

Giessener Geologische Schriften	Nr. 56	Festschrift Knoblich	S. 33-48	1996
---------------------------------------	--------	----------------------	----------	------

Die Auswertung von Kornverteilungskurven zur Ermittlung der Durchlässigkeit

von F. ASCHENBRENNER*

Kurzfassung

Die Auswertung von Siebanalysen ist eine in der Praxis häufig angewandte Methode zur Bestimmung der Durchlässigkeit, da der laborative Aufwand klein und das Verfahren somit kostengünstiger ist als die Bestimmung mittels Permeameter oder durch einen Auffüllversuch in einem Pegel. Es stellt sich jedoch auf dem Hintergrund der zahlreichen Formeln, die für die Auswertung von Siebanalysen von verschiedenen Autoren zumeist auf empirischem Weg abgeleitet wurden, die Frage, wie zuverlässig die Ergebnisse sind. Auf der Grundlage von 30 Bodenproben, die aus 4 Bohrungen im norddeutschen Pleistozän entnommen wurden, werden 12 Formeln für die Sieblinienauswertung untersucht, indem k_f -Werte mit Pumpversuchsergebnissen verglichen werden. Ein weiteres Kriterium für die Zuverlässigkeit ist die Übereinstimmung bzw. Abweichung der mit diesen Formeln erhaltenen k_f -Werte untereinander. Bei diesem Vergleich wiesen die Formeln von HAZEN, ZIESCHANG und CARMAN die besten Resultate auf.

Abstract

The evaluation of the coefficient of permeability can be accomplished by using the grain size distribution of a soil sample. The advantage of this method is the ease, with which the analysis can be done in comparison with other methods like permeameter test or slug-and-bail test. Due to the variety of formulae derived empirically by numerous authors, the reliability of the results is open to question. On the basis of 30 soil samples that were obtained from 4 drilling holes in the Pleistocene in Northern Germany, 12 formulae were analysed by comparing their results with the permeability values from pumping tests. Beside this, a further criterion is the deviation or coincidenc, resp., of the results of the various formulae among each other. According to this investigation, the formulae by HAZEN, ZIESCHANG and CARMAN are the most accurate ones.

*1 Anschrift des Autors: Dr. Frank Aschenbrenner, Institut für Angewandte Geowissenschaften der Justus-Liebig-Universität, Diezstrasse 15, D-35390 Giessen

Einleitung

Der Durchlässigkeitsbeiwert k_f ist einer der wichtigsten Parameter in vielen Bereichen der Geotechnik und der angewandten Geologie. Gleichzeitig dürfte kein anderer Parameter eine so große Schwankungsbreite aufweisen. Für rollige Böden werden k_f -Werte von $10^0 - 10^{-6}$ m/sec und für bindige Böden solche von $10^{-5} - 10^{-12}$ m/sec angegeben (FREEZE & CHERRY 1979, MATTHEWS & URELL 1983). Der k_f -Wert kann innerhalb einer Schicht oder in einem Bohrprofil auf wenigen Metern Distanz um mehrere Größenordnungen variieren.

Um zu einer zuverlässigen und für Prognoserechnungen brauchbaren Einschätzung der Durchlässigkeit des Untergrundes zu gelangen, ist für den praktischen Gebrauch eine einfach zu handhabende Methode zur Ermittlung des k_f -Wertes wünschenswert, die möglichst in einem dichten Raster über das zu untersuchende Gebiet angewendet werden kann. Grundsätzlich ist hierbei zwischen Feld- und Labormethoden zu unterscheiden. Pump- und Auffüllversuche gehören zur erstgenannten Kategorie; ein Raster kann dabei nur zweidimensional über eine Fläche ohne Auflösung der vertikalen Raumrichtung gelegt werden. Zudem sind die Kosten zumindest bei Pumpversuchen erheblich, da im allgemeinen ein größerer Pegeldurchmesser nötig ist ($> DN100$). Soll der k_f -Wert des Bodens oberhalb des Grundwasserspiegels z.B. für die Anlage einer Regenwasserversickerungsanlage untersucht werden, können zwar Auffüllversuche (sog. open-end-tests, EARTH MANUAL 1963) zur Anwendung kommen, doch erfordern diese die Einstellung stationärer gestützter Verhältnisse unterhalb des Standrohres, was eine erhebliche Zeit im Anspruch nehmen kann. Außerdem verfälschen geringe Mengen bindigen Materials in der freien Ausflußöffnung des Standrohres, verursacht z.B. durch Nachfall beim Bohren, das Testergebnis.

Dagegen können k_f -Werte im Labor relativ schnell und zuverlässig ermittelt werden. Grundsätzlich ist hierbei das untersuchte Probenvolumen wesentlich kleiner als bei Pump- oder Auffüllversuchen, so daß bei Rückschlüssen vom Testergebnis auf die natürlichen Verhältnisse die Größe des Repräsentativen Elementarvolumens (REV) Berücksichtigung finden muß. Die älteste Methode zur Ermittlung des k_f -Wertes stellt die Durchströmung der Probe im Permeameter dar (DARCY 1856). Da man möglichst ungestört entnommene Proben verwenden sollte, ist diese Methode für rollige Gesteine weniger geeignet. Außerdem führen Randumläufigkeiten im Probenzylinder bei einaxialen Testzellen zu erheblichen Abweichungen des Ergebnisses vom tatsächlichen Wert.

Diese Schwierigkeiten umgeht man bei der Ermittlung des k_f -Wertes aus Kornverteilungskurven. Dieses Verfahren wird unter Zugrundelegung unterschiedlicher Formeln seit mehr als 100 Jahren angewendet.

Im folgenden wird die Genauigkeit dieser Formeln anhand verschiedener Kornverteilungskurven untersucht. Es wurden hierfür nur Siebkurven von rolligen Böden verwendet, da dieses Verfahren für bindige und gemischtkörnige Böden mit erheblichem Anteil der Kornfraktion <63 µm nicht geeignet ist (MITCHELL, 1993).

