

4. Quantitative Beschreibung des porösen Mediums

4.1 Kornverteilung

Zur Bestimmung der Kornverteilung eines Lockergesteins (z.B. Sand) oder Bodens werden je nach Korngröße zwei Methoden angewendet:

a) *Schlämmanalyse* für Korndurchmessern $d < 0.1$ mm, welches auf der Sinkgeschwindigkeit v eines kugelförmigen Kornes nach dem Stokes-Gesetz beruht:

$$r = 2 [9 \mu v / (2g (\rho_s - \rho_w))]^{1/2} \quad (4.1)$$

mit

- r = Radius der Kugel
- μ = der dynamischen Viskosität des Wassers
- v = Sinkgeschwindigkeit
- g = Erdbeschleunigung
- $\rho_s - \rho_w$ = Dichtedifferenz zwischen Partikel und Wasser

b) *Siebanalyse* für Korndurchmessern $d > 0.1$ mm. Hier werden die Gewichte der Teilfraktionen, die in einem übereinandergeschichteten Sieben mit nach unten geringer werdender Maschenweite gewogen werden, in Prozent (%) der Gesamtfractionen als Summenkurve dargestellt, wobei auf der Abszisse die Logarithmen der Korndurchmesser aufgetragen werden. Dadurch wird der Feinbereich besser erkenntlich. Diese Summenkurve wird als *Körnungskurve* oder *Sieblinie* bezeichnet. Die Kornverteilungskurve gibt nur die Gewichte der Teilfraktionen an. Sie besitzt die Form der Häufigkeitskurve und wird für die Darstellung des prozentualen Anteils der Mineralbestandteile verwendet.

Zur Quantifizierung der Kornverteilungskurve definiert man den

Charakteristischer Korndurchmesser d_{10} = Korngröße bei 10 % Siebdurchgang

und den

Ungleichförmigkeitsgrad U :

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (4.2)$$

U quantifiziert die Steilheit der Sieblinie:

Für gut-sortierte Boden ist U ist größer.
Böden mit $U < 4$ werden als uniform angesehen.

Wie später gezeigt wird, hat der charakteristische Korndurchmesser einen bedeutenden Einfluß auf die *hydraulische Durchlässigkeit* des Lockergesteins.

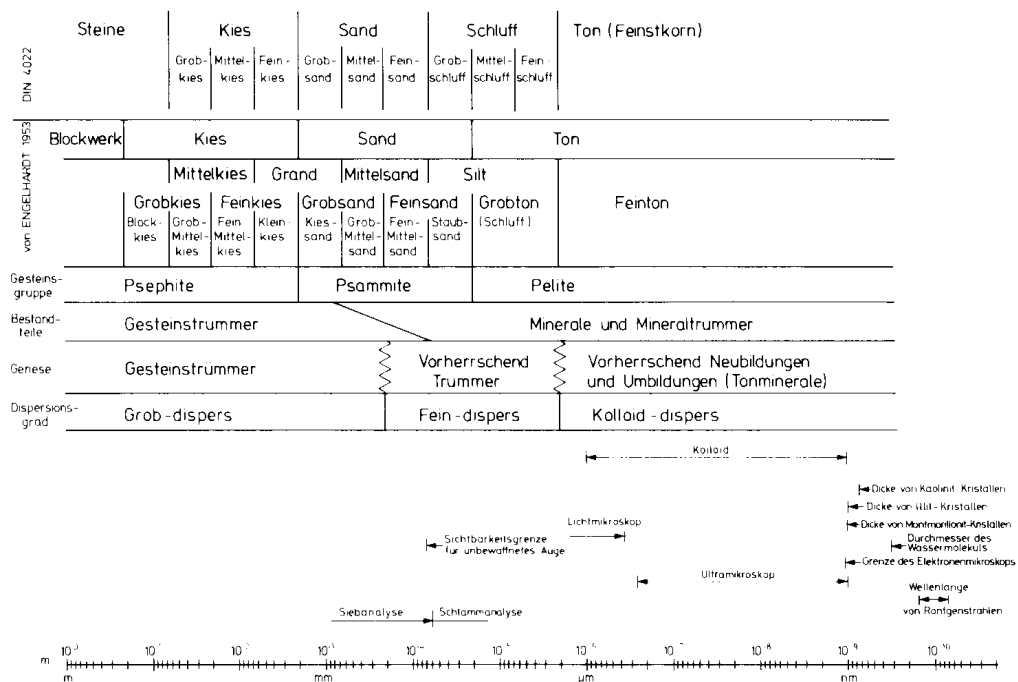


Abb. 7. Korngrößen der Gesteine und deren Bestimmungsmethoden. Die vorliegenden Einteilungsschemata weichen z. T. voneinander ab (VON ENGELHARDT 1953 in LEMCKE et al. 1953, und FÜCHTBAUER 1959, DIN 4022; nach LAMBE & WHITMAN 1969 und WALGER persönliche Mitteilung).

