

Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 94 (1976)
Heft: 37

Artikel: Erkundung der Grundwasserverhältnisse
Autor: Huder, J.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-73161>

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: 24.01.2026

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

Erkundung der Grundwasserverhältnisse

Von Prof. Dr. J. Huder, Zürich

DK 551.495

Bemerkungen zur Prospektion

Der Einfluss des Grundwassers ist bei der Behandlung grundbaulicher Probleme immer im Zusammenhang mit dem Aufbau des Bodens zu betrachten. Den Einfluss zu klären ist Aufgabe der Prospektion: Was, wie, wo soll untersucht werden.

- Was soll die Sondierkampagne an Ergebnissen liefern und wie sollen diese gedeutet und dargestellt werden, damit der projektierende Ingenieur die nötigen Informationen für die optimale Lösung seiner Bauaufgabe zur Verfügung hat?
- Wie soll das Sondier- und Untersuchungsprogramm ausgelegt werden, damit man für ein Minimum an Auslagen die notwendigen Aufschlüsse und Informationen über Baugrundverhältnisse erhalten kann, um Planung und Ausführung eines Bauwerkes zu ermöglichen?
- Wo sollen die Sondierungen angesetzt werden und wie tief sollen sie reichen? Welche Beobachtungen sind während der Sondierarbeit vorzunehmen und welche Untersuchungen in der Sondierung können außerdem zur Klärung der Verhältnisse beitragen?

Die Beantwortung der drei gestellten Fragen setzt voraus, dass dem Ingenieur die Problemstellung, die sich aus der Gestaltung des Bauwerks ergibt, bekannt ist. Nur dann kann das Ergebnis der Erkundung hinreichend und wirtschaftlich sein. Die Untersuchungen sollen nicht nur den Ingenieur über die vorhandene Sicherheit der gewählten Lösung unterrichten, sondern auch Unterlagen ergeben, um eine dem Baugrund sicher angepasste Gründung zu finden. Nur so kann eine Bodenuntersuchung voll genutzt werden. Eine Sondierkampagne ist eine Massarbeit. Richtlinien können dazu nur Anhaltspunkte liefern. Die Sondierkampagne wird vom Baugrund und vom Bauvorhaben bestimmt. Die Kampagne darf nicht einem starren Schema folgen, sondern muss sich dem Aufbau des Bodens anpassen. Je besser die gesammelte Dokumentation über die Baugrundverhältnisse ist, um so gezielter kann die Sondierung geplant werden. Dabei ist auch das Gelände außerhalb des eigentlichen Bauareals einzubeziehen, sowohl für Grundwasser- als auch für Baugrundbeurteilung. Stabilitäts- oder Rückverankerungsfragen oder Beeinflussungen des Grundwasserspiegels durch das Bauvorhaben sind oft nur so zu beurteilen. Baugrunduntersuchungen sind möglichst frühzeitig auszuführen. Dabei sind bei Grundwasserbeobachtungen Messungen über lange Zeitperioden vorzusehen. Probleme, die erkannt werden, sollten nicht nur erwähnt oder beschrieben, sondern auch in der Größenordnung erfasst werden. Es ist beispielsweise sehr einfach, einen Hang als Kriechhang zu «stempeln», ohne die entsprechenden Messungen beizulegen. Die baulichen Folgen einer solchen Missachtung sind teuer.

Die Ergebnisse der Sondierkampagne sind mit geotechnischer Sprache zu beschreiben und für den Baugrund ist ein Modell in möglichst realistischer Form auszuarbeiten. Es zeigt sich oft, dass Teilprobleme wohl erkannt werden, aber

unzutreffende Baugrundmodelle den Berechnungen zugrunde liegen. Nach diesen allgemeinen Betrachtungen soll nun besonders auf die Messung des Porenwasserdruckes eingegangen werden.

Messung des Porenwasserdruckes

Das hydrostatisch gespannte Wasser, welches die Poren im Boden ausfüllt, bildet physikalisch gesehen ein Potentialfeld. Im homogenen und isotropen Boden gehorcht das Wasser den Gesetzen der Potentialtheorie, die mit der bekannten Differentialgleichung für den ebenen Fall im stationären Zustand beschrieben ist:

$$\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} = 0$$

Ein Potentialfeld ist im stationären Zustand unabhängig von der Durchlässigkeit des Bodens. Mit anderen Worten: diese Theorie gilt unter den gegebenen Voraussetzungen ebenso gut für einen Kies wie für einen Ton.

Das Potential wird durch eine grosse Anzahl von Punkt-messungen untersucht, aus denen die Linien gleichen Potentials ermittelt werden. Senkrecht darauf fallen die Strömungslinien, die mit ihnen zusammen das Strömungsnetz bilden. Die idealisierenden Voraussetzungen erlauben es, die fundamentalen Erkenntnisse über Porenwasserspannungen zu vermitteln. Das soll aber nicht darüber hinwegtäuschen, dass ideale Verhältnisse selten auftreten. Wohl können theoretisch Inhomogenitäten des Bodens bei bekannten Durchlässigkeitskoeffizienten in vertikaler Richtung k_v sowie in horizontaler Richtung k_h durch Transformationen mit einem homogenen Modell angenähert werden. k_v und k_h zu ermitteln ist aber schwierig.

In einer Bohrung sind zwei Piezometer eingebaut worden, und die Messungen liefern für P_1 einen Abstand von l_1 , in P_2 einen Piezometerstand l_2 (siehe Bild 1). Der Abstand von P_1 und P_2 , die voneinander abgedichtet sind, beträgt z . Durch den Unterschied der Druckhöhe im Piezometer zeigen diese, dass die beiden Punkte der Messung verschiedenen Potentialen zuzuordnen sind. Aus einer einfachen trigonometrischen Rechnung kann gezeigt werden, dass der Gradient $\sin\alpha = i = \sqrt{(l_2 - l_1)/z}$ ist.

Ob diese Messungen der beiden Piezometer zwei verschiedene, voneinander unabhängige Grundwasserstockwerke anzeigen, oder eine Strömung mit Gefälle Δh darstellen, kann erst durch genaue Prüfung des Bohrprofils, oder durch weitere Messungen ausgesagt werden.