Ermittlung des kf-Wertes aus der Kornverteilungskurve

Grundlage des Verfahrens sind semiempirische Formeln, die die Porosität, die Kornform und den hydraulischen Radius der Porenkanäle berücksichtigen:

$$k_f = f_1(n) f_2(F) R_h^2 \quad [1]$$

Die Funktionen f_1 und f_2 beschreiben den Einfluß der Porosität n und der Kornform F . Der hydraulische Radius R_h kann aus der Hagen-Poiseuilleschen- oder der Navier-Stokes-Gleichung abgeleitet werden. Nach KOZENY (1927) ergibt sich daraus die folgende Gleichung für den kf-Wert:

$$k_f = \frac{\gamma}{\eta} c_0' \frac{n^3}{(1-n)^2} M_s^{-2} \quad [2]$$

Der Koeffizient c_0' beträgt nach CARMAN (1956) 0,2; die spezifische Oberfläche M_s läßt sich durch einen mittleren bzw. wirksamen Korndurchmesser $d_w = 6/M_s$ ersetzen, woraus sich durch Einsetzen in Gl. 2 die sog. Kozeny-Carman-Gleichung ergibt:

$$k_f = \frac{\gamma}{\eta} \frac{d_w^2}{180} \frac{n^3}{(1-n)^2} \quad [3]$$

Neben der semianalytisch abgeleiteten Kozeny-Gleichung existieren noch mehrere andere Formeln, bei denen der hydraulische Radius R_h in Gl. 1 in Form eines bestimmten Korndurchmessers und die Funktionen f_1 und f_2 zu einem Koeffizienten c_0 zusammengefaßt werden. Die allgemeine Form dieser rein empirischen Gleichungen ist:

$$k_f = c_0 d_w^2 \quad [4]$$

Diese in Tab. 1 aufgeführten Formeln wurden anhand von Vergleichsmessungen, die in den meisten Fällen im Permeameter durchgeführt wurden, auf statistischem Wege abgeleitet, was deren Güte im Vergleich zur Kozeny-Carman-Gleichung nicht schmälert, zumal in dieser auch ein empirisch gefundener Koeffizient enthalten ist.

Der wirksame Körndurchmesser wird entweder einem bestimmten Durchmesser der Kornverteilungskurve (meist d_{10}) gleichgesetzt oder er entspricht dem harmonischen Mittel der Kornverteilungskurve, welches auf graphischem Weg nach KOZENY (1927) oder mittels der Gleichung:

$$d_w = \frac{\sum d_i G_i}{\sum \frac{G_i}{d_i}} \quad [5]$$

bestimmt werden kann mit d_i als harmonischem Mittel des Körndurchmessers zwischen zwei Klassengrenzen und G_i als Gewichtsanteil der i -ten Klasse (KÖHLER 1965). Der Koeffizient c_s ist u.a. abhängig von der Ungleichförmigkeit, der Porosität, der Lagerungsdichte sowie der Kornform und -rauhigkeit. In den meisten Fällen wird c_s entweder nur als Funktion der Ungleichförmigkeit oder als reine Konstante ausgedrückt. Die Porosität geht dagegen nur in die Formeln von SLICHTER (1899), ZUNKER (1930) und KOZENY (1927) bzw. CARMAN (1956) ein. Da die anderen o.g. Faktoren die Durchlässigkeit ebenfalls beeinflussen, hängt die Genauigkeit der mit diesen Formeln erhaltenen Ergebnisse von der Übereinstimmung zwischen dem zur Eichung der Formeln benutzten und dem zu messenden Lockergestein bezüglich dieser Faktoren ab. Daneben können auch noch systematische und zufällige Fehler bei der Durchführung der Permeameteruntersuchungen zu falschen Koeffizienten geführt haben.

Die Formel von UMA et al. (1989) wurde durch einen Vergleich mit Pumpversuchsergebnissen erhalten. Gegenüber Permeameterversuchungen ist das bei einem Pumpversuch beprobte Volumen wesentlich größer, so daß nur bei einem homogenen Aquifer mit kleinem REV gleiche Ergebnisse erwartet werden können. Bei einem heterogenen Aquifer sind dagegen unterschiedliche Ergebnisse aufgrund der verschiedenen Probevolumina wahrscheinlich, wenn nicht aus dem gesamten Bohrprofil schichtspezifische k_f -Werte berechnet und aus diesen das gewichtete arithmetische Mittel gebildet wird.

Methodik

Um die Brauchbarkeit der Formeln zu beurteilen, können neben Pumpversuchsauswertungen auch Ergebnisse von Permeameterversuchen herangezogen werden. Hierbei ergibt sich jedoch das Problem, daß versuchsbedingte Streubreiten innerhalb einer Meßreihe auftreten, die größer sind als die Streubreiten, die man bei Verwendung von Sieblinienauswertungen erhält (PEKDEGIR & SCHULZ 1975). Außerdem muß bei Permeameteruntersuchungen die Orientierung der ungestört entnommenen Probe beachtet werden, wenn diese eine Schichtung aufweist, was in den meisten Fällen in mehr oder weniger starker Ausprägung der Fall sein wird. Bei einer vertikalen Orientierung der Probe im Permeameter wird die Durchlässigkeit praktisch

von der Schicht mit dem kleinsten k_f -Wert bestimmt, während eine Schichtung der Probe bei der Sieblinienauswertung nicht berücksichtigt wird.

Tab. 1: Formeln für die k_f -Wert Berechnung aus der Sieblinie; angegeben sind die Formeln für 10°C und d in mm.