Abb. 4.1: Zur Einteilung der Korngrößen von Gesteinen (Mattheß und Ubell, 1983)

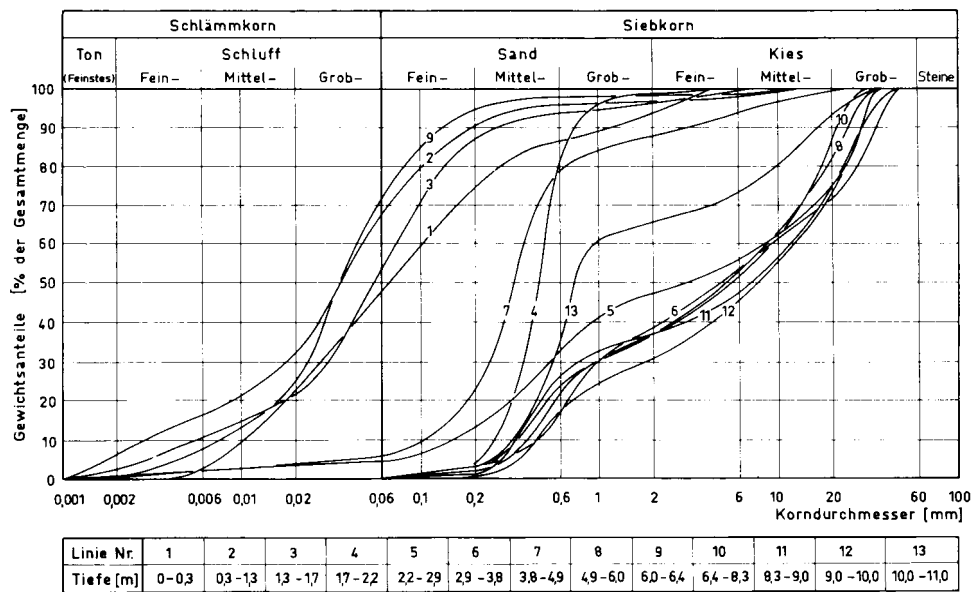


Abb. 8. Kornverteilungs-Summenlinien (Niederterrassensedimente des Rheins in einer Bohrung bei Bonn-Bad Godesberg) (Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“ 1969).

Abb. 4.2: Sieblinien von Rheinsanden. Beachte die Zunahme von mittleren Korngröße mit der Tiefe (Mattheß und Ubell, 1983)

Übung 4.1: Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebanalyse

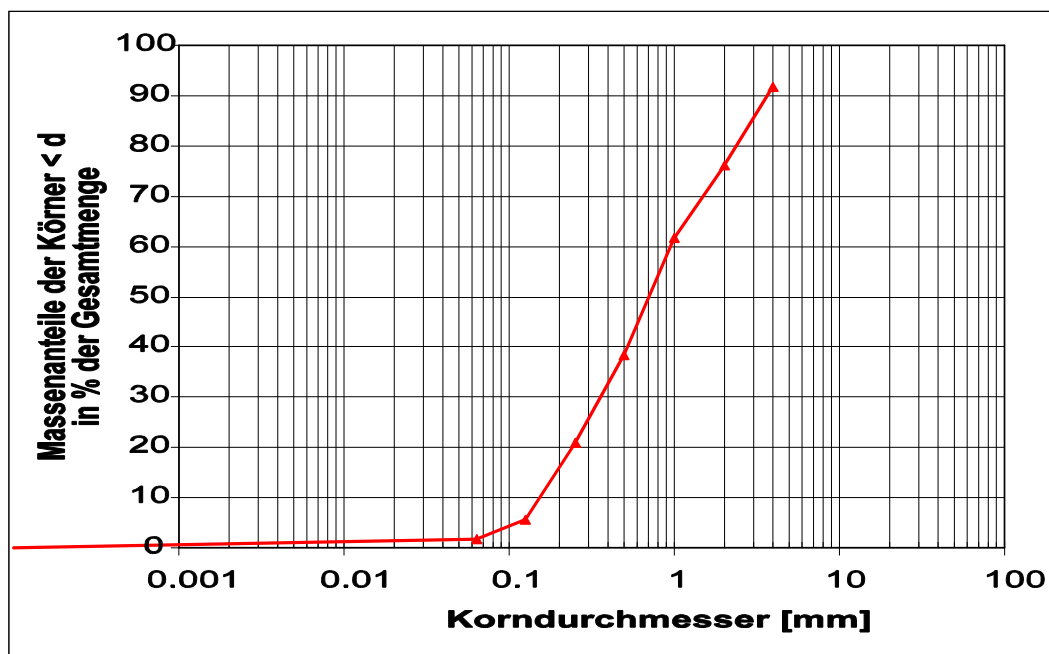
In einem Siebversuch wurden bei einem Gesamtgewicht der Probe von $m_{\text{ges}} = 1139 \text{ g}$ die unten stehenden Siebrückstände ermittelt.

