

DIE BAUTECHNIK

16. Jahrgang

BERLIN, 29. Juli 1938

Heft 32

Alle Rechte vorbehalten.

Setzungen durch Grundwasserabsenkung.¹⁾

Von Prof. Dr.-Ing. F. Kögler und Dipl.-Ing. H. Leussink, Freiberg/Sa.

Vielfach zeigen sich Setzungen und Risse an Bauwerken bei Grundwasserabsenkung. In den Erörterungen darüber wird noch häufig die Meinung vertreten, daß das zu den Absenkungsbrunnen strömende Wasser die feinsten Körner des Erdstoffs mit sich risse und dadurch Hohlräume entstünden. Es läßt sich beweisen, daß dieser Vorgang — wenn überhaupt — nur auf einen Umkreis von wenigen Metern um den Brunnen herum wirkt. Jedenfalls kann er nicht die Ursache von Setzungen in der

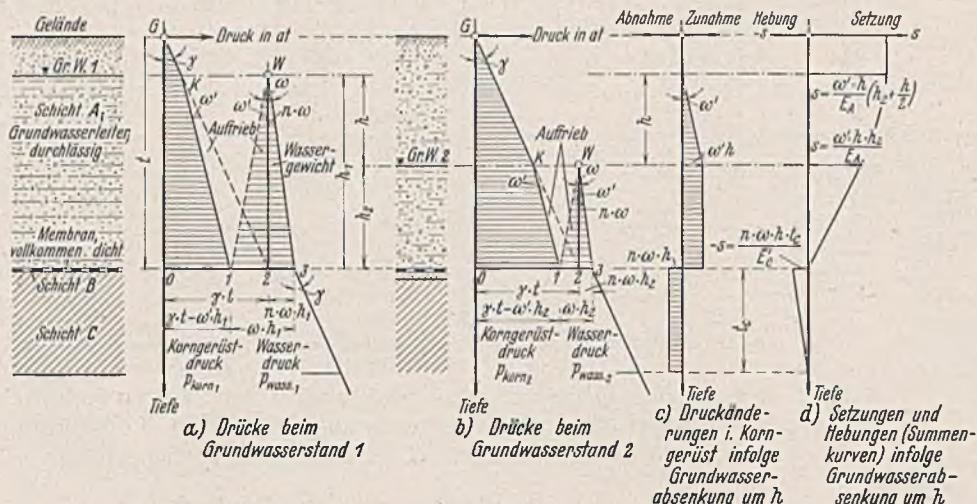


Abb. 1. Wirkung einer Grundwasserabsenkung in einer durchlässigen Schicht A über einer vollkommen undurchlässigen Schicht B (Membran).

E_A = Steifezahl der Schicht A bei Zusammendrückung.
 E_C' = Steifezahl der Schicht C beim Schwellen.

Größenordnung von Dezimetern und von Setzungen in beträchtlicher Entfernung von den Absenkungsanlagen sein. Auf ihn braucht daher nicht näher eingegangen zu werden.

Setzungen von Bauwerken treten allgemein immer dann ein, wenn weiche Schichten unter den Bauwerken belastet werden und sich zusammendrücken. Solche Belastung kann auch aus der Veränderung des Grundwasserstandes herrühren; diese bedeutet für die aus dem Wasser auftauchenden Teile immer den Wegfall des Auftriebes, also eine Gewichtszunahme. Außerdem können dabei noch Kräfte infolge von Strömungsvorgängen auftreten. Wir betrachten folgende Fälle:

A. Die wasserstauende Schicht B als undurchlässige Membran.

I. Freies Grundwasser über ihr.

a) Schichtung.

Schichtenfolge wie in Abb. 1 gezeichnet. Die durchlässige Schicht A besitzt in trockenem Zustande das Raumgewicht $\gamma = \gamma_k(1 - n)$, wobei γ_k = spez. Gewicht der Festmasse, n = Porenvolumen des Erdstoffs. Sie ist Grundwasserleiter, d. h. sie enthält das Grundwasser; dieses kann in ihren Poren fließen. Sämtliche Hohlräume sind mit Wasser (spez. Gewicht des Wassers $\omega = 1$) gefüllt.

Schicht A ruht auf der Schicht B. Diese ist der Grundwasseraustrauer; sie trägt das Grundwasser und begrenzt es nach unten. Damit ihre Wirkung für unsere Betrachtungen vollkommen klar wird, denke man sich zunächst die Schicht B als eine dünne, aber vollkommen undurchlässige Membran (etwa aus Gummi). Unter ihr liege eine Sandschicht C, die kein Wasser enthält. Wichtig ist bei dieser Annahme, daß die Membran B alle Lasten von oben, also Korngerüst- und Wasserdruck aufnimmt und auf die darunterliegende trockene Sandschicht C überträgt.

Daß die Schicht B in Wirklichkeit stets eine gewisse, wenn auch sehr geringe Durchlässigkeit besitzt, bleibt zunächst belanglos; darauf wird unter Abschnitt B noch eingegangen.

¹⁾ Dieser Gegenstand wird auch behandelt in einem Kapitel des binnengenau erscheinenden Werkes: Kögler-Scheidig, Baugrund und Bauwerk. Berlin 1938, Wilhelm Ernst & Sohn. Die Schriftleitung.

b) Drücke.

Das Grundwasser des Grundwasserleiters habe zunächst seinen Spiegel in der Lage Gr.-W. 1 (Abb. 1). Im Korngerüst der Schicht A herrschen dann die in Abb. 1a gezeichneten Drücke γt infolge des Eigengewichts: Linie $G-2$. Die im Grundwasser liegenden Teile erfahren aber einen Auftrieb von der Größe des verdrängten Wassers, also von $\omega' = \omega(1 - n)$. Die Wirkung des Auftriebes macht sich an dem Kurvenknick in Höhe des Grundwasserspiegels bemerkbar: Linie $K-1$. Im Liegenden der Schicht A herrscht ein Korngerüstdruck, der sich aus dem Gewicht der darüberliegenden Festmasse γt abzüglich des Auftriebes der unter Wasser liegenden Teile $\omega' h_1$ ergibt: $p_{korn,1} = \gamma t - \omega' h_1$ = Strecke 0—1. Im Wasser herrscht eine Belastung $p_{wass,1} = \omega h_1$ = Strecke 1—2—3.

Da nach Voraussetzung die Schicht A durchlässig ist, überträgt sich der Wasserdruck ausschließlich durch das Wasser nach unten; ebenso überträgt sich der Druck der Festmasse (des Korngerüstes) nur durch das Korngerüst. Diese Festlegung ist hier wichtig, da man gerade in diesem Punkte immer wieder auf unklare Vorstellungen stößt.

