

Tabelle 2.4. Eigenschaften von reinem Wasser zwischen 0 und 100 °C. Nach Weast (1978) und Lohman et al. (1972).

Temperatur °C	Dichte ρ bei Normalluftdruck (g cm ⁻³)	dynamische Viskosität μ (Centipoise) * (10 ⁻² g cm ⁻¹ s ⁻¹)	kinematische Viskosität ν (Centistokes)* (10 ⁻² g cm ⁻² s ⁻¹)
0	0,99984	1,7938	1,7941
5	0,99997	1,5188	1,5189
10	0,99970	1,3097	1,3101
15	0,99910	1,1447	1,1457
20	0,99820	1,0087	1,0105
25	0,99704	0,8949	0,8976
30	0,99565	0,8004	0,8039
35	0,99403	0,7208	0,7251
40	0,99221	0,6536	0,6587
45	0,99021	0,5970	0,6029
50	0,98804	0,5492	0,5558
55	0,98570	0,5072	0,5146
60	0,98321	0,4699	0,4779
65	0,98056	0,4368	0,4455
70	0,97778	0,4071	0,4164
75	0,97486	0,3806	0,3904
80	0,97180	0,3570	0,3674
85	0,96862	0,3357	0,3466
90	0,96531	0,3166	0,3280
95	0,96189	0,2994	0,3113
100	0,95835	0,2839	0,2962

* vgl. Abschn. 1.4.1

2.3.5 Auswertung von Korngrößenanalysen

Da es möglich ist, aus der spezifischen Permeabilität eines Lockergesteins den Durchlässigkeitskoeffizienten für Wasser einer bestimmten Viskosität zu errechnen, liegt es nahe, Kornverteilungskurven oder Sieblinien unter Benutzung von Gl. 2.71

$$k = C \cdot d_w^2$$

auszuwerten. Dies bietet sich an, da in der Praxis die Ausführung von Korngrößenanalysen eine schnelle und billige Möglichkeit ist, Orientierungswerte für die Durchlässigkeit K zu erhalten.

Die Korngrößenverteilung von beim Bohren gewonnenen oder im Aufschluss von Hand entnommenen Lockergesteinsproben wird durch Sieben oder Schlämmen festgestellt (vgl. die Beschreibung der Probenahme in Kap. 8). Die Korngrößen werden in halblogarithmischer Darstellung gegen die entsprechenden Gewichtsprozentage aufgetragen und anschließend nach einem der weiter unten beschriebenen oder aus der Literatur zu entnehmenden Verfahren ausgewertet.

Nach DIN 4022 (vgl. auch Bieske, Rubbert u. Treskatis 1997) sind auf der logarithmisch geteilten Abszisse bestimmte Kornklassen oder Fraktionen auszuhalten.

Gesiebt wird bis zur Grenze Feinsand – Grobschluff bei 0,06 mm; der darunterliegende Feinkornbereich wird traditionell geschlämmt bzw. in modernen Labors mit dem Laserbeugungsverfahren analysiert (Leschonski 1987; Wachernig 1987). Tabelle 2.5 gibt die genormte Kornklassierung wieder.

Tabelle 2.5. Kornklassen nach DIN 4022

	Feinstkorn oder Ton	$\leq 0,002$ mm
Schlufffraktion	Feinschluff	0,002–0,006 mm
	Mittelschluff	0,006–0,02 mm
	Grobschluff	0,02–0,06 mm
Sandfraktion	Feinsand	0,06–0,2 mm
	Mittelsand	0,2–0,6 mm
	Grobsand	0,6–2 mm
Kiesfraktion	Feinkies	2–6,3 mm
	Mittelkies	6,3–20 mm
	Grobkies	20–63 mm
	Steine	≥ 63 mm

Wie die Erfahrung zeigt, ergeben Auswertungen der Sieblinien Durchlässigkeitswerte, die oft mit solchen aus in-situ-Versuchen übereinstimmen.

Schwierigkeiten treten vor allem bei Spülbohrungen auf, weil

- bei einer oder nur wenigen Proben ein zu geringer Vertikalbereich der wassererfüllten Mächtigkeit erfasst wird,
- die aus dem Spülstrom gewonnenen Proben nur unvollkommen der tatsächlichen Kornverteilung im Aquifer entsprechen.

Die erste Schwierigkeit überwindet man dadurch, dass man nach jedem Schichtwechsel, mindestens aber nach jedem Meter Bohrfortschritt, eine Probe nimmt. Dagegen bleibt die Probenahme aus dem Spülstrom von Bohrungen, die auch dickere Tonpakete durchsinken, immer etwas problematisch. Sobald das durchbohrte Lockergestein nämlich Schluff- oder Tonanteile enthält, ist es nicht

möglich, diese vom Trübesatz der Spülung zu unterscheiden. Dadurch kann die Kornverteilung häufig nur annähernd angegeben werden. Da tiefere Bohrungen nicht als Trockenbohrungen niedergebracht werden können, muss sich der bearbeitende Hydrogeologe oder Ingenieur stets bewusst bleiben, dass Sieblinien, die aus Spülprobenanalysen aufgestellt werden, oft nur eine begrenzte Genauigkeit aufweisen. Er wird dann andere Verfahren wie z.B. geophysikalische Bohrlochmessungen anwenden.

