Brennkamm.,  
k ND-Gasturb., l Generator,  
m Anwurfmot., n Getriebe,  
o Brennstoffpumpe,  
p Schaltanlage, r Trafo

derdruckturbine wird aber die Abgastemperatur umso kleiner, je grösser das Druckgefälle dieser Turbine ist. Da bei dieser Anordnung gleichzeitig das im Hochdruck-Gebläse erzeugte Druckgefälle gross gemacht wird, ergibt sich eine hohe Gebläsetemperatur. Wird deshalb die ganze Nutzleistung von der Niederdruckturbine erzeugt, so erhält man eine niedere Abgastemperatur bei gleichzeitig hoher Gebläseendtemperatur, was einen Wärmeaustauscher unwirtschaftlich macht. Man kann aber auch den Generator von der Hochdruckturbine antreiben lassen. In diesem Fall wird das Druckgefälle der Hochdruck-

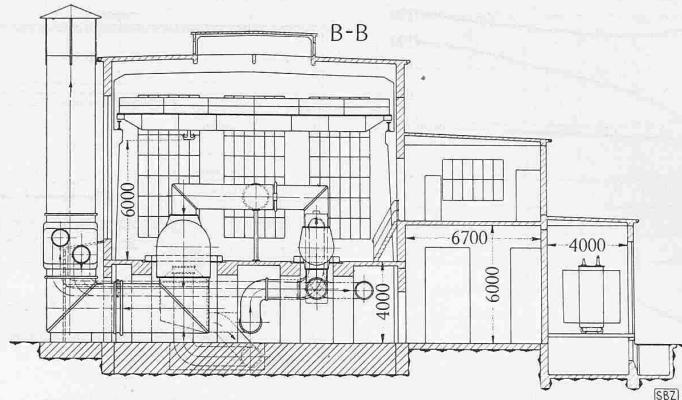
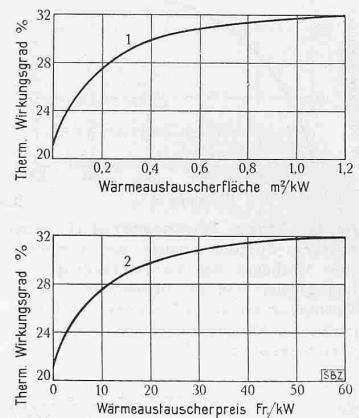


Abb. 18 (rechts). Thermischer Wirkungsgrad einer zweistufigen Verbrennungs-Turbinenanlage in Abhängigkeit von der WA-Fläche (1) und vom WA-Preis pro kW Leistung (2)



turbine gross und dasjenige der Niederdruckturbine klein, weil diese keine Nutzleistung nach aussen abgeben muss. Da bei dieser Anordnung das im HD-Verdichter erzeugte Druckgefälle zweckmässig klein gemacht wird, erhält man eine niedere Verdichterendtemperatur bei gleichzeitiger hoher Abgastemperatur. In diesem Fall wird die Abwärmerückgewinnung lohnend.

Das Schema einer doppelstufigen Anlage mit Wärmeaustauscher zeigt Abb. 17. Um eine möglichst kleine Verdichterleistung zu erhalten, wird die Verdichtung in diesem Fall in drei Stufen mit je einem Zwischenkühler durchgeführt. Diese Zwischenkühlung mit gleichzeitiger Zwischenüberhitzung auf der Turbinenseite und Abwärmeverwertung im Luftvorwärmer gibt, wie Abb. 18 zeigt, sehr gute thermische Wirkungsgrade bei verhältnismässig kleinen Wärmeaustauscherflächen. Um einen thermischen Wirkungsgrad von z. B. 30 % zu erreichen, ist nur eine Wärmeaustauscherfläche von 0,4 m²/kW erforderlich (etwa 20 Fr./kW). Eine derartige Anlage für 10 000 kW Leistung zeigt Abb. 19; eine solche ist z. Zt. bei BBC im Bau. (Schluss folgt)

## Setzungen infolge Senkung, Schwankung und Strömung des Grundwassers

Von P.-D. Ing. Dr. R. HAEFELI und Ing. W. SCHAAD, Erdbauabteilung der Versuchsanstalt für Wasserbau, E. T. H. Zürich (Forts. von S. 271)

### 4. Rechnerische Setzungsanalysen

Während die graphische Setzungsanalyse allgemeine Gültigkeit besitzt und auch bei geschichtetem Boden mit ganz verschiedenartigen Schichten zum Ziele führt, müssen bei der rein rechnerischen Bestimmung der Setzungen innerhalb der zusammendrückbaren Schicht homogene Verhältnisse vorliegen. Je nachdem es sich um einen wenig oder stark zusammendrückbaren Boden handelt, können verschiedene Wege zur Setzungsberechnung eingeschlagen werden (a und b), die gegenüber der graphischen Methode den gemeinsamen Vorzug besitzen, dass sie eine explizite Lösung des Problems ermöglichen.

