

6. Gesteinsprobenuntersuchungen

6.1. Visuelle Gesteinsprobenuntersuchungen

Für die Beurteilung und Auswertung von Bohrerergebnissen sowie als Grundlage aller Laboruntersuchungen dienen visuelle Gesteinsprobenuntersuchungen. Darunter sind alle Maßnahmen zeitgleich und unmittelbar nach Abschluß einer Bohrung im Feld (meist unmittelbar am Ort der Bohrung) zu verstehen. Die visuelle Gesteinsbeschreibung anhand von Haufwerks- und Fächerkistenproben bei Lockergesteinsbohrungen bzw. Gesteinskernen oder Spülproben bei Festgesteinsbohrungen hat folgende Teilaufgaben zu erfüllen:

1. Beschreibung der Korngrößenzusammensetzung des Gesteins zur Gesteinsbezeichnung und zur Erfassung der Schichtenabfolge
2. Aussagen über Beimengungen
3. Feststellungen zum Gefüge und zu den Lagerungsverhältnissen
4. Angabe des Feuchtezustandes
5. Angabe der Farbe

Alle diese Feststellungen werden zusammen mit den Mächtigkeitsverhältnissen im sogenannten vorläufigen Schichtenverzeichnis (siehe Punkt 7.1.) dokumentiert.

Zur Einordnung und Bezeichnung von Gesteinen und deren Eigenschaften sind die Standards TGL 23 984 und 24 408/05 (Schichtenverzeichnis Bohrungen-Grundtyp-), einschließlich des zu letzterem erschienenen Beiheftes mit geologischen und technischen Begriffen und ihrer Verschlüsselung zu beachten.

6.1.1. Korngrößenzusammensetzung

Für Sedimentgesteine und Verwitterungsprodukte von magmatischen und metamorphen Gesteinen gilt nach TGL 23 984 und TGL 24 408/05 (Bezeichnungen in Klammern) die folgende Korngrößeneinteilung.

Tabelle 1. Korngrößeneinteilung

Korngrößenbezeichnung	Abkürzung	Korngrößenbereich in mm
Ton	T (T)	$\leq 0,002$
Schluff	Su (U)	0,002 bis 0,063
Sand	S (S)	0,063 bis 2,0
Feinsand	Fs (SF)	0,063 bis 0,20
Mittelsand	Ms (SM)	0,20 bis 0,63
Grobsand	Gs (SG)	0,63 bis 2,0
Kies	Ki (K)	2,0 bis 63
Feinkies	Fki (KF)	2,0 bis 6,3
Mittelkies	Mki (KM)	6,3 bis 20
Grobkies	Gki (KG)	20 bis 63
Steine	St (E)	63 bis 2000
Blöcke	B (B)	≥ 2000

Analog zur Kornverteilung bei Lockergesteinen werden für die Beschreibung kristalliner Festgesteine (unverwitterte Magmatite und Metamorphite) nach TGL 24 408/05 (Beiheft) die folgenden Bezeichnungen empfohlen.

Tabelle 2. Bezeichnung kristalliner Festgesteine

Bezeichnung	Abkürzung	Bereich in mm
glasig	GL	
dicht	DT	$\leq 0,063$
feinkörnig	FK	0,063 bis 0,2
kleinkörnig	KK	0,2 bis 0,63
mittelkörnig	MK	0,63 bis 2
grobkörnig	GK	2 bis 10
riesenkörnig	RK	≥ 10

Bei der visuellen Gesteinsbeschreibung sollte man zuerst zwischen Haupt- und Nebenanteilen (Korngrößenanteil = Anteil einer Kornfraktion, bezogen auf die Gesamtmasse eines Korngemisches in %) unterscheiden, bevor weitere Abstufungen vorgenommen werden.