Ungleichförmigkeit, spezifische Oberfläche und wirksame Korngröße. Natürlich vorkommende kiesig-sandige, sandig-schluffige und schluffig-tonige Lockersedimente zeigen in der üblichen halblogarithmischen Darstellung meist einen S-förmigen Verlauf.

Vereinfachend lassen sich bei vielen Sieblinien drei Kurvenäste aushalten (Abb. 2.16):

- ein unterer Kurvenast A–B
- ein mittlerer Kurvenast B–C, der sich annähernd als logarithmische Gerade darstellt
- ein oberer Kurvenast C–D mit rasch abnehmender Steigung (Bieske, Jourdan u. Wandt 1989)

Zur Charakterisierung des maßgeblichen Teils der Sieblinie zieht man den *Ungleichförmigkeitsgrad* U heran

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.75)$$

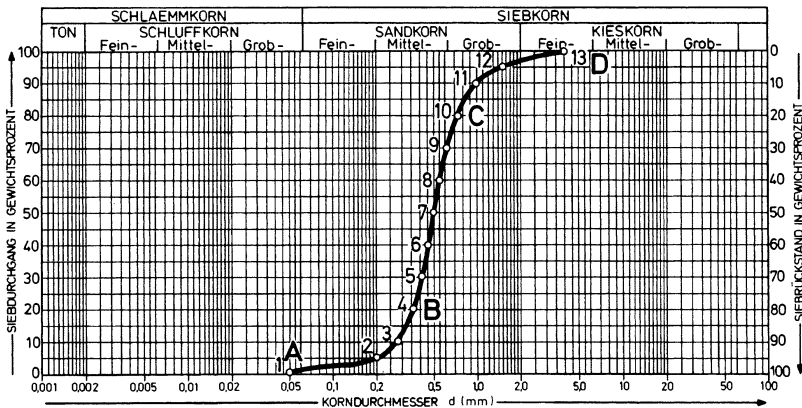


Abb. 2.16. Korngrößenverteilung eines pliozänen Mittel- bis Grobsandes aus dem westlichen Erftbecken, Niederrheinische Bucht

Je gleichförmiger ein Korngemisch zusammengesetzt ist, umso steiler ist der mittlere Ast der dazugehörigen Verteilungskurve oder *Sieblinie* und umso kleiner ist U . Je flacher die Kurve, umso größer ist der Ungleichförmigkeitsgrad.

Diese Größe U übt einen bestimmenden Einfluss auf den Parameter C und die wirksame Korngröße d_w der Gl. 2.71 aus.

Die wahre Bedeutung der wirksamen Korngröße versteht man, wenn man sie aus der *spezifischen Oberfläche* O_s eines Korngemisches herleitet. Mit Kozeny (1927) sei definiert, dass ein Haufwerk von m gleich großen, d.h. gleichförmigen Kugeln mit einem Durchmesser $d = d_w$ ein Volumen V einnimmt. Für das Gesamtvolumen der Kugeln gilt

$$m \cdot \frac{\pi \cdot d_w^3}{6} = (1 - n) \cdot V$$

mit

n = Gesamtporenraum des Haufwerks

Analog dazu beträgt die Summe O_m der Oberflächen aller m Kugeln

$$O_m = m \cdot \pi \cdot d_w^2.$$

Da hier die spezifische Oberfläche

$$O_s = \frac{\text{Summe der Kugeloberflächen}}{\text{Gesamtvolumen der Kugeln}}$$

ist, so ergibt sich

$$O_s = \frac{O_m}{(1 - n) \cdot V} = \frac{6}{d_w} \quad (2.76)$$

oder

$$d_w = \frac{6 \cdot (1 - n)}{O_m} \cdot V \quad (2.77)$$

Weil nun aber ein natürliches Korngemisch sich aus Körnern ganz unterschiedlicher Durchmesser aufbaut, kommt es darauf an, es analytisch durch ein Haufwerk gleich großer Kugeln zu ersetzen. Dabei muss deren „Ersatzdurchmesser“ identisch mit der wirksamen Korngröße d_w sein. Geht man zunächst von Kornfraktionen wie z.B. Grobkies, Mittelkies, Feinkies etc. aus, so muss jeweils

- einer Kornfraktion $\leq d_1, d_1 - d_2, \dots, d_{n-1} - d_n$ $\dim(d) = L$
- ein Volumenanteil $\Delta V_1, \Delta V_2, \Delta V_3, \dots, \Delta V_n$ $\dim(V) = L^3$
- ein Gewichtsanteil $\Delta G_1, \Delta G_2, \Delta G_3, \dots, \Delta G_n$, $\dim(G) = MLT^{-2}$

entsprechen, wobei

$$\Sigma \Delta G = 1 \text{ bzw. } 100 \% \text{ sein soll.}$$

Denkt man sich jede der obigen Fraktionen durch Kugeln mit jeweils einem mittleren Durchmesser $d'_1, d'_2, d'_3, \dots, d'_n$ repräsentiert, so gilt beispielsweise

$$O_1 = m_1 \cdot \pi \cdot (d'_1)^2 \quad (2.78)$$

und

$$\Delta V_1 \cdot (1-n) = \frac{m_1 \cdot \pi \cdot (d'_1)^3}{6} \quad \text{usw.} \quad (2.79a)$$