#### a) Berechnung der Setzungen bei Grundwasserspiegelabsenkungen in spezifisch leichtem, stark zusammendrückbarem Material

Bei stark zusammendrückbaren Materialien mit dem Raumgewicht  $\gamma'_e \sim 1,0 \text{ t/m}^3$  (Torf) darf, wie bereits erwähnt, das durch die Setzung selbst bedingte, erneute Eintauchen gewisser Schichten unter den abgesunkenen Grundwasserspiegel nicht vernachlässigt werden. Anderseits vereinfachen sich hier die Verhältnisse dadurch, dass die Vertikalspannungen unterhalb des Grundwasserspiegels, wo das Raumgewicht  $\gamma''_e$  des Materials unter Wasser

nahe bei 0 liegt, nur wenig mit der Tiefe zunehmen. Dies hat zur Folge, dass bei einer gegebenen Grundwassersenkung nur ein relativ enger Bereich der Zusammendrückungskurve  $\Delta_i = f_i(\sigma_i)$  nach Abb. 3 in Betracht fällt, wobei innerhalb dieses Druckbereiches mit einem konstanten Plastizitätsmodul  $M_E$ , bzw. der angennaherten Proportionalität zwischen spez. Setzung und Spannung gerechnet werden darf. Auf Grund der oben erwähnten Setzungskurve lässt sich der massgebende Plastizitätsmodul  $M_E$  an Hand der spezifischen Setzung eines Körperelementes  $dz_a$  wie folgt definieren:

$$\frac{\Delta dz_a}{dz_a} = \frac{\Delta \sigma}{M_E}; \quad M_E = \Delta \sigma \frac{dz_a}{\Delta dz_a}$$

Anderseits gilt nach früherem:

$$\Delta \sigma = \sigma_b - \sigma_a \quad \text{und} \quad \frac{dz_a}{\Delta dz_a} = \frac{1 - \Delta_a}{\Delta_b - \Delta_a} \quad (\text{siehe Abschnitt 2})$$

Setzt man diese Werte in obiger Gleichung für  $M_E$  ein, so erhält man

$$M_E = \frac{(\sigma_b - \sigma_a)(1 - \Delta_a)}{\Delta_b - \Delta_a} \quad \dots \quad (11)$$

Für konstante Werte von  $M_E$  lässt sich die Berechnung einer Zusammendrückung in analoger Weise ausführen wie die elastische Verkürzung eines Stabes vom Elastizitätsmodul  $E$ . Die beim Absenken des Grundwasserspiegels entstehende Mehrbelastung, die durch die relative Absenkung  $h_b$  bedingt ist, wurde bereits bei der graphischen Analyse erläutert und ist in Abb. 10 nochmals dargestellt. Demnach kann die totale Setzung  $\delta_T$  auf Grund der in Abb. 10 schraffierten Belastungsfläche in folgender Weise berechnet werden:

$$\begin{aligned} \delta_T &= \frac{\gamma_w h_b}{M_E} \left( d_a - h_b + \frac{1}{2} h_b \right) \\ &= \frac{\gamma_w h_b}{M_E} \left( d_a - \frac{h_b}{2} \right); \quad h_b = h_a - \delta_T \\ \frac{\delta_T M_E}{\gamma_w} &= (h_a - \delta_T) d_a - \frac{(h_a - \delta_T)^2}{2} \\ &= h_a d_a - \delta_T d_a - \frac{h_a^2}{2} + h_a \delta_T - \frac{\delta_T^2}{2} \\ \delta_T^2 + 2 \delta_T \left\{ \frac{M_E}{\gamma_w} + \overbrace{\left( d_a - h_a \right)}^{d_b + h_a/2} \right\} - 2 h_a \left( d_a - \frac{h_a}{2} \right) &= 0 \\ \delta_T &= -\frac{p}{2} (-) \sqrt{\left( \frac{p}{2} \right)^2 - q} \\ \frac{p}{2} &= \frac{M_E}{\gamma_w} + d_b \\ q &= -2 h_a \left( d_b + \frac{h_a}{2} \right) = -h_a (2 d_b + h_a) \end{aligned} \quad (12)$$

Ist  $\delta_T$  gegenüber  $h_a$  sehr klein, so darf  $\frac{\delta_T^2}{2}$  in Gleichung (12) vernachlässigt werden. Dann erhält man die Näherungsformel:

$$\delta_T \sim \frac{d_a - \frac{h_a}{2}}{d_b + \frac{M_E}{\gamma_w} h_a} h_a = \frac{d_b + \frac{h_a}{2}}{d_b + \frac{M_E}{\gamma_w} h_a} h_a \quad (13)$$

**Zahlenbeispiel.** Für das folgende Berechnungsbeispiel sollen wieder die gleichen Verhältnisse wie beim graphischen (3a) gelten (s. Seite 269). Dementsprechend betragen:

$$h_0 = 0,50 \text{ m}, \quad h_a = 1,00 \text{ m}, \quad d_b = 3,50 \text{ m}$$

Die Berechnung des Moduls  $M_E$  erfolgt nach Gleichung (11)