Autor	Formel	x	c_0	d	Beschränkungen
SEELHEIM (1880)	$k_f = c_0 d^x$	2	0,00357	d_{50}	
HAZEN (1893)	$k_f = c_0 d^x$	2	0,0116	d_{10}	$U < 5$
SCHLICHTER (1899)	$k_f = 0,0771/c_0 d^x$	2	0,985 $n^{3,3}$	d_{50}	$0,01 < d_{10} < 5$
ZUNKER (1930)	$k_f = \frac{c_0}{\mu} \left(\frac{n}{1-n} \right)^2 d^x$	2	$1,1 \cdot 10^{-5}$	d_{w}	
SICHARDT (1952)	$k_f = c_0 d^x$	2	0,006	d_{w}	
CARMAN (1956)	$k_f = c_0 d^x \frac{n^3}{(1-n)^2}$	2	0,0416	d_{w}	
ZIESCHANG (1961)	$k_f = c_0 d^x$	2	f(U)	d_{10}	$1 < U < 5$
BEYER (1964)	$k_f = c_0 d^x$	2	f(U)	d_{10}	$U < 20$ $0,06 < d_{10} < 0,6$
USBSC*	$k_f = c_0 d^x$	2,3	0,0036	d_{20}	
SEILER (1979)	$k_f = c_0 d^x$	2	f(U)	$U < 17: d_{10}$ $U > 17: d_{25}$	$4 < U < 110$
DRISCOLL (1986)	Nomogramm	-	f(U)	d_{50}	$1,5 < U < 10$
UMA ET AL. (1989)	$k_f = c_0 d^x$	2	2,0 - 6,0**	d_{10}	
SHEPHERD (1989)	$k_f = c_0 d^x$	1,65-1,85	f(U, ***)	d_{15}	

*: zit. n. BIALAS ET AL. (1970)

**: 2,0 für unkonsolidierten Sand, 3,8 für schwach zementierten Sand, 6,0 für zementierten Sand

***: es werden für verschiedene Sedimente typische Werte für c_0 angegeben.

Da die in Tab. 1 zitierten Formeln auf empirischer Grundlage, d.h. überwiegend durch Vergleich mit Permeameterergebnissen abgeleitet wurden, kann eine Überprüfung der Genauigkeit der Formeln auch durch einen Vergleich untereinander erfolgen. Ist die Streubreite der Ergebnisse, die mit den verschiedenen Formeln für eine Bodenprobe erhalten werden, groß, muß die Mehrzahl dieser Ergebnisse mit einem entsprechend großen Fehler behaftet sein, wogegen bei geringer Streubreite bzw. wenigen Ausreißern eine größere Genauigkeit der Ergebnisse angenommen werden kann, da die den meisten Formeln zugrundeliegenden, unabhängig voneinan-

der ausgeführten Permeameterversuche in diesem Fall, d.h. für ein spezifisches Sediment, gleiche oder ähnliche Resultate erbracht haben müssen.

Im folgenden werden die in Tab. 1 aufgelisteten Formeln anhand von Kornverteilungskurven, die aus 4 Bohrungen im Wasserschutzgebiet Forst Esloh bei Hannover erhalten wurden, hinsichtlich ihrer Plausibilität überprüft, wobei die k_f -Werte untereinander und gegen Ergebnisse von Pumpversuchen verglichen werden. Um diejenigen Formeln, welche neben einem wirksamen Koendurchmesser auch die Porosität als Eingangsparameter verwenden, mit in den Vergleich nehmen zu können, wurde die Porosität der Bodenproben nach dem Nomogramm von BEYER & SCHWEIGER (1969) für eine mittlere Lagerungsdichte aus der Ungleichförmigkeitszahl bestimmt.

Die 4 Bohrungen A, B, C und D durchteufen den gesamten ungespannten, aus pleistozänen Lockersedimenten aufgebauten Aquifer, der eine Mächtigkeit zwischen etwa 7 m und 13 m hat. Im Liegenden des Aquifers befinden sich Kreidemergel, die als schwerdurchlässig anzusehen sind. Von jeder Bohrung wurden 7 - 9 Bodenproben aus den in Tab. 2 - 5 angegebenen Teufen auf das Kornverteilungsspektrum mittels Siebanalyse untersucht. Die Kornverteilungskurven (Abb. 1 - 4) weisen den Aquifer als sandig-kiesig mit mäßiger Schichtung aus.

Tab. 2: Daten der Korngrößenverteilung Bohrung A.

Nr.	Teufe	d_{10}	d_{20}	d_{30}	d_{40}	d_{50}	d_w	U	n
1	11,5-12,7	0,20	0,29	0,31	0,33	0,34	0,28	1,7	0,36
2	12,7-13,5	0,28	0,35	0,39	1,15	2,49	0,56	8,9	0,29
3	13,5-14,5	0,29	0,40	0,46	2,20	4,0	0,60	13,8	0,28
4	14,5-15,7	0,30	0,48	0,60	2,65	4,1	0,72	13,7	0,28
5	15,7-16,4	0,28	0,34	0,36	0,53	0,9	0,48	3,2	0,33
6	16,4-17,3	0,31	0,45	0,52	2,80	3,3	0,78	14,8	0,28
7	17,3-18,1	0,34	0,53	0,65	2,0	3,1	0,58	9,1	0,29

Tab. 3: Daten der Korngrößenverteilung Bohrung B.

Nr.	Teufe	d_{10}	d_{20}	d_{30}	d_{40}	d_{50}	d_w	U	n
1	11,5-12,4	0,14	0,22	0,25	0,30	0,32	0,23	2,3	0,35
2	12,4-13,6	0,30	0,40	0,45	1,20	2,31	0,65	7,7	0,29
3	13,6-14,6	0,20	0,36	0,46	1,70	2,5	0,52	12,5	0,28
4	14,6-15,4	0,31	0,43	0,50	1,70	2,51	0,72	8,1	0,29
5	15,4-16,4	0,32	0,44	0,51	1,80	3,0	0,77	9,4	0,29
6	16,4-17,4	0,29	0,36	0,40	0,45	1,71	0,36	6,0	0,31
7	17,4-18,8	0,17	0,26	0,30	0,90	0,68	0,60	4,0	0,32

Tab. 4: Daten der Korngrößenverteilung Bohrung C.

