

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Zweck, Heinz

Baugrunduntersuchungen mit Sonden gemäß DIN 4094 mit Auswertungsmöglichkeiten

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103088>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Zweck, Heinz (1966): Baugrunduntersuchungen mit Sonden gemäß DIN 4094 mit Auswertungsmöglichkeiten. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 24. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 83-106.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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



Regierungsbaudirektor Dr.-Ing. Heinz Zweck

Baugrunduntersuchungen mit Sonden

gemäß DIN 4094 mit Auswertungsmöglichkeiten*)

*) Vortrag während eines Baufachseminars über "Praktische Fragen des Baugrundes" in der Technischen Akademie Bergisch Land.

G l i e d e r u n g

1. Einleitung
2. Ramm- und Drucksondiergeräte
3. Wahl des Gerätes
4. Anwendung der Sondierungen
 - 4.1 Ermittlung von Schichtgrenzen
 - 4.2 Ermittlung von bodenphysikalischen Kennziffern
 - 4.2.1 Vorgänge beim Sondieren
 - 4.2.2 Ermittlung der Lagerungsdichte
 - 4.2.3 Ermittlung der Konsistenz bindiger Böden
 - 4.2.4 Ermittlung der Tragfähigkeit und des Setzungsverhaltens von Flachgründungen
 - 4.3 Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen mit Hilfe der Drucksondierung
5. Flügelsonden und Isotopensonden
6. Zusammenfassung
7. Schrifttum

1. Einleitung

Baugrunduntersuchungen werden vor Beginn jedes größeren Bauvorhabens durchgeführt, da man erkannt hat, daß nur auf diese Weise eine technisch richtige Bauweise erreicht werden kann. Die Erfahrung hat darüber hinaus gezeigt, daß erhebliche Mittel eingespart werden, wenn die Ergebnisse der Baugrunduntersuchungen bei dem Entwurf berücksichtigt werden, ganz abgesehen von den Kosten, die bei späteren Schäden entstehen könnten.

Im allgemeinen werden zur Erkundung des Baugrundes Bohrungen oder Schürfungen niedergebracht und die dabei gewonnenen gestörten und ungestörten Bodenproben untersucht. Hierbei werden, soweit möglich, die bodenphysikalischen Kennziffern ermittelt, die zur Aufstellung des Bauentwurfes mit den dazugehörigen erdstatischen Berechnungen notwendig sind. In vielen Fällen werden aber außerdem noch an Ort und Stelle ergänzende Untersuchungen durchgeführt. Hierzu gehören vor allem die Sondierungen mit den Ramm- und Drucksondiergeräten, die ich heute behandeln möchte.

Da die Sondierungen, vor allem die Rammsondierungen, empirisch ausgewertet werden, hängen die Ergebnisse sehr von den Abmessungen und der Arbeitsweise der Sonde ab. Ergebnisse, die mit verschiedenen Sonden gewonnen wurden, können nicht ohne weiteres miteinander verglichen werden. Auf Anregung von Herrn Oberbaudirektor i.R. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Lohmeyer gründete daher die Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau im Jahre 1955 den Arbeitskreis "Sonden", der gleichzeitig Arbeitsausschuß im Fachnormenausschuß Bauwesen wurde. Er hat als erstes die DIN 4094 Bl. 1 herausgebracht, in dem die Abmessungen und die Arbeitsweise der in Deutschland üblichen Ramm- und auch Drucksondiergeräte genormt worden sind. Im Anschluß daran ist das Blatt 2 über Hinweise für die Anwendung erarbeitet worden [1] [2].

Wenn nun ein neues Gerät eingeführt oder ein altes Gerät aus seinem Winterschlaf aufgeweckt wird, dann gibt es immer einen Kreis, der die Augen vor dieser Neuentwicklung verschließt und sich nicht darum kümmert, und wieder einen anderen, der diese Neuerung begierig aufgreift und ohne allzu große Kritik und Sachkenntnis verwendet. So werden an vielen Stellen Sondierungen durchgeführt, wo sie überhaupt nicht auswertbar sind, an anderen Stellen aber Sondierungen unterlassen, wo sie sicher wertvolle Aufschlüsse geben könnten.

In meinen Ausführungen werde ich zunächst auf die Ramm- und Drucksondiergeräte und ihre Arbeitsweise eingehen - soweit die Geräte in die DIN 4094 aufgenommen sind - und

dann über ihre Anwendungsmöglichkeiten und die Auswertung der Ergebnisse sprechen.

2. Ramm- und Drucksondiergeräte

Die leichte und schwere Rammsonde unterscheiden sich vor allem durch die Größe des Rammgewichtes, das bei der leichten Rammsonde 10 kp und bei der schweren 50 kp beträgt. Die Fallhöhe ist jeweils 50 cm (Abb. 1).

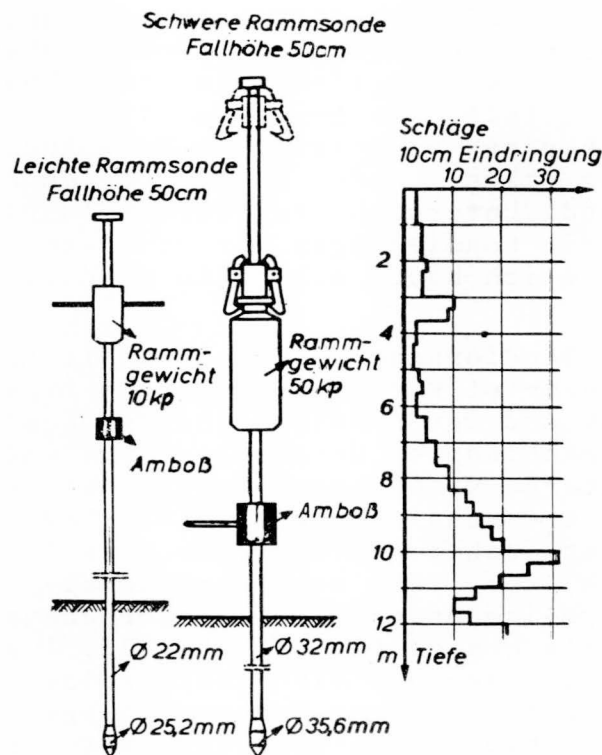


Abb. 1 Leichte und schwere Rammsonde nach DIN 4094 Blatt 1

Außerdem haben die Spitzen verschieden große Querschnittsflächen, 5 und 10 cm² bei der leichten und 15 cm² bei der schweren Rammsonde. In allen Fällen ist der Spitzendurchmesser größer als der des Gestänges. Abb. 2 zeigt die in der Bundesanstalt für Wasserbau verwendete leichte und schwere Rammsonde. Während bei der leichten Rammsonde das Rammgewicht mit Hand gehoben wird, erfolgt das Heben des Gewichtes der schweren Rammsonde mit Hilfe einer Winde. Die Schlagvorrichtung der schweren Rammsonde ist auf einem



Abb. 2a
Leichte Rammsonde der BAW

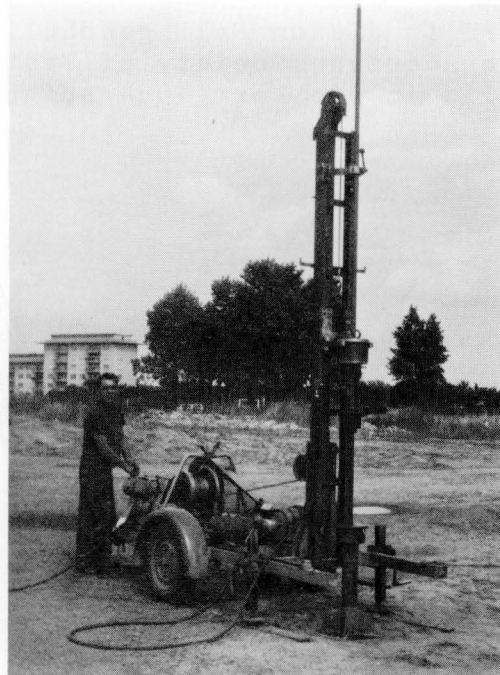


Abb. 2b
Schwere Rammsonde der BAW

1-Achsanhänger aufgebaut. Ein Elektromotor treibt gleichzeitig eine Seilwinde und einen kleinen Kompressor. Das Seil läuft von der Winde über eine Rolle an der Spitze eines umlegbaren Mäklers, an dem hiermit ein Schlitten gehoben und gesenkt werden kann. An diesem Schlitten ist eine Schere, die beim Herablassen des Schlittens über den 50 kg Rammbaren gleitet und diesen beim Heben an seiner Unterseite festhält. Hebt die Winde den Schlitten mit gefaßtem Bär um 50 cm, so öffnet ein Preßluftschieber die Schere und läßt den Bär frei fallen. Der Gerätführer läßt durch Umsteuerung der Winde den Schlitten mit Schere wieder ab, faßt den Bären und der beschriebene Vorgang wiederholt sich.