Aus der Tabelle 1 des graphischen Berechnungsbeispiels (s. Seite 269) ist ersichtlich, dass der hier massgebende Spannungsbereich zwischen  $\sigma_a = 0,05095 \text{ kg/cm}^2$  und  $\sigma_b = 0,10885 \text{ kg/cm}^2$  liegt. Die Abhängigkeit der prozentualen Zusammendrückungen  $\Delta_i$  von der Spannung  $\sigma_i$ :  $\Delta_i = f_1(\sigma_i)$  nach Abb. 3 zeigt, dass innerhalb dieses Bereiches  $f_1$  durch eine Gerade ersetzt werden darf. Zur obigen Spannung  $\sigma_a$  ist der Wert  $f_1 = -111,3 \%$  zugehörig, entsprechend zur Spannung  $\sigma_b$ :  $\Delta_b = -95,8 \%$ . Der Modul  $M_E$  wird nach Gl. (11)

$$\underline{M_E = \frac{(0,10885 - 0,05095)(1 + 1,113)}{1,113 - 0,958} = 0,788 \text{ kg/cm}^2 = 7880 \text{ kg/m}^2}$$

Mit Hilfe dieses Moduls berechnet sich die Setzung  $\delta_T$  wie folgt:

$$\frac{p}{2} = \frac{M_E}{\gamma_w} + d_b = \frac{7880}{1000} + 3,5 = 11,38 \text{ m}$$

$$q = -h_a [2 d_b + h_a] = -1,0 [2 \cdot 3,50 + 1,0] = -8,0 \text{ m}^2$$

$$\delta_T = -\frac{p}{2} (-) \sqrt{\left( \frac{p}{2} \right)^2 - q} = -11,38 + \sqrt{11,38^2 + 8,0} = -11,38 + 11,726 \text{ m}$$

$$\underline{\delta_T = 0,346 \text{ m} = 34,6 \text{ cm}}$$

Die Näherungsformel (13) ergibt mit den gleichen Werten:

$$\delta_T \sim \frac{d_b + \frac{h_a}{2}}{d_b + \frac{M_E}{\gamma_w} h_a} h_a = \frac{3,50 + \frac{1,0}{2}}{3,50 + \frac{7880}{1000}} \cdot 1,0 = 0,352 \text{ m} = 35,2 \text{ cm}$$

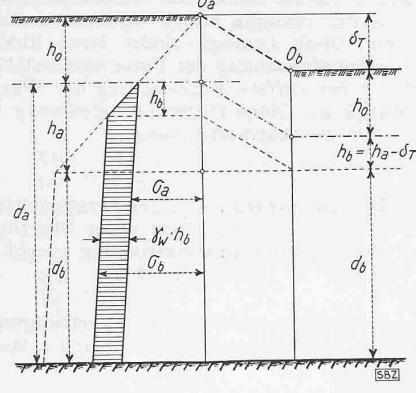


Abb. 10. Spannungsverlauf bei stark zusammendrückb. Material (für rechner. Setzungsanalyse)

Die rechnerisch gefundenen Ergebnisse zeigen sowohl bei der genauen, wie auch bei der Näherungsformel eine gute Übereinstimmung mit den Resultaten der graphischen Analyse ( $\delta_T = 35,5 \text{ cm}$ ).

#### b) Berechnung der Setzungen bei Grundwassersenkungen in spezifisch schwerem, wenig zusammendrückbarem Material

In Fällen, bei denen der Grundwasserspiegel in wenig zusammendrückbarem Material abgesenkt wird und die Absenkung im Verhältnis zur Schichtmächtigkeit klein ist, bewirkt das teilweise Wiedereintauchen der entwässerten Schicht eine vernachlässigbare Veränderung des Auftriebes. Die Eigensetzung der Schichtzone, innerhalb derer die Spiegelabsenkung stattfindet, kann dadurch näherungsweise berücksichtigt werden, indem man statt der linear mit der Tiefe zunehmenden Mehrlast eine entsprechende Zusatzlast berücksichtigt, die in halber Schichthöhe angreift. Eine Mehrbelastung infolge des Auftriebsverlustes der entwässerten Schicht kann unter diesen Voraussetzungen als gleichmäßige Belastung einer unendlich ausgedehnten Ebene aufgefasst werden, die in halber Höhe der abgesenkten Lamelle liegt.

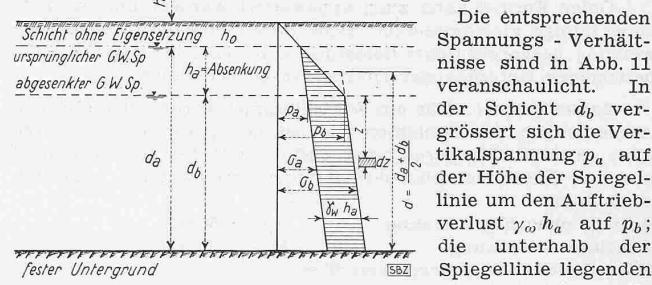


Abb. 11. Spannungsverlauf bei schwach zusammendrückbarem Material (für rechnerische Setzungsanalyse)

Die entsprechenden Spannungs - Verhältnisse sind in Abb. 11 veranschaulicht. In der Schicht  $d_b$  vergrößert sich die Vertikalspannung  $p_a$  auf der Höhe der Spiegellinie um den Auftriebverlust  $\gamma_w h_a$  auf  $p_b$ ; die unterhalb der Spiegellinie liegenden Punkte erfahren alle die gleiche Mehrbelastung. Wie oben erwähnt, denken wir uns diese Mehrbelastung  $\gamma_w h_a$  in der Höhe  $d$  über der festen Schicht wirksam. Ein beliebiger Punkt in der Tiefe  $z$ , dessen Spannung vor der Absenkung

$$s_a = p_a + \gamma_e'' z \quad \dots \quad (14)$$

betrug, erleidet demnach durch die Absenkung eine Spannungs-Erhöhung auf

$$s_b = p_b + \gamma_e'' z = p_a + \gamma_e'' z + \gamma_w h_a \quad \dots \quad (15)$$