Maschenweite [mm]	Siebrückstand [g]
4	95,02
2	271,23
1	434,87
0,5	697,99
0,25	896,38
0,12	1069,36
0,06	1112,85
0,03	1133,97
Schale	

- Zeichne die Kornverteilungskurve in das vorbereitete Diagramm ein!
- Wie groß ist der Ungleichförmigkeitsgrad U ?

Lösung: 1) Auswertung nach Vordruck der nächsten Seite; 2) Zeichnen in folgenden Vordruck

Vordruck zur Bestimmung der Kornverteilungskurve



Ungleichförmigkeitsgrad:
$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = \frac{0,95}{0,16} = \underline{5,9}$$

Vordruck zur Bestimmung der Korngrößenverteilung

				Anlage:		
				Projekt:		
Bestimmung der Korngrößenverteilung durch Siebung nach DIN 18123 Prüfungs-Nr.: Bauvorhaben: Datum: Name:			Entnahmestelle: Tiefe: Bodenart: Art der Entnahme: Datum: Name:			
Bezeichnung der Probe						
Gesamtmasse der trockenen Probe m_d	<u>1134,34</u> g = 100 %		_____ g = 100 %			
Einwaage des Siebanteils m_s	<u>1133,97</u> g = _____ % $m_d = 100$ % m_s		_____ g = _____ % $m_d = 100$ % m_s			
Maschenweite [mm]	Rückstand		Summe [%] Durchgang bzw. Rückstand	Rückstand		Summe [%] Durchgang bzw. Rückstand
	m_R [g]	$\frac{m_R}{\sum m_R} \cdot 100[\%]$		m_R [g]	$\frac{m_R}{\sum m_R} \cdot 100[\%]$	
4	95,02	8,4	91,6			
3	271,23	23,9	76,1			
1	434,87	38,3	61,7			
0,5	697,99	61,6	38,4			
0,25	896,38	79,0	21,0			
0,125	1069,36	94,3	5,7			
0,063	1112,85	98,1	1,9			
Schale:	1133,97	100,0	0			
Summe $\sum m_R$						
Verlust: $m_s - \sum m_R$						
Bemerkungen: (z.B. Kornform usw.)	Anmerkungen zum Verfahren: Das Größtkorn bei der Siebung sollte einen ϕ von ~10 mm besitzen Die Mindesteinwaage sollte 700 g betragen Die Genauigkeit liegt bei 0,1 %					

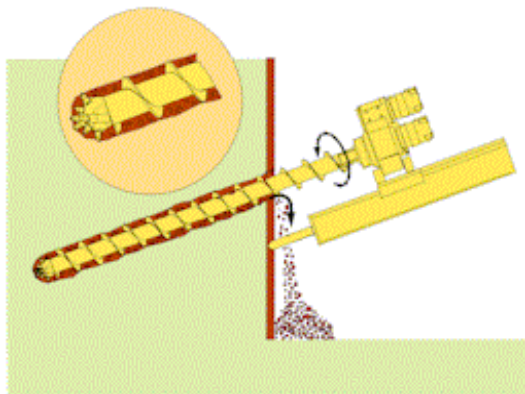
Box. 4.1: Methoden der Bohraufschließung.

Tab. 4.1: Anwendung der Bohrverfahren (Mattheß und Ubell, 1983)

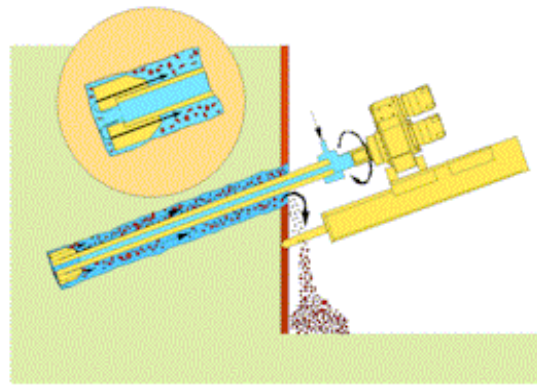
Tabelle 4 Anwendung der Bohrverfahren (DVGW-Merkblatt W115)

Bohrverfahren	Anwendung	Drehbohren					Schlagbohren							Sonstige Verfahren		
		mit Spülung					Trockendrehbohren	Freifallbohren			Hammerbohren	Rammkernbohren	Schlauchkernbohren	Drehschlagbohren	Einspülen	Einrammen
		direkte Spülstromrichtung (Druckspülbohren)	inverse Spülstromrichtung					Seitfreifall	Gestängefreifall							
			Saugen	Strahlsaugen	Luftheben	Counterflush			ohne Spülung	mit Spülung direkte oder inverse Stromrichtung						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
Lockergestein	Aufschlußbohrungen	a	+	+	+	+	+	•		+	+	+				
	Meßstellenbohrungen	b	+	+	+		+	•			•	•	•	+	+	
	Versuchsbrunnenbohrungen	c	+	+	+		+	•					+	•	•	
	Brunnenbohrungen	d	•	+	+		+	•					+	•	•	
Festgestein	Aufschlußbohrungen	e	+	+	+	•	+	•	+				+			
	Meßstellenbohrungen	f	+	+	+		+	•	+				+			
	Versuchsbrunnenbohrungen	g	+	+	+		•	+	+	•	+		+			
	Brunnenbohrungen	h	+	+	+		•	+	+	•	+		+			