An diesem Beispiel ist ersichtlich, wie irreführend eine Potentialmessung wird, wenn diese mit einem Piezometer aus Gasrohr, das auf der ganzen Länge gelocht ist, vorgenommen wird. Das Messsystem wird zur Potentiallinie und verändert das bestehende Potentialfeld. Die Verfälschung kann aber auch eintreten, wenn die Spitze nur auf rd. 30 m gelocht ist,

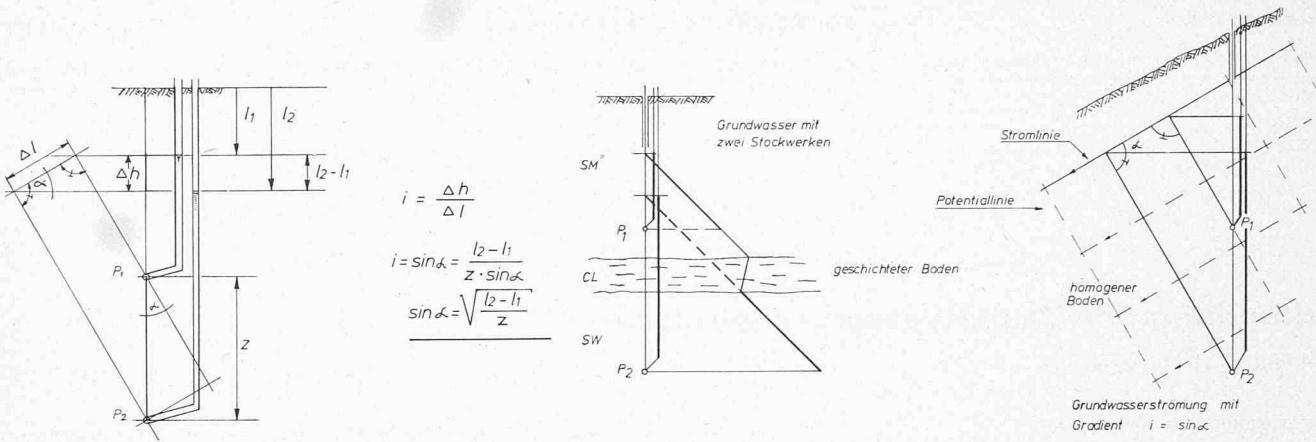


Bild 1. Messungen des Porenwasserdruckes mit zwei Piezometern in einer Bohrung und mögliche Interpretation der Messung

und der Raum zwischen Bohrwand und Piezometer nicht verdämmt wurde. Diese Methode ist nicht einmal in einem bekannt ruhigen Grundwasser anzuwenden. Sollte das Piezometer in der Bauphase eine Beeinflussung des Grundwasserspiegels anzeigen, wäre das Ergebnis fragwürdig.

Der Einfluss des Wassers und der Strömungsrichtung kann durch die Betrachtung der Stabilität eines Böschungselementes veranschaulicht werden (siehe dazu Bild 2).

Für ein Material mit Reibungswinkel Φ' ist die Böschung mit der Neigung α im labilen Zustand für die verschiedenen Strömungsrichtungen, die in der Tabelle (Bild 2) angegeben sind. Im Bild 3 sind bekannte Möglichkeiten, welche die Stabilität einer Böschung durch Beeinflussung des Potentialfeldes zeigen, dargestellt.

Zur Messung des Porenwasserdruckes können verschiedene Piezometertypen verwendet werden, die in Bild 4 dargestellt sind. Der Piezometerstand wird bei ① durch eine Wasserpfeife, bei ② und ③ durch ein elektrisches Lot, in ④ über ein Manometer und in ⑤ elektrisch, z.B. mittels einer schwingenden Saite, gemessen.

Die Messung der Porenwasserspannungen in einem un durchlässigen Boden stellt an das Piezometer besondere Anforderungen. Sind Belastungsänderungen, z.B. Schüttungen, vorgesehen, müssen die Piezometer die Porenwasserspannungen, die durch die Belastung entstehen, rasch anzeigen. Dazu werden die Messköpfe in Profile verlegt, die die gesamte Einflusszone der Belastung erfassen und die Schichten berücksichtigen, in denen sich die Porenwasserspannungen aufbauen. Bei der Konsolidation werden diese abgebaut. Die Piezometer dienen dazu, den Vorgang zu kontrollieren. Obwohl gleichzeitig mit der Konsolidation die Setzungen auftreten, genügt oft die Setzungsmessung allein nicht, um eine sichere Information über Zeitfaktor und Setzungsmass zu erhalten.

α	Φ'	Sicherheit F	$F = 1$	$\gamma = 2 \text{ t/m}^3$		
				$\Phi' = 40^\circ$	30°	20°
$\alpha < \Phi'$	$\frac{\tan \Phi'}{\tan \alpha}$	$\alpha = \Phi'$		40°	30°	20°
$\alpha > \Phi'$	$\frac{\gamma \cdot \tan \Phi'}{\gamma \cdot \tan \alpha}$	$\alpha = \Phi'$		$1:1,2$	$1:1,75$	$1:2,75$
$\alpha = \Phi'$	$\frac{\gamma \cdot \tan \Phi'}{\gamma \cdot \tan \alpha}$	$\alpha = \Phi'$	$22,8^\circ$	$16,1^\circ$	$10,3^\circ$	
			$1:2,38$	$1:3,5$	$1:5,5$	

Bild 2. Böschungsneigung im labilen Zustand mit und ohne Grundwasserströmung

Eine mögliche Anordnung der Piezometer ist im Bild 5 dargestellt. Es sind keine Pegel zur Messung der Setzungen angegeben. Grossversuche zur Ermittlung der Konsolidationszeit im Massstab 1:1 können, wenn diese vollständig instrumentiert sind, die Voraussagen der Berechnung bestätigen und darüber hinaus wichtige Hinweise über das Verhalten des Bodens liefern, wie dies in Bild 6 angedeutet ist.

Die Piezometer bzw. Porenwasserspannungsdosier, die zu diesem Zwecke verwendet werden, sind in Bild 7 gezeigt. Es handelt sich um Dosen mit «geschlossenem» System. Die Messungen werden mit Manometer – direkt ⑥ oder über ein Membranventil ⑧ – bzw. elektrisch ⑤ vorgenommen. Die Systeme ⑥ und ⑦ müssen 100%ig gesättigt werden. Beide Typen, ⑥ wie ⑦, können nur kleine Unterdrücke messen, da das Messsystem an der Oberfläche liegt. Der Grundwasserspiegel sollte sich nur wenige Meter unterhalb des Manometers befinden. Im Gegensatz dazu sind die Membranventilmessdose, wie auch die elektrische Porenwasserdrukdoze unabhängig von der Lage des Ruhegrundwasserspiegels, weil die Messung am Messkopf vorgenommen wird.

Ein Piezometer soll den momentanen Druck im Porenwasser ohne Verzögerung angeben. Im durchlässigen Boden heisst das, dass Schwankungsspitzen, die von Niederschlägen oder Schneeschmelze herrühren, registriert werden müssen. Durch ein trüges System kann eine Spitze nicht erfasst werden. In einem un durchlässigen Boden sind hingegen saisonale Schwankungen infolge der kleinen Durchlässigkeit des Bodens

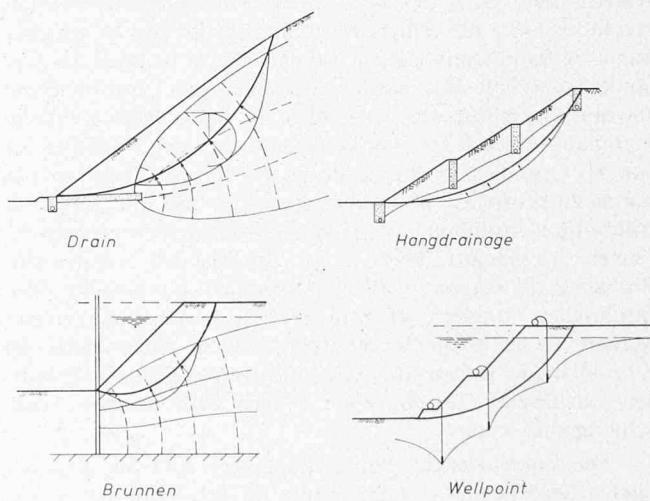


Bild 3. Beeinflussung der Sickerströmung durch bauliche Massnahmen zur Verbesserung der Stabilität