Nun wurde schon andernorts gezeigt, dass die Beziehung der prozentualen Zusammendrückungen  $\Delta_i$  mit der Vertikalbelastung  $\sigma_i$  angenähert durch ein empirisches, logarithmisches Gesetz dargestellt werden kann [3], was praktisch identisch ist mit der Annahme, dass der Plastizitätsmodul  $M_E$  des Materials, der sich mit dem Elastizitätsmodul  $E$  der elastischen Körper vergleichen lässt, proportional mit dem Verdichtungsdruck zunimmt.

$$\Delta_i = \Delta_e \ln \frac{\sigma_i}{\sigma_1} \quad \dots \quad (16)$$

(s. Abschnitt 2, Formel (5))  $M_E = \frac{\sigma_i}{\Delta_e}$  [3] worin bedeuten:

$\Delta_i$  = prozentuale Zusammendrückung bei der Lasterhöhung von  $\sigma_i = 1 \text{ kg/cm}^2$  auf  $\sigma_i \text{ kg/cm}^2$ , bezogen auf die Höhe der Probe bei  $\sigma_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$ ,

$\Delta_e$  = Zusammendrückungszahl (Konstante) = prozentuale Zusammendrückung bei der Erhöhung der Vertikalspannung von  $\sigma_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$  auf  $\sigma_i = e = 2,718 \text{ kg/cm}^2$

Damit wird die Verkürzung  $\Delta dz$  eines Bodenelementes  $dz$  bei der Lasterhöhung von  $p_a + \gamma_e'' z$  auf  $p_b + \gamma_e'' z$ :

$$\Delta dz = \Delta_e [\ln(p_b + \gamma_e'' z) - \ln(p_a + \gamma_e'' z)] dz$$

Die Höhe des Bodenelementes  $dz_1$  (bei  $\sigma_1 = 1 \text{ kg/cm}^2$ ) kann bei schwach zusammendrückbaren Materialien durch  $dz$  ersetzt werden.

Die totale Setzung  $\delta_T$  der Schicht  $d$  wird dann:

$$\delta_T = \int_0^d \Delta dz = \Delta_e \int_0^d [\ln(p_b + \gamma_e'' z) - \ln(p_a + \gamma_e'' z)] dz; \quad d = \frac{d_a + d_b}{2}$$

$$\delta_T = \Delta_e \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\gamma_e''} (p_b + \gamma_e'' z) \{ \ln(p_b + \gamma_e'' z) - 1 \} \\ - \frac{1}{\gamma_e''} (p_a + \gamma_e'' z) \{ \ln(p_a + \gamma_e'' z) - 1 \} \end{array} \right\}_0^d$$

$$\begin{aligned}
 &= \Delta_e \left\{ -\frac{p_b}{\gamma_e''} \left\{ \ln(p_b + \gamma_e'' z) - 1 \right\} + z \left\{ \ln(p_b + \gamma_e'' z) - 1 \right\} \right\}^d \\
 &= \Delta_e \left\{ -\frac{p_a}{\gamma_e''} \left\{ \ln(p_a + \gamma_e'' z) - 1 \right\} - z \left\{ \ln(p_a + \gamma_e'' z) - 1 \right\} \right\}^0 \\
 &= \Delta_e \left\{ -\frac{p_b}{\gamma_e''} \ln \left( 1 + \frac{\gamma_e'' d}{p_b} \right) + d \left\{ \ln(p_b + \gamma_e'' d) - 1 \right\} \right\} \\
 &\quad - \frac{p_a}{\gamma_e''} \ln \left( 1 + \frac{\gamma_e'' d}{p_a} \right) - d \left\{ \ln(p_a + \gamma_e'' d) - 1 \right\} \\
 \delta T = \Delta_e &\left\{ \frac{p_b}{\gamma_e''} \ln \left( 1 + \frac{\gamma_e'' d}{p_b} \right) - \frac{p_a}{\gamma_e''} \ln \left( 1 + \frac{\gamma_e'' d}{p_a} \right) + \right. \\
 &\quad \left. + d \cdot \ln \frac{p_b + \gamma_e'' d}{p_a + \gamma_e'' d} \right\} \quad d = \frac{d_a + d_b}{2} \quad \dots \quad (17)
 \end{aligned}$$

Bei einer Absenkung in Oberflächennähe wird  $p_a$  sehr klein sein. In diesem Fall darf diese Spannungsgrösse  $p_a$  vernachlässigt werden und die Totalsetzung berechnet sich dann angehert zu:

$$\delta T = \Delta_e \left\{ \frac{p_b}{\gamma_e''} \ln \left( 1 + \frac{\gamma_e'' d}{p_b} \right) + d \cdot \ln \left( 1 + \frac{p_b}{\gamma_e'' d} \right) \right\} \quad (18)$$

Obige Formel kann auch angewendet werden, um die Setzung infolge gleichmässiger, nicht durch eine Grundwasserabsenkung hervorgerufener Belastung einer ebenen Oberfläche bei homogenen Untergrundsverhältnissen zu berechnen.