Da die Schicht B als wasserundurchlässig angenommen ist (zur Bekräftigung dessen in Abb. 1 als Membran dargestellt!), so setzt sich infolgedessen auch der Wasserdruck auf die Membranschicht ab. Die Schicht B bekommt also an ihrer Oberseite den vollen Korngerüstdruck und den vollen Wasserdruck der überlagernden Schicht, also: $p_{ges} = p_{korn,1} + p_{wass,1} = \gamma t - \omega(1 - n) h_1 + \omega h_1 = \gamma t + n \omega h_1$ = Strecke 0—1—2—3. Dieser Druck setzt sich nach der Tiefe hin fort.

c) Druckänderungen infolge der Grundwasserabsenkung.

Eine Grundwasserabsenkung um das Maß h (neuer Grundwasserspiegel Gr.-W. 2 in Abb. 1b) bewirkt, daß das Korngerüst der Schicht A im Bereich von h trockenfällt und seinen Auftrieb verliert, also schwerer wird und dementsprechend mehr auf das unter ihm liegende Korngerüst drückt. Die neue Druckverteilung ist in Abb. 1b gezeichnet. Im Liegenden von A herrscht jetzt der Druck im Korngerüst:

$$p_{korn,2} = \gamma t - \omega' h_2$$

Dies bedeutet gegen Gr.-W. 1 eine Zunahme um $\omega' h$. Der Wasserdruck im Liegenden von A ist jetzt $p_{wass,2} = \omega h_2$. Dies bedeutet eine Abnahme um ωh . Diese Abnahme gleicht aber innerhalb der Schicht A nicht etwa die Zunahme des Korngerüstdruckes aus: Das Korngerüst der Schicht A trägt die Belastungszunahme im Korngerüst für sich allein. Die Belastungsabnahme im Wasser dagegen ist nur in diesem spürbar und wirkt sich nicht auf das Korngerüst A aus.

Auf die Schicht B (Membran) dagegen haben beide Veränderungen Einfluß: das Korngerüst der Schicht A und das Wasser der Schicht A. In der Schicht B (Membran) vermindert sich also der Gesamtdruck um $\omega n h$, das ist das Gewicht des durch die Grundwasserabsenkung weggenommenen Wassers. Das Gleiche gilt für die Schicht C.

Die Druckänderungen in den Schichten A und C sind in Abb. 1c aufgezeichnet. Es ergibt sich für das Korngerüst der Schicht A eine Druckzunahme, für das Korngerüst von Schicht C eine Druckabnahme.

Diese leicht einzusehende Tatsache ist in der Literatur schon mehrfach, auch mit den sich daraus ergebenden Folgerungen, aufgeführt. Sie ist hier nur deshalb noch einmal ausführlich gebracht, weil man, wie bereits gesagt, auf diesem Gebiete immer wieder unrichtigen Auffassungen und Darlegungen begegnet und weil die Darlegung in Abb. 1 das Verständnis des Folgenden erleichtert.

d) Setzungen infolge der Grundwasserabsenkung.

Die in Abb. 1c gezeichneten Druckänderungen rufen, je nach den Steifeziffern der Erdstoffe, Zusammendrückungen bzw. Schwellungen hervor, deren Summenkurve die Abb. 1d zeigt. Es gilt dabei die Voraussetzung, daß der E -Wert (Steifezahl) für die gesamte Höhe der Schicht A

konstant ist, desgl. der Schwellwert der Schicht C . Die Oberfläche der Schicht A setzt sich infolge der Zusammendrückung von A um

$$s = \frac{\omega' h}{E_A} \left(h_2 + \frac{h}{2} \right) \text{ bzw. } s = \frac{\omega' h}{E_A} \left(h_1 - \frac{h}{2} \right).$$

Die Oberfläche von C hebt sich infolge des Schwellens um

$$-s = -\frac{n \omega' h t_C}{E_C};$$

die Bedeutung der Buchstaben geht aus Abb. 1 hervor. In vielen Fällen wird die Schicht C praktisch überhaupt nicht schwellfähig sein (Fels, fester Mergel, Kies, Sand); in allen Fällen ist der Schwellwert E_C so groß, daß dem Schwellen praktisch keine Bedeutung zukommt. Dagegen kann die Schicht A in hohem Maße zusammendrückbar sein, z. B. Moor od. dgl. In diesen Fällen wird man also mit beträchtlichen Setzungen bei Grundwasserabsenkung rechnen müssen. Über ihre Größe s. weiter unten.

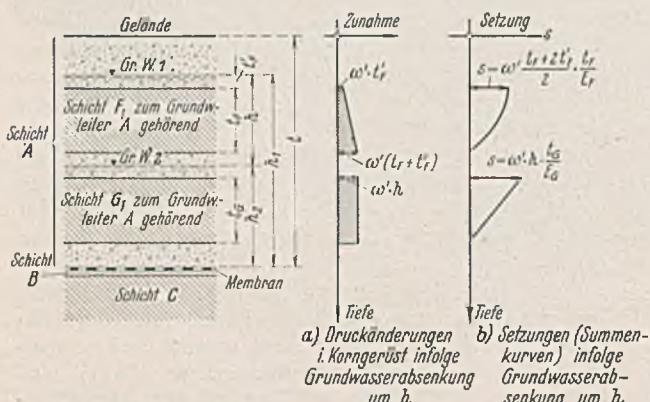


Abb. 2. Weiche Schichten F und G innerhalb der durchlässigen Schicht A ; Grundwasserabsenkung um h .

$$E_F = \text{Steifezahl der Schicht } F \text{ bei Zusammendruckung},$$

$$E_G = \text{Steifezahl der Schicht } G \text{ bei Zusammendruckung}$$

e) Einlagerungen in der Schicht A .

In Abb. 2 ist noch der Sonderfall behandelt, daß die Schicht A an sich zwar nicht zusammendrückbar ist, daß sie aber weiche Einlagerungen enthält.

Die Schichten F und G unterscheiden sich dadurch von der Schicht A , daß ihre Steifeziffern E bedeutend kleiner sind. Die Zusammendrückung der übrigen Schicht A kann den Teilschichten G und F gegenüber vernachlässigt werden. Wichtig ist aber, daß die Schichten F und G so durchlässig sind, daß etwaige Grundwasserdrukschwankungen sich durch sie hindurch auf das Wasser des unter ihr liegenden Teiles der Schicht A übertragen, oder daß die Schichten F und G örtlich begrenzte Linsen sind, so daß das Grundwasser in der Schicht A um sie herumfließen kann.

Die Schicht F taucht bei der Absenkung aus dem Grundwasser auf (s. Abb. 2). Das Diagramm des Zusatzdruckes ist in diesem Falle ein Trapez (Abb. 2a), die Summenkurve der Setzung ein Parabelstück (Abb. 2b).