Wegen des nötigen Arbeitsaufwandes sind die Volumenanteile ΔV nur schwer zu ermitteln. Da es sich aber, wie oben demonstriert, um Verhältniszahlen handelt, können stattdessen die Gewichtsanteile ΔG benutzt werden, die bei einer Korngrößenanalyse anfallen. Demzufolge gilt

$$\Delta G_1 \cdot (1-n) = \frac{m_1 \cdot \pi \cdot (d'_1)^3}{6} \quad \text{usw.} \quad (2.79b)$$

und

$$\frac{O_1}{\Delta G_1 \cdot (1-n)} = \frac{6}{d'_1} \quad \text{etc.}$$

$$\frac{O_2}{\Delta G_2 \cdot (1-n)} = \frac{6}{d'_2}$$

sowie

$$O_m = O_1 + O_2 + \dots + O_{n-1} + O_n = 6 \cdot (1-n) \cdot \left[\frac{\Delta G_1}{d'_1} + \frac{\Delta G_2}{d'_2} + \dots + \frac{\Delta G_{n-1}}{d'_{n-1}} + \frac{\Delta G_n}{d'_n} \right]$$

$$O_m = 6 \cdot (1-n) \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\Delta G_i}{d'_i}$$

Für immer kleiner werdende Intervalle, die schließlich gegen Null gehen, wird nach Kozeny (1927) der Summenausdruck

$$\sum \frac{G}{d'} = \int \frac{dG}{d_n} = \frac{G}{d_n} + \int \frac{G}{d_n^2} \cdot d(d_n) = \frac{1}{d_w} \quad (2.80)$$

und $\dim \left(\frac{1}{d_w} \right) = L^{-1}$

Das Integral der Gl. 2.80 ist graphisch leicht zu lösen. Wie in Abb. 2.17 trägt man auf normalem Millimeterpapier zunächst als Sieblinie die aus der Korngrößenanalyse erhaltene Summe der Gewichtsanteile $\Sigma \Delta G$ (Siebdurchgang) gegen die entsprechenden Korngrößen d_n auf. Anschließend konstruiert man die reziproke

Funktion $\frac{1}{d_n}$ und trägt von der Sieblinie parallel zur Abszisse die dazugehörigen

$\frac{1}{d_n}$ -Werte auf (s. folgendes Beispiel).

Die so erhaltenen Punkte liegen auf einer Kurve C . Zwischen dieser Kurve und der Sieblinie befindet sich die Fläche des Integrals $\int \frac{dG}{d_n}$ der Gl. 2.80. Diese Fläche ist gleich groß mit der eines Rechtecks, das die Höhe $\Sigma \Delta G = 1$ (100 %) und die Basis $\frac{1}{d_w}$ besitzt.

Einen ganz ähnlichen Lösungsweg zur graphischen Bestimmung von d_w beschreibt Beyer (1964 b).

Abschließend ist die Bedeutung der wirksamen Korngröße wie folgt zu definieren:

„Die wirksame Korngröße d_w kennzeichnet den charakteristischen Korndurchmesser eines natürlichen Lockergesteins, der die Größe der spezifischen Permeabilität bestimmt. Gleiche Koeffizienten C vorausgesetzt, verhalten sich ein Haufwerk mit Körnern nur der einen Korngröße d_w und ein Korngemisch mit d_w als wirksamer Korngröße hydraulisch identisch.“

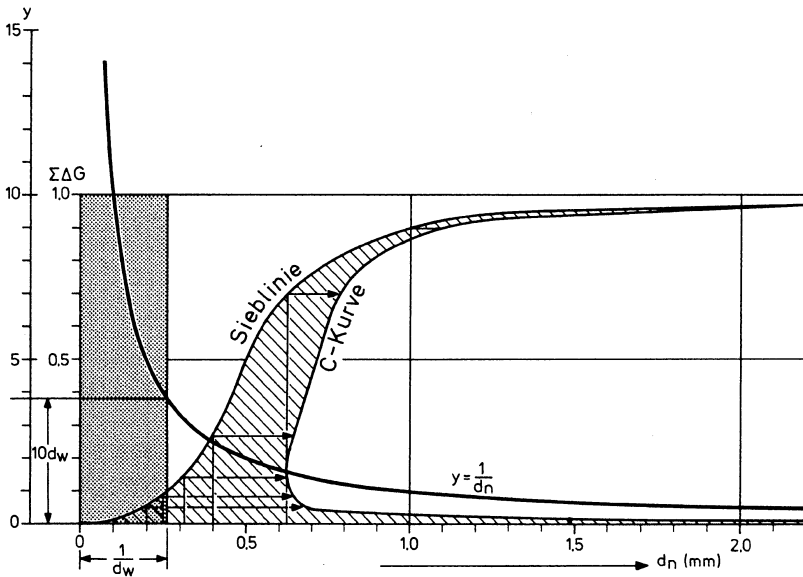


Abb. 2.17. Kornverteilung, inverse Kornverteilung und Flächenhüllkurve zur graphischen Ermittlung der wirksamen Korngröße d_w . Nach Kozeny (1927).