**Zahlenbeispiel:** Für ein Zahlenbeispiel werden die gleichen Abmessungen der Schichten wie bei der graphischen Analyse (3a) gewählt. Hingegen wird dafür ein Boden mit bedeutend kleinerer Zusammendrückbarkeit vorausgesetzt nach folgenden Annahmen:

Schicht ohne Eigensetzung . . . . .	$h_0 = 0,50 \text{ m}$
Absolute Absenkung . . . . .	$h_a = 1,00 \text{ m}$
Höhe des Grundwasserspiegels über fester Unterlage . . . . .	$d_a = 4,50 \text{ m}$
Abstand des abgesunkenen Spiegels von der festen Unterlage . . . . .	$d_b = 3,50 \text{ m}$
Raumgewicht des gesättigten Erdmaterials . . . . .	$\gamma_e' = 2,0 \text{ t/m}^3$
Raumgewicht des Materials unter Wasser . . . . .	$\gamma_e'' = \gamma_e' - \gamma_w = 1,0 \text{ t/m}^3$
Zusammendrückungszahl . . . . .	$\Delta_e = 3 \%$

Setzt man voraus, dass auch über den Grundwasserspiegeln gesättigtes Bodenmaterial vorliege, so ergeben sich aus Abb. 11 die Spannungen  $p_a$  und  $p_b$  wie folgt:

$$\begin{aligned}
 p_a = h_0 \gamma_e' + h_a \gamma_e'' &= 0,5 \cdot 2,0 + 1,0 \cdot 1,0 \\
 &= 2,0 \text{ t/m}^2 = 0,2 \text{ kg/cm}^2 \\
 p_b = (h_0 + h_a) \gamma_e' &= (0,5 + 1,0) \cdot 2,0 \\
 &= 3,0 \text{ t/m}^2 = 0,3 \text{ kg/cm}^2 \\
 d = \frac{d_a + d_b}{2} &= \frac{4,50 + 3,50}{2} = 4,0 \text{ m}
 \end{aligned}$$

und die Setzung  $\delta T$  wird nach Formel (17):

$$\begin{aligned}
 \delta T &= 0,03 \left\{ \frac{3,0}{1,0} \ln \left[ 1 + \frac{1,0 \cdot 4,0}{3,0} \right] - \frac{2,0}{1,0} \ln \left[ 1 + \frac{1,0 \cdot 4,0}{2,0} \right] \right. \\
 &\quad \left. + 4,0 \ln \frac{3,0 + 1,0 \cdot 4,0}{2,0 + 1,0 \cdot 4,0} \right\} \\
 &= 0,03 (3 \ln 2,33 - 2 \ln 3,0 + 4 \ln 1,17) = 0,029 \text{ m} \\
 \underline{\delta T = 2,9 \text{ cm} \sim 3,0 \text{ cm}}
 \end{aligned}$$

## 5. Zeitlicher Verlauf der Setzungen

Die Theorie der Porenwasserströmung von Terzaghi [6] liefert Anhaltspunkte über den zeitlichen Verlauf der Setzung, wenn die Durchlässigkeitsziffer  $k$ , sowie die Abhängigkeit der Porenziffer vom Druck des Materials bekannt sind. Der Setzungsvorgang ist durch das Abströmen des Porenwassers bedingt, welches bei der Belastung einer wassergesättigten Schicht einen vermehrten Druck in der Form hydrodynamischer Spannungen erfährt. Dieser passt sich im Laufe der Zeit den hydrostatischen Druckverhältnissen des Bodens an, indem er sich auf Kosten des sogenannten «Korn- zu Korndruckes» entlastet, bis schliesslich im Endzustand die gesamte Mehrlast von der festen Phase getragen wird. Der zeitliche Verlauf der Porenwasserentspannung erfolgt nach den analogen Gesetzen wie die Abkühlung einer Platte, die gegenüber der Umgebung eine gegebene anfängliche Temperaturdifferenz besitzt. Der nach aussen abfließenden Porenwassermenge beim Setzungsvorgang entspricht die nach aussen abströmende Wärmemenge bei der Abkühlung. An die Stelle der Porenwasserspannung im ersten Fall tritt die Temperatur im zweiten Fall. Das Wärmeleitungsvermögen spielt einerseits eine analoge Rolle wie die Durchlässigkeitsziffer, während anderseits die Temperaturleitfähigkeit ihr Korrelat im so genannten Verfestigungsbeiwert  $c$  findet, der auch in denselben Einheiten ausgedrückt wird  $\text{cm}^2/\text{sec}$ . Zwischen den beiden Vor-

gängen besteht somit eine vollkommene Analogie, die von ihrem Entdecker Terzaghi als *thermodynamisches Gleichnis* bezeichnet wurde. Diese Analogie findet ihren Ausdruck darin, dass die Differentialgleichung der Porenwasserströmung formal identisch ist mit der Differentialgleichung der Wärmeströmung (Wärme-Uebergang). Obige Differentialgleichung lautet:

Für die Wärmeströmung:

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{\partial T}{\partial t} \quad \dots \quad (19)$$

$T$  = Temperatur,  $a$  = Temperaturleitfähigkeit,  $t$  = Zeit,  $z$  = Tiefe unter Oberfläche

Für die Porenwasserströmung (vergl. [6]):

$$c \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} = \frac{\partial w}{\partial t} \quad \dots \quad (20)$$

$w$  = Porenwasserdruck,  $c$  = Verfestigungsbeiwert.