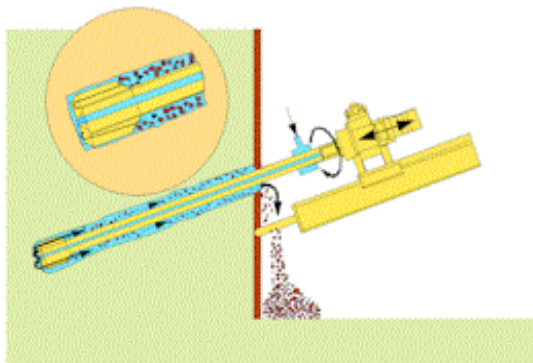
- +
- für Bohrungen bis 30 m Tiefe
- ⊙
- Hilfsverrohrung in der Regel erforderlich
-
- Druckluft als Spülmedium bevorzugt
-
- Kernen nur in bindigen Schichten möglich



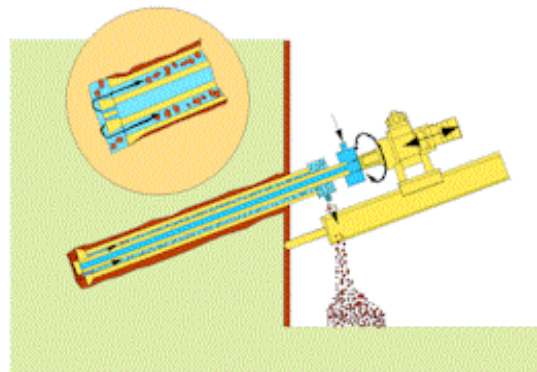
Drehbohren mit Bohrschnecke
Rotary drilling with auger



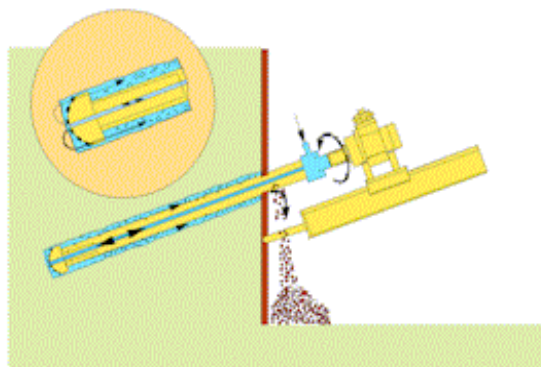
Drehbohren im Spülverfahren
Rotary flush drilling



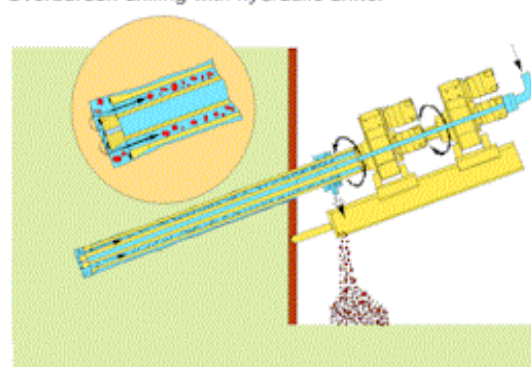
Drehschlagbohren mit Aussenhammer und verlörener Krone
Rotary percussive drilling with hydraulic drifter and sacrificial bit



Drehschlagbohren mit Aussenhammer
und Überlagerungsgestänge
Overburden drilling with hydraulic drifter



Drehschlagbohren mit im-Loch Hammer
Rotary percussive drilling with down-the-hole hammer



Doppelkopfbohren Twin rotary drive drilling
drehen - drehen / rotary - rotary
drehen - im-Lochhammer / rotary - down-the-hole hammer
drehen- drehschlagen / rotary - rotary percussive

Abb. 4.2a: Übersicht Bohrverfahren

4.2 Porosität und Wassergehalt

4.2.1 Definitionen

Die Porosität quantifiziert die tatsächlich vorliegenden Hohlräume im Gestein (vergl. Kap. 3.2.2.2). Diese können ganz oder teilweise mit Wasser gefüllt sein. Im ersten Fall handelt es sich dann um einen *voll-* und im letzteren Fall um ein *teilgesättigtes* poröses Medium.