Bild 4. Verschiedene Piezometertypen zur Messung von Porenwasserdrücken

- 1 1"-Rohr mit gelochter Spitze (rammbar)
- 2 Spitze mit Quarzfilter und Plastikrohr ($\frac{8}{12}$) (rammbar)
- 3 Quarzfilter und Plastikrohr
- 4 Typ 3 mit angeschlossenem Manometer
- 5 Elektrisches Messsystem mit schwingender Saite

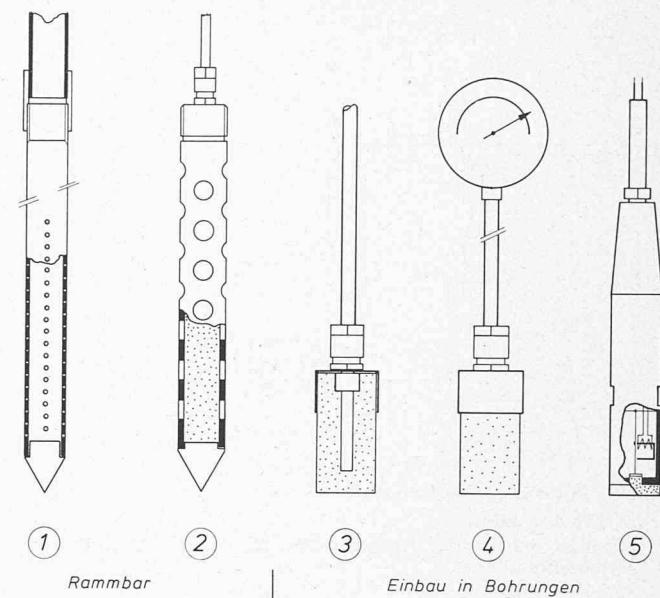
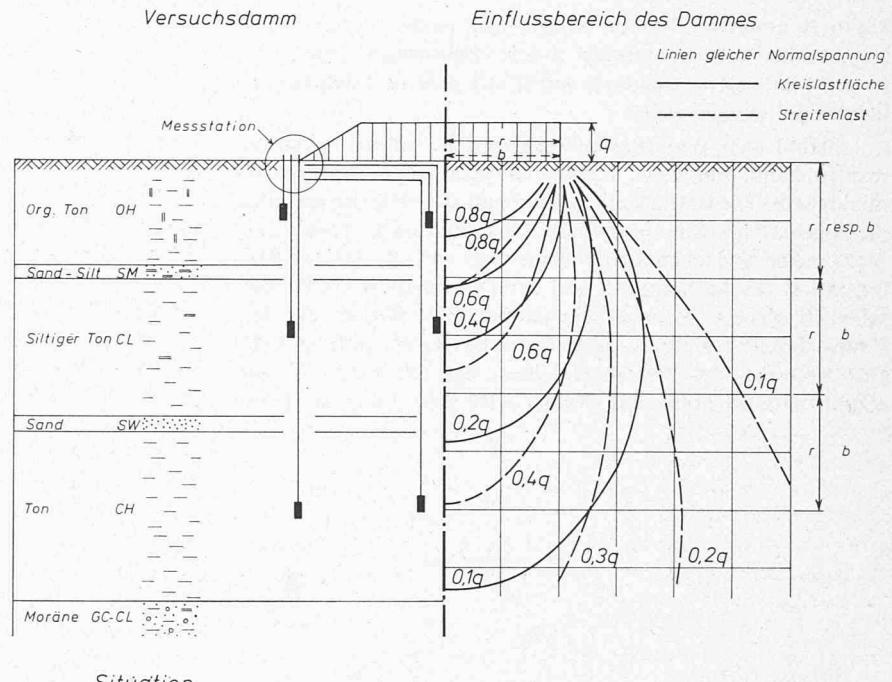


Bild 5. Anordnung von Messdosen im Versuchsdamm



Situation

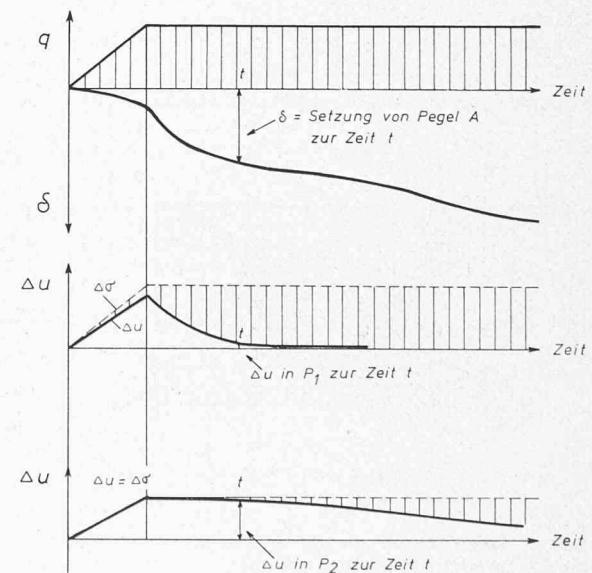
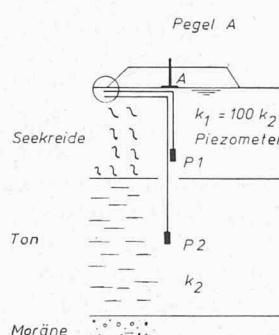


Bild 6. Schematische Darstellung des Zeitsetzungsverlaufes unter der Belastung q in einem Zweischichtensystem

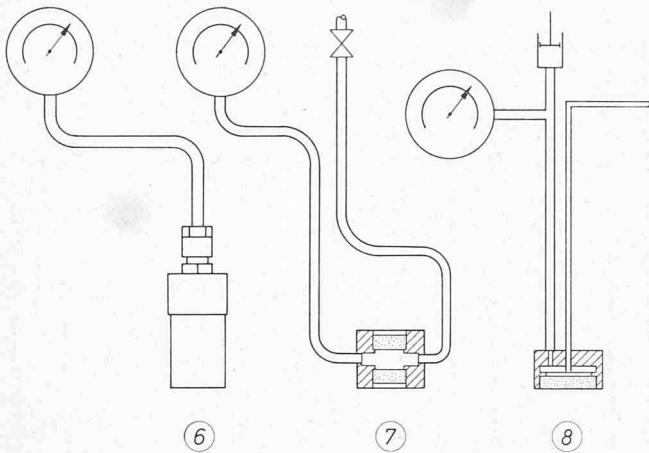


Bild 7. Porenwasserdruckmessdosen

6 ist Typ 4 in Bild 4

7 Messdose mit Zu- und Ableitung zur Spülung des Messsystems

8 Membranventildose

kaum zu erwarten. Rasche Änderungen in den Porenwasserspannungen werden hingegen durch Belastungen verursacht. In gesättigtem Ton treten sie sofort auf, und sind den zusätzlichen Spannungen gleich.