Beispiel

Ein Mittel- bis Grobsand baut sich aus den in Tabelle 2.6 wiedergegebenen Kornfraktionen auf.

Tabelle 2.6. Kornverteilung und reziproke Kornverteilung

$\Sigma \Delta G$ Siebdurchgang (Gewichtsanteile)	d_n (mm)	$y = \frac{1}{d_n}$ (mm ⁻¹)
0,015	0,071	14,08
0,025	0,1	10,0
0,04	0,16	6,25
0,05	0,2	5,0
0,08	0,25	4,0
0,14	0,315	3,17
0,265	0,4	2,5
0,7	0,63	1,59
0,9	1,0	1,0
0,965	2,0	0,5
0,985	3,15	0,317
0,995	4,0	0,25

Wie groß ist der wirksame Korndurchmesser d_w dieses Sandgemisches?

Mit Kozeny (1927) konstruiert man zunächst auf Millimeterpapier die Kornverteilungskurve (Abb. 2.17), indem man entlang der Abszisse die Korngrößen d_n gegen den aufsummierten Siebdurchgang $\Sigma \Delta G$ aufträgt. Zweckmäßigerweise wählt man die Maßstäbe so, dass $\Sigma \Delta G = 1$ und $d_n = 1,00$ mm den gleichen Abstand zum Achsenkreuz aufweisen. Man vermeidet dadurch mögliche Fehler bei Maßstabsumrechnungen.

Anschließend zeichnet man die reziproke Funktion $y = \frac{1}{d_n}$ wie in Abb. 2.17 gezeigt.

Nun wird von der Sieblinie oder Kornverteilungskurve aus horizontal nach rechts für jeden Punkt d_n der dazugehörige Wert $\frac{1}{d_n}$ im Maßstab der Ordinate in den Graphen eingetragen. Die so entstandenen Punkte liegen auf der Hüllkurve C . Der Inhalt der Fläche zwischen Sieblinie und C -Kurve stellt das Integral $\int \frac{dG}{d_n}$ der Gl. 2.80 dar. Er ist auf dem Millimeterpapier durch Auszählen oder Planimetrieren zu bestimmen.

Nach Umwandlung des Flächeninhalts in ein Rechteck mit der Höhe $\Sigma \Delta G = 1$ und der Basis $\frac{1}{d_w}$ kann nun d_w unter Berücksichtigung des gewählten Maßstabs auf der y -Achse mit $d_w = 0,38$ mm bestimmt werden.

Einen anderen Weg zur Bestimmung der wirksamen Korngröße d_w hat Moll (1980) vorgeschlagen. Auf theoretischem, hier nicht wiedergegebenem Weg konnte er für gleichförmige Korngemische mit $U < 2$ einfach anzuwendende Formeln ableiten, die von der mittleren Korngröße d_m (50 % Siebdurchgang) eines Korngemisches bzw. d_{60} und d_{10} ausgehen. Aus der Siebung ergibt sich d_m als arithmetisches Mittel.

$$d_m = \frac{1}{100} \cdot \sum_{i=1}^n \Delta G_i \cdot d_i \quad (2.81)$$

mit

ΔG_i = prozentualer Gewichtsanteil der jeweiligen Kornklasse i mit

d_i = mittlerer Korndurchmesser dieser Klasse i

Die beiden Bestimmungsgleichungen von Moll lauten

$$d_w = 0,95 \cdot d_m \quad (2.82)$$

und

$$d_w = \left(0,75 + \sqrt{0,54 \cdot U - 0,48} \right) \cdot d_{10} \quad (2.83)$$

Beispiel

Für den in Abb. 2.16 gezeigten Mittel- bis Grobsand errechnet sich die wirksame Korngröße mittels Gl. 2.83 zu

$$d_w = \left(0,75 + \sqrt{0,54 \cdot 2,05 - 0,48} \right) \cdot 0,27 = 0,42 \text{ mm.}$$

Mit $U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 2,05$ ist die eingangs genannte Einschränkung für die Anwend-

barkeit dieser Formel nicht mehr genau erfüllt. Dennoch ist das Ergebnis zufriedenstellend, wenn man es mit dem erzielten Wert von $d_w = 0,39$ mm für das gleiche Korngemisch nach dem Verfahren von Kozeny, Köhler u. Köhler (s. weiter unten) vergleicht.

Sieblinienauswertung nach Hazen (1892) und Zieschang (1961). Als erster Autor versuchte Hazen auf empirische Weise, den Durchlässigkeitskoeffizienten K von Mittelsanden aus der Kornverteilung herzuleiten, indem er den wirksamen Korndurchmesser d_w mit d_{10} gleichsetzte. In der heute in Deutschland gebräuchlichen Form lautet seine Formel

$$K = 0,0116 \cdot d_{10}^2 \cdot (0,70 + 0,03 \Theta) \tag{2.84}$$

mit

- K = Durchlässigkeitskoeffizient (ms^{-1})
- d_{10} = Korngrößendurchmesser bei 10 % Siebdurchgang (mm)
- Θ = Temperatur des (schwach mineralisierten) Wassers ($^{\circ}\text{C}$)

Zieschang (1961), unter Anlehnung an Skaballanowitsch (1954), modifizierte diese Gleichung zu

$$K = C \cdot d_{10}^2 \cdot (0,70 + 0,03 \Theta) \quad (\text{ms}^{-1}) \tag{2.85}$$

mit C = empirischer Beiwert, der vom lithologischen Aufbau des Lockergesteins sowie von der Ungleichförmigkeit $U = \frac{d_{60}}{d_{10}}$ abhängt (s. Tabelle 2.7).