Nach Abb. 4.3 läßt sich das mit z.T. mit Wasser und Gas (Luft) gefüllte poröse Medium in drei Teil-Volumen V und entsprechende Gewichtsanteile W oder Massen M ($= W/g$) aufteilen:

$$V_T = V_v + V_s \quad (4.3a)$$

$$= V_w + V_a + V_s \quad (4.3b)$$

mit

V_T = Gesamtvolumen

V_v = Volumen der Poren

V_s = Volumen der soliden Matrix

V_w = Volumen des Wassers im Porenraum

V_a = Volumen der Luft im Porenraum

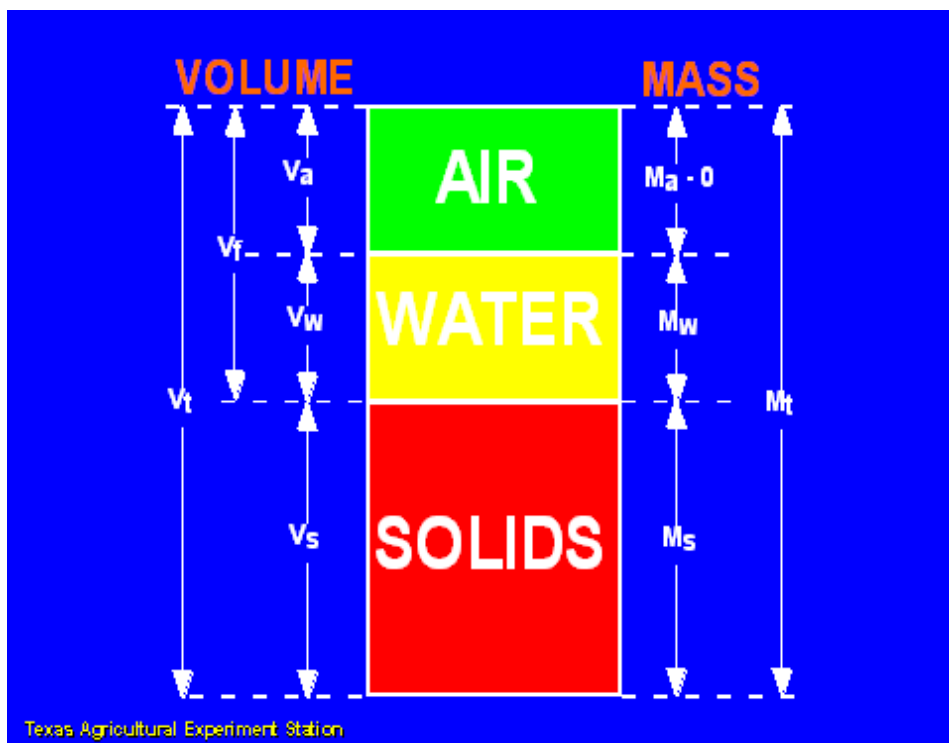


Abb. 4.3: Volumetrische Beschreibung des porösen Mediums (Internet)($V_f = V_v$ im Text)

Damit ergeben sich folgende Definitionen

$$\text{Porenverhältnis (void ratio):} \quad e = V_v/V_s \quad (4.4)$$

(Wird vornehmlich in der Bodenmechanik verwendet)

$$\text{Porosität:} \quad n = V_v/V_T = e / (1+e) \quad (4.5)$$

(Wird vornehmlich in der Geohydrologie verwendet)

$$\text{Sättigungsgrad (Saturation):} \quad S = V_w/V_v * 100\% \quad (4.6)$$

$$\text{Feuchtigkeitsgehalt:} \quad \theta = V_w/V_T * 100\% \quad (4.7)$$

$$= S n$$

Daneben definiert man noch folgende Dichten:

$$\text{Bulk-Dichte} \quad \rho_B = M_T/V_T = (M_s + M_w) / V_T = (\rho_p + S e \rho_w) / (1 + e) \quad (4.8)$$

Daraus ergibt sich für S=0 die

$$\text{trockene Bulk-Dichte (Schüttungsdichte)} \quad \rho_{Bdry} = \rho_p / (1 + e) = \rho_p (1-n) \quad (4.9)$$

und für S=1 die

$$\text{saturierte Bulk-Dichte} \quad \rho_{sat} = (\rho_p + e \rho_w) / (1 + e) \quad (4.10)$$

$$\text{Partikel-Dichte} \quad \rho_p = M_s/V_s = M_T/V_s \quad (4.11)$$

Tab 4.1: Partikel- Dichten ρ_p einiger Mineralien

Mineral	Dichte (gr/cm ³)
Gips	2.32
Orthoklase	2.56
Kaolinite	2.61
Quarz	2.67
Kalktein	2.72
Dolomit	2.87
Magnetite	5.17

Übung 4.2: Porosität und Porenverhältnis

Beweisen Sie folgende zusätzliche Formeln:

$$e = n / (1-n) \quad (4.12)$$

und

$$n = (1 - \rho_{\text{Bdry}} / \rho_p) \quad (4.13)$$

Lösung: Einsetzen der entsprechenden Volumen- bzw. Massen in die Definition und Umrechnungen

Anmerkung: Bestimmung der Porosität

(Nach: http://www.gfz-potsdam.de/ktb/methods/gp_poro.htm)

Die Bestimmung der Porosität erfolgt an druckentlasteten Proben unter Oberflächenbedingungen. D.h. die Bohrkern erfahren durch die Druckentlastung bereits eine Volumenvergrößerung. Neben dieser Volumenvergrößerung ist noch zu berücksichtigen, daß während des Bohrens Mikrorisse entstehen können. D.h. für die Bestimmung der Porosität, daß die gemessene Porosität nicht gleich der in situ-Porosität ist.