Die Schicht G taucht nach der Grundwasserabsenkung noch nicht aus dem Wasser (s. Abb. 2). Der Zusatzdruck ihres Korngerüstes infolge der Absenkung wird dann durch ein rechteckiges Druckbild dargestellt, das in Abb. 2a aufgetragen ist. Die Summenkurve der Setzungen, in Abb. 2b gezeichnet, bildet ein Dreieck.

II. Gespanntes Grundwasser unter der Schicht B (Membran).

a) Schichtung.

In der Schicht C unter der (wieder als Membran gedachten) Schicht B steht gespanntes Grundwasser an, das in einem Bohrloch bis zur Höhe (Gr.-W. 1) gedrückt wird (Abb. 3). Die Schicht D sei undurchlässig.

b) Drücke.

Druck in Schicht A , durch Raumgewicht γ bedingt, ohne Wirkung des Auftriebes. Durch Schicht B macht sich der Wasserdruck hebend bemerkbar, und zwar auf die Schicht A von unten her in der Größe ωh_1 . Während der Druck im Korngerüst der Schicht A dicht über B die Größe γt hat (Strecke 0-2), ist er dicht unter B nur noch $\gamma t - \omega h_1$ (Strecke 0-1). Zu diesem Drucke kommt auf die Höhe t_C der Schicht C noch hinzu das Gewicht γ des Erdstoffes abzüglich des Auftriebes ω' ; an der Grenze zwischen C und D ist also der Druck im Korngerüst von C

$$p_{\text{korn}1} = \gamma t - \omega h_1 + \gamma t_C - \omega' t_C = \gamma T - \omega H_1 + n \omega t_C \text{ (Strecke 5-6).}$$

Die Schicht D , undurchlässig angenommen, trägt außer dem Korngerüstdruck von C auch noch die ganze Wasserlast ωH_1 ; deshalb erfährt die Schicht D einen Druck $\gamma T + n \omega t_C$, Strecke 5-6-7-8-9.

c) Druckänderungen infolge von Grundwasserabsenkung.

Eine Absenkung des Grundwassers um das Maß h [von (Gr.-W. 1) auf (Gr.-W. 2) in Abb. 3] hat zur Folge, daß der hebende Druck in der Schicht C geringer wird, daß das Korngerüst dieser Schicht also mehr belastet wird, und zwar um das Maß ωh auf die ganze Höhe dieser Schicht (s. das Bild der Druckänderung in Abb. 3c). Die Schicht D dagegen erfährt hier keine Entlastung, da wohl der Druck im Grundwasser, nicht aber das Gewicht der Wassermenge der Schicht C verändert wird. Die Schicht A wird ebenfalls nicht beeinflußt.

d) Senkungen infolge von Grundwasserabsenkung.

Es gilt das unter I Gesagte (vgl. Abb. 3d).

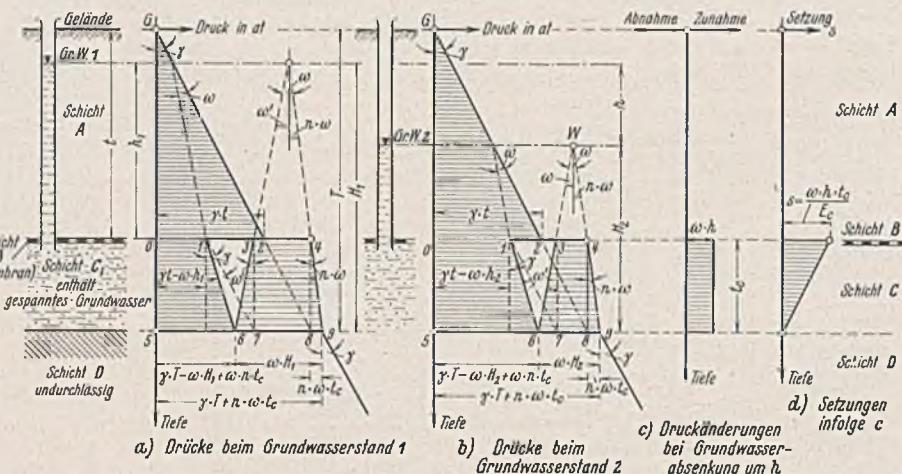


Abb. 3. Wirkung einer Grundwasserabsenkung in einer durchlässigen Schicht C , die gespanntes Wasser führt, unter einer undurchlässigen Schicht B (Membran).

$$E_C = \text{Steifezahl der Schicht } C \text{ bei Zusammendruckung.}$$

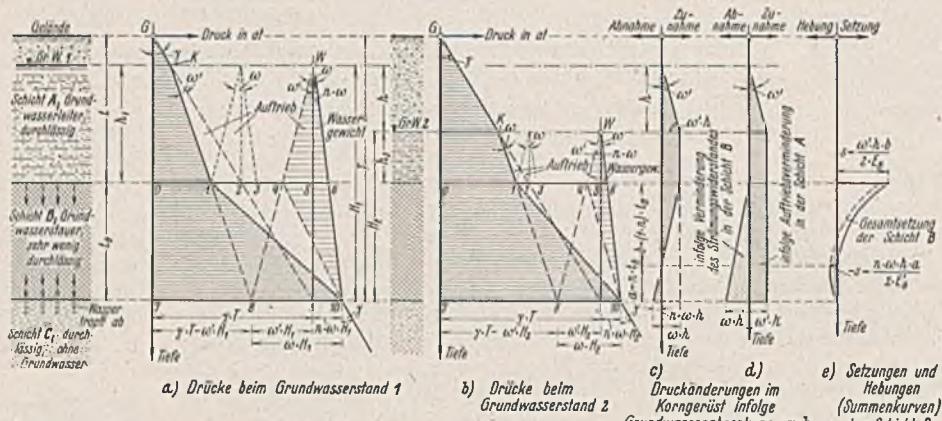


Abb. 4. Wirkung einer Grundwasserabsenkung in der Schicht A auf einen schwer durchlässigen Grundwasserstauer B .

$$E_B = \text{Steifezahl der Schicht } B \text{ bei Zusammendruckung},$$

$$E_B = \text{Steifezahl der Schicht } B \text{ beim Schwellen (Schwellwert).}$$

e) Sonderfall.

Geht die Grundwasserabsenkung bis in die Schicht C hinein, so erfährt auch die Schicht D eine Entlastung.

B. Die wasserstauende Schicht B als schwer durchlässige Schicht.

I. Freies Grundwasser über ihr.

a) Schichtung.