Die entsprechenden Werte  $a$  und  $c$  lassen sich wie folgt definieren:

Wärmeströmung (Wärmeleitung)

$$a = \frac{\lambda}{c' \gamma_F} = \text{Temperaturleitfähigkeit} \quad \dots \quad [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

$$\lambda = \text{Wärmeleitungsvermögen} \quad \dots \quad \left[ \frac{\text{cal}}{\text{cm.sec.Grad}} \right]$$

$$c' = \text{spez. Wärme der Gewichtseinheit} \quad \dots \quad \left[ \frac{\text{cal}}{\text{gr.Grad}} \right]$$

$$\gamma_F = \text{Raumgewicht des Materials} \quad \dots \quad [\text{gr/cm}^3]$$

Porenwasserströmung

$$c = \frac{k}{v \gamma_w} = \text{Verfestigungsbeiwert} \quad \dots \quad [\text{cm}^2/\text{sec}]$$

$$k = \text{Durchlässigkeitsziffer} \quad \dots \quad \left[ \frac{\text{cm}}{\text{sec}} \right]$$

$$v = \text{spez. Porenwasserverlust} \quad \dots \quad \left[ \frac{\text{cm}^2}{\text{gr}} \right]$$

$$\gamma_w = \text{Raumgewicht des Wassers} \quad \dots \quad [\text{gr/cm}^3]$$

Der spezifische Porenwasserverlust  $v$  ist dabei identisch mit der Höhe der Wassersäule, die bei einer Spannungserhöhung 1 aus einem Bodenprisma von der Höhe 1 ausgepresst wird.

Die obige Differentialgleichung der Porenwasserströmung beruht auf der Voraussetzung, dass  $k$  konstant und die Belastungsänderung klein sei. Obschon die Konstanz von  $k$  bei Setzungsvorgängen im Torf keineswegs erfüllt ist, erlaubt die erwähnte Theorie — unter Berücksichtigung von massgebenden Mittelwerten der Durchlässigkeitsziffer — dennoch die Grössenordnung der Zeitperiode abzuschätzen, innerhalb der sich die Hauptsetzung vollzieht.

Nach Abb. 11 denke man sich eine gewichtslose und wassergesättigte Schicht von der Mächtigkeit  $d_a$  unter einer gleichmässig verteilten Auflast  $\sigma_a$  konsolidiert. Die Belastung werde nun plötzlich von  $\sigma_a$  auf den Wert  $\sigma_b$  erhöht, wodurch eine Setzung mit entsprechender Porenwasserströmung eingeleitet wird. Da die Unterlage zunächst als wasserundurchlässig angenommen werden soll, kann das Porenwasser nur nach oben ausströmen.

Theoretisch benötigt das allmäliche Ausklingen der Strömungsvorgänge bzw. der Setzungen eine unendlich lange Zeit. Praktisch, d. h. zu rd. 96 %, ist jedoch die Hauptsetzung nach einer gewissen Zeit  $t$  beendet, die sich nach Terzaghi-Fröhlich wie folgt berechnen lässt:

$$t = \frac{d_a^2}{c} = \frac{d_a^2}{k} v \gamma_w \quad \dots \quad (21)$$

Für den spez. Porenwasserverlust  $v$  erhält man anderseits folgenden Ausdruck:

$$v = \frac{\epsilon_a - \epsilon_b}{\sigma_b - \sigma_a} \frac{1}{1 + \epsilon} \quad \dots \quad (22)$$

worin bedeuten:

$$\epsilon = \text{mittlere Porenziffer während der Setzung} = \frac{n}{1-n}$$

$$\epsilon_a = \text{Porenziffer vor der Setzung (Laststufe } \sigma_a \text{)}$$

$$\epsilon_b = \text{Porenziffer nach der Setzung (Laststufe } \sigma_b \text{)}$$

$$n = \text{mittlere Porosität während der Setzung}$$

Demnach berechnet sich der Verfestigungsbeiwert wie folgt:

$$c = \frac{k}{v \gamma_w} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{(\sigma_b - \sigma_a)(1 + \epsilon)}{\epsilon_a - \epsilon_b} \quad \dots \quad (23)$$

Durch Einsetzen von Gleichung (23) in Gleichung (21) erhält man schliesslich:

$$t = \frac{d_a^2 \gamma_w}{k} \frac{\epsilon_a - \epsilon_b}{(\sigma_b - \sigma_a)(1 + \epsilon)} \quad \dots \quad (24)$$

Die Grössen  $k$ ,  $\epsilon$ ,  $\epsilon_a$  und  $\epsilon_b$  sind auf Grund von Laboratoriums-Versuchen an ungestörten Proben zu ermitteln. Die über die Schichthöhe  $d = \frac{d_a + d_b}{2}$  (Abb. 11) konstante Spannungsdiffe-

renz bei der Druckänderung ergibt sich im Falle der Grundwasserabsenkung zu

$$\sigma_b - \sigma_a = \gamma_w h_b = \gamma_w (h_a - \delta T) \quad (\text{Abb. 10})$$

Für wenig oder mässig zusammendrückbare Materialien wie Sande, Lehme und Tone, kann bei Kenntnis des Plastizitätsmoduls  $M_E$  zur Bestimmung der Setzungszeit die nachfolgend abgeleitete Näherungsformel (30) verwendet werden.