Damit der Porenwasserdruckzuwachs sofort registriert werden kann, muss die Volumenänderung des Messsystems minim sein. Dieser Forderung kommen die elektrischen oder die sogenannten Membranmessdosen am besten nach. Dosen mit Manometer sind ebenbürtig, wenn man von der kleinen Deformation des Manometers und der Deformation im Plastikschauch absieht. Weniger eignen sich hier Dosen, die den Druck durch ihre eigene piezometrische Wassersäule messen. Das Volumen des Piezometerrohrs, das dabei mit Wasser gefüllt wird, ist gross, das Wasser wird also durch die Kon-

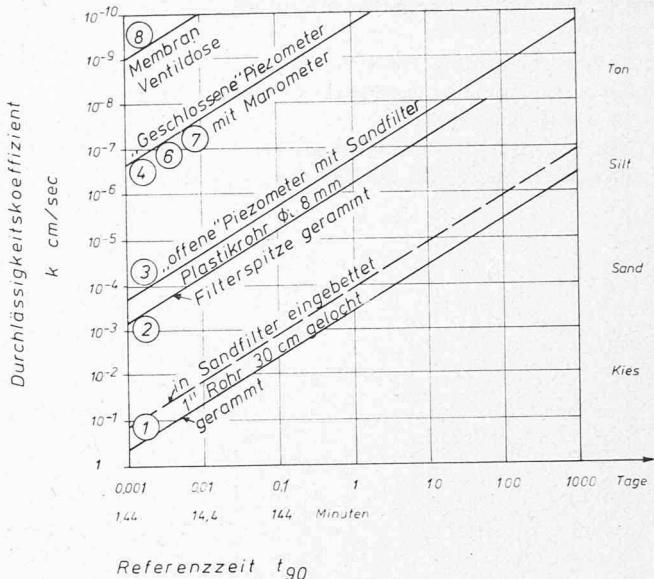


Bild 9. Referenzzeit t_{90} in Abhängigkeit der Durchlässigkeit der verschiedenen Piezometertypen 1 bis 8

solidation des umliegenden Bodens geliefert. Dieser Vorgang verzögert die Messung. Um das Piezometerrohr aufzufüllen ist je nach der Durchlässigkeit des Materials mehr oder weniger Zeit nötig. Je mehr Wasser benötigt wird, desto langsamer stellt sich der Piezometerstand ein. Unterdessen kondensiert der Boden weiter, so dass die Messungen mit einer Zeitverschiebung erfolgen und kleinere Drücke aufweisen. Der Zusammenhang zwischen der Durchlässigkeit des Bodens und der Zeit bis zur Druckangabe durch das Piezometer wurde zuerst von M. J. Hvorslev untersucht. Die Wassermenge Q , die vom Piezometerrohr zu- bzw. wegfließen muss, kann mit der Durchlässigkeitsformel für den homogenen Boden bestimmt werden zu:

$$Q = 4 \pi r_s H k$$

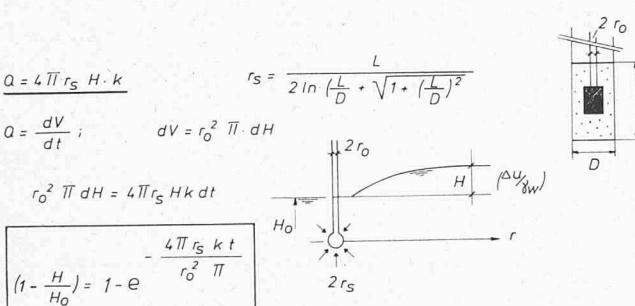
dabei ist r_s der ideelle Kugelradius der Ein- bzw. Austrittsfläche des Wassers. r_s kann mit der angeführten Formel im Bild 8 berechnet werden.

Die Wassermenge Q ist dV/dt und $dV = r_o^2 \pi \cdot dH$. Hier bedeutet r_o den Radius des Piezometerstandrohres; so dass die Formel zur Bestimmung der Durchlässigkeit folgende Form annimmt:

$$r_o^2 \pi dH = 4 \pi r_s H k dt$$

Nach der Integration in den Grenzen von H bis H_0 ergibt sich die Formel für die relative Piezometer-Höhe $(1-H/H_0)$, die in Bild 8 angegeben ist. H_0 ist dabei die Höhe des Ruhe- druckwasserspiegels.

Die Lösung von Gibson berücksichtigt zusätzlich die Deformation infolge der Zusammendrückbarkeit des Bodens aus einer Belastung. Die Differentialgleichung der Konsolidation, die sich daraus ergibt für eine kugelförmige Entwässerung ist ebenfalls in Bild 8 angegeben. Der Konsolidationskoeffizient c_v ist hier als Funktion von M_E - und k -Wert angegeben. Die Lösung dieser Differentialgleichung ist ebenfalls in Funktion der relativen piezometrischen Höhe $(1-H/H_0)$ und der relativen Zeit μT zusammengestellt. Der Einfluss der Zusammendrückbarkeit des Bodens ist mit dem Parameter μ in den Grenzen von 0 bis $\mu = 10$ berücksichtigt. Die Ausdrücke für μ und T sind im Bild 8 erklärt.



Diff. Gl. der Konsolidation gegen eine kugelförmige Entwässerung

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad u = \gamma_w H \quad \text{und} \quad c_v = \frac{k \cdot M_E}{\gamma_w}$$

$$\mu = \frac{4 \pi r_s^3}{M_E r_o^2 \gamma_w} \quad T = \frac{c_v \cdot t}{r_s^2} \quad \mu T = \frac{4 r_s k t}{r_o^2}$$

Beispiel: $D=10 \text{ cm}$, $L=25 \text{ cm}$, $\rightarrow r_s=7,6 \text{ cm}$, $k=10^{-8} \text{ cm/sec}$, $2r_o=0,8 \text{ cm}$
 $\mu=0$, $(1-H/H_0)=0,9$, $\mu T=2,2 \rightarrow t_{90} = \frac{2,2 \cdot r_s^2}{4 \cdot k} = 13 \text{ Tage}$

Bild 8. Referenzzeitdiagramm zur Ermittlung der Zeitverschiebung bis zur zuverlässigen Piezometerangabe

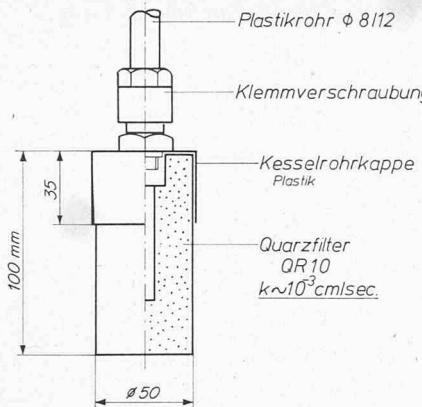


Bild 10. Piezometerspitze aus Quarzfilter mit Plastikrohr von $8/12$ mm Durchmesser