Im Abschnitt A war über die Schicht B die Voraussetzung gemacht, daß sie völlig undurchlässig sei (Membran). In Wirklichkeit sind die Grundwasserstauer meist Tonschichten und als solche zwar nur sehr wenig, aber immerhin etwas durchlässig. Auch wenn die Tonschicht ein Grundwasserbecken trägt, so besagt das noch nicht, daß sie undurchlässig ist. Es wird stets eine gewisse Menge aus dem oberen Grundwasser durch die Tonschicht hindurchziehen und unten abtropfen. Daß in der Praxis der obere Grundwasservorrat erhalten bleibt, liegt daran, daß der Nachschub von oben durch Regen usw. größer oder mindestens so groß ist wie der Verlust durch Abströmen nach unten. Jedenfalls findet ein Strömungsvorgang statt, wenn auch mit äußerst geringer Geschwindigkeit.

b) Drücke.

Wir wollen die Druckverhältnisse in einer solchen Schicht von der Dicke t_B erörtern (s. hierzu Abb. 4). Wir nehmen an, daß auch beim Ton (wie bei den anderen Erdstoffen) eine Wasserlast sich auf das Porenwasser des Tons abstützt, daß also an der Oberfläche der Tonschicht B genau dieselben Druckverhältnisse gelten wie an der Unterseite der Schicht A (s. Abb. 1): Auf dem Korngerüst ruht das Gewicht der überlagernden Festmasse der Schicht A abzüglich des Auftriebes dieser Festmasse:

$$p_{\text{korn}1} = \gamma t - \omega' h_1 = \text{Strecke } 0-1.$$

Das Porenwasser von der Oberfläche der Schicht B steht unter dem Drucke des darüberliegenden Wassers, nämlich:

$$p_{\text{wass},1} = \omega h_1 = \text{Strecke } 4-5-6.$$

Dieser Wasserdruck, auf den unter A nicht eingegangen ist, hat hier seine besondere Bedeutung. Er bewirkt und bestimmt die Strömung durch die Tonschicht. Wegen ihrer geringen Durchlässigkeit setzt die Tonschicht dieser Strömung einen so großen Widerstand entgegen, daß die gesamte Strömungsenergie durch Reibung an den Porenwänden des Tones aufgezehrt wird: Geschwindigkeit \approx Null.

Dieser Strömungswiderstand, den das Wasser findet, setzt sich als „Mitnahme“-Kraft auf das die Strömung behindernde Korngerüst des Tones ab, und zwar ist diese Kraft auf die Höhe t_B der Tonschicht verteilt und summiert.

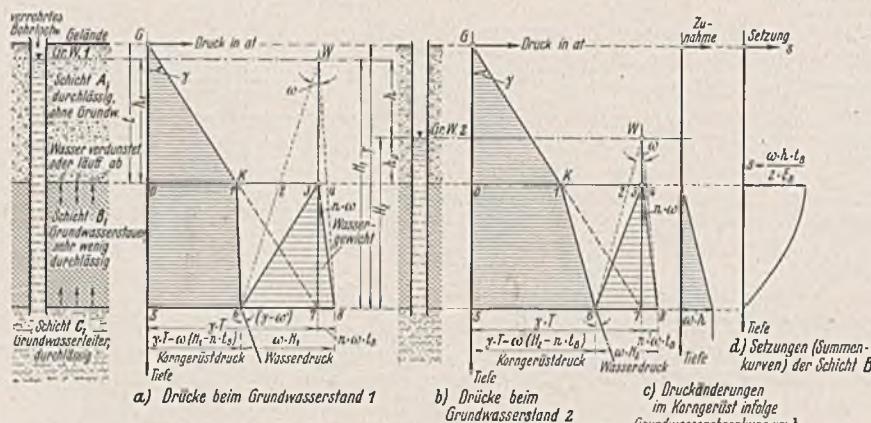


Abb. 5. Das Verhalten einer schwer durchlässigen Schicht B bei gespanntem Grundwasser in der darunter liegenden Schicht C ; Grundwasserabsenkung um h .

$$E_B = \text{Steifezahl der Schicht } B \text{ bei Zusammendrückung.}$$

Die Schicht B im Abschnitt A übernahm als Membran schon in ihrer Ebene den gesamten Korngerüst- und Wasserdruck der Schicht A (s. Abb. 1). Hier dagegen wird an der Oberfläche von B zunächst nur der Korngerüstdruck übernommen, der Wasserdruck aus A dagegen erst allmählich innerhalb der Schicht B auf deren Korngerüst abgestützt (s. Abb. 4).

Das, was die Schicht B im Abschnitt A infolge ihrer vollkommenen Undurchlässigkeit (Membran) gewissermaßen auf statischem Wege vollbrachte, nämlich die gleichzeitige Abstützung der über ihr lagernden Korngerüst- und Wassermassen der Schicht A , das erreicht die Tonschicht B jetzt (sehr schwer durchlässig) durch einen hydraulischen Vorgang auf dem durchströmten Wege.

An der Unterseite von B hat das austretende Wasser keinen Druck mehr; es hat ihn vollkommen an das Korngerüst abgegeben. Man darf annehmen, daß diese Abgabe gleichmäßig über die gesamte Mächtigkeit der Schicht B geschieht, daß also die Summenkurve des Strömungswiderstandes durch ein Dreieck dargestellt wird. Ein Modellversuch bestätigt diese Annahme.

So geht also von dem Wasserdruck-Trapez 4-5-6-8-9-10 ein Dreieck mit der Grundlinie 8-9-10 als Druck auf das Korngerüst der Schicht B über und fügt sich als Dreieck 1-8-9-10 dem schon vorhandenen Korngerüstdruck zu. An der Sohle der Schicht B ist selbstverständlich das gesamte Erdstoff- und Wassergewicht aufgenommen:

$$\gamma T + n \omega H_1 = \text{Strecke } 7-8-9-10.$$

Interessant ist hier noch das Ergebnis, daß das Porenwasser in der Schicht B verschiedenen Druck aufweist: an ihrer Oberfläche hat es den Druck ωh_1 = Strecke 4-5-6, an ihrer Unterfläche den Druck 0.

c) Druckänderungen infolge von Grundwasserabsenkung.

Welche Wirkung hat nun eine Grundwasserabsenkung um h auf die Schicht B ? (s. Abb. 4b).

1. Wie unter A dargelegt, wird das Korngerüst von A schwerer; es lastet mit größerem Druck auf dem Korngerüst von B . Die Druckzunahme ist genau so groß wie unter A: rechteckiges Druckverteilungsdiagramm mit der Abszisse $\omega' h$ (s. Abb. 4d).