Nr.	Teufe	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{90}	d_w	U	n	
1	8,1-12,6	0,18	0,27	0,29	0,34	0,35	0,25	1,9	0,36
2	12,6-13,8	0,27	0,33	0,35	0,46	0,60	0,43	2,2	0,35
3	13,8-14,8	0,34	0,52	0,64	2,8	3,8	0,86	11,2	0,29
4	14,8-15,5	0,43	0,80	1,15	3,4	4,3	1,17	10,0	0,29
5	15,5-18,1	0,30	0,40	0,45	1,4	2,8	0,65	9,3	0,29
6	18,1-18,4	0,35	0,55	0,70	3,1	4,6	0,94	13,1	0,29
7	18,1-19,0	0,32	0,46	0,57	2,7	4,2	0,87	13,1	0,29
8	19,0-20,1	0,30	0,42	0,50	2,9	4,7	0,74	15,8	0,28
9	20,1-20,7	0,32	0,46	0,54	2,1	3,7	0,80	11,6	0,29

Tab 5: Daten der Korngrößenverteilung Bohrung D.

Nr.	Teufe	d_{10}	d_{30}	d_{50}	d_{90}	d_w	U	n
1	17,5-18,5	0,19	0,24	0,26	0,43	0,34	2,7	0,33
2	18,5-19,0	0,28	0,41	0,47	1,70	0,70	10,7	0,29
3	19,0-19,4	0,47	0,69	0,86	3,55	1,20	11,1	0,29
4	19,4-21,1	0,42	0,63	0,79	3,3	1,07	11,7	0,29
5	21,1-22,0	0,55	0,86	1,06	3,45	1,36	9,0	0,29
6	22,0-24,5	0,28	0,36	0,42	1,4	0,67	13,9	0,29
7	24,5-24,9	0,24	0,31	0,36	1,9	0,57	16,5	0,28

Die Pumpversuche wurden mit dem Geraillinenverfahren unter Verwendung der korrigierten Absenkung ausgewertet, welches bei Absenkungen von etwa 1,5 m (entsprechend etwa 15% der durchschnittlichen Aquifermächtigkeit) ohne erhebliche Einbuße an Genauigkeit hier angewendet werden kann. Die in Tab. 6 dargestellten Ergebnisse weisen Durchlässigkeitswerte im Bereich von etwa $8 - 23 \cdot 10^{-4}$ m/sec auf. Bei den Bohrungen A und C lagen keine Daten für den Wiederanstieg vor, da in diesen Brunnen Leistungspumpversuche durchgeführt wurden. Die Durchlässigkeitswerte, die aus den Absenkungs- und Wiederanstiegsdaten bei den Bohrungen B und D berechnet wurden, zeigen Unterschiede von über 50%, was als normaler Fehler bei der Pumpversuchsauswertung angesehen werden kann, wobei den Werten aus der Wiederanstiegsphase im allgemeinen eine größere Genauigkeit zugesprochen wird, da sich Schwankungen der Pumprate nicht auf das Ergebnis auswirken. Aufgrund des unterschiedlichen Probenvolumens wurden nur die gewichteten arithmetischen Mittelwerte der Durchlässigkeiten, die teufenspezifisch für jedes Bohrprofil aus den Kornverteilungskurven erhalten wurden, mit den Pumpversuchsergebnissen verglichen.

Tab. 6: Ergebnisse der Pumpversuchsmesswertung für die Brunnen A, B, C und D ($\times 10^4$ m/s).

	Bohrung A	Bohrung B	Bohrung C	Bohrung 10
Cooper-Jacob	8,1	12,8	8,8	23
Wiederanstieg	-*	20,6	-*	15

*: keine Daten vorhanden.

Unterschiede der mit den in Tab. 1 enthaltenen Formeln berechneten Durchlässigkeiten haben ihre Ursache zum einen in zufälligen und systematischen Fehlern bei den meist im Labor mittels Permeameter durchgeführten Vergleichsmessungen und zum anderen in der verschiedenen Wichtung der Einflußfaktoren, also wirksame Korngröße, Ungleichförmigkeitsgrad und Porosität, die bei den Formeln Berücksichtigung finden.

Die Unterschiede in den für ein Bohrloch ermittelten Durchlässigkeiten lassen sich in zwei Kategorien einteilen: 1. Mittelwertdifferenzen und 2. Unterschiede in der Streubreite. Während systematische Fehler bei den zur Eichung der Formeln verwendeten Vergleichsmessungen nur zu verschiedenen Mittelwerten der mit den Formeln berechneten k_f -Werten führen, haben zufällige Fehler bei den Vergleichsmessungen und die unterschiedliche Wichtung der verschiedenen Einflußfaktoren zusätzlich noch eine unterschiedliche Streubreite der k_f -Werte zur Folge. Die Streubreite wird hier definiert als Quotient aus Standardabweichung und Mittelwert. Der Einfluß zufälliger Fehler bei den Vergleichsmessungen auf die k_f -Werte dürfte in den meisten Fällen zu vernachlässigen sein, da eine jeweils ausreichend große Anzahl dieser Messungen für die Eichung der Formeln vorausgesetzt werden kann, so daß dieser Fehler ausgemittelt wurde. Dagegen dürfte die Wirkung der in den Formeln berücksichtigten Einflußfaktoren wirksamer Korndurchmesser, Ungleichförmigkeit und Porosität je nach Sediment unterschiedlich sein, was neben Unterschieden im Mittelwert auch eine Streuung der Werte für jeweils ein Bohrloch in unterschiedlichem Maß bewirkt.

Bei der vergleichenden Beurteilung der Formeln können zunächst die jeweiligen Mittelwerte für die einzelnen Bohrungen verglichen werden, um unter Hinzuziehung der Pumpversuchsergebnisse einen Anhaltspunkt für den wahrscheinlichen Größenbereich der tatsächlichen Durchlässigkeit zu erhalten. In einem zweiten Schritt können die Streubreiten der k_f -Werte für jeweils eine Bohrung verglichen werden. Hier fehlt zwar in der vorliegenden Untersuchung ein Formel-unabhängiges Kriterium wie z.B. Permeametervmessungen, doch kann davon ausgegangen werden, daß Streubreiten, die im Vergleich der Formeln untereinander sehr groß oder sehr klein sind (also von der mittleren Streubreite nach oben oder unten stark abweichen), auf eine Unzuverlässigkeit der ermittelten Durchlässigkeiten hinweisen.

