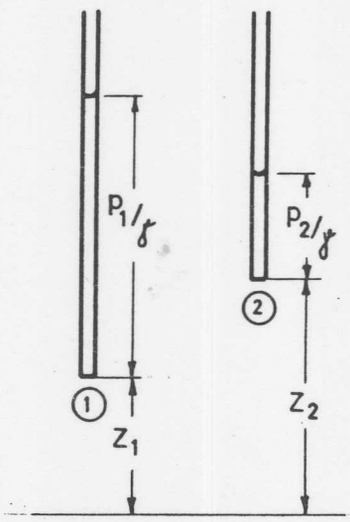
Durchlässigkeit

1. Definition

Wasser durchströmt das (i.a.) offene Porensystem des Bodens mit einer w a h r e n G e s c h w i n d i g k e i t (Mittelwert des Betrags = v_w). Für Berechnungen ist v_w ungeeignet; man verwendet besser die F i l t e r g e s c h w i n d i g k e i t $v = v_w \cdot n_F$ (n_F = mittlere Flächenporosität eines durchströmten Querschnitts). Damit erhält man für ein durchströmtes, mit Erdstoff gefülltes Rohr des Querschnitts F die Wassermenge $Q = v \cdot F$.

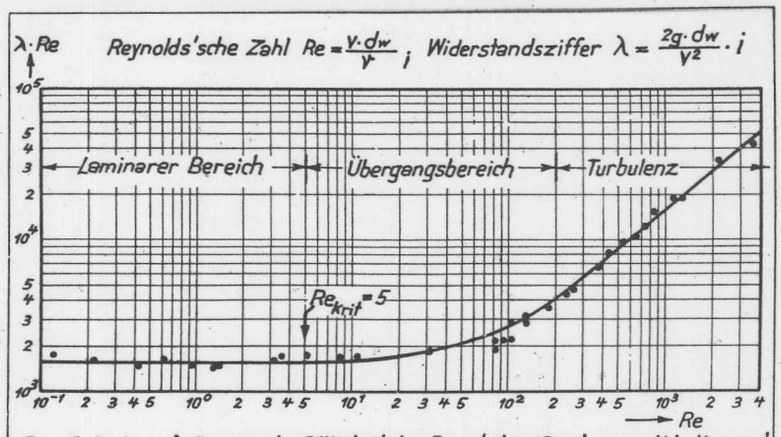
$Q = v_w \cdot n_F \cdot F = v \cdot F$

Die Energiehöhe (P o t e n t i a l h ö h e) ist nach BERNOULLI als $H = Z + p/\gamma + v^2/2g$ definiert. Bei Sickerströmung ist $v^2/2g$ vernachlässigbar (z.B. bei v = 1 cm/sec, einem recht hohen Wert, $v^2/2g = 5 \cdot 10^{-6}$ m). Dann läßt sich H als p i e z o m e t r i s c h e H ö h e in einem (gedachten) Steigrohr (= Piezometer) veranschaulichen. Der Gradient von H, $i = |\text{grad } H|$, verursacht eine Strömung, wobei v i.a. mit i zunimmt. Es gilt $\vec{v} \cdot \text{grad } H > 0$, d.h. Wasser strömt nicht gegen den Gradienten (z.B. strömt im dargestellten Fall das Wasser von 1 nach 2!) Im folgenden wird nur der Fall betrachtet, daß $\vec{v}$ und grad H parallel sind.



Bei gegebenem i leistet der Boden einen Strömungswiderstand (Energiehöhe nimmt ab) der materialabhängig ist: Erdstoffe sind verschieden d u r c h l ä s s i g .