Die Hauptkornfraktion wird zuerst dokumentiert. Die Abkürzung dafür beginnt mit einem Großbuchstaben (z. B. Grobsand = Gs). Danach stuft man die Nebenanteile durch Benutzung halbquantitativer Begriffe nach abnehmender Häufigkeit ein. Diese halbquantitativen Begriffe sind z. B.: sehr stark, stark, schwach, sehr schwach oder vereinzelt. Man sollte gedanklich versuchen, den Nebenanteilen auf die Gesamtprobe bezogene Masseprozentanteile zuzuordnen (siehe Punkt 7.1.) und danach obige Begriffe stark, schwach usw. einzuführen. Die Nebenanteile werden mit Kleinbuchstaben bezeichnet (z. B. mittelsandig = ms) und durch Zusatzzeichen dargestellt.

Bezeichnung	Zeichen	Beispiel
sehr stark	====	\overline{ms}
stark	—	\overline{ms}
schwach	'	ms'
sehr schwach	"	ms''

Tabelle 3. Halbquantitative Abstufung der Nebenanteile

Abweichungen hinsichtlich Bezeichnung und Einstufung der Korngrößenanteile ergeben sich nach der TGL 24 408/05.

Bei der Festlegung einer Kornfraktion wird hier im Gegensatz zur bisher üblichen Bezeichnungsweise zuerst der Großbuchstabe der Hauptkomponente aufgeführt, anschließend die Abstufung Fein... bis Grob.... vorgenommen.

Beispiel: Feinsand

<u>alte Bezeichnung</u>	<u>neue Bezeichnung nach TGL 24 408/05</u>
Fs	SF

Für die Abstufung maßgeblicher Beimengungen werden anstelle der halbquantitativen Begriffe stark, schwach usw. nur noch Masseprozentanteile verwendet.

Tabelle 4. Abstufung der Masseprozentanteile

Anteil in Masse-%	Zeichen	Beispiel
< 10 (schwach)	...)	SG SM) = Grobsand mit 10% Mittelsand
10 bis 30 (mittel)	... (SF (U = Feinsand mit 10 bis 30% Schluff
> 30 (stark)	... !	T SF! = Ton mit 30% Feinsand

Beim Auftreten von Korngemischen werden folgende Bezeichnungen verwendet:

1. Gleicher Anteil von zwei Hauptkomponenten

z. B. Mittelsand, Grobkies

- Komponenten werden durch Komma getrennt

	S	M	,	K	G
--	---	---	---	---	---

2. Homogene Mischung

z. B. Mittelsand bis Feinkies

- Bei Korngemischen mit weitem Korngrößenspektrum Angabe der oberen und unteren Kornklasse, getrennt durch Bindestrich

	S	M	-	K	F
--	---	---	---	---	---

3. Wechselagerung von zwei Gesteinen

z. B. Mittelsand/Schluff

- Trennung der beiden Komponenten durch Schrägstrich

	S	M	/	U	
--	---	---	---	---	--

Die Vergleichbarkeit visueller Gesteinsbeschreibungen im vorläufigen Schichtenverzeichnis ist oft dadurch erschwert, weil die halbquantitativen Begriffe teilweise unterschiedlich interpretiert werden.

Nach GARLING /5/ kann die visuelle Lockergesteinsprobenansprache verbessert und vereinheitlicht werden, wenn folgende drei Aspekte beachtet werden:

1. Neben der Verwendung halbquantitativer Begriffe sollten die geschätzten Prozentanteile der einzelnen Fraktionen mit dokumentiert werden.
2. Die Benutzung von Bestimmungshilfsmitteln (Körnungslehren, Meßlupen, Längenmaßstäbe usw.) sollte allgemein üblich werden.
3. Die individuelle Gesteinsprobenansprache sollte des öfteren mit Hilfe nachfolgend durchgeführter Siebanalysen kontrolliert werden.