Bei einer Rammsondierung werden gewöhnlich die Anzahl der Schläge je 10 cm Eindringung gezählt. Entsprechend werden auch die Ergebnisse einer Sondierung aufgetragen (Abb. 1). Eine Umrechnung dieser Ergebnisse mit Hilfe einer Rammformel bringt keine Vorteile, zumal die Auswertung der Rammsondierungen empirisch erfolgt und die Rammformeln wegen der darin enthaltenen Vereinfachungen keine zuverlässigen Ergebnisse bringen.

Die Sondierungen mit den genannten Rammsonden werden gewöhnlich von der Geländeoberfläche oder von der Sohle einer Baugrube aus ausgeführt. Sie können aber auch in einem Bohrloch angesetzt werden. Statt der schweren Rammsonde

wird in diesem Fall gewöhnlich die sogenannte Standardsonde der American Society of Testing Materials benutzt, die ebenfalls in die Norm 4094 aufgenommen ist (Abb. 3)

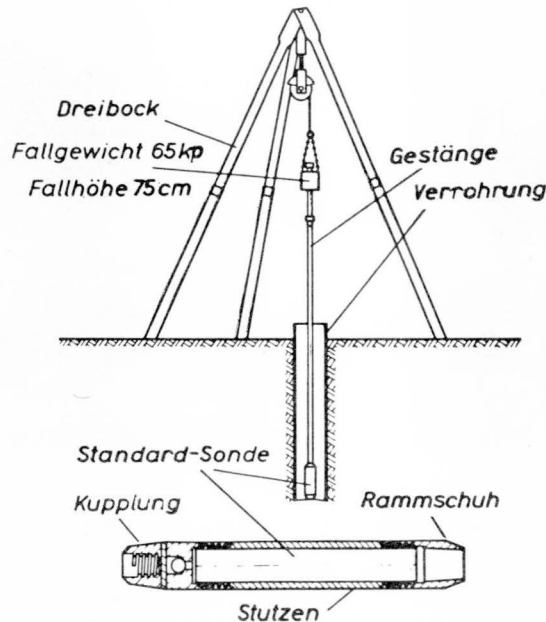


Abb. 3 Standard Penetration Test

Diese Sonde wird mit einer Gewichtskraft von 63,5 kp bei einer Fallhöhe von 76,2 cm im Bohrloch in den Boden gerammt. Die hohe, etwa 50 cm lange Sonde hat einen Außendurchmesser von 50,8 mm und einen Innendurchmesser von 34,9 mm. Sie gestattet die gleichzeitige Entnahme von Bodenproben. Beim Einrammen wird nach einer Eindringung von 15,2 cm (1/2 Fuß) die Anzahl der Schläge je 30,5 cm (1 Fuß) gemessen und der Auswertung zugrunde gelegt. Diese Sonde kann auch nach Aufsetzen einer Spitze als reine Spitzensonde verwendet werden. Für die Beurteilung der Ergebnisse ist es wichtig, wie diese Sonde eingerammt wird, ob z.B. der Bär, wie beim amerikanischen Verfahren, über Gelände angesetzt wird oder in einem Bohrloch dicht über der eigentlichen Sonde wirkt. Ebenso ist es von ausschlaggebender Bedeutung, wie das Bohrloch selbst hergestellt wird und welchen Durchmesser es hat. Ganz falsche Ergebnisse werden erhalten, wenn z.B. durch ins Bohrloch strömendes Grundwasser der Boden unter der Bohrlochsohle aufgelockert wird. Der Ausdruck Standardsonde darf nicht zu der Ansicht verleiten, daß die Sondierungen jeweils in gleicher Art durchgeführt werden und daher gleiche Ergebnisse bringen.

Bei der Drucksondierung wird eine Sonde durch eine statische Kraft mit gleichbleibender Geschwindigkeit von 0,2 bis 0,4 m/Min in den Boden gedrückt, wobei der Gesamtwiderstand und der Spitzenwiderstand getrennt gemessen werden können. Für bestimmte Aufgaben genügt es allerdings, den Spitzenwiderstand allein zu bestimmen.

Nach der DIN 4094 ist die Querschnittsfläche der Sonde mit 10 cm^2 und der Spitzenöffnungswinkel mit 60° festgelegt. Die Länge des Schaftes, soweit er dieselbe Querschnittsfläche behält, soll etwa 11 cm betragen.

Die Messung des Spitzenwiderstandes kann auf verschiedene Weise erfolgen. Die Sondenspitze der Firma Gouda, Holland, sitzt an einer inneren Stange mit einem Durchmesser von 15 mm, die in dem Sondengestänge (Durchmesser 36 cm) bis oben hochgeführt wird. Das Gestänge verjüngt sich im unteren Teil und wird vom Schutzmantel der Spitze umschlossen. Beim Sondieren wird zunächst Spitze und Mantel zusammen bis zur gewünschten Tiefe gedrückt. Dann wird die Spitze allein um 6,75 cm vorgedrückt. Anschließend wird der Mantel nachgeschoben. Die Kräfte zum Eindringen der Spitze oder des Gesamtwiderstandes können mit einem Manometer gemessen werden.

Die Drucksonde, wie sie in der Bundesanstalt für Wasserbau verwendet wird, zeigt die Abb. 4.