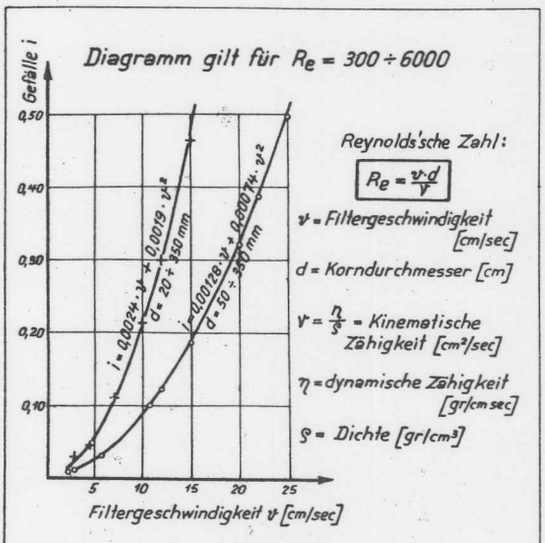
Die Ursachen für den Widerstand sind je nach der R e y n o l d s z a h l $Re = v \cdot d_w/\nu$ (d_w = wirksamer Korndurchmesser, ν = kinematische Zähigkeit) verschieden:



Re < 5, laminar, λ·Re = const., Gültigkeit des Darcy'schen Gesetzes, v = K·i, K = const.
5 < Re < 200, Übergangsbereich
Re > 200, Turbulenz, λ·Re = f(Re), v = a·i^0,74, a = f(v) ≠ const.

Institut für Bodenmechanik T.H. Karlsruhe	Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Sand- und Kiesgemischen mit etwa gleichem Ungleichförmigkeitsgrad. (Versuche von Nagy u. Karádi, 1961)	571

Für Re < 5 ist die Strömung l a m i n a r und die Reibungskräfte sind proportional zu v.
Für den Ü b e r g a n g s b e r e i c h $5 \leq Re \leq 200$ kommen zu v^2 proportionale Trägheitskräfte als Widerstand hinzu.
Darüber (Re > 200) tritt T u r b u l e n z ein.
Für die bei Sickerströmungen im laminaren Bereich auftretenden Geschwindigkeiten, denen ein wirksamer Korndurchmesser $d_w \leq 5$ mm entspricht, ist, wie Versuche und theoretische Betrachtungen gezeigt haben, das DARCY'sche Gesetz: $v = k_f \cdot i$ gültig. k_f [cm sec^{-1} oder m . sec^{-1}] ist der D u r c h l ä s s i g k e i t s b e i w e r t (= Geschwindigkeit bei i = 1).

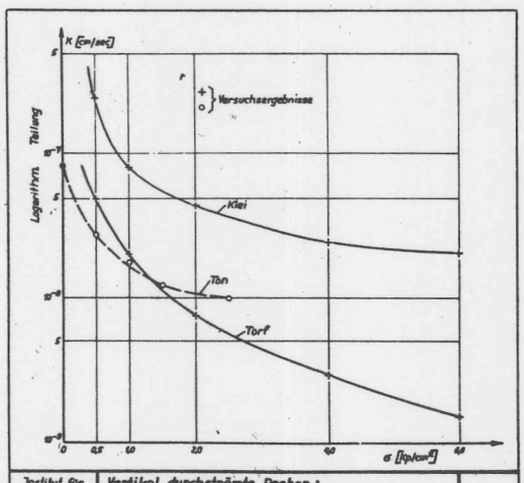


Institut für Bodenmechanik T.H. Karlsruhe	Durchlässigkeitsversuche mit grobem Steingeröll	563

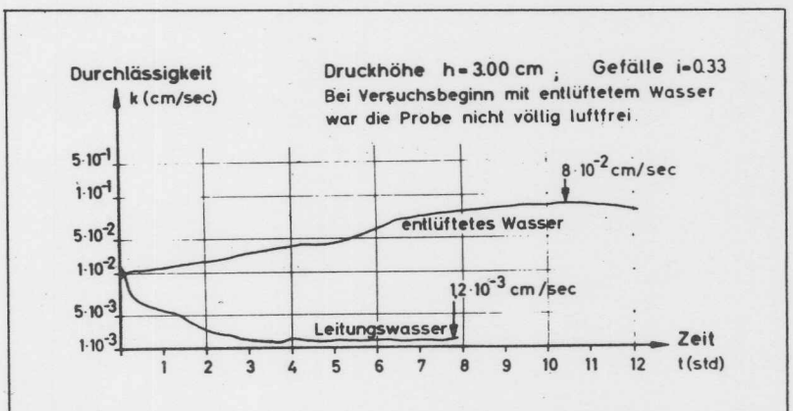
Im Bereich Re > 5 gilt die Proportionalität nicht mehr. Man kann für die Beziehung zwischen v und i n i c h t l i n e a r e Ansätze machen, z.B. $v = \alpha \cdot i^{\beta}$ oder $i = av + bv^2$. Eine theoretische Erfassung der Koeffizienten α, β bzw. a, b ist bisher nicht gelungen (Beispiel siehe Bild 563).