Wie schon erwähnt, lautet die Definitionsformel für den Verfestigungsbeiwert  $c$ :

$$c = \frac{k}{v \gamma_w} \quad \dots \quad (25)$$

Anderseits nimmt der spezifische Porenwasserverlust  $v$  nach der bereits angegebenen Definition die mathematische Form an:

$$v = \frac{d h_i}{h_i - d \sigma_i} \sim \frac{d (\Delta_i)}{d \sigma_i} = \frac{d (\Delta_e \ln \frac{\sigma_i}{\sigma_1})}{d \sigma_i} = \frac{\Delta_e}{\sigma_i} \quad (26)$$

(Vgl. auch Abschnitt 2, Berechnungsgrundlagen.)

Nach früher abgeleiteten Beziehungen [3] gilt:

$$\frac{\Delta_e}{\sigma_i} = \frac{1}{M_E} \quad \dots \quad (27)$$

(Vgl. Gl. (16))

Damit wird der spezifische Porenwasserverlust  $v$  (Gl. (26)):

$$v \sim \frac{1}{M_E} \quad \dots \quad (28)$$

Führt man diesen Wert in Gl. (23) ein, so erhält man:

$$c = \frac{k}{v \gamma_w} \sim \frac{k M_E}{\gamma_w} \quad \dots \quad (29)$$

womit sich in Verbindung mit Gl. (21) ergibt:

$$t = \frac{d_a^2}{c} \sim \frac{d_a^2 \gamma_w}{k M_E} \quad \dots \quad (30)$$

Die grosse Zusammendrückbarkeit des Torfes schliesst die Anwendung der Formel (30) für die Bestimmung der Setzungszeit  $t$  bei letzterem Material aus. Dagegen liefert diese Gleichung für Tone und Lehme brauchbare Näherungswerte.

In analoger Weise wie die Zeit  $t$ , die für die Entspannung des Porenwassers bis auf wenige Prozente erforderlich ist, lässt sich auch die Zeit  $t'$  berechnen, die zur Abkühlung einer entsprechenden Schicht (z. B. Betonplatte) von konstanter Anfangstemperatur benötigt wird. Dabei ist in Gl. (30) anstelle des Verfestigungsbeiwertes  $c$  die Temperaturleitfähigkeit  $a$  einzusetzen, die für Beton 0,0015 bis 0,003  $\text{m}^2/\text{h}$  beträgt.

$$t' = \frac{d_a^2}{a} \quad \dots \quad (30a)$$

Liegt die zusammendrückbare Schicht auf einer durchlässigen Unterlage, z. B. auf einer Kiessandbank, so kann das Wasser nach oben und unten ausströmen. In Formel (24) ist in diesem Falle an Stelle von  $d_a$   $\frac{d_a}{2}$  einzuführen, d. h. der Wert  $t$  reduziert sich gegenüber dem Fall mit undurchlässiger Unterlage auf den vierten Teil.

Aus der Differentialgleichung (20) ist ersichtlich, dass diese offenbar dem zeitlichen Setzungsverlauf nur dann genügt, wenn der Verfestigungsbeiwert  $c = \frac{k}{v \gamma_w}$  einen konstanten Wert bei-

behält. Diese Bedingung ist bei Torf infolge seiner grossen Zusammendrückbarkeit im allgemeinen nicht mehr erfüllt. Zur Veranschaulichung dieser Tatsache wurden in Abb. 12 die Durchlässigkeitsziffer  $k$  und der Verfestigungsbeiwert  $c$  in Funktion der Vertikalspannung  $\sigma_i$  (Verfestigungsdruck) aufgetragen. Die Kurven, die das Ergebnis von Versuchen mit einer von  $\sigma_i = 0,04 \text{ kg/cm}^2$  stufenweise bis auf  $\sigma_i = e = 2,718 \text{ kg/cm}^2$  vorbelasteten Torfproben darstellen, zeigen, dass bei grossen Laststeigerungen sowohl die Durchlässigkeit wie die Verfestigungsbeiwerte sehr stark variieren.

Für die relativ geringen Belastungsänderungen infolge Grundwasserabsenkung kann man sich jedoch meistens mit mittleren Durchlässigkeitsziffern bzw. Verfestigungsbeiwerten als Rechnungsgrundlage begnügen. Dies wird ersichtlich aus Abb. 12, in der die schraffierte Fläche ungefähr der im Zahlenbeispiel der Setzungsberechnung (Abschnitt 3a) für stark zusammendrückbare Materialien (Torf) massgebenden Druckänderung entspricht. Innerhalb dieses Druckbereiches bleibt zum mindesten die Größenordnung der Durchlässigkeitsziffer und des Verfestigungsbeiwertes unverändert. Deshalb bieten die, unter Voraussetzung eines konstanten  $c$ - bzw.  $k$ -Wertes abgeleiteten Gleichungen (21) und (24) eine genügend genaue Basis für die Ermittlung der Größenordnung der Setzungsdauer  $t$ . Zur Demonstration dieser einfachen Rechnung diene das nachfolgende Zahlenbeispiel, das dem am Schlusse von Abschnitt 3a (graphische Setzungsanalyse) behandelten Beispiel entspricht.