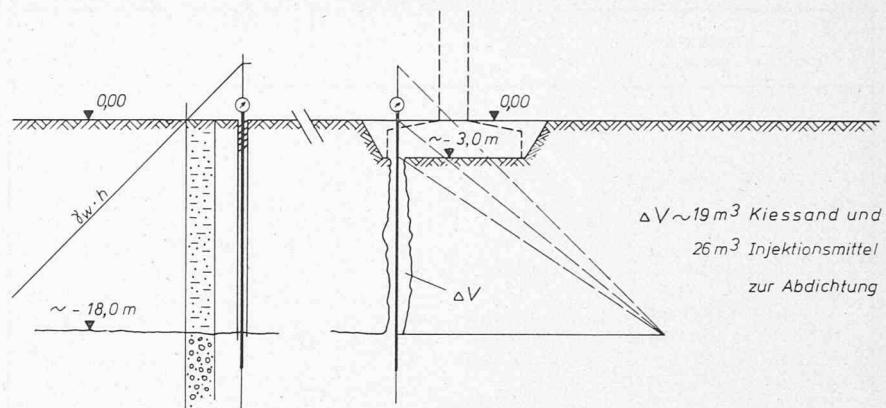


Bild 12. Auswirkung eines ungenügend verdämmten Piezometers im gespannten Grundwasser

Der nicht zusammendrückbare Boden kann mit $M_E = \infty$ beschrieben werden, das bedeutet einen μ -Wert von 0. Für $\mu = 0$ wird der Ausdruck identisch mit der Lösung von Hvorslev. Für die relative piezometrische Höhe $(1 - H/H_0) = 0,9$ ist die Referenzzeit μT unabhängig von der Zusammendrückbarkeit, und μT ergibt 2,2.

Das gerechnete Beispiel entspricht dem Piezometer 3, das in einer 100-mm-Bohrung D und 25 cm Sandfilterlänge L in einem Tonboden mit einem k -Wert von 10^{-8} cm/s. verlegt ist. Der Piezometer weist ein Plastikrohr von $2r_0 = 8$ mm Innen-durchmesser auf. Soll der Piezometer schon 90% des Sollwertes erreichen, ergibt sich daraus ein $\mu T = 2,2$ und die Referenzzeit t_{90} ist daraus 13 Tage.

Auf Grund dieser Überlegungen sind die Piezometer in Bild 9 in Abhängigkeit der Durchlässigkeit k und der Referenzzeit t_{90} % in Tagen aufgetragen. t_{90} soll erinnern, dass 90% der ursprünglichen Druckdifferenz abgebaut ist. Z.B. ist der Piezometerstand beim Einbau 3 m höher als er dem natürlichen entspricht, so ist der Fehler t_{90} % noch 30 cm. Das Bild zeigt deutlich, dass das «alte» System mit 1"-Rohr – aber richtig eingebaut! – in Kies verwendet werden kann. Bei Sand treten schon starke Verzögerungen ein. Bei Silt und Ton ist dieses System 1 sicher ein ungeeignetes Mittel zur Kontrolle der Porenwasserdrücke. Das Rohr verbraucht ein zu grosses Wasservolumen.

Geeigneter in dieser Beziehung ist der zweite Piezometer-typ 2 mit geschützter Keramikkerze und dünnem Plastikrohr von 8 mm Durchmesser. Er kann im Sand sicher verwendet werden und ist für Silt noch geeignet. Der Vorteil der beiden Piezometer 1 und 2 ist, dass sie bei locker gelagertem Sand, eventuell auch Kies, eingerammt werden können. Bei dichter Lagerung ist es schwer, ohne Verschleiss die Piezometer in grössere Tiefen zu rammen. Die anderen Piezometer können nur in Bohrungen bzw. Schüttungen eingebaut werden. Typ ③ mit Filterkerze kann in jeden Boden, mit Ausnahme des Tonens, versetzt werden. Bei einer Durchlässigkeit des Bodens $k = 10^{-7}$ cm/s ist die Zeit für t_{90} ungefähr 1 Tag und bei $k = 10^{-8}$ cm/s rd. 10 Tage. Sind kürzere Zeiten erwünscht bzw. der Ton undurchlässiger als 10^{-8} cm/s, sind Piezometer mit geschlossenen Systemen notwendig. Solange der Grundwasserspiegel nicht mehr als einige Meter unter Geländeoberfläche liegt, ist die Messung mit Manometern (Typ ④) möglich. Bei der Verlegung ist für ein gesättigtes System unbedingt Sorge zu tragen. Typ ⑦ mit doppelter Leitung ermöglicht zuverlässig die Sättigung des Messsystems. Der Druck wird ebenfalls mit Manometer gemessen. Die Dosen mit einem Membranventil und die elektrischen Dosen erlauben es, in undurchlässigen Böden rasch und genau den Druck zu regi-

strieren, da sie vernachlässigbare Volumenänderungen aufweisen. Diese Messsysteme werden hier nicht weiter diskutiert. Die Messung selbst wird mit Spezialgeräten durchgeführt, die Dosen sind relativ teuer und müssen von einem versierten Fachmann verlegt werden.

Piezometer Typ ③ sei hier noch etwas näher erläutert. Seine Verwendung ist in unseren Böden fast überall möglich. Das Wasservolumen im Plastikrohr, das sich neu einstellen muss, ist gering, so dass es auch als offener Piezometer in Ton mit k -Werten von 10^{-8} cm/s innert etwa 10 Tagen zuverlässige Ermittlung des Grundwasserspiegels gestattet. Die Messung selbst erfolgt durch ein elektrisches Lot zuverlässig und schnell. Sind Porenwasserspannungsänderungen z.B. infolge einer Belastung zu ermitteln, kann – sofern der Grundwasserspiegel nicht tiefer als 4 bis 5 m liegt – der gleiche Typ ③ mit einem Manometer versehen werden. Dadurch wird die Referenzzeit von t_{90} auf rd. 15 Minuten reduziert.