2. Einflüsse auf die Durchlässigkeit

Interpretiert man die Sickerströmung theoretisch als Rohrströmung (HAGEN - POISEUILLE), so zeigt sich, daß G r ö ß e und F o r m d e s P o r e n s y s t e m s sowie die Z ä h i g k e i t des Wassers wesentlichen Einfluß haben müssen und daß der Einfluß der Korngröße (als Maß für die Porengröße) überwiegt. Bei ungleichförmigen Böden bestimmt der F e i n a n t e i l die Porengröße und damit die Durchlässigkeit. Dies wird in der grobempirischen Formel von HAZEN $k\ (cm/s) = D_{10}^{2}(mm)$ (die sicher verbesserungsfähig ist) erfaßt. Der Einfluß der K o r n f o r m auf k ist geringer und nicht so einfach zu erfassen; offenbar kann aber die Kornform eine A n i s o t r o p i e bewirken, wenn z.B. plattige Körner parallel liegen. Das P o r e n v o l u m e n hat nur bei stark kompressiblen Erdstoffen einen wesentlichen Einfluß (s. Bild 12o5). (Die konsolidierte Normalspannung σ steht in eindeutiger Beziehung zum Porenvolumen).



Institut für Bodenmechanik Uni. Karlsruhe | Vertikal durchströmte Proben: Durchlässigkeitsbeiwert k in Abhängigkeit von der Normalspannung σ (Weserport) | 1205



Institut für Bodenmechanik T.H. Karlsruhe | Einfluss von gelöster Luft auf die Durchlässigkeitsziffer von Sand (Versuche Miethe 1958) Korn ∅ 0.2 – 1.0mm | 23

L u f t b l a s e n bewirken eine höhere Zähigkeit und setzen die Durchlässigkeit u.U. erheblich herab (Bild 23). Hierauf ist bei den Versuchen zu achten, besonders bei niedrigen Drücken (Boyle-Mariotte-Gesetz p.V= const).

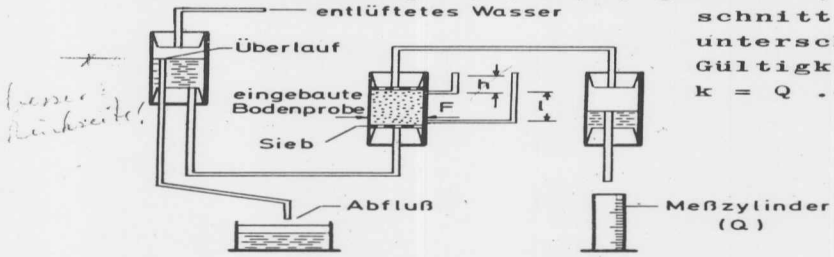
Die T e m p e r a t u r hat bekanntlich erheblichen Einfluß auf die Zähigkeit und damit auf die Durchlässigkeit. Bei Versuchen muß auf die jeweils maßgebende Grundwassertemperatur geachtet werden. Mit steigender Temperatur nimmt die Zähigkeit ab (Durchlässigkeit nimmt zu: Tropen!).