2. Der an der Oberfläche der Schicht B herrschende Wasserdruck wird um ωh vermindert, ebenso also auch der aus diesem Wasserdruck herrührende Strömungsdruck auf das Korngerüst (Abb. 3d).

Die Wirkung nach 1 bedeutet eine Belastung des Korngerüstes, die Wirkung nach 2 eine Entlastung. Die Druckzunahme mit rechteckiger Verteilungskurve und die Druckabnahme mit dreieckiger Verteilungskurve überlagern sich also: Ergebnis in Abb. 4c. Der obere Teil der Schicht B von der Höhe $b = (1 - n) t_B$ erfährt eine Druckzunahme, der untere Teil von der Höhe $a = n t_B$ eine Druckabnahme = Entlastung.

d) Setzungen infolge von Grundwasserabsenkung.

Die Zusammendrückung der Schicht A ist unter A behandelt. Für die Schicht B , die oben eine Druckzunahme, unten eine Druckabnahme erfährt, gilt folgendes:

Da der E -Wert für Schwellen bedeutend größer ist (unter Umständen 10- oder 20-fache oder noch mehr) als der für Zusammendrückung, so wird im vorliegenden Falle die Hebung infolge von Entlastung praktisch bedeutungslos gegenüber der Setzung infolge von Belastung. Die Summenkurve der Setzung ist demgemäß in Abb. 4d gezeichnet.

II. Gespanntes Wasser unter der Schicht B .

a) Schichtung.

Wie vorstehend unter I. Wasserverhältnisse wie unter A II.

b) Drücke.

Im Gegensatz zum Fall II unter A findet jetzt ein Strömungsvorgang in der Tonschicht B von unten nach oben statt. Das auf die Oberfläche des Tones austretende Wasser habe die Möglichkeit, abzulaufen oder zu verdunsten. Der für die Strömung zur Verfügung stehende Wasserüberdruck beträgt ωH_1 an der Unterseite der Schicht B . Wie im Falle I darf man wieder annehmen, daß die Strömungsenergie innerhalb der Schicht B vollständig aufgezehrt wird, d. h. daß der Wasserdruck bis zur Oberfläche von B geradlinig bis auf Null abnimmt (Abb. 5a).

Der nach oben gerichtete Strömungsdruck des Wassers setzt sich auf die Porenwände der Tonschicht B ab, entlastet also deren Korngerüst. Allerdings steht nicht der volle Wasserdruck ωH_1 für die Überwindung des Strömungswiderstandes zur Verfügung, sondern es muß der Anteil $\omega n t_B$ abgezogen werden, der dem Gewichte des in der Schicht B befindlichen Wassers entspricht. Die Entlastung des Korngerüstes der Schicht B wird also dargestellt durch ein Dreieck mit der Spitze an der Oberfläche von B und der Basis $\omega (H_1 - n t_B)$ an der Unterseite von B (Abb. 5a, Strecke 6-7).

c) Druckänderungen infolge von Grundwasserabsenkung.

Eine Grundwasserabsenkung um das Maß h von Gr.-W. 1 auf Gr.-W. 2 hat hier folgende Wirkung:

Der Druck des gespannten Grundwassers in der Schicht C wird um ωh verringert. Der jetzt noch zur Verfügung stehende Strömungsdruck an der Unterseite von B ist um ωh kleiner als beim Gr.-W. 1. Damit wird auch die Entlastungswirkung der Strömung auf das Korngerüst von B um ωh geringer. Abb. 5c zeigt die Verteilung der Druckzunahme in der Schicht B .

d) Setzungen infolge von Grundwasserabsenkung.

Abb. 5d zeigt die Summenkurve der Setzungen.

e) Sonderfall.

Die Absenkung des Grundwassers gehe soweit, daß der neue Grundwasserspiegel unterhalb der Tonschicht B in der Schicht C liegt. In diesem Falle ist die gesamte Korngerüstentlastung der Tonschicht B durch die Mitnahmekraft weggefallen. Die Druckzunahme des Korngerüstes im Liegenden von B beträgt also

$$\omega (H_1 - t_B) + \omega' t_B.$$

Die daraus folgende Gesamtsetzung von B ist:

$$s = \frac{t_B}{2 E_B} [\omega (H_1 - t_B) + \omega' t_B].$$

III. Der Einfluß des Kapillar- und Haftwassers.

Soweit die vorstehenden Formeln den Einfluß des Wegfalls des Auftriebes ausdrücken, sind sie sämtlich mit dem Faktor $(1 - n)$ behaftet, bzw. mit dem Wasserteilgewicht $\omega' = \omega (1 - n)$. Dieser Faktor enthält die Annahme, daß der beim Absinken des Wassers entstehende Hohlraum sich mit Luft füllt. Dies wird jedoch nur bei grobkörnigen Erdstoffen (Sand, Kies) der Fall sein. Bei feinkörnigen Erdstoffen jedoch bleibt in den Poren Wasser in Form von Kapillar- oder Haftwasser zurück. Dieses Wasser hängt am Korngerüst und vergrößert damit den durch Wegfall des Auftriebes bereits vergrößerten Korngerüstdruck noch um $n \omega$.

Dadurch wird der Faktor $(1 - n)$ mindestens in allen den Formeln zu 1, die eine Absenkung des Grundwassers innerhalb der Tonschicht beschreiben. Soweit der obenliegende Sand sehr feinkörnig oder örtlich lehmig ist, können auch in ihm unter Umständen beträchtliche Mengen Haft- oder Kapillarwasser verbleiben.

C. Praktische Anwendungen.

I. Größe der Setzungen.

Das Maß der Zusammendrückung einer weichen Schicht hängt von der Steifeziffer E dieser Schicht ab. Dieser E -Wert kann für begrenzte Lastbereiche mit hinreichender Genauigkeit als eine Konstante angesehen werden; er wird im Laboratorium durch einen Zusammendrückungsversuch bei behinderter Seitendehnung ermittelt und entspricht der auch sonst im Materialprüfungswesen verwendeten Steifeziffer (Elastizitätsmodul in at). In Abb. 6 sind mittlere E -Werte für die am häufigsten vorkommenden Erdstoffe aufgezeichnet, wie sie sich aus vielen hundert Versuchen des Erdbaulaboratoriums Freiberg ergeben haben. Sehr kleine Steifeziffern besitzen Klei und Schlick ($E = 5$ bis 15 at) und Moor ($E = 1$ bis 5 at); es haben sich aber für Moor auch schon Steifeziffern unter 1 at ergeben. Diese besonders in Norddeutschland häufig vorkommenden Erdstoffe werden also sehr große Setzungen erleiden, wie das ja auch die Praxis immer wieder bestätigt.