Beispiel

Wie groß ist die Durchlässigkeit des in Abb. 2.16 durch seine Sieblinie charakterisierten Mittel- bis Grobsandes, wenn die Wassertemperatur 10°C beträgt?

Es wird abgelesen bzw. berechnet

$$d_{10} = 0,27 \text{ mm}, \quad U = \frac{d_{60}}{d_{10}} = 2,05, \quad \text{folglich ist } C = 0,0139.$$

Nach Einsetzen dieser Zahlen in Gl. 2.85 lautet das Ergebnis

$$K = 0,0139 \cdot (0,27)^2 \cdot (0,70 + 0,03 \cdot 10) = 1,013 \cdot 10^{-3} \approx 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}.$$

Zu beachten ist der Unterschied zwischen $d_w \approx d_{10} = 0,27 \text{ mm}$ nach Hazen-Zieschang und $d_w = 0,38 \text{ mm}$, wie nach Kozeny für den selben Sand weiter oben ermittelt wurde.

Tabelle 2.7. Empirischer Koeffizient C als Variable der Lithologie eines Lockergesteins. Nach Zieschang (1961).

lithologischer Aufbau	Gültigkeitsbereich		
	$U = d_{60} / d_{10}$	von C für d_{10}	C
reiner Sand oder kiesiger Sand	1–3	0,1–0,6 mm	0,0139
reiner Sand oder kiesiger Sand	3–5	0,1–0,6 mm	0,0116
schwach schluffiger Sand (bis 2 % < 0,01 mm)	< 5	0,1–0,6 mm	0,0093
schwach tonschluffhaltiger Sand (bis 3 % < 0,01 mm)	< 5	0,08–0,6 mm	0,0070
tonschluffhaltiger Sand (bis 4 % < 0,01 mm)	< 5	0,06–0,6 mm	0,0046

Sieblinienauswertung nach Beyer (1964 b). Auf der Grundlage der graphischen Entwicklung von d_w von überwiegend gut gerundeten quartären und tertiären Sanden und Kiesen Norddeutschlands konnte Beyer einen funktionellen Zusammenhang zwischen d_w und d_{10} feststellen, dessen Kenntnis es ermöglicht, d_{10} zur (relativ) genauen Berechnung von d_w zu benutzen.

Tabelle 2.8. Zusammenhang zwischen wirksamer Korngröße d_w und d_{10} in Abhängigkeit von der Ungleichförmigkeit U für $0,06 \leq d_{10} \leq 0,6$ mm und $1 \leq U \leq 20$ (Beyer 1964 b)

$U = d_{60}/d_{10}$	d_w/d_{10}	d_w/d_{10}
Bereich	Bereichswerte	Mittelwert
1,0–1,9	1,0–1,6	1,4
2,0–2,9	1,6–1,9	1,8
3,0–4,9	1,9–2,2	2,1
5,0–9,9	2,2–2,5	2,3
> 10,0	> 2,5	> 2,5

Beyer verwendet den Beiwert C als Proportionalitätsfaktor, der sofort die Berechnung des Durchlässigkeitsbeiwertes K ermöglicht. Für mittlere Packungsdichten, schwach mineralisierte Grundwässer (Gesamtkonzentration < 500 mg/l) mit Temperaturen um 10 °C lässt sich die Relation $C = f(U)$ dimensionsgerecht tabellarisch (Tabelle 2.9) angeben.

Tabelle 2.9. Zusammenhang zwischen dem Proportionalitätsfaktor C und dem Ungleichförmigkeitsgrad U für $0,006 \leq d_{10} \leq 0,6$ mm und $1 \leq U \leq 20$ (Beyer 1964 b)

U (Bereich)	C (Bereichswerte)	C (Mittelwert)
1,0–1,9	$(120-105) \cdot 10^{-4}$	$110 \cdot 10^{-4}$
2,0–2,9	$(105-95) \cdot 10^{-4}$	$100 \cdot 10^{-4}$
3,0–4,9	$(95-85) \cdot 10^{-4}$	$90 \cdot 10^{-4}$
5,0–9,9	$(85-75) \cdot 10^{-4}$	$80 \cdot 10^{-4}$
10,0–19,9	$(75-65) \cdot 10^{-4}$	$70 \cdot 10^{-4}$
> 20,0	$< 65 \cdot 10^{-4}$	$60 \cdot 10^{-4}$