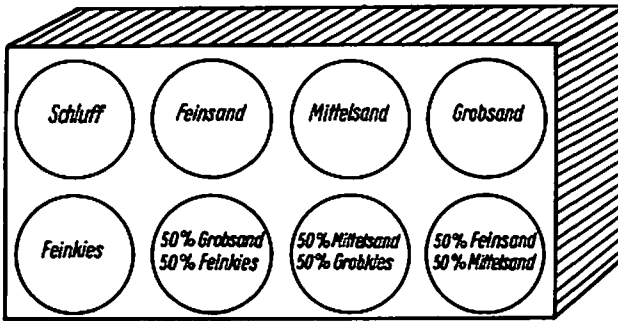
Zum feldmäßigen Erkennen einiger wichtiger Komponenten können nach Tabelle 5 folgende Anhaltswerte für die Korngrößen-einstufung benutzt werden:

Tabelle 5. Vergleichskorngrößen

Kurzzeichen	Beschreibung
Gki (KG)	größer als Haselnuß, durchschnittlich ungefähr Kartoffel- oder Hünereigröße
Mki (KM)	größer als Erbse, nicht größer als Haselnuß
Fki (KF)	größer als Streichholzkopf, nicht größer als Erbse
Gs (SG)	kleiner als Streichholzkopf, größer als Grieß
Ms (SM)	normaler Grieß oder Zucker
Fs (SF)	noch kleiner als Grieß oder Zucker, als Einzelkorn gerade noch erkennbar

Um den Umfang der nicht gänzlich zu beseitigenden subjektiven Fehler weiter einzuschränken, wird die Verwendung von sogenannten "Körnungslehren" empfohlen. Man versteht darunter ein zum Betrachter mittels Glasscheibe durchsichtig verschlossenes Behältnis (siehe Bild 15), in dem sich Proben genau definierter Korngrößenbereiche befinden. Durch ständigen Vergleich der Kornfraktion in der Körnungslehre mit dem anzusprechenden Probenmaterial aus einer Bohrung ist eine relativ genaue Bestimmung der Gesteinszusammensetzung bereits im Feld möglich.

Bild 15
Körnungslehre



Da Körnungslehren z. Z. nicht hergestellt werden, sollen für den Selbstbau dieser wichtigen Bestimmungshilfe folgende Hinweise gegeben werden:

Aus einem Holzstück (ca. 25 bis 30 mm dick), dessen Länge wegen der Handlichkeit 150 bis 200 mm nicht überschreiten sollte, werden mit der Lochkreissäge Vertiefungen von 15 bis 20 mm Durchmesser ausgesägt. In diese sind die aus einem Labor beschafften definierten Kornfraktionen abzufüllen. Die gesamte Platte ist mittels Glas oder Plexiglas dicht abzudecken.

6.1.2. Beimengungen

Beimengungen hinsichtlich der Korngrößenzusammensetzung eines Gesteins wurden unter Punkt 6.1.1. erläutert, so daß hier nur sonstige stoffliche Bestandteile zu erwähnen sind.

Humusgehalt

Zur Schätzung des Humusgehaltes können die Abstufungen sehr schwach ... bis sehr stark humos, anmoorig und Moorboden (Torf) verwendet werden.

Kalkgehalt (HCl-Test bzw. Karbonatgehaltsbestimmung)

Der HCl-Test wird an unaufbereiteten Gesteinsproben durch Betropfen mit verdünnter Salzsäure durchgeführt und in Anlehnung an TGL 11 460/02 nach Tabelle 6 dokumentiert.

Tabelle 6. Abstufung des Kalkgehaltes von Gesteinen

Reaktion	Bezeichnung	Kurzzeichen
kein Aufbrausen	kalkfrei	NC
stellenweises Aufbrausen	vereinzelt kalkhaltig	VC
schwaches Aufbrausen	schwach kalk- haltig	SC
deutliches Aufbrausen	kalkhaltig	C
starkes Aufbrausen	stark kalkhaltig	CC

Eisengehalt

Anhand von Farbe und Verfestigungsgrad (Verkittung, Verkrustung) kann der Eisengehalt grob eingeschätzt werden:

- eisenschüssig
- ortsteinhaltig
- raseneisenhaltig

6.1.3. Gefüge

Nach /1/ versteht man unter Gefüge den inneren Aufbau eines Gesteins, bestimmt durch dessen Struktur und Textur. Die Struktur ergibt sich aus den verschiedenen Mineralkomponenten und der Art ihres Zusammentretens.

Zu den Struktureigenschaften zählen Kristallinitätsgrad, Korngröße, Kornverteilung, Kornform und Kornbindung.