Um einen Begriff von der Größenordnung der in Frage kommenden Setzungsbeträge zu geben, sind in der Tabelle I für Absenkungshöhen von 1, 3, 5 und 10 m und ebenso große Mächtigkeiten der weichen Schicht für den Fall I des Abschnitts A die Setzungen zusammengestellt. Da die Setzungsbeträge proportional mit der Schichtmächtigkeit der zusammendrückbaren Schicht und der Spiegelsenkung h sowie umgekehrt proportional mit der Steifeziffer E gehen, so können sie für andere Werte als die angegebenen geradlinig inter- oder extrapoliert werden.

Die Tabelle I zeigt, daß für die gebräuchlichen Absenkungstiefen bei weichen Schichten ($E = 20$ at) schon Zentimeter- bzw. Dezimeterbeträge an Setzungen zustandekommen. Besonders große Setzungen treten natürlich bei Schlick und Moor ein; hier gehen die Setzungen schon bei wenigen Metern Spiegelsenkung in die Größenordnung von Dezimetern.

Tabelle I. Größe der Setzungen s in cm bei Grundwasserabsenkung nach Fall I, Abschnitt A.

$$s = \frac{\omega' h}{E_A} \left(h_1 - \frac{h}{2} \right). \text{ Bezeichnungen s. Abb. 1. } n = 0,25, \omega' = 0,75 \text{ t/m}^3.$$

Mächtigkeit der Schicht	$h = 1 \text{ m}$			$h = 3 \text{ m}$			$h = 5 \text{ m}$			$h = 10 \text{ m}$		
	20	60	100	20	60	100	20	60	100	20	60	100
$h_1 = 1 \text{ m}$	0,19	0,06	0,04									
$h_1 = 3 \text{ m}$	0,94	0,31	0,19	1,69	0,56	0,34						
$h_1 = 5 \text{ m}$	1,69	0,62	0,38	3,94	1,31	0,79	4,69	1,56	0,94	—	—	—
$h_1 = 10 \text{ m}$	3,56	1,19	0,71	9,55	3,18	1,91	14,03	4,67	2,81	18,75	6,25	3,75

II. Waagerechte Erstreckung.

Über die Ausdehnung der Absenkung in waagerechter Richtung (Reichweite R) sind in der Literatur eine ganze Anzahl Unterlagen zu finden. Sie läßt sich z. B. nach Weber¹⁾ oder Sichardt²⁾ berechnen. In der Tabelle II sind für verschiedene Durchlässigkeitsziffern k und verschiedene Absenkungshöhen h die Reichweiten R nach Sichardt angegeben.

Tabelle II.

$$R = 300 h \sqrt{k} \text{ (empirische Formel). } h \text{ in m, } k \text{ in m/sec.}$$

Bodenart:	Kiessand	Flußsand	Felsand
k (cm/min):	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^1$	$1 \cdot 10^{-1}$
$h = 5 \text{ m:}$	$R = 1890 \text{ m}$	600 m	60 m
$h = 10 \text{ m:}$	$R = 3780 \text{ m}$	1200 m	120 m

¹⁾ Weber, Die Reichweite von Grundwasserabsenkungsanlagen mittels Rohrbrunnen. Berlin 1928, Springer.

²⁾ Kyrieleis-Sichardt, Grundwasserabsenkung bei Fundierungsarbeiten, 2. Aufl. Berlin 1930, Springer.

Über Messungen von Absenkungstrichtern berichtet u. a. Bohlmann³⁾. In Sandschichten (Durchlässigkeitsziffer $k \approx 3 \text{ cm/min}$) beobachtete er die in Abb. 7 dargestellte Absenkung. Die Reichweite betrug über 6 km, die Absenkung in 1000 m Entfernung von der Baugrube noch fast 8 m bei 20 m Höchstabsenkung. Keilhack⁴⁾ berichtet ebenfalls über einen Absenkungstrichter von vielen Kilometern Reichweite.

Wenn auch am Rande des Absenkungstrichters die Absenkung des Wasserspiegels sehr klein ist, so besteht doch unmittelbar um die Absenkungsanlage bzw. um die Baugrube herum ein Bereich von beträchtlicher Größe, innerhalb dessen eine wesentliche Absenkung stattfindet (s. Abb. 7).

Jedenfalls ist die Fläche immer so groß, daß man eine Druckausbreitung, die bei Bauwerken stets stattfindet und die Pressung ver-

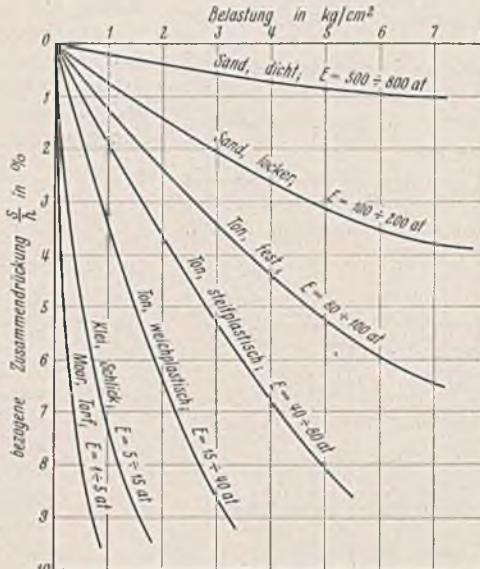


Abb. 6. Steifezahlen verschiedener Erdstoffe nach Versuchen des Erdbaulaboratoriums Freiberg (Sa.).

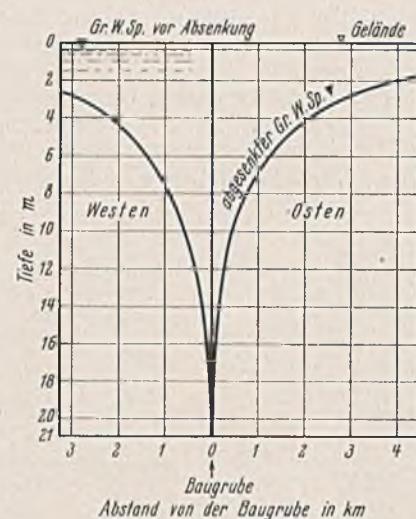


Abb. 7. Reichweite der Grundwasserabsenkung beim Schleusenbau in Brunsbüttelkoog.

mindert, hier nicht in Rechnung setzen darf. Das bedeutet, daß eine Grundwasserabsenkung unter Umständen viel ungünstiger wirken kann als eine Bauwerksbelastung.