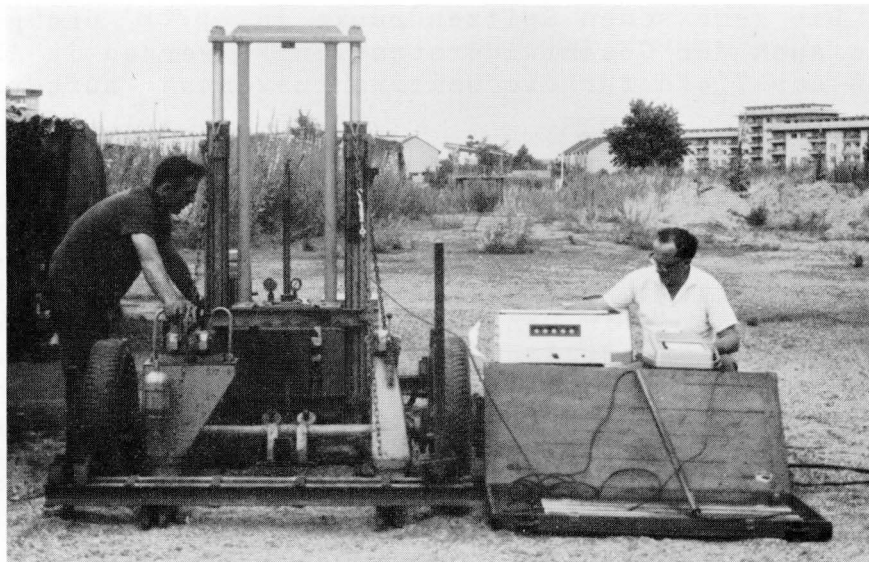


Abb. 4 Drucksonde der B A W

Sie ist mit einer Maihak-Spitze ausgerüstet, die mit Hilfe einer elektrischen Meßeinrichtung eine laufende Messung des Spitzenwiderstandes während des Eindrückens erlaubt. Der Antrieb der Drucksonde erfolgt hydraulisch. Hierzu sind auf einem Einachsanhänger ein elektrisch angetriebenes Ölpumpenaggregat und zwei senkrecht stehende Hydraulikzylinder aufgebaut. Zwischen den beiden Zylindern ist ein rechteckiger Rohrrahmen eingebaut, dessen Steifheit einen mechanischen Gleichlauf der Kolbenstangen der Hydraulikzylinder gewährleisten soll. An der unteren Quertraverse des Rohrrahmens befindet sich ein Hydraulikschloß, das zum Festhalten der Sondenstangen dient und diese auch bei 5 MP vertikalem Druck hält. Beim Sondieren kann der jeweils in den Boden zu drückende Meter der Sondenstange an jeder beliebigen Stelle mit dem Schloß gefaßt werden. Sitzt das Schloß kurz unterhalb des oberen Endes der Sondenstange, so kann auf diese während des hydraulischen Eindrückens die nächste Meterstange aufgeschraubt werden. Ist das gefaßte Sondenstück tief genug eingedrückt, so wird das Schloß durch Hebelsteuerung gelöst und dieses mit dem Rohrrahmen durch die beiden senkrechten Hydraulikzylinder so weit wie zweckmäßig hochgefahren. Dann wird die Sondenstange mit dem Schloß neu gefaßt und durch Umsteuerung des Zylinders nach unten gedrückt. Das Ziehen des Sondengestänges erfolgt in gleicher Weise aber umgekehrter Reihenfolge. An einem gesonderten Abzweig des Ölpumpenaggregates kann mit entsprechenden Schläuchen ein Ölmotor angeschlossen werden, mit dessen Hilfe die Erdanker eingedreht werden können. Mit diesen wird der Einachsanhänger gegen den nach oben gerichteten Druck am Boden verankert.

Die gemessenen Spitzendrücke in kp/cm^2 und gegebenenfalls auch der Gesamtwiderstand in kp werden in Abhängigkeit von der Tiefe für die weitere Auswertung aufgetragen.

Durch Inkrafttreten der DIN 4094 ist die Entwicklung der Ramm- und Drucksondiergeräte selbstverständlich nicht abgeschlossen. Sie geht u.a. darauf hin, die Handarbeit durch Maschinenarbeit zu ersetzen und die Meßergebnisse automatisch aufzuschreiben. Wird die Sonde z.B. durch Schnellschlaghammer in den Boden getrieben, wie dieses bei der sogenannten "Schnellschlagsonde" der Fall ist, so ist das Ergebnis dieser Sondierung nicht mehr mit denen der genormten vergleichbar, da sich nun ganz andere Vorgänge im Boden abspielen. Die Auswertung der Ergebnisse dieser Sonden muß entsprechend nach anderen Gesichtspunkten erfolgen.

In dem Arbeitsausschuß "Sonden" verfolgen wir die neuere Entwicklung auf dem Gebiet der Sonden und werden gegebenenfalls auch die Abmessungen und Arbeitsweise weiterer Geräte festlegen.

3. Wahl des Gerätes

Die Wahl des Gerätes richtet sich nach dem Zweck der Untersuchung, nach der erforderlichen Untersuchungstiefe, sowie nach der Art und Beschaffenheit des Bodens.

Die leichte Rammsonde ist die geeignetste Sonde für Untersuchungen, die schnell und mit geringem Aufwand durchgeführt werden sollen. Dieses Gerät ist ja sofort einsetzbar und so leicht, daß es von einem Mann bedient werden kann. Es braucht auch keine Verankerung oder Belastung wie die Drucksonde. Die Tiefe, bis zu der eine Sondierung mit diesem Gerät ausgeführt werden kann, liegt bei nicht zu dicht gelagerten oder zu groben Bodenarten bei etwa 8 m. Da mit wachsender Sondiertiefe das Gestängegewicht laufend größer wird, wachsen die durch den Fall des Bären zu bewegendenden Massen. Sie zehren in zu großer Tiefe die Energie des Fallgewichtes auf, so daß schon aus diesem Grunde nicht beliebig tief sondiert werden kann. Sind allerdings weiche Schichten zu durchfahren, um Schichtgrenzen mit tieferliegenden festeren Böden festzustellen, können selbstverständlich auch mit der leichten Rammsonde größere Tiefen erreicht werden. Bei schwer zu durchrammenden Böden muß auf die schwere Rammsonde zurückgegriffen werden. Auch hier hängt die tatsächliche Sondiertiefe von der Festigkeit des Bodens und dem Zweck der Untersuchungen ab. Tiefen von 20 m gehören zu den üblichen Sondiertiefen.

Die Drucksonden erlauben im Gegensatz zu den Rammsonden eine weitergehendere Auswertung der Ergebnisse, weil die Vorgänge beim Eindringen der Sonde nicht so schwer erfassbar sind wie die beim Einrammen. Außerdem kann hier der Spitzenwiderstand getrennt von der Mantelreibung gemessen werden. Die Tiefe, bis zu der sondiert werden kann, hängt auch hier von der Festigkeit des Bodens, dann aber auch von dem maximalen Druck ab, für den die Sonde ausgelegt ist, und von der Größe des Gegengewichtes, die entweder durch Anker oder durch Ballast maximal aufgebracht werden kann. Die Drucksonde ist ein Gerät, das sich vor allem in feinkörnigen Böden bewährt hat.

4. Anwendung der Sondierungen

4.1 Ermittlung von Schichtgrenzen

Sondierungen, vor allen Dingen mit der leichten Rammsonde, die sehr gut transportabel und schnell einsetzbar ist, sind ein ausgezeichnetes Mittel, um den Baugrund zwischen vorhandenen Bohrungen zu überprüfen und so den ge-

nauen Schichtenverlauf festzustellen. Bei Wechsel verschiedenen fester Schichten ergeben sich deutlich ein sprunghaftes Ansteigen oder Abfallen des Sondierwiderstandes.

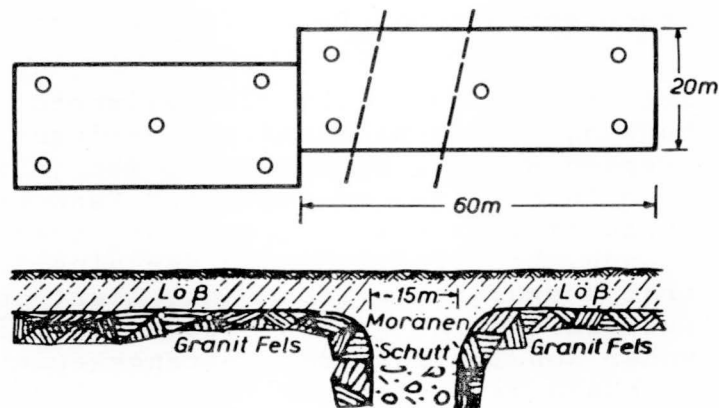


Abb. 5 Ansatz von Bohrungen, bei denen eine Felsspalte nicht erfaßt wurde (nach [20])

Die Abb. 5 zeigt ein Beispiel, bei dem durch eine Rammsondierung Bauverzögerungen und erhebliche zusätzliche Gründungsmaßnahmen hätten erspart werden können. Die für die beiden Bauwerke niedergebrachten 10 Bohrungen zeigten überall unter einer Lößlehmschicht von etwa 3 m Tiefe Granitfels. Zunächst wurde das linke Gebäude errichtet, dann begann man mit dem Bau des rechten Gebäudes. Beim Baugrubenaushub, als schon die rechte Seite dieses Gebäudes zum Teil stand, wurde eine 15 m breite mit weichem Moränenschutt ausgefüllte Felsspalte festgestellt. Ein Verschieben des Bauwerkes war zu diesem Zeitpunkt nicht mehr möglich. So mußte man zusätzlich kostspielige Gründungsarbeiten durchführen, um unterschiedliche Setzungen und Risse im Gebäude zu vermeiden. Durch Sondierungen mit der leichten Rammsonde hätte man mit geringem Aufwand in kurzer Zeit diesen Spalt ausmachen können.