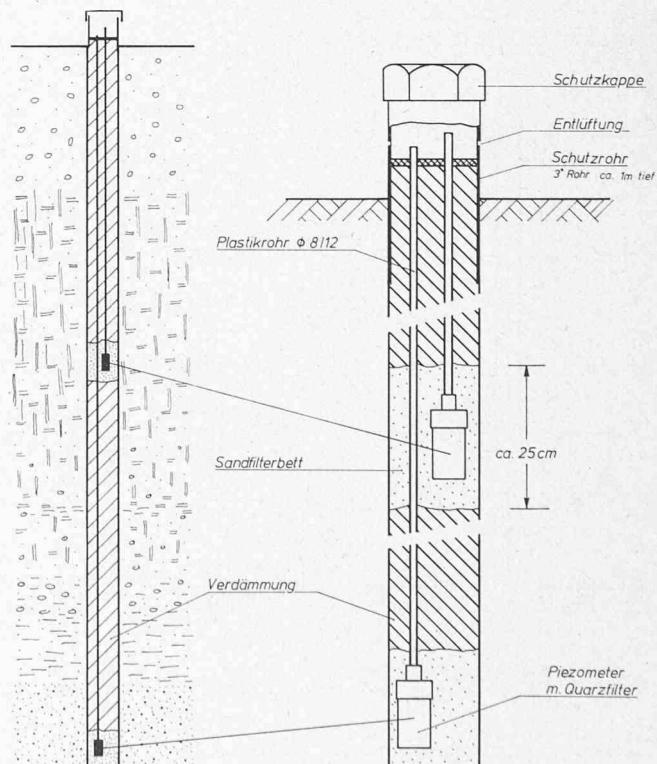


Bild 11. Einbau von mehreren Piezometern in einer Bohrung in verschiedenen Horizonten, die durch dichtes Verdämmungsmaterial voneinander abgedichtet sind

Bild 13. Einstufung der Durchlässigkeit

$k \text{ cm/sec}$	Vergleichs-dimension	Stufe	Material	USCS Klassifikation
> 1		sehr durchlässig	Grobkies	
10^{-1} \downarrow 10^{-3}		durchlässig	Kiessand ohne Feinanteil wenig Feinanteil	GW GP SW SP
10^{-4} \downarrow 10^{-6}	$10^{-5} \sim 1 \text{ cm/Tag}$ $= 1 \text{ Fuß/Jahr}$	wenig durchlässig	Sand mit grossem Feinanteil siltige Sande	GM SM GC SC OL
10^{-7} \downarrow 10^{-9}		sehr wenig durchlässig	tonige Silte Tone	ML MH OH CL CH

Im Bild 10 ist die Konstruktion dieser Dose gezeigt. Die verwendeten Teile sind im Handel erhältlich. Dieses Piezometer, ohne Plastikrohr, kostet 20 bis 30 Fr. Dazu kommt das Plastikrohr PVC 8/12 mm (etwa 0.50 Fr./m). Dieses Piezometer kommt weit billiger zu stehen als ein gut verlegtes Gasrohrpiezometer.

Die Einbindetiefe eines Piezometers ist auf Grund des Resultates des Bohrprofils und dem vermuteten Grundwasserspiegel festzulegen. Es ist möglich, in einer Bohrung eine ganze Anzahl von Messstellen einzubauen.

Wie der Einbau vor sich geht, ist in Bild 11 gezeigt. Jedes Piezometer ist in einem Sandfilterbett verlegt. Der Sand soll als Filter gegen den Boden wirken. Zwischen den einzelnen verlegten Piezometern ist die Bohrung zu verdämmen, und zwar mit einem Material, das weniger durchlässig ist als der umgebende Boden. Damit wird die gegenseitige Beeinflussung verhindert. Dieser Einbau ist in jedem Boden möglich. Falls das Material nicht standfest ist, muss das Futterrohr schrittweise nachgezogen werden. Die Piezometer sollen an der

Oberfläche durch ein Rohr mit Deckel geschützt werden. Die einzelnen Piezometer sind so zu markieren, dass keine Verwechslungen bei Messungen vorkommen. Die Messung mit einem Elektrolot gestattet, Tiefen von 30 m und mehr abzutasten.

Es mag auf den ersten Blick scheinen, dass dabei ein grosser Aufwand getrieben wird. Zwei wichtige Gründe, die dafür sprechen, sollen hier erwähnt werden. Es sollte heute keine Bohrung – mindestens im genutzten Grundwasser – ohne Verdämmung verlassen werden. Sie stellen ansonst Verletzungen des Grundwasserträgers dar. Sie können sogar bei einem Projekt Schaden anrichten, z.B. bei einem Retentionsbecken mit natürlicher Dichtung, das Wasser verlor, konnte nach der Absenkung eine grössere Anzahl Trichter entdeckt werden, die in ihrer Anordnung genau der Lage der Sondierbohrungen entsprachen. Die Abdichtung der Trichter brachte den erwünschten Erfolg. Bei der Prospektion für ein Brückenprojekt traf man nach rd. 18 m steifem, kaum plastischem Ton, einen durchlässigen Kies mit gespanntem Grundwasser an. Zur Messung des Druckes wurde ein Piezometer eingebaut. Der Überdruck betrug rd. 4 m Wassersäule. Damit keine baulichen Schwierigkeiten bei einer Pfahlgründung auftreten, wurde eine Flachgründung gewählt. Eine Bohrung mit dem Piezometer lag gerade in der Pfeilerfundation. Beim Aushub des Fundamentes wurden die obersten 3 m des Piezometers freigelegt. Am Freitagabend war der Aushub beendet. Am Montagmorgen strömte aus der Fundamentgrube eine Brühe zum nächsten Bach. Es gab dazu nur eine Erklärung: Beim Piezometer – es handelte sich um ein Gasrohrpiezometer mit Manometer – waren nur die obersten 3 m verdämmt worden.

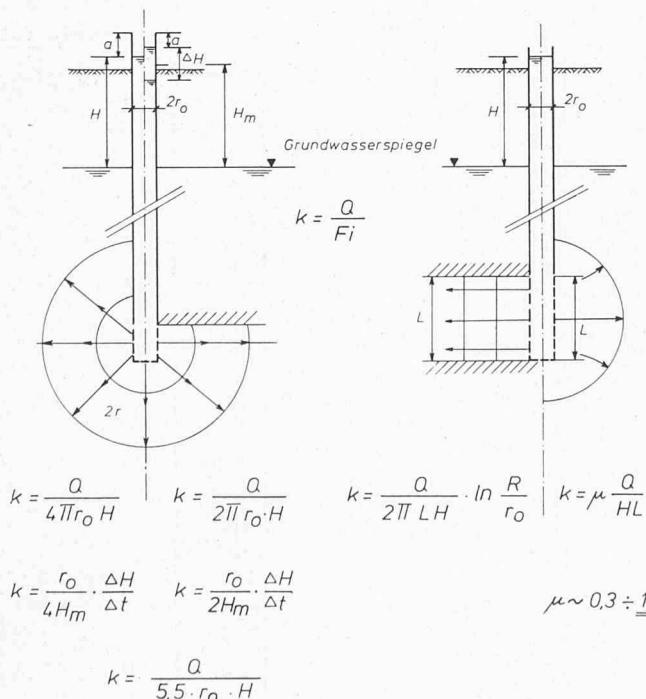


Bild 14. Bestimmung der Durchlässigkeit in Bohrungen durch die gebräuchlichsten Formeln bei verschiedenen Untergrundverhältnissen

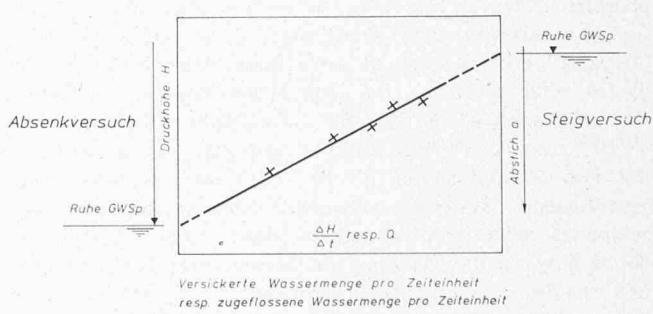


Bild 15. Auswertung von Absenk- bzw. Steigversuchen im Bohrloch durch graphischen Ausgleich

Während der Beobachtungsperiode konnte über ein Jahr nichts besonderes vermerkt werden. Beim Aushub wurde der Tonzapfen entfernt, so dass das Wasser den Weg nach aussen fand. Mit zunehmender Erosion wurde der Wasserandrang grösser. Das Loch wurde durch etwa 19 m^3 Kies verpfropft und anschliessend mit rd. 26 m^3 Material injiziert. Das Fundament wurde nach Plan ausgeführt und hat sich trotz allem gut verhalten. Andere Beispiele siehe auch Vortrag von Prof. H. J. Lang vom 5. November 1971, «SBZ» 1973, H. 35, S. 823-827.