III. Zeitlicher Verlauf der Setzungen.

Die in den Formeln angegebenen und in Tabelle I errechneten Setzungsbeträge sind Endsetzungen. Bekanntlich folgen bei weniger durchlässigen Erdstoffen die Setzungen der Belastung mit einer zeitlichen Verzögerung, die von der Durchlässigkeit des sich setzenden Erdstoffs abhängt. Diese Verzögerung kann auf Grund eines Zeit-Setzungs-Versuchs im Laboratorium oder mit Hilfe der Durchlässigkeitsziffer k nach v. Terzaghi-Fröhlich⁵⁾ rechnerisch erfaßt werden. Je nach der Größe der Durchlässigkeitsziffer kann es Wochen, Monate oder Jahre dauern, bis die Endsetzung erreicht ist. Dauert die Grundwasserabsenkung im Vergleich hierzu kürzere Zeit, so wird die Endsetzung nicht voll erreicht. Ganz allgemein ist aber wichtig, daß die Setzungsgeschwindigkeit in der ersten Belastungszeit wesentlich größer ist als später.

Außerdem ist noch ein anderer Gesichtspunkt zu berücksichtigen. Bei wenig durchlässigen Erdstoffen ist die durch die Grundwasserabsenkung hervorgerufene Belastung im Verhältnis zu der Zeit, in der das Porenwasser aus den setzungsfähigen Erdstoffen austreten kann, als plötzlich zu bezeichnen. Nun ruft aber jede plötzliche Belastung in einem solchen Erdstoff eine starke Verminderung der inneren Reibung hervor (Zustand der Nullreibung). Diese Erscheinung kann zu Rutschungen oder Aufquetschungen führen.

IV. Beispiele.

1. Schleuse Vreeswijk (Niederlande)⁶⁾.

Bauwerk: Kanalschleuse; Baugrube 270×52 m Fläche, bis 6,50 m unter Gelände reichend, d. h. bis etwa Unterkante Klei- und Moorschichten.

³⁾ Bohlmann, Die Grundwasserabsenkung bei dem Schleusenbau zu Brunsbüttelkoog, bearbeitet als Beitrag zur Grundwasserbewegung. Dissertation, Braunschweig 1913.

⁴⁾ Keilhack, Lehrbuch der Grundwasser- und Quellenkunde. Berlin 1917, Bornträger.

⁵⁾ v. Terzaghi-Fröhlich, Theorie der Setzungen von Tonschichten. Leipzig und Wien 1936, Fr. Deuticke.

⁶⁾ Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Cambridge, Mass. USA., 1936, Vol. I, S. 115.

Untergrund: 6 bis 7 m Klei- und Moorschichten, darunter etwa 15 m Sand, auf 3 bis 5 m Ton liegend. Grundwasserstand etwa in Geländehöhe.

Wasserhaltung: Zunächst offen (bis 4 m unter Gelände); danach mit Filterbrunnenanlage bis mindestens 1 m unter Baugrubensohle, also unterhalb der Ton- und Moorschichtenunterkante. Größte Absenkung in der Baugrube etwa 9 m unter Gelände. Laufende Messungen in einer großen Anzahl von Beobachtungsbrunnen zeigten, daß die Absenkung über 1000 m weit reichte.

Setzungsmessungen: Die Setzungen wurden in zahlreichen Punkten gemessen, die bis zu einer Entfernung von 1500 m rings um die Baugrube verteilt waren. Die mittlere Weite, bis zu der die Setzungen der Geländeoberfläche wahrgenommen wurden, betrug etwa 700 m. Innerhalb eines mittleren Halbmessers von etwa 250 m waren die gemessenen Setzungen größer als 15 cm; die größten Setzungen in der Nähe der Baugrube betrugen 50 bis 60 cm! Rechnet man aus den gemessenen Absenkungstiefen (Zusatzbelastung) und der gemessenen Setzung die Steifeziffer der Klei- und Moorschicht aus, so kommt man auf einen E -Wert von etwa 5 bis 10 kg/cm^2 .

2. Hallenbad in Mitteldeutschland.

Bauwerk: Mehrstöckiges Gebäude von etwa 1400 m^2 Fläche auf Banketten, etwa 1 m tief gegründet; Sohlenpressung etwa 1 at.

Baugrund: Etwa 2,50 m ziemlich weicher Auelehm ($E = 25$ bis 75 at) auf etwa 1,50 m Kiesand; darunter 4 bis 5 m Schluffton ($E = 60$ bis 100 at), darunter Kies.

Grundwasser: Die obere Kiesandschicht enthält freies Grundwasser, das unberührt blieb. In der unteren Kiesschicht befindet sich gespanntes Grundwasser, das im Bohrloch bis 3,00 m unter Gelände ansteigt. Dieses Wasser wird in drei Brunnen für Wasserversorgungszwecke abgepumpt. Die Brunnen liegen 15 bis 25 m vom Gebäude entfernt. Sie bewirken unter den Außenmauern des Gebäudes eine Absenkung des gespannten Grundwasserspiegels von etwa 1,00 m (in Meßbrunnen gemessen); in den Entnahmestellen selbst sinkt das Wasser etwa 3 m ab. Es liegt also der Fall II unter B einer Absenkung vor.

Setzungsberechnung: Bald nach Fertigstellung des Rohbaus zeigten sich Setzungen am Gebäude. Diese wurden zunächst auf die Grundwasserabsenkung zurückgeführt. (Die Brunnenanlage war etwa gleichzeitig mit dem Gebäude errichtet worden.) Auf Grund von Baugrunduntersuchungen konnte aber festgestellt werden, daß die Grundwasserabsenkung von 1 m im vorliegenden Falle eine Zusammendrückung

der Schlufftonsschicht von nur etwa 3 bis 4 mm zur Folge haben kann (s. B. II: $h \approx 1$ m; $t_B \approx 5$ m; $E = 60$ bis 100 at). Die Auelehmsschicht wird durch die Grundwasserabsenkung nicht beeinflußt. Die Setzungsberechnung für die Gebäudelast ergab dagegen Setzungen von 4 bis 8 cm, die auch im Laufe der Zeit eingetreten und gemessen sind. Sie röhren in erster Linie aus der Zusammendrückung der Auelehmsschicht her. Es konnte somit nachgewiesen werden, daß die durchgeführte Grundwasserabsenkung an den eingetretenen Setzungen so gut wie nicht beteiligt und ihre Weiterführung deshalb unbedenklich ist.

3. Verfaulen von Holzpfahlköpfen.

Unter Umständen können auf Holzpfählen gegründete Bauwerke in Mitleidenschaft gezogen werden. Steht ein Gebäude auf Standpfählen, die die Gebäudelast in tiefere Schichten übertragen, so können sich die durchfahrenen Schichten infolge von Grundwasserabsenkung setzen, so daß die Pfahlköpfe allmählich aus dem Baugrund und damit aus dem Wasser herausragen und unter diesen Umständen schnell zerstört werden.