Tabelle 2.10. Ermittlung der Durchlässigkeitskoeffizienten aus der Kornverteilungskurve (Beyer 1964 b)

d_{60} (mm)	d_{10} (mm)																
	0,060	0,065	0,070	0,075	0,080	0,085	0,090	0,10	0,11	0,12	0,13	0,15	0,16	0,17	0,18		
0,06	4,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,08	4,1	5,0	5,8	6,7	7,7	-	-	-	-	-	-	-	10^{-4} ms^{-1}		-	-	-
0,10	4,0	4,7	5,3	6,4	7,3	8,4	9,6	1,2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,12	3,8	4,4	5,0	6,2	7,0	8,1	9,2	1,1	1,4	1,7	-	-	-	-	-	-	-
0,15	3,6	4,2	4,9	5,9	6,7	7,8	8,8	1,1	1,4	1,7	2,1	2,3	2,7	-	-	-	-
0,20	3,4	4,0	4,7	5,6	6,4	7,3	8,4	1,0	1,3	1,6	2,0	2,2	2,6	2,9	3,8	-	-
0,25	3,2	3,8	4,5	5,3	6,1	7,0	8,0	1,0	1,2	1,6	1,9	2,1	2,5	2,8	3,6	-	-
0,30	3,1	3,6	4,3	5,1	5,9	6,7	7,7	9,6	1,2	1,5	1,8	2,0	2,4	2,7	3,5	-	-
0,40	2,9	3,4	4,1	4,8	5,6	6,3	7,3	9,0	1,2	1,4	1,7	1,9	2,3	2,6	3,3	-	-
0,50	2,8	3,3	3,9	4,6	5,3	6,0	7,0	8,6	1,1	1,4	1,6	1,8	2,2	2,5	3,2	-	-
0,60	2,7	3,2	3,7	4,4	5,1	5,8	6,7	8,4	1,1	1,3	1,6	1,8	2,1	2,4	3,1	-	-
0,80	2,5	3,0	3,5	4,2	4,9	5,5	6,3	7,9	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	2,2	2,9	-	-
1,0	2,4	2,9	3,4	4,0	4,7	5,2	6,0	7,5	9,5	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,8	-	-
1,2	2,3	2,8	3,3	3,8	4,5	5,0	5,8	7,3	9,2	1,1	1,4	1,5	1,8	2,0	2,7	-	-
1,5	-	-	3,1	3,6	4,3	4,8	5,5	7,0	8,8	1,0	1,3	1,4	1,8	1,9	2,6	-	-
2,0	-	-	-	-	-	-	5,2	6,6	8,3	1,0	1,2	1,4	1,7	1,8	2,4	-	-
2,5	-	10^{-5} ms^{-1}		-	-	-	-	-	7,8	9,5	1,2	1,3	1,6	1,8	2,3	-	-
3,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,2	1,5	1,7	2,2	-	-

Tabelle 2.10. (Fortsetzung)

d_{60} (mm)	d_{10} (mm)																
	0,20	0,22	0,24	0,26	0,28	0,30	0,32	0,35	0,38	0,40	0,42	0,45	0,50	0,55	0,60		
0,20	4,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,25	4,6	5,6	6,9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10^{-3} ms^{-1}		-	-	-
0,30	4,5	5,4	6,6	8,0	9,3	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,40	4,2	5,1	6,3	7,5	8,8	1,0	1,2	1,5	1,7	2,0	-	-	-	-	-	-	-
0,50	4,0	4,9	6,0	7,2	8,4	1,0	1,2	1,4	1,6	1,9	2,1	2,4	3,0	-	-	-	-
0,60	3,8	4,7	5,8	6,9	8,1	9,4	1,1	1,4	1,6	1,8	2,0	2,3	2,9	3,6	4,3	-	-
0,80	3,6	4,4	5,4	6,5	7,7	9,0	1,1	1,3	1,5	1,7	1,9	2,1	2,7	3,4	4,1	-	-
1,0	3,5	4,2	5,2	6,2	7,3	8,5	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,6	3,2	4,0	-	-
1,2	3,3	4,1	5,0	6,0	7,0	8,1	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7	2,0	2,5	3,1	3,9	-	-
1,5	3,2	3,9	4,8	5,7	6,7	7,7	9,3	1,1	1,3	1,4	1,6	1,9	2,4	3,0	3,7	-	-
2,0	3,0	3,7	4,5	5,4	6,4	7,3	8,7	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,3	2,8	3,4	-	-
2,5	2,8	3,5	4,4	5,2	6,1	7,0	8,3	1,0	1,2	1,3	1,5	1,7	2,2	2,7	3,3	-	-
3,0	2,7	3,4	4,2	5,0	5,8	6,6	8,0	9,5	1,1	1,3	1,4	1,6	2,1	2,6	3,1	-	-
4,0	2,6	3,2	3,9	4,7	5,5	6,3	7,6	9,0	1,1	1,2	1,3	1,5	2,0	2,5	3,0	-	-
5,0	-	-	3,7	4,5	5,2	6,1	7,2	8,5	1,0	1,2	1,3	1,4	1,9	2,4	2,8	-	-
6,0	-	-	-	-	5,0	5,9	6,9	8,1	9,7	1,1	1,2	1,3	1,8	2,3	2,7	-	-
8,0	-	-	-	-	-	-	-	7,7	9,2	1,0	1,2	1,3	1,7	2,2	2,6	-	-
10,0	-	10^{-4} ms^{-1}		-	-	-	-	-	-	9,7	1,1	1,2	1,6	2,1	2,5	-	-
12,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,6	2,0	2,4	-	-	-