Die Ermittlung der Durchlässigkeit in situ

Ein Grundwasserträger stellt ein Potentialfeld dar und als solcher ist er im homogenen und isotropen Baugrund und stationären Zustand von der Durchlässigkeit unabhängig. Doch ist gezeigt worden, dass für eine zweckmässige Messung des Porenwasserdruckes die Grösse der k -Werte für die Wahl des Piezometers bestimmt ist. Jeder Bauzustand im Grundwasser kann als stationärer oder instationärer Zustand einer Grundwasserströmung angesehen werden, je nachdem der Boden sehr durchlässig oder undurchlässig ist. Die Kenntnis des k -Wertes des Bodens ist wichtig; bei der Bestimmung muss aber mit grossen Streuungen gerechnet werden. Sie werden durch die Inhomogenität des Bodens verursacht. Bild 13 gibt eine Klassifikation der Durchlässigkeiten des Bodens. In Bild 14 sind die Formeln zur Bestimmung der Durchlässigkeit im Bohrloch für verschiedene Bodenverhältnisse und Versuchsanordnungen angegeben. Um einen Versuch auszuwerten, muss man das Bohrprofil kennen. Je nach dem Bodenaufbau ist auch die Formel zu wählen. Die Formel zur Ermittlung des k -Wertes gibt es nicht. Doch kann man alle auf ähnliche Weise auswerten; denn es handelt sich immer um das Erfassen des Gradienten für die Formel von Darcy, die je nach Austrittsform verschieden ist.

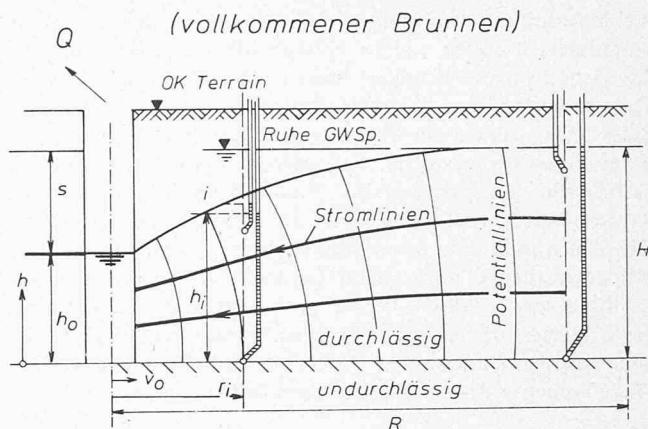
Die Praxis zeigt, dass die Anwendung am zuverlässigsten ist, wenn die einzelnen Ablesungen eines Versuches graphisch ausgeglichen werden und der k -Wert nach diesem Mittelwert ausgerechnet wird, Bild 15. Die Durchlässigkeit wird am besten durch einen Pumpversuch mit einer Anzahl Piezometer ermittelt, Bild 16. Der Pumpversuch kann ebenfalls nach einem graphischen Ausgleich ausgewertet werden, wie dies in Bild 17 gezeigt ist.

Die Bestimmung der Durchlässigkeit, wie sie hier beschrieben ist, erlaubt im besten Falle noch Werte von 10^{-5} cm/s zu erfassen; für kleinere Werte sind die Ablesungen zu klein und ungenau (1 cm/Tag) oder die theoretischen Voraussetzungen sind nicht mehr erfüllt. Das betrifft Pumpversuche, Absenk- und Steigversuche. Wenn es sich nur darum handelt, den Wasserandrang zu bestimmen, sollten diese Versuche genügen, denn bereits bei $k = 10^{-4} \text{ cm/s}$ beträgt die Pumpwassermenge in einer Baugrube von 5000 m^2 rd. 1 l/s. Bei kleineren Durchlässigkeiten spielt einerseits die Zeit, bis die Entwässerung wirksam wird, eine Rolle und andererseits wird die Menge an freiem Wasser, das gravimetrisch entnommen werden kann, immer kleiner. Die Reichweite des Brunnens nimmt ebenfalls mit der Durchlässigkeit des Bodens ab. Nach Theis ist die Reichweite R :

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{H \cdot k \cdot t}{n_s}}$$

n_s als wirksame Porosität eingesetzt.

Bei wenig durchlässigen Böden, z.B. Silt, bewirkt nicht die Menge an gefördertem Wasser die gewünschte Verbesserung der Baugrundverhältnisse, sondern vielmehr die Änderung des Sickernetzes, des Potentials und der Richtung der Strömungskräfte. Als Beispiel hierzu möge die Stabilitäts-



Situation der Piezometer

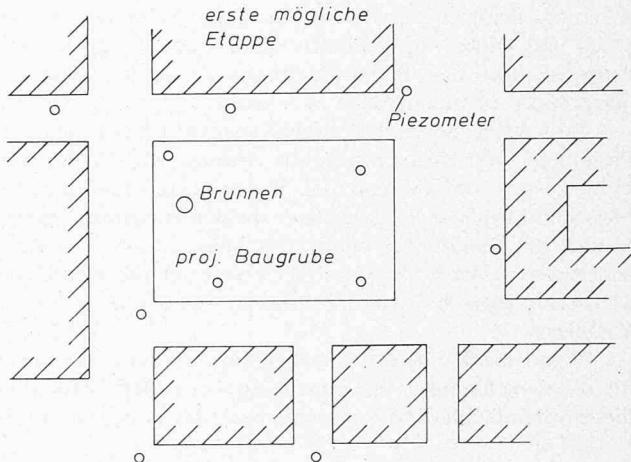
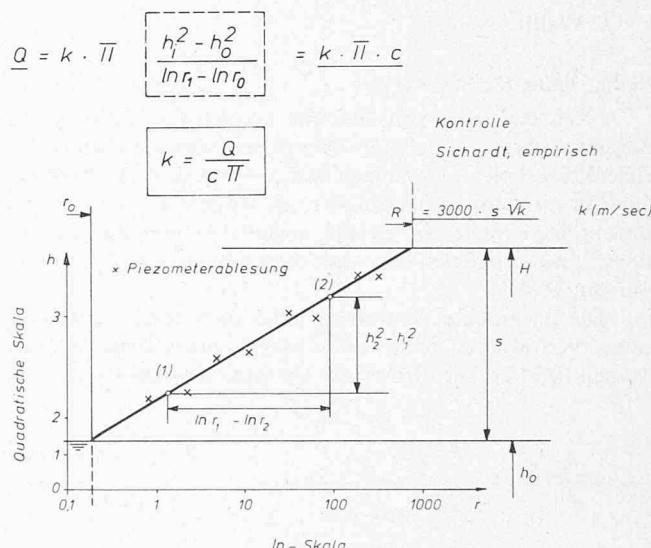