Laborversuche

Beim Versuch mit k o n s t a n t e r D r u c k h ö h e wird die Wassermenge Q (cm^3/s) gemessen, die eine Probe (Länge l, Querschnitt F) bei konstantem Energieunterschied h durchströmt. Daraus bei Gültigkeit des Darcy'schen Gesetzes

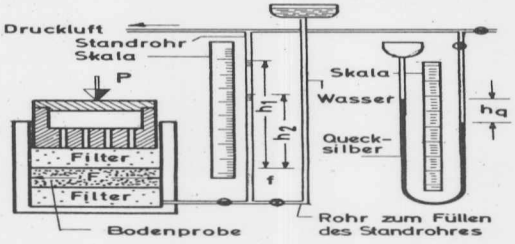
$k = Q \cdot l/F \cdot h$

$$k = \frac{Q \cdot l}{F \cdot h}$$



Beim Versuch mit v e r ä n d e r l i c h e r D r u c k h ö h e, der sich für wenig durchlässige Erdstoffe besser eignet (Q sehr klein), wird auf der Oberseite kein Wasser zugegeben, so daß der rechte Spiegel im Laufe der Versuchszeit t_o von h_1 auf h_2 absinkt. Bei Annahme des Darcy'schen Gesetzes sinkt dabei v ab von $k\, h_1/l$ auf $k\, h_2/l$. Für einen Zwischenzustand gilt die Bilanz

$Q = -\frac{dh}{dt} f = k \frac{h(t)}{l} \cdot F$, die man leicht integriert zu



$$k = \frac{fl}{F\, t_o} \ln \frac{h_1}{h_2}$$ bei Berücksichtigung der Anfangsbedingungen.

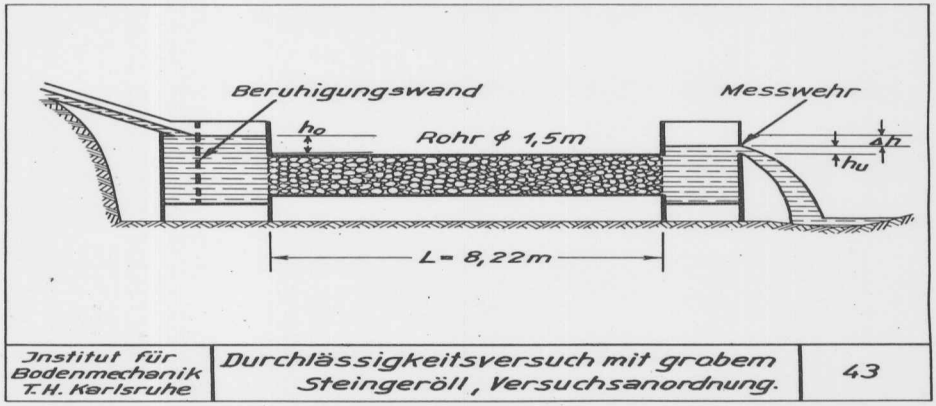
Beide Versuchstypen sind sehr fehleranfällig, u.a. weil

- das Porensystem beim Probeneinbau leicht gestört werden kann,
- an den Behälterwänden unkontrollierbare Seitenkanäle entstehen können,
- besonders an der Niederdruckseite Luftblasen auftreten können.

Überdies ist die willkürlich herausgegriffene Probe oft nicht repräsentativ, da der Boden bezüglich k sehr inhomogen sein kann. Dann besser