Die Bestimmung der Grenze zwischen Schichten unterschiedlicher Festigkeit spielt auch bei Bodenuntersuchungen eine Rolle, die nicht mit Gründungsfragen in Zusammenhang stehen. So konnten mit der schweren Rammsonde im Rheinbett oberhalb des Binger Loches, wo wegen der geplanten Verbesserung der Schifffahrtslinie Baggerungen notwendig werden, die hierfür wichtige Grenze zwischen der Überlagerungsschicht aus Sanden und Kiesen und den darunter anstehenden Fels schnell und eindeutig festgestellt werden.

Muß eine Sondierung wegen zu großen Bodenwiderstandes in einer bestimmten Tiefe abgebrochen werden, so ist gegebenenfalls durch Bohrungen zu überprüfen, ob nicht unter-

halb der angetroffenen sehr festen Schicht eine weichere ansteht, die einen Einfluß auf das projektierte Bauwerk haben könnte,

4.2 Ermittlung von bodenphysikalischen Kennziffern

4.2.1 Vorgänge beim Sondieren

Um ein Urteil über die Verwendbarkeit der Sonde zur Ermittlung bestimmter bodenphysikalischer Kennziffern zu erhalten, müssen wir uns die Vorgänge klar machen, die beim Einrammen bzw. Eindrücken der Sonde im Boden ablaufen.

Wird die Sonde in einem nicht bindigen Boden - wie Sand und Kies - gerammt, so wird der Boden unter der Spitze je nach seiner Lagerungsdichte mehr oder weniger zusammengedrückt und zur Seite gedrängt.

Sind die Böden wassergesättigt und haben auf Grund ihrer Feinkörnigkeit eine sehr geringe Durchlässigkeit, vor allem bei bindigen Böden, so werden die Vorgänge durch die bei dem verhältnismäßig schnellen Sondieren auftretenden Porenwasserdrücke beeinflusst. Sie verhindern einmal eine Zusammendrückung des Bodens und dann eine Erhöhung der Scherfestigkeit bei den auftretenden Druckbeanspruchungen. Da der Boden beim Auftreten des Porenwasserdruckes zunächst sich nicht komprimiert, fließt er bei nicht verrohrten Sonden um die Spitze und erzeugt eine große Mantelreibung, die stetig zunimmt.

Bei nicht bindigen Böden macht sich die Mantelreibung an dem Gestänge bei Sondierungen über Wasser kaum bemerkbar, da die Sondenspitze verdickt ist und das Sondierloch nicht zusammenfällt. Der Grund für das Stehenbleiben der Löcher liegt an der Verzahnung der Körner, dann aber auch an der sogenannten scheinbaren Kohäsion durch die Kapillarkräfte in diesem doch praktisch immer feuchten Boden. Bei Sondierungen unter Wasser können die Sondierlöcher bereits beim Sondieren zusammenfallen und damit die Mantelreibung mit zunehmender Sondiertiefe vergrößern.

Die Mantelreibung kann bei den Rammsonden durch Verrohrung der Sonde ausgeschaltet werden. Bei den Drucksonden, bei denen der Spitzenwiderstand getrennt gemessen wird, spielt die Mantelreibung bei der Auswertung keine Rolle.

Aus dem oben Genannten geht hervor, daß Sondierungen nur ausgewertet werden können, wenn die Bodenarten bekannt sind; in denen sondiert wird. Sondierungen können also nicht Bohrungen ersetzen, sondern liefern zusätzliche Aus-

künfte über bestimmte Bodeneigenschaften, über die später berichtet wird.

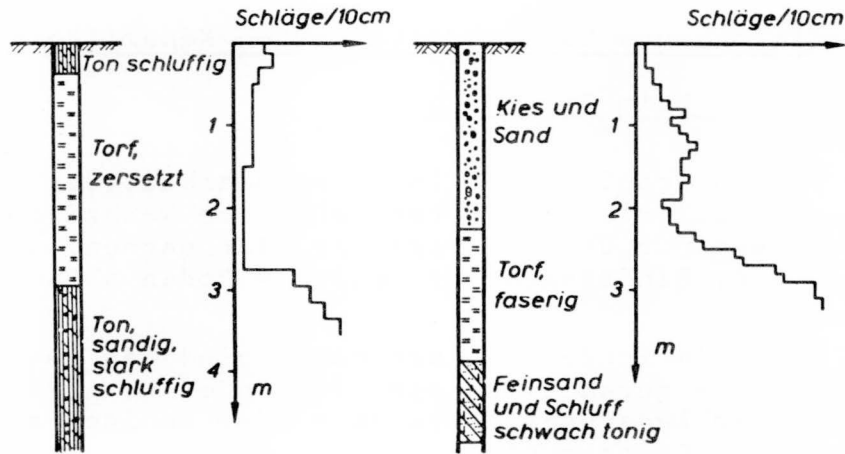


Abb. 6 Einfluß von Torfschichten verschiedener Zusammensetzung auf die Rammsondierergebnisse (nach [2])

Bei der Sondierung, die auf der Abb. 6 rechts aufgetragen ist, ergaben sich zunächst geringe und dann sehr stark zunehmende Schlagzahlen. Ohne die Kenntnis, daß sich unter der oberen Sand-Kies-Schicht ein faseriger Torf befindet, hätte man auf Grund der Sondierung geschlossen - und in einem Fall ist es auch tatsächlich geschehen - daß hier der Sand in ganz besonders dichter Lagerung ansteht. In Wirklichkeit sind die hohen Schlagzahlen auf den faserigen Torf zurückzuführen, der wegen seiner Elastizität in dieser Art durch einen hohen Widerstand auf die Rammsonde reagiert. Daß ein nicht zersetzter Torf nur geringe Schlagzahlen bringt, zeigt die Abb. 6 links.

Verschiedentlich müssen Sondierungen abgebrochen werden, weil der Eindringwiderstand zu groß ist. Es kann sich hierbei um stark verockerte Sandschichten oder andere festere Schichten handeln, die noch von weicheren unterlagert werden. Man darf aus hohen Sondierwiderständen nicht schließen, daß die angetroffene Schicht großer Festigkeit auch nach der Tiefe weiter sich fortsetzt und muß sich gegebenenfalls durch Bohrungen über die Schichten in größerer Tiefe ein Bild verschaffen, soweit dies für den betrachteten Fall erforderlich ist. Angaben über die erforderlichen Untersuchungstiefen bei Gründungen von Bauwerken sind in DIN 1054 enthalten.

4.2.2 Ermittlung der Lagerungsdichte

Wie ich vorher bei den Sondierungen im nichtbindigen Boden ausführte, ist der Eindringwiderstand von Sonden umso kleiner, je größer die Zusammendrückbarkeit und je geringer die Scherfestigkeit gegen ein Verdrängen ist. Beides ist bei einer lockeren Lagerung gegeben. Die umgekehrten Verhältnisse gelten für einen dicht gelagerten, nichtbindigen Boden. Aus diesen Gründen hat sich auch die beste Korrelation zwischen Sondierwiderstand und Bodeneigenschaft für die Beziehung zwischen Sondierwiderstand und Lagerungsdichte ergeben.