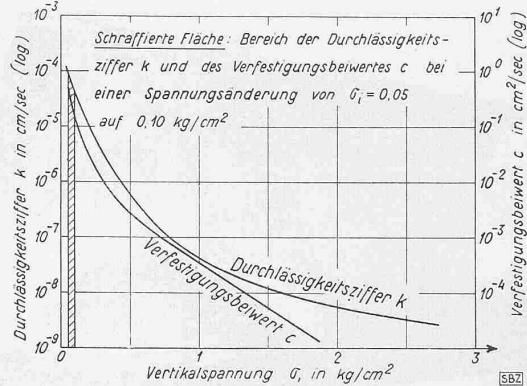


Abb. 12. Durchlässigkeitsziffer und Verfestigungsbeiwert in Funktion der Vertikalspannung bei Torf

**Zahlenbeispiel.** Bei der früher berechneten, totalen Setzung von 35,5 cm variiert der Verfestigungsdruck  $\sigma_i$  von  $\sigma_a \sim 0,05 \text{ kg/cm}^2 = 50 \text{ g/cm}^2$  auf  $\sigma_b \sim 0,05 + 0,0335 = 0,0835 \text{ kg/cm}^2 = 83,5 \text{ g/cm}^2$ .

Die Laboratoriumsversuche ergaben, dass diesen Spannungsstufen die in der folgenden Tabelle 3 angeführten Materialkennziffern entsprechen (vgl. Abb. 12):

Tabelle 3. Massgebende Kennziffern des Materials

Verfestigungsdruck	$k$ cm/sec	$\epsilon$	$k_{\text{mittel}}$ cm/sec	$\epsilon_{\text{mittel}}$	$\epsilon_a - \epsilon_b$
$\sigma_a = 50 \text{ g/cm}^2$	$11,4 \cdot 10^{-5}$	7,97	$10,43 \cdot 10^{-5}$	7,91	
$\sigma_b = 83,5 \text{ g/cm}^2$	$9,45 \cdot 10^{-5}$	7,85			0,12

Für eine mittlere Schichthöhe von  $4,00 \text{ m} = 400 \text{ cm}$  berechnet sich nach Formel (24) die angenäherte Setzungszeit (in g, cm und sec) wie folgt:

$$t = \frac{400^2 \cdot 1,0}{10,43 \cdot 10^{-5}} \cdot \frac{0,12}{(83,5 - 50) \cdot (1 + 7,91)} = 6,16 \cdot 10^5 \text{ sec} \sim 7 \text{ Tage}$$

Die Setzungen im Torf vollziehen sich in der Regel relativ rasch, weil dieser bei geringer Belastung meistens genügend wasserdurchlässig ist. Dagegen zeigen undurchlässige Lehme und Tone oft sehr grosse Setzungszeiten, die sich nach Gleichung (24) bzw. (30) nicht selten auf Jahre oder gar Jahrzehnte berechnen.

Ausserdem bezieht sich obige Rechnung nur auf die Hauptsetzung, unter Ausschluss der späteren Nachsetzung [3].

(Schluss folgt)

### Fryburger ländliche Kleinhäuser

Arch. ROB. R. BARRO und JOS. DIENER in Düdingen

Die Siedlung Rain in Düdingen, erstellt Nov. 1943 bis Febr. 1944

Die, wie in vielen Schweizer Gemeinden, auch in Düdingen herrschende Wohnungsnot war nicht nur akut, sondern scheinbar unmöglich zu beheben: während nämlich die Baukosten nicht wesentlich billiger sind als in der übrigen Schweiz, sind im ganzen Sensebezirk die Einkommen bedeutend tiefer. Da außerdem die Familien meistens kinderreich sind, lässt sich der Mietzins oft nur schwer zusammenbringen. Aber auch wo keine direkte Not besteht, wird eher an der Wohnung als anderswo gespart, und zwar bis zum Verzicht auf jegliche Bequemlichkeit. Diese Einstellung verunmöglicht faktisch die Herstellung von Mietobjekten, so dringend notwendig solche auch sein mögen, da der Bauplaner doch mit einem normalen Zinsertrag rechnen muss.

Unter diesen Umständen waren alle Bemühungen von privater und öffentlicher Seite zum Scheitern verurteilt und auch die Erklärung der Wohnungsnot, die der Gemeinderat in vor-sorglicher Weise vom Kanton erwirkte, und die die Ausrichtung kantonaler und Bundessubventionen ermöglichen sollte, erwies sich als machtlos, solange nicht dazu die Herstellungskosten der in Frage kommenden Wohnbauten weitgehend herabgesetzt werden konnten. Im Sensebezirk genügten aber diese Subventionen nicht, da sie dort nicht nur die jetzigen Baupreiserhöhungen, sondern auch die oben erwähnte Diskrepanz zwischen erforderlichem und einbringbarem Mietzins überbrücken sollten. So