Bild 16. Pumpversuch (vollkommenen Brunnen) zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Untergrundes



Kontrolle durch Formel von Theis:

$$R = 1,5 \sqrt{\frac{H \cdot k \cdot t}{n_s}}$$

Bild 17. Auswertung eines Pumpversuches durch graphischen Ausgleich. Zum Beispiel Messungen des 10. Tages nach Pumpbeginn mit konstanter Absenkung im Brunnen

verbesserung durch horizontale Drains gelten. Bei sehr wenig durchlässigen Böden, wie Tone, ist ebenfalls eine Beeinflussung des Grundwassers möglich; doch ist die Durchlässigkeit der Tone so gering, dass die Veränderung des Potentials zu neuen Belastungen führt, die im tonigen Boden nur Porenwasserspannungen hervorrufen. Mit anderen Worten: der Weg zur natürlichen Verbesserung des Tones führt immer über die Konsolidation. Sie allein kann die Scherfestigkeit erhöhen. Die Zeit, die hierfür notwendig ist, kann an Hand der Konsolidationstheorie abgeschätzt werden. Auch für diesen Fall ist die Kenntnis des k -Wertes notwendig. Die Bestimmung des k -Wertes für wenig durchlässige bis undurchlässige Böden kann mit dem eingebauten Piezometer vorgenommen werden. Die Geometrie des Filterbettes muss bekannt sein.

Kontrollen

Zu den eingangs erwähnten Grundsätzen der Prospektion sind zwei weitere hinzuzufügen, die jeder Ingenieur beherzigen sollte. Schon bei der Festlegung des Untersuchungsprogrammes muss sich der Ingenieur die Frage stellen: «wie sollen die Beobachtungen und Messungen während der Bauarbeit und später vorgenommen werden, damit die getroffene Prognose über den Baugrund überprüft werden kann, um nötigenfalls sofort eingreifen zu können?»

Zu solchen Beobachtungsinstrumenten gehören auch die Piezometer und Versuchsbrunnen. Darum sind sie so anzurichten, dass sie während des Bauzustandes funktionieren. Mancher Ingenieur vergisst, dass die Untersuchung nur ein Modell des Baugrundes ergibt. Terzaghi schrieb: «Unglücklicherweise ist der Boden durch die Natur und nicht durch den Menschen gemacht und das Produkt der Natur ist immer komplex».

Wenn die Komplexität des Bodens erkannt ist, müssen für die Berechnungen Vereinfachungen getroffen werden. Ob dieses vereinfachte Bild der Natur bzw. das Baugrundmodell,

das den Berechnungen zu Grunde lag, mit den Gegebenheiten übereinstimmt, ist durch Beobachtungen und Messungen zu überprüfen. Damit die Abweichungen und ihre Größen kontrolliert werden können, muss das Baugrundmodell übersichtlich dargestellt werden.

Die Natur ist komplex und auch die beste Prospektion ergibt nur ein Modell. Daraus ziehen wir die Lehre für den nächsten Grundsatz:

Aus der gegebenen geotechnischen Lage und infolge des Bauvorhabens können unvorhergesehene Auswirkungen auf das eigene Bauwerk sowie auf Nachbarbauwerke auftreten. Die möglichen Auswirkungen sind abzuschätzen und die Wahrscheinlichkeit deren Eintretens anzugeben.

Literaturverzeichnis

L. Bjerrum, A. W. Bishop: 1960, Publikation 43, Norwegisches Geotechnisches Institut, Blindern, Oslo.

R. E. Gibson: 1963, An Analysis of System Flexibility and its Effect on Time-log in Pore-water pressure Measurements. «Géotechnique», vol. XIII, 1963.

M. J. Hvorslev: 1948, Subsurface Exploration on Sampling of Soils for Civil Engineering Purpose. W. E. S. Wicksbury, Miss.

H. J. Lang: 1973, Aufschlüsse zur Feststellung der Art und der Eigenarten des Baugrundes. «Schweiz. Bauzeitung» 91 (1973), H. 35, S. 823-827. 1968: Hydraulique des Sols. «Bulletin des Laboratoires routiers» (1968).

K. Terzaghi, R. B. Peck: 1967, Soil Mechanics in Engineering Practice, Second Edition, John Wiley & Sons INC, New York.

Ch. V. Theis: 1935, The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground-water storage. U.S. Geological Survey.

Schweizerische Gesellschaft für Bodenmechanik und Fundationstechnik, Publikation Nr. 67. Richtlinien: Bodensondierungen und Feldversuche.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. J. Huder, IGB, ETH Zürich, Gloriastrasse 37-39, 8006 Zürich.

Momenteneinflussflächen für Flächentragwerke

Modellstatische Ermittlung

Von E. Wälli, Arbon

DK 624.074.5

Einflusslinien für Stabwerke

Nach dem Satz von Maxwell können Einflusslinien für Biegemomente in Durchlauf- oder Bogenträgern mit Hilfe von Gelenkbiegelinien sehr einfach bestimmt werden. Die Einflusslinie für ein Moment ergibt sich als Biegelinie, wenn an der gewünschten Stelle ein Gelenk angebracht und die Schnittstellen gegeneinander um das Bogenmass $\alpha = 1$ verdreht werden (Bild 1).

Die gewünschte Verdrehung kann auch durch Verwenden eines Verformers, ohne ein Gelenk einzubauen, erzeugt werden (Bild 2). Die Grösse des Verformungswinkels α^* ist so

zu wählen, dass das elastische Verhalten des Modells erhalten bleibt.

Einflussflächen für Flächentragwerke

Die Verformermethode ist auch auf Platten und Schalen anwendbar, um an Stelle von Einflusslinien Einflussflächen zu erhalten, dies analog zu den Einflusslinien für Stabwerke.

Praktisch wird am besten so vorgegangen, dass an der Stelle, an der die Einflussfläche gesucht wird, ein kleines Loch gebohrt und der Verformer dort angebracht wird. Durch diesen

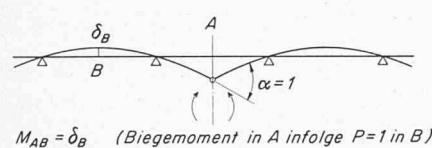


Bild 1 Gelenkbiegelinie

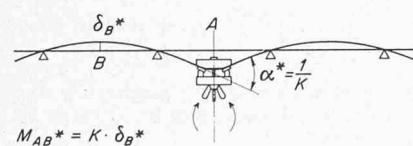


Bild 2. Verformerbiegelinie

Bild 3 (rechts). Momentenverformer für Flächentragwerke