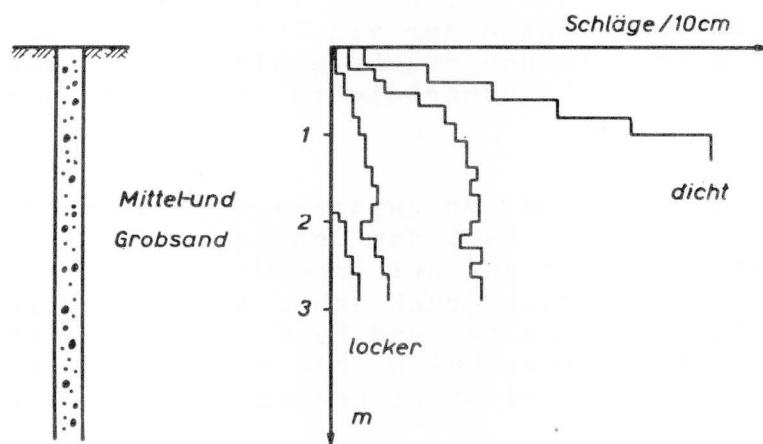


Abb. 7 Einfluß der Lagerungsdichte von Sanden auf die Rammsondiererergebnisse (nach [2])

Die Abb. 7 stellt Ergebnisse von Sondierungen mit der leichten Rammsonde in Schüttungen aus Mittel- und Grobsand über Wasser dar. Sie sind in einer Versuchsgrube der Bundesanstalt für Straßenbau durchgeführt worden, bei der die tatsächliche Lagerungsdichte durch Untersuchung ungestört entnommener Bodenproben bestimmt worden war. Die Kurven zeigen für jede Tiefe, daß mit wachsender Lagerungsdichte der Eindringwiderstand, also die Schlagzahlen je 10 cm Eindringung zunehmen. Außerdem ergibt sich, daß der Eindringwiderstand mit der Tiefe zunächst stark wächst und dann nahezu konstant bleibt. Dies zeigt sich besonders deutlich bei der Sondierung bei mitteldichter Lagerung.

Diese Kurven stellen somit Eichkurven dar, auf Grund derer die Lagerungsdichte für diese Sandart in jeder Tiefe genau ermittelt werden kann. Es muß betont werden, daß die Eichkurve von vielen Faktoren abhängt, so von der Korngrößenverteilung, also von der Gleichförmigkeit oder Ungleichfö-

migkeit, ferner von der absoluten Korngröße und sehr wesentlich von der Form und Rauhigkeit der einzelnen Bodenkörner [11].

Die erste Beziehung zwischen Lagerungsdichte und der Schlagzahl der Standard Penetration Sonde für Sande haben Terzaghi und Peck gegeben [15]. Sie verglichen die Ergebnisse der Sondierungen mit denen von Lastplattenversuchen. Aus den Ergebnissen der Lastplattenversuche wurde die Lagerungsdichte abgeschätzt und den jeweiligen Schlagzahlen bestimmte Lagerungsdichten zugeordnet. Da die Abhängigkeit dieser Beziehung von der Untersuchungstiefe, deren Einfluß ich vorher aufzeigte, nicht berücksichtigt ist, gilt sie nur für eine bestimmte Tiefe. In weiteren Forschungsarbeiten ist der Einfluß des Überlagerungsdruckes, also der Tiefe, untersucht worden. Sie führten zu Ergänzungen der von Terzaghi und Peck angegebenen Beziehungen zwischen den Ergebnissen des Standard Penetration Test und der Lagerungsdichte und damit zu genaueren Auswertungen [16].

Die gute Korrelation zwischen dem Eindringwiderstand, ausgedrückt durch die Anzahl der Schläge je 30 cm, des Standard Penetration Testes und der Lagerungsdichte in Abhängigkeit von dem Überlagerungsdruck haben auch Schultze und Menzenbach [13] und Schultze und Melzer [14] bestätigt. Sie verglichen die Sondierergebnisse mit der Lagerungsdichte, die an gleicher Stelle an ungestört entnommenen Bodenproben ermittelt worden war.

Alle Versuchsergebnisse gelten selbstverständlich nur für die untersuchten Bodenarten. Hierauf wird auch bei der Angabe von Untersuchungsergebnissen stets hingewiesen. In der Praxis werden dann allerdings, oft zu Unrecht, diese Ergebnisse auf andere Bodenarten übertragen. Liegen andere Bodenarten vor, vor allem Böden anderer Korngröße, Kornverteilung, Rauhigkeit und Kornform, müssen entsprechende Eichversuche durchgeführt werden.

Die Ermittlung der Lagerungsdichte durch Drucksondierungen erlaubt sicherere Angaben, als sie mit Hilfe der Rammsondierungen möglich sind, vor allem deshalb, weil die Mantelreibung bei den Messungen des Spitzendruckes auf jeden Fall ausgeschaltet ist. Auf der Abb. 8 sehen Sie Versuchsergebnisse der DEGEBO Berlin, die in einem gleichförmigen, feinsandigen Mittelsand ($U = 1,5$) durchgeführt worden sind [6]. Es handelt sich um Sondierungen in einem locker verfüllten, leicht verdichteten und stark verdichteten Sand. In 2,0 m Tiefe liegen die Werte für lockeren Sand noch unter 10 kp/cm^2 . Man sieht aus diesen Kurven, daß - wie bei der Rammsondierung - die Widerstände zunächst mit der Tiefe zunehmen und von einer bestimmten Tiefe ab die Zunahme nur sehr gering ist.

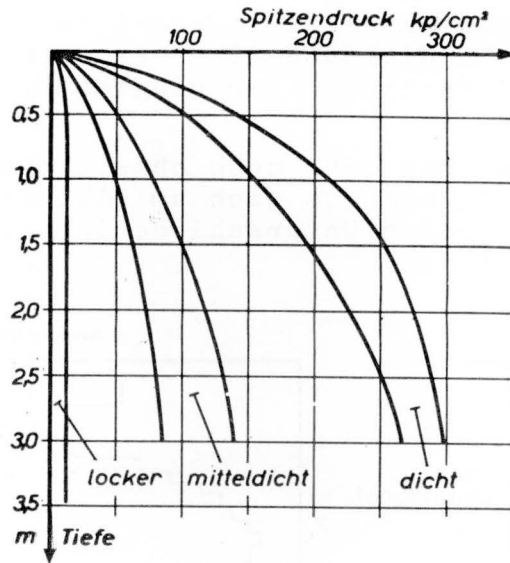


Abb. 8 Einfluß der Lagerungsdichte von Sanden auf die Drucksondiererergebnisse (nach [6])

Diese Kurven stellen also Eichkurven für den untersuchten gleichförmigen Feinsand dar. Bei anders aufgebauten Böden ergeben sich Abweichungen von diesen Kurven. So haben neuere Versuche der DEGEBO [18] für einen ungleichförmigen Sand und Kies Sondierwiderstände ergeben, die bei nicht ausgesprochen dichter Lagerung wesentlich niedriger lagen als bei dem vorher betrachteten Feinsand. Würde man also die Eichkurven für den Feinsand bei der Auswertung einer Sondierung im Sand und Kies benutzen, so würde man die Lagerungsdichte zu gering schätzen.

Als weiterer wesentlicher Faktor bei der Auswertung von Ramm- und Drucksondierungen muß die Lage des Grundwasserspiegels mit in die Auswertung einbezogen werden. Nach Erreichen des Grundwasserspiegels nimmt der Eindringwiderstand der Sonden im allgemeinen ab. Dieser Einfluß macht sich besonders stark bei locker gelagerten Böden bemerkbar. Nach Versuchen der DEGEBO [18] nimmt dieser Einfluß bei Drucksondierungen mit der Tiefe unterhalb des Grundwasserspiegels wieder ab. Er verschwindet nahezu, wenn der Grundwasserspiegel erst in Tiefen von 3 m unter Gelände beginnt.

Liegen für die zur Verfügung stehenden Ramm- oder Drucksonden Eichkurven oder aus Versuchen abgeleitete Beziehungen zwischen Eindringwiderstand und Lagerungsdichte bei Berücksichtigung der Untersuchungstiefe und sonstiger die Vorgänge beeinflussender Faktoren für die zu untersuchenden Böden vor, so ist eine genaue Ermittlung der Lagerungsdichte

gegeben. Dabei ist stets zu prüfen, ob die Sonden eingesetzt werden, für die die Auswertediagramme oder Formeln entwickelt sind, und ob die Sondierungen in derselben Art durchgeführt werden, wie bei Aufstellung der Diagramme.