Textur bezeichnet die Gefügeeigenschaften, die sich auf räumliche Anordnung und Verteilung der Gemengteile beziehen. Die Raumanordnung sowie die Raumerfüllung der Gefügekörner bestimmen die Textureigenschaften.

Bei den Sedimentgesteinen, die vielfach als Lockersedimente vorliegen, sind neben den bereits im Punkt 6.1.1. beschriebenen strukturellen Angaben zur Korngröße und Kornverteilung diejenigen zur Kornform (Rundungsgrad und Oberflächeneigen-

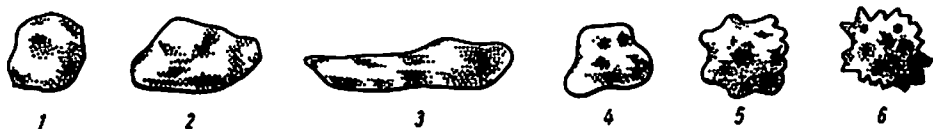


Bild 16. Kornformen

- | | |
|---------------|----------------|
| 1 kugelig | 4 abgerundet |
| 2 plattig | 5 kantig |
| 3 nadelförmig | 6 scharfkantig |

schaften der Körner) wichtig. Bild 16 zeigt eine Zusammenstellung verschiedener Kornformen.

Während in Sanden und Kiesen die Einzelkörner meist kugelig auftreten, sind Schluffe und Tone vorwiegend aus plattigen Bestandteilen aufgebaut. Die Kornform hat Einfluß auf die Stabilität des Korngerüstes und auf die Durchlässigkeit. Texturell ist für die Sedimentgesteine die Art der Schichtung am wichtigsten. Hierbei kann man je nach den Ablagerungsbedingungen zwischen Parallel-, Schräg-, Diagonal-, Kreuz- und Rippelschichtung unterscheiden. Für die Durchlässigkeit der Sedimentgesteine ist ihr Porenraum von ausschlaggebender Bedeutung. Nach der räumlichen Anordnung der einzelnen Gesteinsteilchen zueinander unterscheidet man Einzelkorn-, Waben-, Flocken-, Krümel- und Schollengefüge - siehe Bild 17.

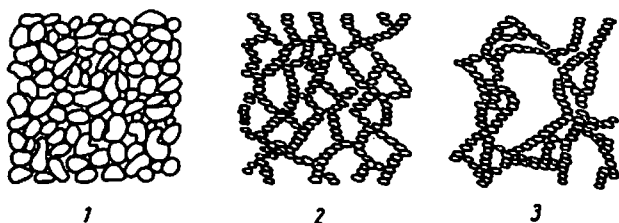


Bild 17
Gefügearten
1 Einzelkorn-
gefüge
2 Wabengefüge
3 Flockengefüge

Die wichtigsten Lockergesteine besitzen Einzelkorngefüge, bei dem die Teilchen aneinander liegen und Hohlräume und Gesteinsteilchen statistisch verteilt sind.

Eine Auswahl von Gefügearten, die bei magmatischen und metamorphen Gesteinen unterschieden werden, ist in Tabelle 7 zusammengestellt.

Tabelle 7. Gefügearten von Festgesteinen

Bezeichnung	Kurzzeichen	Bezeichnung	Kurzzeichen
bänderig	B	schieferig	S
flaserig	FL	schuppig	SU
kavernös	KV	wellig	WL
körnig	K	brekziös	BZ
massig	M		
porphyrisch	PY		

6.1.4. Zersetzungsgrad, Bindigkeit und Konsistenz

Der Zersetzungsgrad des Gesteins kann in Anlehnung an die TGL 24 408/05 nach Tabelle 8 beschrieben werden:

Tabelle 8. Zersetzungsgrad von Gesteinen

Merkmal	Bezeichnung	Kurzzeichen
ohne Anzeichen der Zersetzung, keine Festigkeitsminderung	frisch	FRI
farbliche Veränderungen gegenüber Primärgestein (z. B. gebleicht, entfärbt)	angewittert	ANG
starke Herabminderung der Festigkeit	mürbe	MRB
mechanische Auflösung zu Lockermaterial (z. B. Grus)	grusig	GRS
mineralogische Umwandlung zu Lockermaterial (z. B. Kaolin)	zersetzt	ZRS