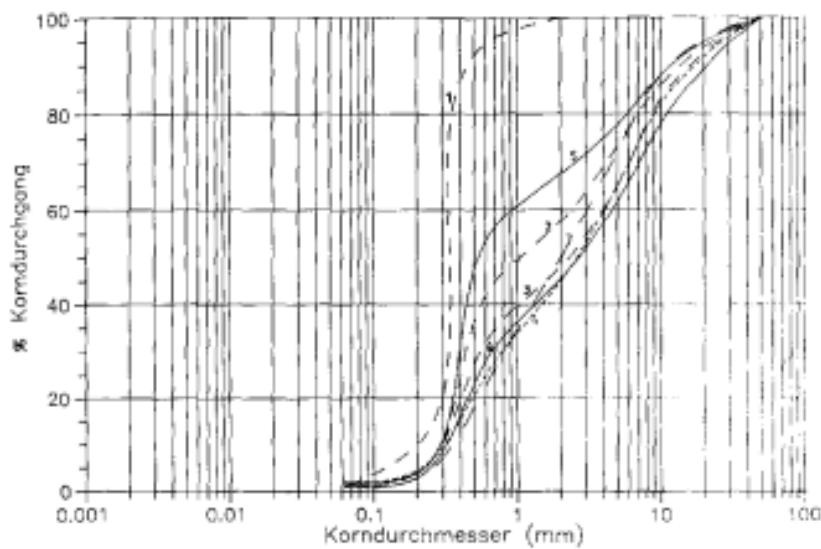


Abb. 1: Kornverteilungskurven Bohrung A.

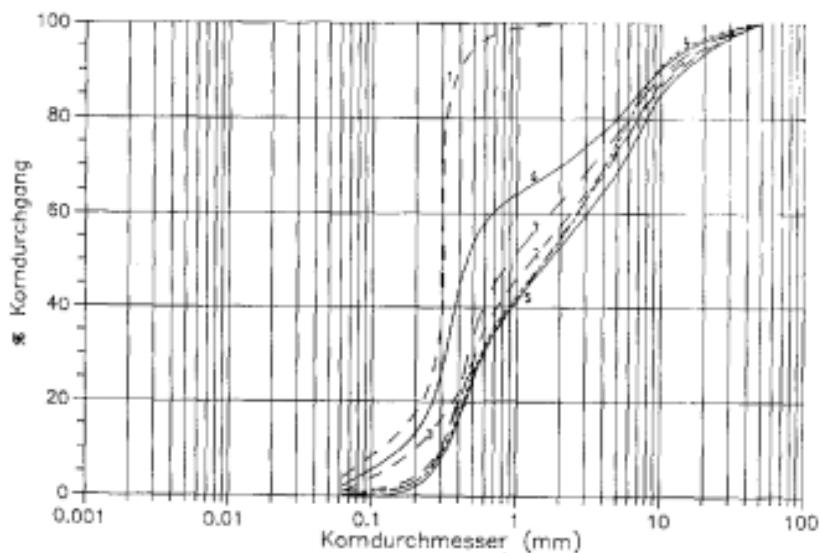


Abb. 2: Kornverteilungskurven Bohrung B.

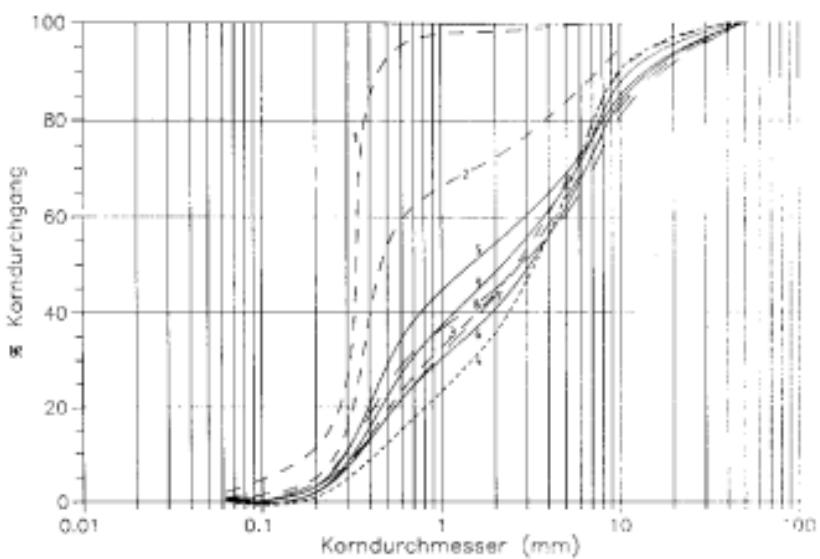


Abb. 3: Kornverteilungskurven Bohrung C.

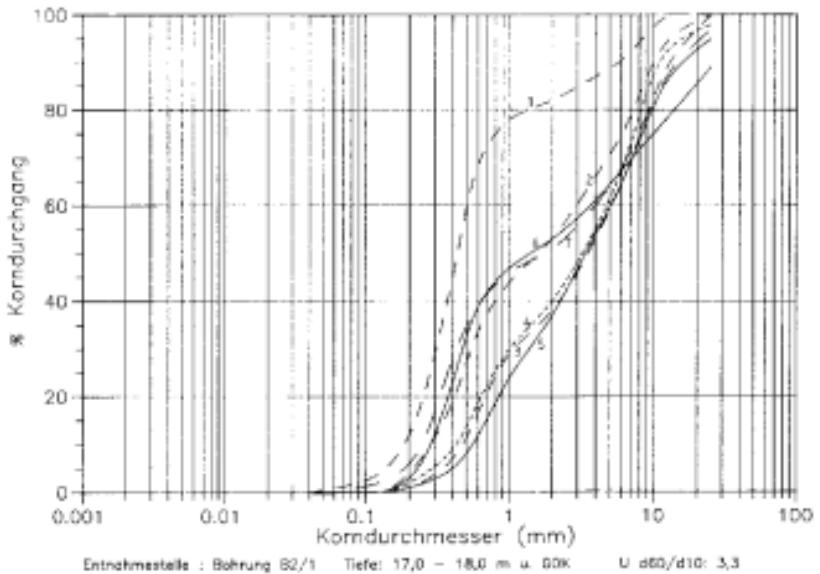


Abb. 4: Kornverteilungskurven Bohrung D.