Die Sonde kann aber auch ohne Eichung wertvolle Erkenntnisse liefern, wenn es sich um gleiches Material handelt, bei dem lediglich Unterschiede in der Dichte festgestellt werden sollen.

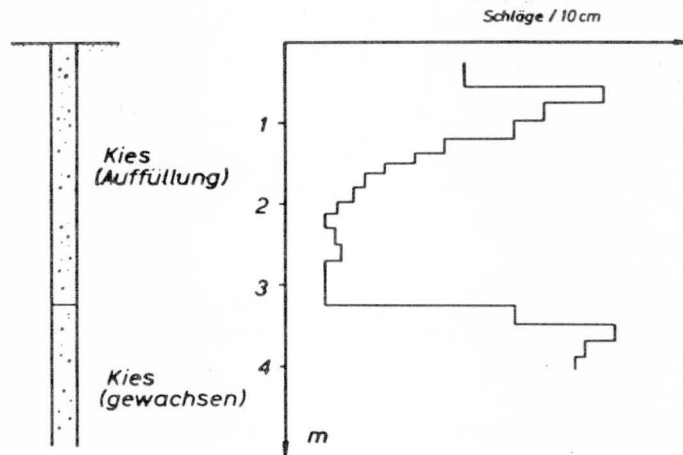


Abb. 9 Nachprüfung der Lagerungsdichte einer Grabenverfüllung durch Rammsondierungen (nach [2])

Die Abb. 9 zeigt ein Beispiel für eine Sondierung in einem mit Kies aufgefüllten 3,20 m tiefen Leitungsgraben. Die Sondierung mit der leichten Rammsonde zeigt in diesem gleichmäßigen Schüttmaterial mit der Tiefe abnehmende Schlagzahlen und damit eine Verringerung der Lagerungsdichte. Sie ist darauf zurückzuführen, daß die verhältnismäßig dicke Schicht in dem engen Graben lediglich von der Oberfläche aus verdichtet worden ist.

Es wird in der Praxis vielfach angenommen, daß aus den Schwierigkeiten beim Bohren auf die Lagerungsdichte geschlossen werden kann. Auch werden vom Bohrmeister oft entsprechende Angaben in den Schichtenverzeichnissen gemacht. Die Schwierigkeit beim Bohren braucht aber in keiner Weise mit der Lagerungsdichte als solcher zusammenzuhängen. Hierfür nur ein Beispiel: Vor dem Schlagen von Dalben im neuen Karlsruher Ölhafen sollte festgestellt werden, wie dicht dort der anstehende Sand und Kies gelagert ist. Zuerst wurde eine Bohrung niedergebracht. Der Bohrmeister bezeichnete auf Grund des langsamen Bohrfortschrittes in diesem Sand-Kies-Gemisch die Lagerung als dicht. Diese Feststellung erschien auch glaubhaft, da das Bohrgut sehr ungleichförmig und dem Anschein

nach natürlich gewachsen war. Bei der zusätzlichen Rammsondierung fiel aber die Sonde zunächst einige Meter mit geringem Widerstand durch. Erst danach mußte eine beträchtliche Anzahl von Schlägen aufgewendet werden, um die Sondierung fortzusetzen. Die Ursache für die tatsächlich vorhandene aber durch die Bohrung nicht festgestellte lockere Lagerung der oberen Schichten wurde bald gefunden. Zur Gewinnung von Sand und Kies war innerhalb des Beckens tiefer gebaggert worden, wobei angrenzende Bereiche nachrutschten und sich auflockerten. Gerade an einer solchen Stelle waren die Untersuchungen durchgeführt worden.

4.2.3 Ermittlung der Konsistenz bindiger Böden

Während es bei nicht bindigen Böden unter bestimmten Voraussetzungen durchaus möglich ist, sichere Angaben über ihre Lagerungsdichte zu erhalten, kann man nur sehr unsichere Angaben über die Konsistenz bindiger Böden erhalten. Der Grund liegt hier in den bei diesen bindigen Böden unter Wasser auftretenden unbekanntem Porenwasserdrücken, die von der Schnelligkeit des Sondierens und von der Durchlässigkeit des Bodens abhängen. Terzaghi und Peck haben zwar bestimmte Schlagzahlen des Standard Penetration Tests bestimmten Konsistenzbereichen zugeordnet, doch hat sich gezeigt, daß diese Angaben nur für eine qualitative Beurteilung ausreichen [15] und mit zunehmender Bindigkeit an Aussagekraft verlieren. Bei gleichartig aufgebauten Böden können selbstverständlich Unterschiede in der Konsistenz deutlich erkannt werden.

4.2.4 Ermittlung der Tragfähigkeit und des Setzungsverhaltens von Flachgründungen

Auf Grund der Kenntnis der Lagerungsdichte von nicht bindigen Böden kann ein qualitatives Bild über das voraussichtliche Setzungsverhalten und auch über die Grenztragfähigkeit von Flachgründungen gewonnen werden. Darüberhinaus hat man versucht, direkte Beziehungen zwischen den Ergebnissen von Sondierungen zu der Tragfähigkeit und dem Setzungsverhalten bzw. der sie bestimmenden Scherfestigkeiten und Steifemodulen zu erhalten.

So stellte Paproth 1943 für den Prüfstab Künzel, der der leichten Rammsonde entspricht, nur keine verdickte Spitze besitzt, für nicht bindige Böden eine Beziehung zwischen der Steifemodul dieser Böden und dem Eindringwiderstand auf, den er aus der Stoßgleichung für den unelastischen Stoß errechnete [10]. Für den Standard Penetration Test gaben Terzaghi und Peck 1948 Beziehungen zwischen der Schlagzahl N dieser Sonde und der zulässigen Belastung eines Sandbodens unter der Voraussetzung, daß die maximalen Setzungen 2,5 cm nicht über-

schreiten [15]. Die Bauwerksbreite, von der die Setzungen mitabhängen, geht in die Auswertung ein. Entsprechende Beziehungen sind auch für die Berechnung der Grundbruchsicherheit aufgestellt worden. Diese Angaben von Terzaghi und Peck sind auf Grund weiterer Versuche an anderer Stelle ergänzt worden [16], wobei besonders der Einfluß der Überlagerungshöhe miteinbezogen wurde. Die vorliegenden Beziehungen geben aber nur einen ganz rohen Anhalt und gelten nur für die untersuchten Böden. Sand kann nicht gleich Sand gesetzt werden, denn beide Sandarten können in der Gleichförmigkeit, der Kornrauigkeit sehr unterschiedlich sein.

Auf weitere Vorschläge zur Auswertung von Ramm- und Drucksondierungen zur Ermittlung der Setzungen und der Tragfähigkeit kann ich im Rahmen dieses Vortrages nicht eingehen und muß auf die Literatur verweisen. Insbesondere nenne ich die Arbeiten von de Beer über die Auswertung von Drucksondierungen zur Ermittlung von Steifeziffern und Scherfestigkeitswerten und deren Anwendung in der Praxis [3] und die im Institut für Verkehrswasserbau, Grundbau und Bodenmechanik der T H Aachen erzielten Versuchsergebnisse zur Ermittlung der Steifeziffer nichtbindiger Böden [14].

4.3 Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen mit Hilfe der Drucksondierung

Eine sehr wichtige Anwendung der Sondierungen, vor allen Dingen der Drucksondierung, ist die Ermittlung der Tragfähigkeit von Pfählen bzw. die Ermittlung der notwendigen Pfahllänge bei gegebener Belastung.

Grundsätzlich kann man nach Vorliegen des Bohrprofiles die Lagerungsdichte der nicht bindigen Schicht ermitteln, in die die Pfähle einbinden sollen, und auf Grund von Erfahrungen die Einbindetiefe ausreichend groß wählen.

Darüberhinaus aber ist es möglich, die Tragfähigkeit von Pfählen auf Grund statistischer Auswertungen von Pfahlprobelastungen und dazugehörigen Sondierungen oder aber unter bestimmten Voraussetzungen auf Grund erdstatischer Berechnungen zu ermitteln.