Für bindige Lockergesteine ist die Konsistenz zu bestimmen:

Tabelle 9. Konsistenz bindiger Lockergesteine

Merkmal	Bezeichnung	Kurzzeichen
Spülgemisch	flüssig	FL
quillt in geballter Faust zwischen den Fingern hindurch	sehr weich	SW
leicht knetbar	weich	WE
schwer knetbar	steif	ST
bröckelt beim Ausrollen zu 3mm-Walzen	halbfest	HF
ausgetrocknet	fest	FE

Bei nichtbindigen Lockergesteinen wird die Gesteinsfestigkeit angegeben:

- lose gelagert
- schwach verfestigt
- mittelfest
- sehr fest
- extrem fest

6.1.5. Farbe

Die Farbe eines Gesteins wird grundsätzlich am erdfeuchten Material bestimmt, trockene Proben sind vorher anzufeuchten. Nach TGL 24 408/05 sind Grundfarben oder Kombinationen dieser mit folgenden Abkürzungen zu verwenden.

"Hell- oder Dunkel"-Abstufungen sind der Farbbezeichnung voranzustellen. Bei Farbkombinationen steht die bestimmende Farbe an zweiter Stelle.

Beispiel:

Hellgraubraun - HGB

Tabelle 10. Gesteinsfarben

<u>Grundfarben</u>				<u>Abstufungen</u>	
Blau	A	Orange	O	dunkel	D .
Braun	B	Rot	R	mittel	M .
Bunt	U	Schwarz	S	hell	H .
Gelb	E	Violett	V	<u>Nebenfarben</u>	
Grün	N	Weiß	W	marmoriert	... M
Grau	G	Rostig	F	streifig	... S
				fleckig	... F

6.2. Laboruntersuchungen

6.2.1. Korngrößenbestimmung

6.2.1.1. Begriffe und Bedeutung

Unter der Korngröße d als Maßzahl für die Größe eines Einzelkorns versteht man

- bei direkter Messung die Weite eines Rundloches, durch die das Korn hindurchgeht
- bei indirekter Messung die kleinste lichte Maschenweite, durch die das Korn hindurchfällt bei Verwendung von Maschensieben und
- bei indirekter Messung nach Sedimentationsverfahren den Durchmesser einer Kugel der gleichen Reindichte

Die Korngrößenverteilung beschreibt den Anteil einzelner Korngrößengruppen an der Gesamtmasse einer Gesteinsprobe. In der hydrogeologischen Praxis dient die Korngrößenbestimmung im Labor hauptsächlich folgenden Zwecken:

- Überarbeitung der Feldschichtenverzeichnisse zum endgültigen Schichtenverzeichnis
- Ermittlung von Kornkennwerten (d_{10} , d_{17} , d_{60} , d_{85} , U usw.)
- Brunnenbemessung (Filter, Gewebe, Kiesschüttung) nach den ermittelten Kornkennwerten
- k-Wert-Berechnung aus den Ergebnissen der Kornverteilung

6.2.1.2. Verfahren und Anwendungsgrenzen
der Korngrößenbestimmung

In Tabelle 11 sind die wichtigsten Untersuchungsverfahren zusammengestellt, wobei die unter 2. und 3. genannten Verfahren für die hydrogeologische Praxis am bedeutungsvollsten sind.