Ergebnisse

Die mit Hilfe der in Tab. 1 aufgelisteten Formeln erhaltenen k_f -Werte sind in den Tab. 7 - 10 jeweils teufenspezifisch dargestellt. Mit einigen Formeln konnte nicht für jede Bodenprobe ein k_f -Wert ermittelt werden, da bei den Formeln für die jeweiligen Parameter der Kornverteilungskurve keine Koeffizienten angegeben wurden, weil die Parameter außerhalb des jeweiligen Definitionsbereiches lagen. Sofern ein Parameter (meist der Ungleichförmigkeitsgrad) außerhalb der jeweiligen Gültigkeitsgrenzen lag, ist dies in den Tabellen vermerkt.

Tab. 7: k_f -Werte ($\times 10^4$ m/sec) aus der Korngrößenverteilung Bohrung A berechnet mit den in Tab. 1 angegebenen Formeln; Pumpversuchswert $8,1 \cdot 10^4$ m/s.

Probe	Seehl.	Hazen	Slichter	Zunker	Sichardt	Carman	Ziesch.	Beyer	USBSC	Seiler	Uma	Driscoll
1	3,9	4,6	1,1	2,0	4,7	3,7	3,7	4,4	2,1	-	0,15	5,6
2	47,2	9,1*	1,0	4,3	18,8	6,3	9,1*	6,3	3,2	10,7	0,30	1,25
3	173	9,8*	0,98	4,7	21,6	6,3	9,8*	5,9	4,4	6,4	0,32	-
4	251	10,4*	1,1	6,4	31,1	9,1	10,4*	6,3	6,7	6,8	0,34	-
5	10	9,1	1,6	4,6	13,8	7,7	9,1	7,1	3,0	-	0,3	4,4
6	280	11,1*	1,1	7,5	36,5	10,7	11,1*	6,7	5,7	6,7	0,36	-
7	143	13,4*	1,5	4,6	20,2	6,8	13,4*	9,2	8,4	15,4	0,44	3,6
Mittel**	135	9,4	1,2	4,8	21,0	7,1	9,2	5,7	4,8	-	0,29	-
SDK**	83%	29%	21%	35%	50%	31%	33%	24%	48%	-	31%	-

*: Gültigkeitsgrenze überschritten

**: gewichteter arithmetischer Mittelwert; Streubreite (Standardabweichung/Mittelwert)

Tab. 8: k_f -Werte ($\times 10^4$ m/sec) aus der Korngrößenverteilung Bohrung B berechnet mit den in Tab. 1 angegebenen Formeln; Pumpversuchswerte $12,8 \cdot 10^4$ m/s (Absenkung) und $20,6 \cdot 10^4$ m/s (Wiederaufstieg).

Probe	Seehl.	Hazen	Slichter	Zunker	Sichardt	Carman	Ziesch.	Beyer	USBSC	Seiler	Uma	Driscoll
1	3,2	2,3	0,5	1,3	3,2	2,2	1,8	1,96	1,1	-	0,08	4,9
2	51,4	10,4*	1,2	5,8	25,3	8,5	10,4*	7,2	4,4	14,0	0,34	3,1
3	103	4,6*	0,47	3,3	16,2	4,8	4,6*	2,8	3,4	3,6	0,15	-
4	103	11,2*	1,3	7,1	31,1	10,4	11,1*	7,7	5,2	14,2	0,37	6,8
5	116	11,9*	1,3	8,1	35,6	11,9	11,9*	8,2	5,4	13,2	0,39	2,4
6	7,2	9,8*	1,4	2,1	7,8	3,4	9,8*	6,7	3,4	16,0	0,32	0,9
7	29	3,3	0,5	6,5	21,6	10,6	13,3	2,6	1,6	-	0,11	8,2
Mittel**	56	7,3	0,9	4,9	19,9	7,5	7,2	5,1	3,3	-	0,20	-
SDK**	86%	56%	48%	53%	59%	52%	58%	53%	51%	-	65%	-

*: Gültigkeitsgrenze überschritten

**: gewichteter arithmetischer Mittelwert; Streubreite (Standardabweichung/Mittelwert)

Tab. 9: k_f -Werte ($\times 10^4$ m/sec) aus der Korngrößenverteilung Bohrung C berechnet mit den in Tab. I angegebenen Formeln; Pumpversuchswert $8,8 \cdot 10^4$ m/s.