4. Feldversuche

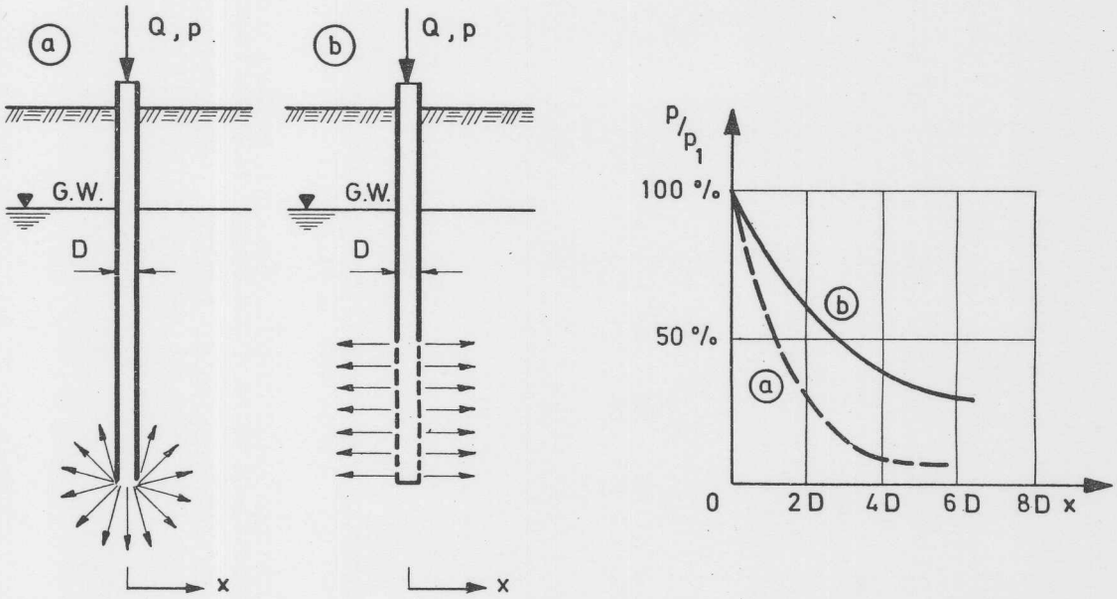
Ein Versuchstyp, der dem Laborversuch mit konstanter Druckhöhe ähnelt, kommt für sehr grobkörnige Erdstoffe infrage. Bsp.Bild 43:



Diese Anordnung wurde gebaut, um das Dammbaumaterial des Henne-Staudammes zu untersuchen. Ergebnis: Re ≈ 300 - 6000, max Durchlässigkeit $k = 10^{+2}$ cm/sec. Für i = 10 ‰ ergibt sich v_w = 2,5 - 150 cm/sec. Es zeigte sich, daß 1 m^2 Erdstoff soviel Wasser durchläßt, wie ein offenes Rohr von 20 cm Durchmesser: Daher Einbau einer zusätzlichen Kerndichtung.

Bei den übrigen Feldversuchen wird in dem Boden in situ ein (bezüglich i) inhomogenes Strömungsfeld erzeugt. Durch Auswertung gemessener Wassermengen und Druckhöhen erhält man mittlere k-Werte, die den durchströmten Bereich repräsentieren.

Bei der Z e n t r a l b r u n n e n m e t h o d e (MIETHE) wird in einem in den Grundwasserträger eingeführten Brunnenrohr ein Überdruck aufrechterhalten und die dabei in den Boden strömende Wassermenge gemessen. Theoretisch hergeleitete Formeln gestatten dann die Berechnung des k-Wertes.