Die Porositätsmessungen werden nach dem "Archimedischen Prinzip" durchgeführt. D.h es sind zur Porositätsbestimmung drei verschiedene Wägungen notwendig. Als erstes wird die Trockenmasse der Probe bestimmt. Hierzu wird die Probe 24 Stunden unter Vakuum bei 80° getrocknet. Die Trockenwägung wird mehrmals wiederholt. Nach der Bestimmung des Trockengewichtes werden die Proben unter Vakuum mit destilliertem Wasser gesättigt.

Hierzu wird der Exsikator etwa 2 Stunden evakuiert. Anschließend läßt man das destillierte Wasser vorsichtig in den Exsikator einströmen bis die Proben vollständig vom Wasser bedeckt sind. Bevor nun die Tauch- und Naßwägungen durchgeführt werden, bleiben die Proben noch ca. 72 Stunden stehen. Zur Durchführung der Tauchwägungen werden die Proben mit Hilfe einer Probenhalterung in einen mit destilliertem Wasser gefüllten Behälter getaucht. Die Tauchwägungen werden mehrmals wiederholt.

Als dritte Wägung wird die Naßwägung durchgeführt. Hierzu wird die Probe aus dem destillierten Wasser genommen und sorgfältig vom äußeren Wasserfilm befreit. Dieser Vorgang beinhaltet die größte Fehlerquelle, da man nie genau weiß, ob man nun zuviel oder zuwenig vom äusseren Flüssigkeitsfilm entfernt hat. Deshalb muß diese Wägung sehr sorgfältig und mehrmals durchgeführt werden. Aus den so bestimmten drei verschiedenen Massen (d.h. *Gewichte*, Anm. M.K.) läßt sich nun einfach die Porosität bestimmen:

$$n = \frac{G_{\text{naß}} - G_{\text{trocken}}}{G_{\text{naß}} - G_{\text{tauch}}} \quad (4.14)$$

Übung 4.3: Beweisen Sie obige Formel (4.14).

Lösungshinweis: Anwendung des Prinzips von Archimedes (s. Skript Hydraulik) (nicht trivial)

Übung 4.4: Messung von Porositäts- und Sättigungsparametern.

Ein Bohrkern hat ein Volumen von 413 cm³ bei einem Gewicht von 727 g. Nachdem der Bohrkern getrocknet ist, wiegt er 607 g. Es sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie groß ist die trockene Bulk-Dichte ρ_{Bdry} ?
- Wie groß ist die Porosität n ?
- Wie groß ist das Porenverhältnis e ?
- Wie hoch ist der Sättigungsgrad S ?
- Wie hoch ist der Wassergehalt θ des Bohrkerns?

Annahme: Partikel-Dichte $\rho_s = 2,65 \text{ gr/cm}^3$

Lösungen:

- $\rho_{\text{Bdry}} = M_T / V_T = 607 / 413 = 1,47 \text{ g/cm}^3$
 - $n = (1 - \rho_d / \rho_s) = (1 - 1,47 / 2,65) = 0,445$
 - $e = n / (1-n) = 0,445 / (1 - 0,445) = 0,8$
 - $S = V_w / V_v * 100\% = 120 / (0,445 * 413) * 100 \% = 63,8 \%$
 - $\theta = S * n = 63,8 \% * 0,445 = 28,4 \%$
-

4.2.2 Einfluß von Kornform und -Verteilung auf den Hohlraumanteil

gleich große Körner mit glatter Oberfläche
-> geringer Hohlraumanteil

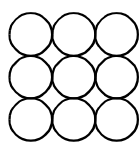
Körner in sperriger Lagerung
-> sehr großer Hohlraumanteil

Körner mit "rauher" Oberfläche
-> größerer Hohlraumanteil

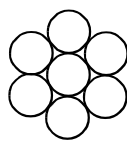
Körner mit "Füllkorn"
-> sehr kleiner Hohlraumanteil

Körner mit "Distanzkorn"
-> sehr großer Hohlraumanteil

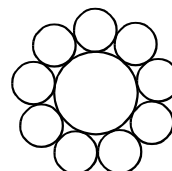
4.2.3 Einfluß der Packungsart auf den Hohlraumanteil



$n = 48\%$



$n = 28\%$



$n = 39\%$

Abb. 4.4: Theoretische Porosität als Funktion der Packungsart

Übung 4.3: Berechnung der theoretischen Porosität als Funktion der Packung

Zeigen Sie daß die kubische Packung der Abb. 4.3 links eine theoretische Porosität von $n=48\%$ und die der Abb. 4.4 Mitte $n=28\%$ ergibt.