Probe	Seelh.	Hazen	Slichter	Zunker	Sichardt	Carman	Ziosch.	Beyer	USBSC	Seller	Uma	Driscoll
1	4,1	3,8	0,87	1,6	3,7	3,0	3,7	3,4	1,8	-	0,12	5,3
2	7,5	8,5	1,8	4,4	11,1	7,8	10,1	7,3	2,8	-	0,28	6,8
3	280	13,4*	1,5	10,1	44,4	14,9	13,4*	8,2	8,0	11,7	0,44	4,6
4	412	21,4*	2,4	18,7	82,1	27,5	21,4*	13,9	21,5	22,2	0,30	4,5
5	70	10,4*	1,2	5,8	25,3	8,5	10,4*	6,9	4,3	11,7	0,34	1,8
6	343	14,2*	1,6	12,1	53,0	17,8	14,2*	8,6	9,1	10,0	0,47	-
7	260	11,9*	1,3	10,4	45,4	15,2	11,9*	7,2	6,0	8,4	0,39	-
8	300	10,4*	1,0	6,8	32,9	25,0	10,4*	6,3	4,9	5,7	0,34	-
9	157	11,9*	1,3	8,8	38,4	12,9	11,9*	7,5	6,0	9,9	0,39	1,4
Mittel**	119	9,0	1,2	5,9	24,3	10,3	9,1	6,2	4,9	-	0,29	-
S/K**	126%	53%	38%	84%	96%	77%	51%	44%	119%	-	54%	-

*: Gültigkeitsgrenze überschritten

**: gewichteter arithmetischer Mittelwert; Streubreite (Standardabweichung/Mittelwert)

Tab. 10: K -Werte ($\times 10^4$ m/sec) aus der Korngrößenverteilung Bohrung D errechnet mit den in Tab. I angegebenen Formeln; Pumpversuchswerte $23 \cdot 10^4$ m/s (Absenkung) und $15 \cdot 10^4$ m/s (Wiederanstieg).

Probe	Seelh.	Hazen	Slichter	Zunker	Sichardt	Carman	Ziosch.	Beyer	USBSC	Seller	Uma	Driscoll
1	6,6	4,2	0,7	2,5	6,9	3,8	5,0	3,46	1,3	-	0,14	5,3
2	103	9,1*	1,0	6,7	29,4	9,9	7,3*	5,8	4,6	8,5	0,30	1,6
3	450	25,6*	2,9	19,7	86,4	29,0	25,6*	16,1	15,3	22,7	0,84	4
4	389	20,5*	2,3	15,7	64,2	23,0	20,4*	12,9	12,4	16,9	0,67	2,7
5	425	35,1*	4,0	25,3	111	37,2	35,1*	23,9	25,0	40,8	1,1	7,2
6	70	9,1*	1,0	6,1	26,9	9,0	7,3*	5,5	3,4	6,0	0,30	-
7	129	6,7*	0,7	4,0	19,5	5,7	5,4*	4,0	2,4	3,4	0,22	-
Mittel**	204	15,0	1,7	10,8	46,0	15,9	14,2	9,7	8,5	-	0,49	-
S/K**	92%	77%	76%	82%	84%	81%	84%	79%	103%	74%	-	-

*: Gültigkeitsgrenze überschritten

**: gewichteter arithmetischer Mittelwert; Streubreite (Standardabweichung/Mittelwert)

Die größten Abweichungen hinsichtlich des Mittelwertes zeigen die Formeln von SEELHEIM (1880) und SICHARDT (1952) nach oben und die Formeln von UMA ET AL. (1989) und SLICHTER (1899) nach unten. Die Abweichungen erreichen bei SEELHEIM (1880) und bei UMA ET AL. (1989) jeweils eine Größenordnung. Die auch im Vergleich zu den Pumpversuchsergebnissen zu großen k_f -Werte, die mit der Formel von SEELHEIM (1880) berechnet werden,

sind auf die alleinige Verwendung von d_{50} als Einflußfaktor zurückzuführen. Offensichtlich eignet sich d_{50} nicht als kennzeichnende Größe eines Korngemisches. So fand beispielsweise SEILER (1979), daß die Korrelation zwischen wirksamen Körndurchmesser und k_f -Wert jenseits von d_{50} zunehmend schlechter wird. Dies zeigen in weniger ausgeprägter Form auch die Durchlässigkeitswerte, die mit dem Nomogramm nach DRISCOLL (1984) ermittelt wurden. Da hierbei auch der Ungleichförmigkeitsgrad in die Berechnung eingeht, sind die Ergebnisse nicht so unrealistisch wie bei der Seelheim-Formel.

Der Grund für die im Durchschnitt eine Größenordnung zu kleinen k_f -Werte, die mit der Formel von UMA ET AL. (1989) berechnet wurden, liegt in der Heranziehung von teilweise schon diagenetisch verfestigten Sanden für die Vergleichsmessungen. Es ist deshalb zu vermuten, daß die Zementation zu einer wesentlichen Herabminderung der Durchlässigkeit geführt hat, ohne daß Klüfte zu einer wesentlichen Erhöhung der Transmissivität beitragen, da in diesem Fall keine Korrelation der Pumpversuchsergebnisse mit der Kornverteilung vorhanden wäre.

Die Ursache für die hohen Durchlässigkeitswerte, die mit der Formel von SICHARDT (1952) erhalten wurden, ist möglicherweise auf einen systematischen Fehler bei den Vergleichsmessungen zurückzuführen, da die Streubreite zumindest bei den Bohrungen B und D nicht größer ist als bei den meisten anderen Formeln.

Dagegen sind die zu niedrigen Ergebnisse, die mit der Formel von SLICHTER (1899) ermittelt wurden, auf den extremen Einfluß der Porosität zurückzuführen, die bei den hier untersuchten Proben um einen Wert von etwa 30% nur geringfügig schwankt. Dementsprechend sind die Streubreiten der Ergebnisse klein.

Die Ergebnisse der verbleibenden Formeln zeigen dagegen eine recht gute Übereinstimmung sowohl in Bezug auf die Mittelwerte wie auch die Streubreiten. Legt man die Pumpversuchsergebnisse als Maßstab an, so liefern die Formeln von HAZEN (1893), ZIESCHANG (1961) und CARMANN (1956) bei den Bohrungen A, C und D die besten Resultate. Dies ist um so erstaunlicher, als in den Formeln von HAZEN (1893) und ZIESCHANG (1961) die Gültigkeitsgrenze von $U < 5$ meist deutlich überschritten wurde. Bei der Bohrung B sind die Pumpversuchsergebnisse deutlich höher als die Ergebnisse, die mit den Formeln mit Ausnahme derjenigen von SEELHEIM (1880) und SICHARDT (1952) gewonnen wurden. Der Grund hierfür kann in starker durchlässigen Schichten im Nahbereich der Bohrung gesehen werden, wodurch die Absenkung herabgesetzt wird. Sieht man von den o. g. Formeln ab, sind auch in diesem Beispiel die Ergebnisse der Formeln von CARMAN (1956), HAZEN (1893) und ZIESCHANG (1961) im Vergleich zu den Pumpversuchsergebnissen am besten.