Den Weg der Auswertung von Drucksondierungen hinsichtlich der Tragfähigkeit von Pfählen hat Huizinga [5] beschrieben. Er ermittelte den Spitzenwiderstand von Pfählen auf Grund von Druck- und Zugversuchen und verglich den so gefundenen Spitzenwiderstand der Pfähle mit dem der Drucksonde. Auf der Abb. 10 sind auf der Abszisse Spitzenwiderstände der Sonde und auf der Ordinate die der Pfähle aufgetragen. Für die Punkte, die auf einer unter 45° geneigten

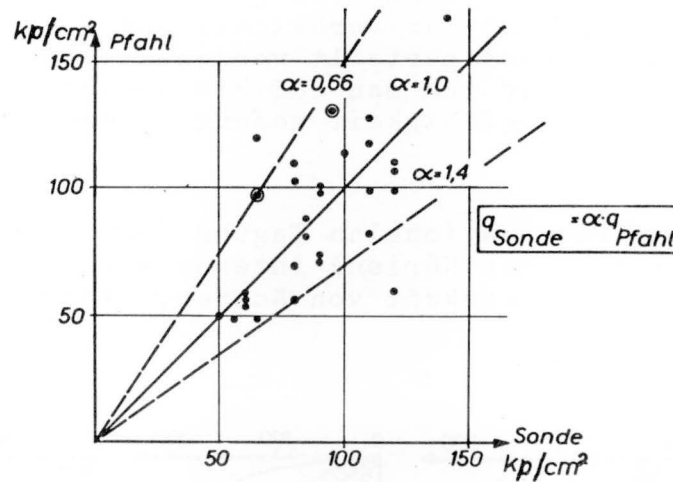


Abb.10 Beziehung zwischen Spitzenwiderstand von Drucksonden und Pfählen (nach [3])

Geraden liegen, ist der Spitzenwiderstand in beiden Fällen gleich groß. Bei den Versuchswerten oberhalb dieser Geraden ist der Spitzenwiderstand des Pfahles größer, bei den Punkten unterhalb ist er kleiner als der der Sonde. Der Pfahlwiderstand war nicht kleiner als der durch 1,4 geteilte Spitzenwiderstand der Sonde. Da aus dem Diagramm einerseits hervorgeht, daß im Mittel die Spitzenwiderstände für Pfahl und Sonde gleich groß sind, andererseits aber die genannten Streuungen vorkommen, wurde empfohlen, zur Berechnung der Bruchlast von Pfählen den Wert des Spitzenwiderstandes der Sonde zu nehmen und durch 1,4 zu teilen. Nachdem zu den hier dargestellten Ergebnissen noch weitere hinzugekommen sind, ging man nach einem Vorschlag von van der Veen [17] dazu über, statt 1,4 einen Faktor von 1,5 der Errechnung der Bruchlast des Pfahles aus dem Sondenwiderstand zu Grunde zu legen. Um hieraus die zulässige Pfahlbelastung zu bekommen, muß selbstverständlich noch ein zweiter Sicherheitsfaktor eingeführt werden. Ist dieser z.B. 1,67, so muß die Sondenbruchspannung durch $1,5 \cdot 1,67 = 2,5$ dividiert werden, um die zulässige Pfahllast zu erhalten.

Menzenbach [9] ist dem Problem der Beziehung zwischen Spitzenwiderstand des Pfahles und dem der Sonde rein statistisch nachgegangen. Er untersuchte 88 Pfähle mit Durchmessern zwischen 12 und 124 cm, die im Kiesboden standen, und trug das Verhältnis des Spitzenwiderstandes von Pfählen zu dem der Sonde in einem Häufigkeitsdiagramm auf. Als Mittelwert fand er für das vorher genannte Verhältnis vom Spitzenwiderstand des Pfahles zu dem der Sonde den Wert 1,17. Als ungünstigsten Wert fand er allerdings das Verhältnis 2,4.

Dieser große Wert betraf aber nur 17 % der Pfähle, und zwar nur solche mit besonders großem Durchmesser. Bei den übrigen Pfählen lag das Verhältnis bei 1,5, wie es von den Holländern auch festgestellt worden ist. Bei Pfählen mit großem Durchmesser muß man auf die dadurch bedingte Verkleinerung der Tragfähigkeit gegenüber der Sonde Rücksicht nehmen.

Bei der Internationalen Tagung für Bodenmechanik und Gründungen 1961 hat Kérisel interessante Versuchsergebnisse über die Tragfähigkeit von Sonden, Pfählen und Brunnen vorgelegt [7].

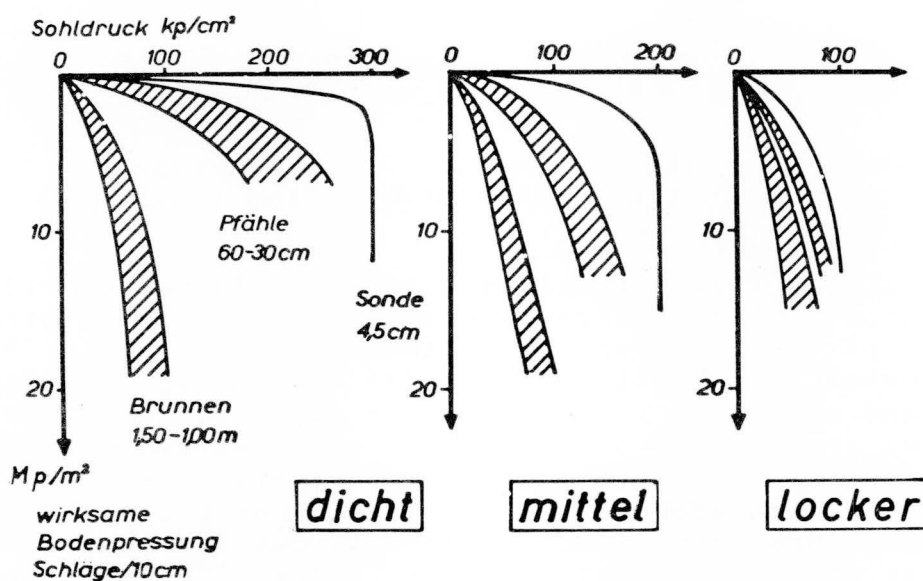


Abb.11 Spitzenwiderstand von Sonden, Pfählen und Brunnen in Sanden verschiedener Dichte (nach [7])

Auf der Abszisse der Abb. 11 ist die Tragfähigkeit in kp/cm^2 auf der Ordinate die in der Höhe der Pfahlspitze wirkende Bodenpressung angegeben. Diese wirksame Bodenpressung in Mp/m^2 der Tiefe in Metern. Man sieht deutlich, daß die Grundbruchsicherheit mit größer werdendem Pfahldurchmesser abnimmt. Für Pfähle von nicht zu großem Durchmesser, wenn diese außerdem in nicht zu dicht gelagerten Sanden stehen, ist aber der von den Holländern vorgeschlagene Wert von 1,5 durchaus praktisch anwendbar. Bei der Übertragung der Sondierergebnisse auf Pfahlbelastungen muß also auf die Größe der Pfähle bzw. Brunnen geachtet werden. Hierauf hat besonders de Beer hingewiesen und auch herausgestellt, daß die Tiefe, bis zu der die Pfähle in einer Sandschicht unter weichen Schichten einbinden, bei dem Vergleich berücksichtigt werden muß [4].

5. Flügelsonden und Isotopensonden

Der Vollständigkeit halber sei noch kurz auf die Flügel- und Isotopensonden hingewiesen, die nicht in der Norm DIN 4094 enthalten sind, die der Arbeitsausschuß "Sonden" aber ebenfalls behandelt.