Tabelle 11. Verfahren der Korngrößenbestimmung

Verfahren	Korngrößenbereich in mm
1. direkte Messung der Korngrößen	> 63
2. indirekte Messung der Korngrößen durch Siebverfahren	} 63 bis 0,063
- Trockensiebung bei nichtbindigen Gesteinen	
- Naß-/Schlämmsiebung bei nicht- bindigen Gesteinen mit 25% Anteil < 0,063 mm	
3. Schlämm- und Sedimentationsverfahren u. a.	
- Aräometerverfahren nach CASAGRANDE	0,1 bis 0,001
- Pipetteverfahren nach ANDREASEN	0,063 bis 0,002
- Sedimentationswägung	0,2 bis 0,002
4. Sonstige Verfahren	
- Windsichtung	1,0 bis 0,005
- Zentrifugiermethoden	0,01 bis 0,00001
- mikroskopische Verfahren	0,1 bis 0,000001

6.2.1.3. Siebanalyse

Probemenge:

Die bereits im Punkt 3.3., Seite 21 genannte Probemenge für die Herstellung der Laborproben (Sande ~ 1,5 kg und Kies ~ 4,0 kg) wird im Labor weiter bis zur notwendigen Siebaufgabemenge (Einwaage) reduziert:

- Feinsand und Mittelsand - 400 ... 600 g
- Grobsand und Kiese - bis 1500 g

Durchführung:

Das Probenmaterial wird im Trockenschrank bei ~ 105 °C getrocknet, durch Vierteln und Verjüngen die Einwaagemenge gewonnen und mittels Vibrationsprüfsiebmaschinen gesiebt. Mit den genannten Maschinen werden günstige Siebergebnisse erzielt, weil der horizontalen Bewegung des Siebbodens zusätzlich noch eine vertikale Bewegung überlagert wird. Als Siebe werden sogenannte Quadratlochsiebe nach TGL O-4188 verwendet, die zu einem Standard-Siebsatz mit den in Tabelle 12 genannten Maschenweiten zusammengesetzt werden.

Maschenweite in mm	Siebrückstand R_i in mm	Tabelle 12. Standard- Siebsatz
6,3	$R_1 > 6,3$	
4,0	$R_2 > 4,0$	
2,0	$R_3 > 2,0$	
1,0	$R_4 > 1,0$	
0,63	$R_5 > 0,63$	
0,4	$R_6 > 0,4$	
0,2	$R_7 > 0,2$	
0,1	$R_8 > 0,1$	
0,063	$R_9 > 0,063$	
Auffanggefäß	$R_{10} < 0,063$	

Nach Beendigung der Siebung (Siebzeit zwischen 10 bis 30 min) werden die Rückstände R_i in g auf den Einzelsieben der ver-

schiedenen Maschenweiten in mm sowie der Feinanteil $< 0,063$ mm im Auffanggefäß durch Wägung ermittelt.

6.2.1.4. Sedimentationsanalyse

Die untere Grenze der Siebverfahren liegt bei $0,063$ mm. Im Korngrößenbereich $< 0,063$ mm ermittelt man deshalb die Korngrößenzusammensetzung der Gesteine durch Sedimentations- (Schlamm-)Analysen.

Physikalisches Prinzip:

In einer Suspension aus Gesteinsteilchen und (meist) Wasser läßt man erstere frei sedimentieren. Als Voraussetzung gilt, daß die Dichte der Feststoffteilchen größer als die Dichte des umgebenden Mediums sein muß. Die Konzentrationsänderung der Suspension wird in Abhängigkeit von der Sedimentationszeit ermittelt. Die Berechnung der Teilchengrößen erfolgt bei allen Verfahren nach dem Gesetz von STOKES.

Aräometerverfahren nach CASAGRANDE:

Bei dieser sehr einfachen Sedimentationsmethode wird durch Spindeln mit einem Aräometer die Trübedichte des in einem Standzylinder aufgeschlammten Gesteinsmaterials zu bestimmten Zeitpunkten (z. B. nach $0,5$; 1 ; 2 ; 5 ; 10 ; 20 und 30 min) ermittelt (siehe Bild 18).