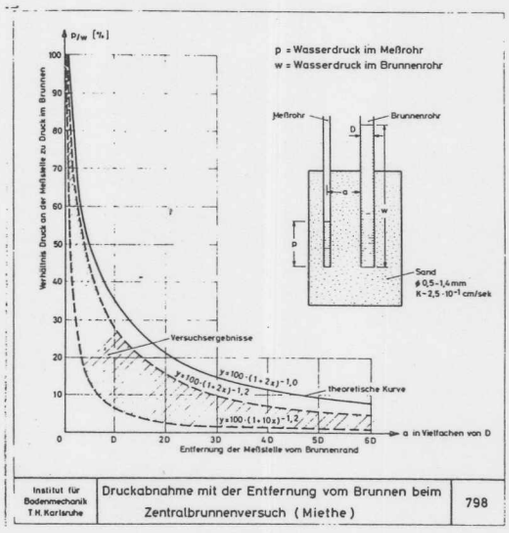


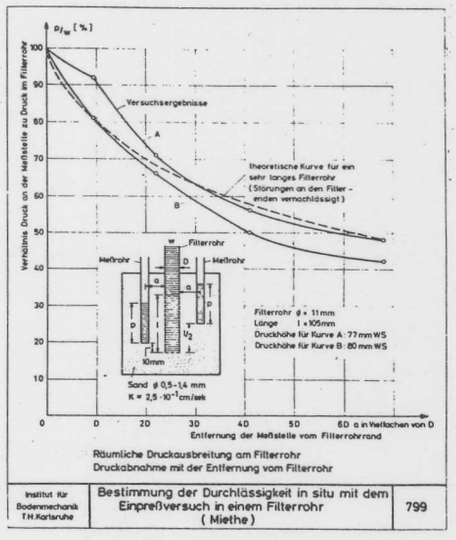
Wie Versuche und Berechnungen zeigen, fällt der Druck (je nach Anordnung der Öffnungen verschieden) zur Umgebung hin rasch ab. Maßgebend für die Ergebnisse (also auch für k) ist nur eine schmale Zone um den Brunnen herum, die überdies beim Einbau des Brunnens gestört wird. Bei diesem Verfahren werden also k-Inhomogenitäten großer Ausdehnung nicht erfaßt.

Die P r o b e a b s e n k u n g kann einen viel größeren Bodenbereich erfassen, ist aber auch wesentlich teurer. Man mißt Wassermenge und (an mindestens zwei Stellen) Wasserstand und wertet nach der Brunnenformel aus. Neuere USA-Versuche erlauben instationäres Absinken, daraus Ableitung von k.

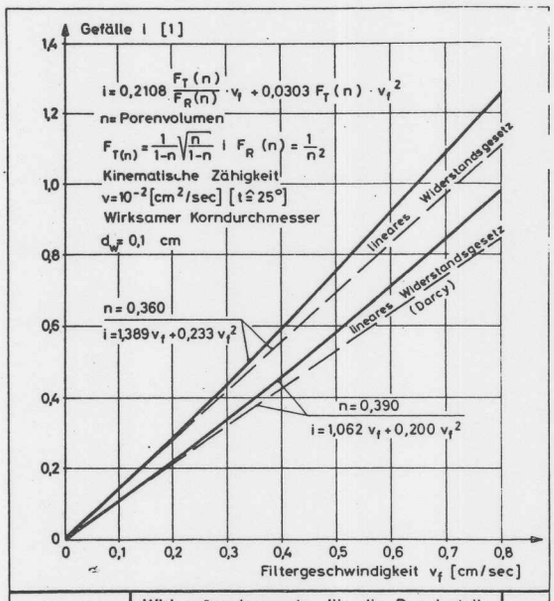
5. Erfahrungswerte für Vorentwürfe

Erdstoff	k_f [cm/s]	
grobes Geröll	10^{+1} - 10^{+2}	Darcy'-sches Gesetz nicht gültig
Grobkies	10^{0}	
Kiessand	10^{-1}	
Sand	10^{-2}	
Feinsand	10^{-3}	
Grobschluff	10^{-4}	
Schluff	10^{-5} - 10^{-6}	
magerer Ton	10^{-7}	
fetter Ton	10^{-8} - 10^{-9}	