Zusammenfassung.

Man ist heute in der Lage, die bei Grundwasserabsenkungen auftretenden Setzungerscheinungen zu erklären und einigermaßen rechnerisch, vor allen Dingen aber im voraus zu erfassen. Hierzu sind notwendig:

a) Erhebungen über die vermutliche Reichweite und über die Gestalt des Absenkungstrichters der Grundwasserabsenkung; also Ermittlung der Durchlässigkeit der wasserliefernden Schichten; Porenvolumen und gegebenenfalls kapillare Steighöhe der trockenfallenden Schichten.

b) Feststellung der Schichtung an den gefährdeten Punkten, Entnahme ungestörter Proben aus etwa angetroffenen weichen Schichten; Ermittlung der erdstoffphysikalischen Ziffern der weichen Erdstoffe: Zusammendrückbarkeit (E -Werte), Durchlässigkeitzfür k und Zeit-Setzungs-Versuch, um den zeitlichen Verlauf der Setzung abzuschätzen.

c) Laufende Messungen der Wasserstände in Meßbrunnen an den gefährdeten Punkten zur Kontrolle der Ermittlungen unter a.

d) Vom ersten Beginn der Absenkung bis zum Wiedererreichen des normalen Wasserstandes laufende Setzungsmessungen, besonders an gefährdeten Gebäuden innerhalb der Reichweite der Absenkung zur Kontrolle der Voraussagen unter b. Das Nivellement muß selbstverständlich von einem einwandfrei gegründeten Festpunkten möglichst außerhalb des Absenkungstrichters ausgehen.

Alle Rechte vorbehalten.

Gleitwiderstand von Ankerblöcken für Hängebrücken¹⁾.

Von Ing. Dr. Karl v. Terzaghi, o. ö. Professor an der Technischen Hochschule Wien.

Der Entwurf von Ankerblöcken für Hängebrücken erfordert nicht bloß die Kenntnis der maßgebenden Eigenschaften des tragenden Bodens, sondern auch die Kenntnis des Sicherheitskoeffizienten, den man wählen muß, um den Grad der Sicherheit der Verankerung jenem des Oberbaues anzugeleichen. Nun liegen allgemein anerkannte Regeln für die Wahl des

im Wettbewerb stehenden Entwürfen und erzeugte die Gefahr folgenschwerer Mißgriffe. Nachfolgend sollen Vorschläge zur Behebung der herrschenden Unsicherheiten gegeben werden. Die Vorschläge werden an der Hand eines praktischen Beispiels, an den Verankerungen der Reichsbrücke über die Donau bei Wien, entwickelt und erläutert.

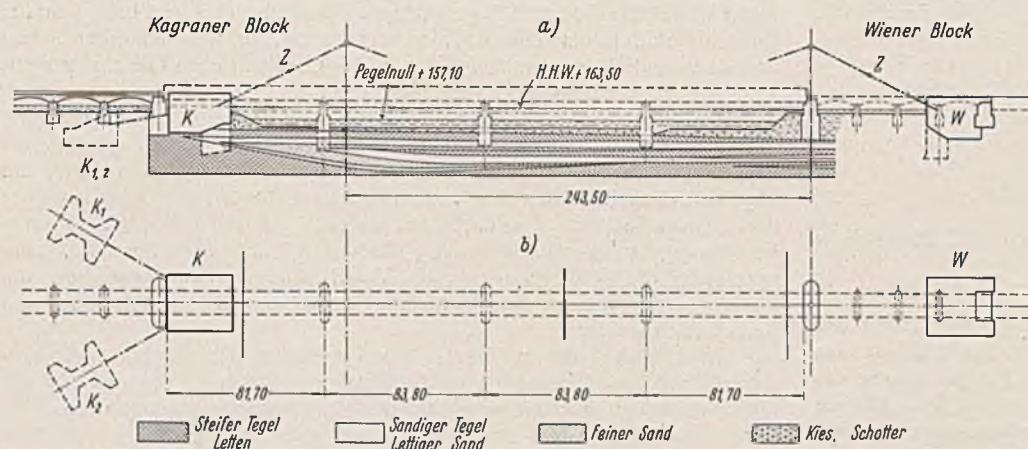


Abb. 1.

Sicherheitskoeffizienten bisher nur für den Ankerblock mit mächtiger Sandunterlage vor. In allen anderen, weniger einfachen Fällen war der Ingenieur bei der Bearbeitung des Entwurfs bisher an keine Regeln gebunden. Dieser Mangel erschwerte das Urteil bei der Wahl zwischen

¹⁾ Dieser Aufsatz enthält die gekürzte Wiedergabe des Inhalts eines Vortrags, den der Verfasser am 30. April 1937 im Österr. Ing.-u. Arch.-Verein in Wien gehalten hat.

Bodenverhältnisse bei der Reichsbrücke und die Vorgeschichte des Hängebrückenprojektes.

Abb. 1a zeigt einen Schnitt durch den Untergrund der Reichsbrücke. Der Schnitt läßt erkennen, daß man zwischen zwei geologisch verschiedenen Abschnitten unterscheiden muß, und zwar zwischen dem Untergrunde des rechten Ufers und des Flüßbettes einerseits und jenem des linken Ufers anderseits. Unterhalb der Kote + 150 bis zu der bei den Bohrungen erreichten Kote von etwa + 130 besteht der Boden im ersten Abschnitt, d. h. unterhalb der Flüßsohle und des rechten Ufers aus einer regellosen Folge von feinen Sanden, lettigen Sanden, plastischem Tegel und steifem Tegel mit vorwiegend waagerechter Schichtung. Im zweiten Abschnitt, unterhalb der Kote + 150, scheint sich unterhalb des Schotters eine Schicht festen Tegels von großer Mächtigkeit zu befinden, die von keinen Sandzwischenlagen unterbrochen wird. An der Grenze zwischen den beiden Abschnitten, d. h. unterhalb des Ankerblocks K keilen die sandigen Schichten des ersten Abschnitts allmählich aus. In beiden Abschnitten besteht der Boden oberhalb einer Kote von etwa + 150 aus groben, alluvialen Sanden und Schotter. Die Pfeller der alten Reichsbrücke sind gestrichelt angedeutet. Die Bodenpressungen betragen unter diesen Pfählen mit Abzug von Auftrieb und Seitenreibung zwischen 3,3 und 4,8 kg/cm^2 .

Sicherheitskoeffizienten bisher nur für den Ankerblock mit mächtiger Sandunterlage vor. In allen anderen, weniger einfachen Fällen war der Ingenieur bei der Bearbeitung des Entwurfs bisher an keine Regeln gebunden. Dieser Mangel erschwerte das Urteil bei der Wahl zwischen