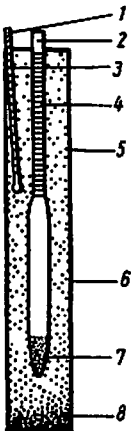


Bild 18
Schema der Schlämmanalyse nach dem Aräometerverfahren
1 Thermometer
2 Aräometer
3 Meßmarke bei 1000 cm^3
4 Skala
5 20 bis 80 g Gestein mit destilliertem Wasser gemischt (Suspension)
6 Glaszylinder 1000 m^3 Inhalt
7 Schrottkörner
8 bereits abgesetzte Bodenteilchen

6.2.2. Porenanteilsbestimmung

Begriffe und Bedeutung:

Eine der hydrogeologisch wesentlichsten Eigenschaften (Speicher- und Durchlässigkeitsvermögen) der Sedimentgesteine ist das Vorhandensein von Poren (Hohlraum im Millimeter- bis Zentimeterbereich). Das Porenvolumen stellt das Volumen der mit Wasser und Luft (= Dreiphasensystem Gestein/Wasser/Luft) bzw. Wasser oder Luft (= Zweiphasensystem Gestein/Wasser oder Luft) erfüllten Poren eines Gesteins dar:

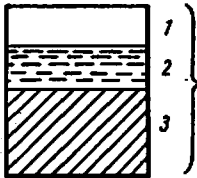


Bild 19
Definition der Hohlräume
1 Volumen der Luft
2 Volumen des Wassers } (V_p)
3 Feststoffvolumen (V_s)
4 Volumen des Gesteinskörpers (V)

$$V_p = V - V_s$$

Der Porenanteil n drückt das Verhältnis von Porenvolumen (V_p) zum Volumen des Gesteinskörpers (V) aus:

$$n = \frac{V_p}{V}$$

(Angabe in % oder als Dezimalbruch)

Zur Ermittlung des Speicherkoeffizienten eines Grundwasserleiters wird im Labor der entwässerbare Porenanteil n_e , auch als dränbare oder drainable Porosität n_d bezeichnet (bei Grundwasserabsenkung freiwerdender Porenanteil), aus der Differenz zwischen dem Porenanteil n und dem Wasserhaltewert w_a bestimmt:

$$n_e = n - w_a$$

(in % oder als Dezimalbruch)

Durchführung:

Der Wasserhaltewert w_a wird mit Hilfe der Absaugapparatur nach ZUNKER (siehe Bild 20) bestimmt.

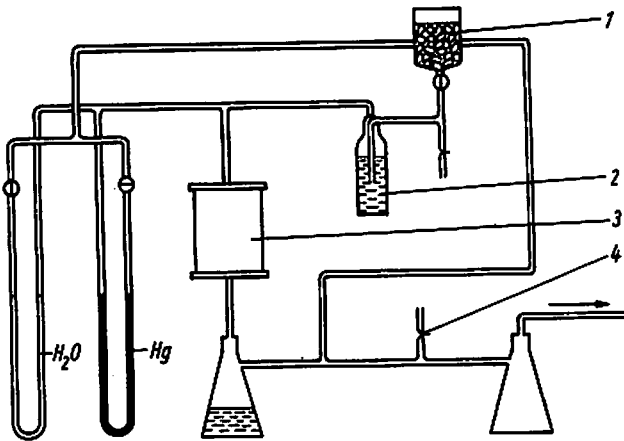


Bild 20
Absaugvorrichtung
zur Bestimmung des
Wasserhaltewertes
1 Entnahmestutzen
mit ungestörter
Probe
2 Waschflasche
3 nasser Kiesfilter
4 Vakuumregelung

Das Prinzip dieses Verfahrens besteht in der Erzeugung eines Unterdruckes, der den in der wassergesättigten Probe herrschenden Kapillarkräften entgegenwirkt.

Der Porenanteil n wird ermittelt aus dem Volumen V der Probe (Abmessungen des Probezylinders) und dem Feststoffvolumen V_s . Letzteres wird durch Wägen aus der Trockenmasse m_t und deren Dichte ρ_s bestimmt. Nach dem Wässern der Probe erfolgt der Absaugvorgang mittels Vakuumpumpe. Die Absaugzeit wird mit zunehmendem mittlerem Korndurchmesser geringer (Feinsand $\hat{=}$ 35 min ... Grobsand und Kiese $\hat{=}$ 20 min). Nach Abstellen der Vakuumpumpe wird die Probe feucht gewogen (m_f) und das Volumen bestimmt.