Mittels zahlreicher Vergleiche der K -Werte aus Pumpversuchen und Laboruntersuchungen war es Beyer schließlich möglich, für die in den Tabellen 2.8 und 2.9 aufgeführten Ungleichförmigkeitsstufen eine Abhängigkeit des Durchlässigkeitskoeffizienten vom d_{10} -Wert zu erkennen, wie in Abb. 2.18 und Tabelle 2.10 ersichtlich ist. Abschließend sei noch einmal festgehalten, dass der Gültigkeitsbereich des Verfahrens von Beyer durch die Bedingungen

$$0,06 \leq d_{10} \leq 0,6$$

$$1 \leq U \leq 20$$

vorgegeben ist. Sind diese Bedingungen gegeben, kann man mit diesem Verfahren schnell und mit geringem Aufwand für große Probenmengen mit ausreichender Genauigkeit Durchlässigkeitsbeiwerte ermitteln (Pekdeger u. Schulz 1975).

Beispiel

Welcher K -Wert errechnet sich für den Mittel- bis Grobsand (Kornverteilung in Abb. 2.16) durch Anwendung des Beyer-Verfahrens?

$$d_{10} = 0,27 \text{ mm}$$

$$d_{60} = 0,56 \text{ mm}$$

$$U = 2,05$$

Für diese Zahlen liest man aus Tabelle 2.10 oder Abb. 2.18:

$$K \approx 7,7 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1} \quad \text{bzw.} \quad K \approx 7,5 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}.$$

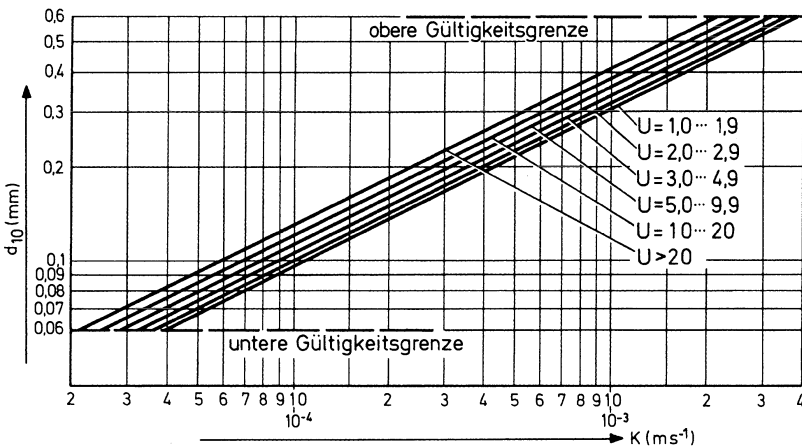


Abb. 2.18. Durchlässigkeitsbeiwert K in Abhängigkeit von d_{10} und Ungleichförmigkeitsgrad U . Nach Beyer (1964 b).

Sieblinienauswertung nach Kozeny-Köhler (H.P. Köhler 1960; W. Köhler 1965). In der heute üblichen Schreibweise (Hütte 1951) lautet die Bestimmungsgleichung von Kozeny

$$K = C \cdot d_w^2 = \frac{\tau}{r} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1 + \varepsilon} \cdot d_w^2 \quad (\text{ms}^{-1}) \quad (2.86)$$

mit

$\varepsilon =$ Porenziffer $= \frac{n}{1 - n}$ (dimensionslos, vgl. Kap. 3)

$\tau =$ Verhältnis der kinematischen Zähigkeiten von 10 °C warmem Wasser und Wasser unterschiedlicher Temperatur im Aquifer. Bei Temperaturen von < 20 °C kann $\tau = 1$ gesetzt werden.

$d_w =$ wirksame Korngröße (mm)

$r =$ Rauigkeitsgrad (dimensionslos)

Nach Hütte ist r annähernd:

Kugeln	rundlicher Flusssand	eckiger Sand, nur leicht gerundet	scharfkantiger Bruchsand
$r = 1$	$r = 1$	$2,0 < r < 3,5$	$r = 5,5$

Die wirksame Korngröße in Gl. 2.86 lässt sich entweder mit dem graphischen Verfahren nach Kozeny (1927) oder mit dem rechnerisch einfachen, möglichst programmierten Verfahren nach H.P. Köhler (1965) ermitteln. Die Gleichung nach Köhler lautet

$$\frac{1}{d_w} = \frac{\sum 1/d_i \cdot \Delta G_i}{\sum \Delta G_i} \quad (2.87)$$

mit

$i =$ Index der Kornklasse in den frei wählbaren Grenzen d_o und d_u

$\Delta G_i =$ Gewichtsanteil der jeweiligen Kornklasse i (in Gewichtsprozenten oder als Dezimalbruch)

$\frac{1}{d_i} =$ harmonisches Mittel nach W. Köhler (1960) aus der oberen und unteren Grenze der jeweiligen Kornklasse i

$$\frac{1}{d_i} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_u} \right) \quad (2.88)$$

mit

$d_o =$ Korndurchmesser an der oberen Grenze einer Kornklasse

$d_u =$ Korndurchmesser an der unteren Grenze einer Kornklasse

Beispiel

Die Kornverteilungskurve der Abb. 2.16 wird zur Anwendung des Verfahrens von Kozeny-Köhler mit einer Anzahl Stützstellen (= Kornklassengrenzen) belegt. Es hat sich als sinnvoll erwiesen, die flachen Kurvenäste A-B und C-D durch engere Punktabstände als beim oft geraden Mittelteil B-C abzudecken. Anfangspunkt 1 und Endpunkt (hier 13) sind meistens zu extrapolieren. Tabelle 2.11 demonstriert den Auswertegang.