4.2.4 Effektive und Retention- Porosität

Insbesondere für phreatische Aquifers, wo die Poren bei Grundwasser-Absenkung z.T. von Wasser dräniert werden, ist das Konzept von *totaler Porosität* n , *effektiver Porosität* n_{eff} und Retention-Porosität von Bedeutung n_r . Dabei gilt:

$$n = n_{eff} + n_r \quad (4.13)$$

mit

- n = Gesamtporosität
- n_{eff} = die effektive oder nutzbare Porosität
- n_r = die Retention-Porosität (adhäsiv verstopfendes Wasser)

n_r beinhaltet dabei den Teilbereich der Poren, der mit adhäsiven an der Porenmatrix haftenden Wasser, die effektiv nicht zum Wassertransport beitragen können, ausgefüllt wird. Der komplementäre, spezifische Teil n_{eff} wird daher auch als *kinematische Porosität* bezeichnet.

Abb. 4.5 und 4.6 zeigen, daß gerade für kleine Korngrößen die effektive oder nutzbare Porosität n_{eff} wesentlich kleiner als die Gesamtporosität n werden kann. Bei den sehr feinkörnigen Tonen kommt darüber hinaus noch die *polare* Eigenschaft des Minerals zum Tragen, wodurch das Wasser an der Mineraloberfläche besonders stark adhäsiv gebunden wird und n_r besonders groß wird.

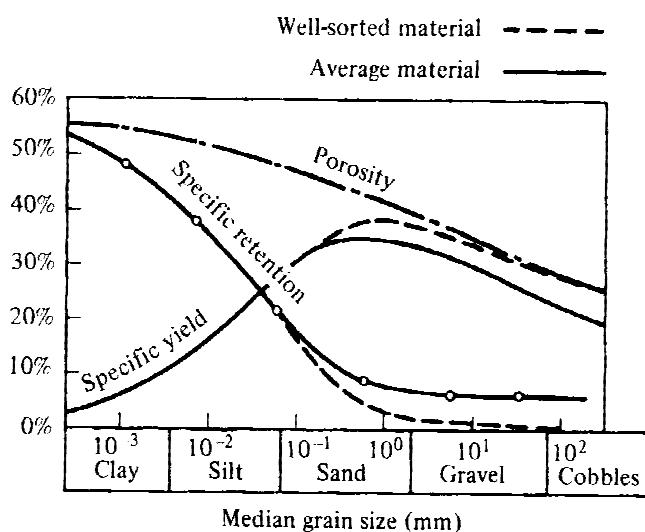
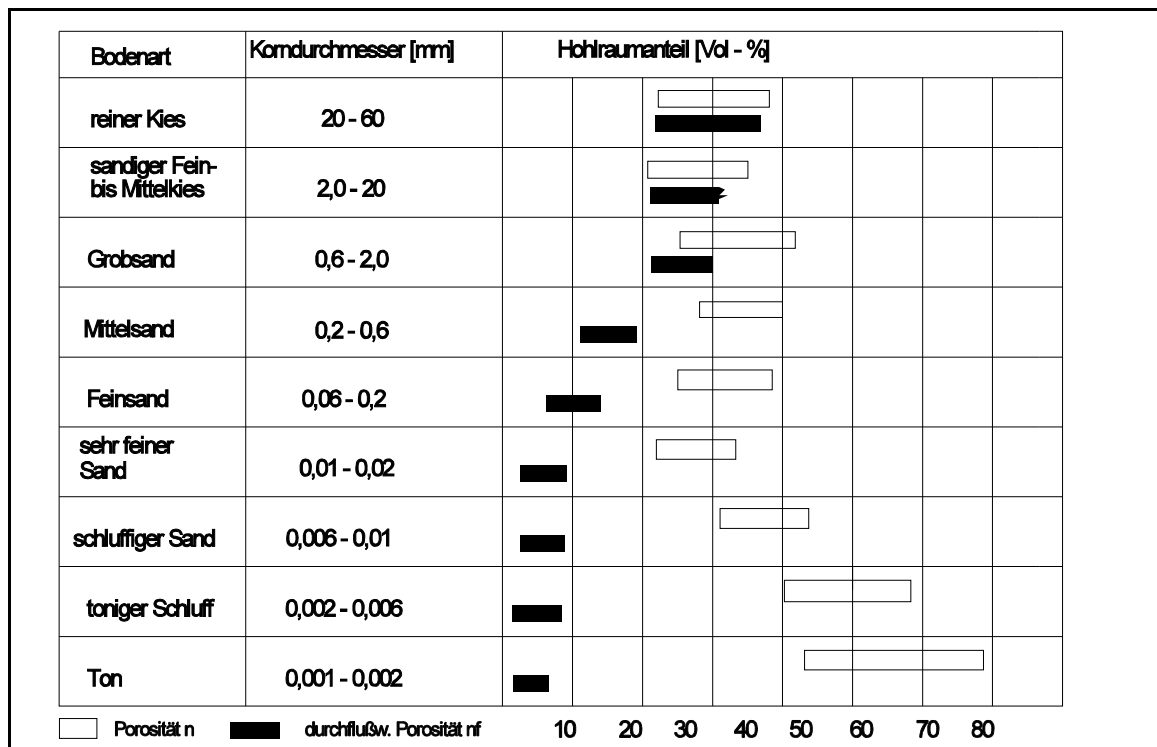