Da die Auswertung nur Bodenproben eines Standortes berücksichtigt, können sich bei Sedimenten mit völlig anderer Kornform oder extremer Ungleichförmigkeit abweichende Resultate ergeben. So würde sich z.B. die Formel von SEILER (1979), mit der aufgrund der Beschränkung auf Sedimente mit einer Ungleichförmigkeit $U > 4$ für einige Bodenproben in der hier durchgeführten Untersuchung keine k_f -Werte erhalten würden, für die Auswertung sehr ungleichförmiger Sande und Kiese anbieten, weil dieses Material zur Eichung verwendet wurde. Da bei den in Abb. 1 - 4 dargestellten Sieblinien ein relativ breites Spektrum der Kornverteilung abgedeckt wird, dürfte die Schlussfolgerung hinsichtlich der Brauchbarkeit der Formeln auch auf andere rollige Sedimente zutreffen, soweit diese keine extremen Merkmale wie sehr plattige Kornform oder hohe Ungleichförmigkeit zeigen. Mittels der Formeln von HAZEN (1893), ZIESCHANG (1961) und CARMAN (1956) lassen sich demnach Durchlässigkeitswerte zumindest großordnungsmäßig bestimmen. Eine wichtige Voraussetzung ist jedoch die Untersuchung möglichst vieler Bodenproben, da erstens die jeweilige Größe des REV eine entsprechend große Anzahl von Proben erfordert und zweitens die Wahrscheinlichkeit, daß der Fehler hierdurch ausgemittelt wird, größer ist.

Notation

c_0	empirischer Koeffizient
d	Korndurchmesser
d_w	wirkamer Korndurchmesser
M_s	spezifische Oberfläche
n	Porosität
R_h	hydraulischer Radius
U	Ungleichförmigkeitsgrad (d_{60}/d_{10})
γ	Wichte
η	dynamische Viskosität

Literatur

- BEYER, W. (1964): Zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Kiesen und Sanden aus der Kornverteilungskurve. - WWT 14, S. 165 - 168
- BEYER, W. & SCHWEIGER, K.-H. (1969): Zur Bestimmung des entwässerbaren Porenanteils der Grundwasserleiter. - WWT 19, S. 57 - 60
- BIALAS, Z. & KLBCZKOWSKI, A.S. (1970): Über den praktischen Gebrauch von einigen empirischen Formeln zur Bestimmung des Durchlässigkeitskoeffizienten (in polnisch mit englischem Abstract). - Archiwum Hydrotechniki 17, S. 405 - 417
- CARMAN, P.C. (1956): Flow of gases through porous media. - Butterworths, London

- DARCY, H. (1856): Les fontaines publiques de la ville Dijon. - V. Dalmont, Paris
- DRISCOLL, F.G. (1984): Groundwater and wells. - Johnson Div., St. Paul (MN)
- EARTH MANUAL (1963): A guide to the use of soils as construction materials for hydraulic structures. - US Dep. of the Int., Bureau of Reclamation, Denver
- FREEZE, R.A. & CHERRY, J.A. (1979): Groundwater. - Prentice-Hall, Englewood Cliffs
- HAZEN, A. (1893): Some physical properties of sands and gravels with special reference to their use in filtration. - Ann. Rep. Mass. State Bd. Health 24, S. 541 - 556
- KÖHLER, H.-P. (1965): Ein kombiniertes Verfahren zur Bestimmung des Durchlässigkeitsbeiwertes von Sand- und Kiesgemischen für Wasser aus Siebproben. - Bergbautechnik 15, S. 338 - 342
- KOZENY, J. (1927): Über Grundwasserbewegung. - Die Wasserwirtschaft 22, S. 67 - 70, 86 - 88, 103 - 104, 120 - 122, 146 - 148
- MATTHES, G. & UBELL, K. (1983): Allgemeine Hydrogeologie - Grundwasserhaushalt. - Borntraeger, Berlin
- MITCHELL, J.K. (1993): Fundamentals of soil behaviour. - Wiley, New York
- PEKDEGER, A. & SCHULZ, H.-D. (1974): Ein Methodenvergleich zur Laborbestimmung des k_p -Wertes von Sanden. - Meyniana 27, S. 35-40
- SEILHEIM, F. (1880): Methoden zur Bestimmung der Durchlässigkeit des Bodens. - Z. anal. Chemie 19, S. 387
- SEILER, K.-P. (1979): Durchlässigkeit und Porosität von Lockergesteinen in Oberbayern. - Mitt. Ing.-u. Hydrogeol. 9, S. 105 - 126
- SHEPHERD, R.G. (1989): Correlations of permeability and grain size. - Ground Water 27, S. 633 - 638
- SICHARDT, W. (1952): Überblick über die Wasserhaltungsverfahren. - Mitt. Hannoversch. Versuchsanst. Grundbau u. Wasserbau 1, S. 99 - 114
- SICHTIER, C.S. (1899): Theoretical investigations of the motion of ground waters. - USGS 19th Annual Report 2, S. 295 - 384
- UMA, K.O., EGBOKA, B.C.E. & ONUOHA, K.M. (1989): New statistical grain-size method for evaluating the hydraulic conductivity of sandy aquifers. - J. of Hydrol. 108, S. 343 - 366
- ZIESCHANG, J. (1961): Zur zulässigen Hochstbelastung eines Brunnens. - Z. angew. Geol. 7, S. 580-582

ZUNKER, F. (1930): Das Verhalten des Bodens zum Wasser. - In: E. Blank (Hrsg.): Handbuch der Bodenlehre, Bd. 6, S. 66 - 220, Springer Verlag, Berlin