Die Flügelsonde besteht aus einem Gestänge, an dessen unterem Ende Flügel angeschweißt sind. Sie wird in den Boden eingedrückt, oder eingetrieben und dann mit einem Handgriff gedreht. Hierbei wird das zur Erreichung des Maximalwertes erforderliche Drehmoment gemessen und die Scherfestigkeit beim Bruch für weiche bindige Böden gefunden. Anschließend kann man auch weiterdrehen und nun die Scherfestigkeit des Bodens beim Gleiten ermitteln. Man erhält damit auch ein Maß für die Störungsempfindlichkeit bindiger Böden.

Die Isotopensonden sind in steigendem Maße nach dem Kriege entwickelt worden und erlauben es, ohne Entnahme von Bodenproben das Feuchtraumgewicht und den Wassergehalt des Bodens in beliebigen Tiefen zu ermitteln. Dieses Verfahren beruht auf der Absorption oder Streuung von Gammastrahlung bei der Raumgewichtsermittlung oder der Bremsung der Neutronenstrahlung bei der Ermittlung des Wassergehaltes. Wird an Hand gleichzeitig entnommener gestörter Bodenproben im Labor die dichteste und lockerste Lagerung bestimmt, so kann ohne weiteres die Lagerungsdichte ermittelt werden. Herr Dr. Wolters hat als Mitglied des Arbeitsausschusses "Sonden" einen Aufsatz "Strahlenmeßgeräte im Erd- und Straßenbau" in der Bautechnik [19] veröffentlicht. Er soll als Grundlage für die weiteren Diskussionen dienen. Die Arbeit an der Vereinheitlichung der Isotopensonden ist allerdings zurückgestellt, da noch z.Zt. laufende Forschungen abgewartet werden sollen.

6. Zusammenfassung

Die in der DIN 4094 aufgeführten Sonden, die leichte und schwere Rammsonde, die Sonde des Standard Penetration Tests und die Drucksonde, sind wertvolle Geräte zur Untersuchung des Untergrundes und von Schüttungen. Voraussetzung für die Auswertung ist allerdings die Kenntnis der Bodenarten, die im Untergrund anstehen.

Die Sondierungen erlauben eine schnelle und einfache Feststellung von Grenzen verschieden fester Bodenschichten und geben damit eine Ergänzung und Kontrolle der Bohrungen. Darüber hinaus ist es bei nicht bindigen Böden möglich, zusätzliche Informationen über die Lagerungsdichte zu erhalten.

Auch können Aussagen über die Belastbarkeit des Baugrundes bei Flachgründungen, besonders aber bei Pfahlgründungen gemacht werden. Bei diesen Auswertungen müssen aber verschiedene Einflüsse berücksichtigt werden, wie z.B. der Überlagerungsdruck, der Grundwasserstand und vor allem die Bodenart, wobei nicht nur die Kornverteilung sondern auch die Kornform und die Kornrauhigkeit eine große Rolle spielen. Daß Aussagen gerade bei nicht bindigen Böden möglich sind, ist ein besonderer Vorteil der Sonden, da ja bekanntlich die Entnahme ungestörter Bodenproben aus diesen Böden kaum oder nur mit großen Schwierigkeiten möglich ist. Bei bindigen Böden ist die Aussagekraft der Ramm- und Drucksonden gering, hier aber können leicht ungestörte Proben aus Bohrungen gewonnen werden.

Der Arbeitsausschuß Sonden hat außer dem Blatt 1 über die Abmessungen und Arbeitsweise der Sondiergeräte das Blatt 2 herausgebracht, das Hinweise für die Anwendung gibt und vor allem die Einflüsse aufzeigen soll, die bei der Auswertung zu beachten sind. Wegen der vielen Faktoren, die sich auf die Sondierung auswirken, können noch keine einfachen und zuverlässigen Angaben über die Beziehung zwischen Sondierwiderstand und bestimmten Bodeneigenschaften gemacht werden. Der Ausschuß arbeitet an dieser Frage aber weiter, wobei er sich im wesentlichen auf systematisch durchgeführte Versuche stützen muß und auf die Auswertung weiterer einzelner Versuchsergebnisse, die allerdings eine vollständige Bodenbeschreibung enthalten müssen.

Der Vortragende dankt allen Mitgliedern des Arbeitsausschusses Sonden für die vielen Anregungen, die er bei den Sitzungen des Arbeitsausschusses erhalten hat und für die Überlassung verschiedener Beispiele, die er in die Erläuterungen der DIN 4094 Blatt 2 aufgenommen und zum Teil in diesem Vortrag aufgeführt hat.

7. Schrifttum

- [1] DIN 4094 Blatt 1 : "Ramm- und Drucksondiergeräte.
(Mai 1964) Abmessungen und Arbeitsweise
der Geräte" mit Erläuterungen
- [2] Vornorm DIN 4094 : "Ramm- und Drucksondiergeräte,
Blatt 2 (Juni 1965) Hinweise für die Anwendung"
mit Erläuterungen
- [3] de Beer, E.E. : "Etudes des fondations sur pi-
lotis et des fondations directs"
Ann.Trav.Publ.Belg.(1945)S.229
- [4] de Beer, E.E. : "The scale effect in the trans-
position of the results of deep-
sounding tests and the ultimate
bearing capacity of piles and
caisson foundations"
Géotechnique 13 (1963) S.39

- [5] Huizinga, T.K. : "Application of results of deep penetration tests to foundation piles". Proc.Bldg.Res. Congr. (1951) Bd.1, S.173
- [6] Kahl, H. : "Derzeitiger Stand des Spitzen-druck-Sondierverfahrens" Fortschr.u.Forsch.i.Bauwesen (1955) Teil II,H.25,S.1
- [7] Kérisel, J. : "Fondations profondes en milieux sableux".Proc. 5.Int.Conf.Soil.Mech.Found.Eng.(1961) Bd.2,S.73
- [8] Melzer, Kl.-J. : "Vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Sondenkonstruktionen im Sand". Mitt.Inst.Verkehrswasserb.Grundb.Bodenmech. TH Aachen (1964) H.33, S.173
- [9] Menzenbach, E. : "Die Anwendbarkeit der Sonden zur Prüfung der Festigkeitseigenschaften des Baugrundes".Westdeutscher Verlag Köln u. Opladen 1959
- [10] Paproth, E. : "Der Prüfstab Künzel, ein Gerät für Baugrunduntersuchungen". Die Bautechnik 21 (1943) S.327
- [11] Schubert, K. : "Untersuchung des sandigen Untergrundes durch Rammsondierungen" Bauplanung und Bautechnik (1956) H.12,S.515
- [12] Schultze, E. und Muhs, H. : "Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten". Springer-Verlag Berlin,Göttingen,Heidelberg,1950
- [13] Schultze, E. und Menzenbach, E. : "Standard Penetration Test und Zusammendrückbarkeit des Bodens" Mitt.Inst.Verkehrswasserb.Grundbau u.Bodenmech. TH Aachen(1962) H. 24
- [14] Schultze, E. und Melzer, K.-J. : The determination of the density and the modulus of compressibility of non-cohesive soils by soundings. Proc. 6 Int.Conf.Soil Mech. Found.Eng. (1965) Bd.1,S.354
- [15] Terzaghi, K. und Peck, R.B. : "Die Bodenmechanik in der Baupraxis".Springer Verlag Berlin, Göttingen, Heidelberg, 1961

- [16] Thornburn, S. : "Tentative correction chart for the standard penetration tests in non-cohesive soils". Civ. Eng. and Public Works Rev. (1963) S.752
- [17] van der Veen, C. : "The bearing capacity of a pile predetermined by a cone penetration test". Proc. 4 Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., London (1957) Bd. II, S.72
- [18] Weiß, K. : "Neuere Erkenntnisse mit der Spitzendrucksonde". Vorträge der Baugrundtagung 1964 in Berlin, S.227. Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen, 1964.
- [19] Wolters, R. : "Strahlungsmeßgeräte im Erd- und Grundbau". Die Bautechnik 39 (1962) Heft 10
- [20] Zweck, H. : Baugrunduntersuchungen. Der Maschinenschaden 33 (1960) H.5/6, S.91.