Figure 5-4 Relationship between specific yield and grain size (from Conkling et. al., 1934, as modified by Davis and DeWiest, 1966).

Abb. 4.5: Effektive (specific yield), Retention- und Gesamt-Porosität (Bear, 1979)

4.2.5 Porositäten geologischer Gesteine

4.2.5.1 Porositäten von Sedimenten und Sedimentgesteinen



Hohlraumanteil verschiedener Böden nach CASTANY (1967)

Abb. 4.6: Porositäten für verschiedene Lockergesteine

Sedimentäre Lockergesteine wie Ton, Lehm, Löß, Sand, Kies enthalten zwischen den Partikeln Porenhohlräume, die Wasser aufnehmen. Sehr feinkörnige Lockergesteine haben Porenanteile um 50%, Sande und Kiese bis 40%. Während die groben Poren in Sanden und Kiesen leicht wasserdurchlässig sind, wird das Wasser in den feinen Kapillaren feinkörniger Gesteine festgehalten. Grobkörnige Lockergesteine sind daher Porengrundwasserleiter, feinkörnige Lockergesteine sind Grundwasserstauer. Wasserdichte Gesteine gibt es nicht.

Sedimentgesteine entstehen aus Sedimenten durch den **Diagenese Prozess**, bedingt durch Druck und Temperatur. Bei *Sandstein* oder *Kalkstein* kommt es i.a. zu einer **Zementierung** der Lockergesteine, d.h. die ursprünglich vorhandene Poren werden durch Bindemittel teilweise gefüllt oder gegeneinander abgeschottet.

In *Ton- und Mergelsteinen* wurde der ursprüngliche Porenraum durch Kompaktion vermindert und verkleinert. Die Porosität verringert sich also. Jedoch können neue Poren durch Lösungsprozesse des sauren Grundwassers entstehen, die im Extremfall bei *Kalksteinen* und Gyps-haltigen Sedimenten zu großräumigen Kanälen und Hohlwegen ausarten, was zu ergiebigen *Karst-Aquifern* führt.

Die Mehrzahl der Hohlräume von nicht-maritimen Sedimentgesteinen entsteht jedoch in *Klüften und Spalten*, die durch tektonische Spannungen verursacht werden. Man bezeichnet die sogebildete Porosität auch als *sekundäre Porosität*, im Gegensatz zur *primären Porosität* zwischen den Körnern des Gesteins. Sandstein und Kalkstein werden grobstückig zerlegt, es

können relativ weite Klüfte entstehen. Ton- und Mergelstein werden dagegen kleinstückig zerlegt, es entstehen enge, oft nur latente Klüfte. In engen Klüften sind Oberflächenkräfte wie die Kapillarwirkung wirksamer als in weiten Klüften. *Ton- und Mergelsteine werden dadurch zu Grundwasserstauern, Sand- und Kalksteine zu Kluft-Grundwasserleitern.*

4.2.5.2 Porositäten von Feuer- und metamorphen Gesteinen

Porositäten von Feuer- (Granit) und metamorphen Gesteinen (Gneiss) sind ursächlich wesentlich geringer als die von Sedimenten und sind in der Größenordnung von 2-5 %. Bei solchen Festgesteinen sind also die primären Poren beim Wassertransport vernachlässigbar. Ausnahmen bildet sich schnell abkühlende Lava-Gesteine (*Bimstein*), oder auch *Pumice*, ein Basalt mit hohem eingeschlossenen Gasgehalt, dessen Gesamtporosität bis auf 80% ansteigt. Allerdings sind die Poren häufig nicht zusammenhängend, so daß die effektive Porosität n_{eff} sehr viel kleiner ist.

Ansonsten sind die Porositäten von Feuer- und metamorphen Gesteinen wieder *sekundärer* Natur, d.h. sie werden durch tektonisch bedingte Klüfte und Spalten ausgemacht. Die Porositäten bewegen sich zwischen 2-5 %, können jedoch bei extremem Verwitterungen bis auf 30-60% ansteigen. Dies ist z.B. bei *Schiefer* der Fall, der damit u.U. einen befriedigenden Grundwasserspeicher darstellt.