Mit Gl. 2.87 errechnet sich d_w zu 0,39 mm.

Gleichung 2.86 dient nun der Bestimmung von K . Für 10 °C warmes Wasser setzt man $\tau = 1$.

Bei dem untersuchten pliozänen Sand handelt es sich um einen Flusssand mit rundlich-plattigen Körnern, so dass der Rauigkeitsgrad mit $r = 1,5$ angenommen werden kann. Für den Porenraum steht mit $n = 0,36$ ein recht verlässlicher Wert zur Verfügung. Die Porenziffer ε geht daher mit einem Wert von 0,56 in die Rechnung ein. Somit folgt

$$K = \frac{1}{1,5} \cdot 405 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{0,176}{1,56} \cdot (0,39)^2 = 4,63 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$$

Tabelle 2.11. Auswertetabelle nach dem Verfahren von Kozeny-Köhler

Stützstelle	Korngröße (mm)	$\frac{1}{d_i}$	ΔG_i	$\frac{1}{d_i} \cdot \Delta G_i$
1	0,05 *	12,50	0,05	0,625
2	0,2	4,35	0,05	0,218
3	0,27	3,20	0,10	0,320
4	0,37	2,54	0,10	0,254
5	0,42	2,28	0,10	0,228
6	0,46	2,07	0,10	0,207
7	0,51	1,86	0,10	0,186
8	0,57	1,67	0,10	0,167
9	0,63	1,49	0,10	0,149
10	0,72	1,19	0,10	0,119
11	1,0	0,82	0,05	0,041
12	1,55	0,42	0,05	0,021
13	5,0			
	* extrapoliert		$\Sigma = 1,0$	$\Sigma = 2,535$

Diskussion der Ergebnisse. Die vorgestellten Auswerteverfahren nach Hazen-Zieschang, Beyer und Kozeny-Köhler sind nur als Beispiele weiterer in der Praxis verwendeter Methoden zitiert worden.

Für ein und dieselbe Sieblinie ergeben sich unterschiedliche K -Werte:

$$\text{Hazen-Zieschang} \quad K = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ ms}^{-1}$$

$$\text{Beyer} \quad K = 7,7 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$$

$$\text{Kozeny-Köhler} \quad K = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ ms}^{-1}$$

Im Vergleich zu den anderen Werten erscheint K_{HAZEN} etwas zu hoch. Der Unterschied zwischen Ergebnissen nach Beyer und Kozeny-Köhler macht rund 30 % aus, ein bei derartigen Untersuchungen noch tolerabler Unterschied. Zur Ermittlung statistisch repräsentativer Gebietswerte empfehlen sich ohnehin Reihenuntersuchungen (Pekdeger u. Schulz 1975). Dabei erbringt das Verfahren von Hazen in dem von Zieschang definierten Gültigkeitsbereich lediglich Orientierungswerte.

2.4 Durchlässigkeit von Kluftgesteinen

2.4.1 Einleitende Bemerkungen

Ganz offensichtlich hängt die Festlegung eines definitiven Zahlenwertes der Durchlässigkeit in einem Festgestein von der untersuchten Örtlichkeit im Gelände ab. In einer Folge von Sandsteinbänken z.B. muss bei gleichem lithologischen Aufbau eine Kluftzone eine höhere Durchlässigkeit aufweisen als benachbarte nicht oder geringer geklüftete Bereiche.

Im Streichen der Klüfte wird weiterhin ein anderer Wert als senkrecht zur Streichrichtung festzustellen sein. Unterschiedliche Durchlässigkeiten ergeben sich also für Kluftnetze, Schichtfugen, Lösungshohlräume etc. Ferner haben die durch Klüfte begrenzten Festgesteinskörper eine eigene Durchlässigkeit, die durch deren Porosität bestimmt wird.

Man kann deshalb konstatieren, dass in Abhängigkeit von lithologischer Zusammensetzung und tektonischer Beanspruchung Festgesteine grundsätzlich *inhomogen* und *anisotrop* sind.

Praktische Zwecke erfordern die Definition eines Mindestvolumens des Gesteinskörpers, der als quasi-homogenes Kontinuum aufgefasst werden kann und für den sich eine repräsentative, durchaus anisotrope Durchlässigkeit definieren lässt. Dieses Mindestvolumen wird meist als REV, d.h. *repräsentatives Elementarvolumen*, bezeichnet (Bear 1979). Seine Größe hängt von der gestellten Aufgabe ab. Eine hochdurchlässige Kluftzone im Untergrund eines Talsperrrenabspernbauwerks z.B. wird durch ein anderes REV repräsentiert als eine Reihe von Kluftzonen in der sonst gleichen geologischen Abfolge.

In diesem Kontext interessieren auch nicht mehr die hinsichtlich der Durchlässigkeit unterschiedlich wirksamen Teilvolumina eines Festgesteins, sondern wich-