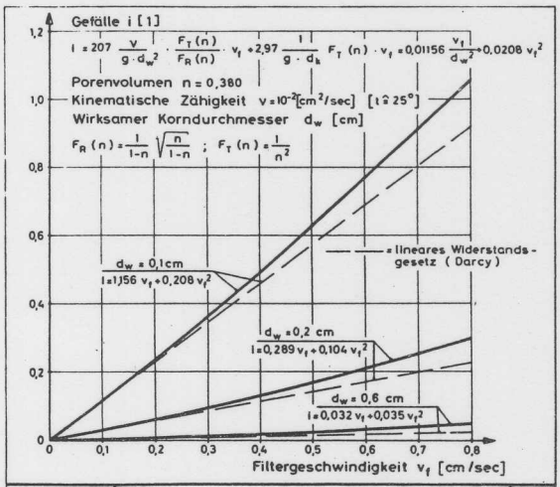




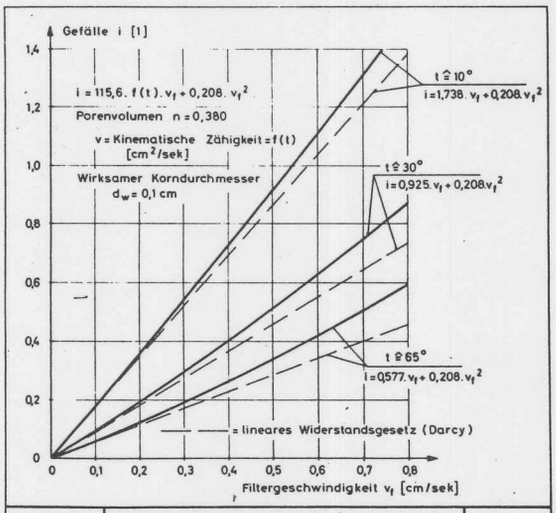
Die Durchlässigkeit ist bei Sand groß und bei Ton klein. Bei nassem Boden finden in den Porengängen Strömungen nach den Gesetzen der Hydraulik statt, die Porenwasserströmungen. Allerdings ist, wie oben bereits ausgeführt, das Wasser in den Hohlräumen nur teilweise flüssig. Die oberflächenreichen Schuppenteilchen der Tonböden sind eisartig von gebundenen Wasserhüllen umgeben, die ihre Stärke unter Druck ändern. Hierdurch wird das Verhalten dieser Böden in starkem Maße be-



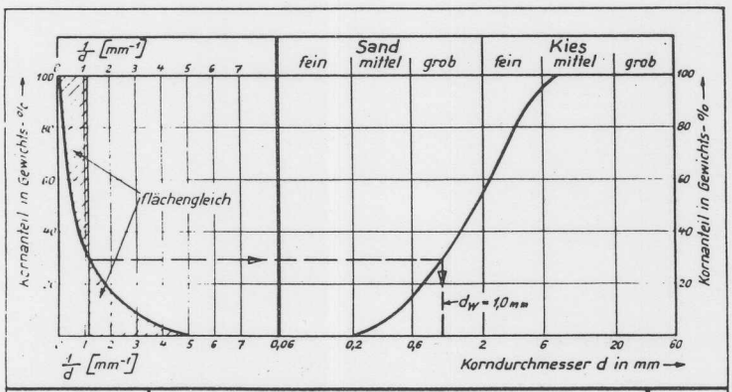
Institut für Bodenmechanik u. Felsmechanik Univ. Karlsruhe	Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Kugelschüttungen (Ein- und Zweikornschüttungen) Einfluß des Porenvolumens n (Tessendorf)	1338



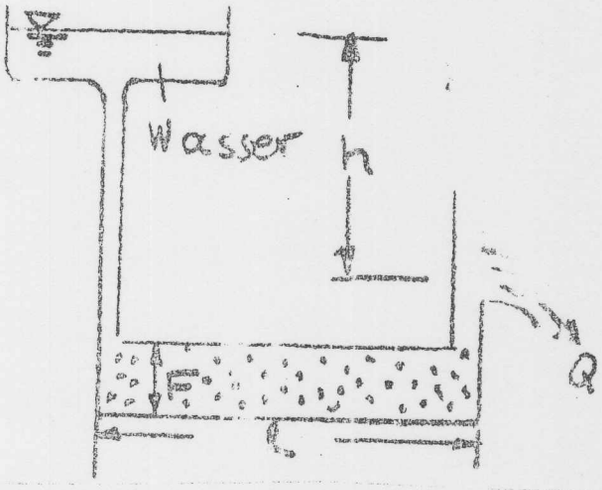
Institut für Bodenmechanik u. Felsmechanik Univ. Karlsruhe	Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Kugelschüttungen (Ein- und Zweikornschüttungen) Einfluß des Korndurchmessers d_w (Tessendorf)	1339



Institut für Bodenmechanik u. Felsmechanik Univ. Karlsruhe	Widerstandsgesetz für die Durchströmung von Kugelschüttungen (Ein- und Zweikornschüttungen) Einfluß der Temperatur t. (Tessendorf)	1340



Institut für Bodenmechanik T.H. Karlsruhe	Bestimmung des wirksamen Korndurchmessers d_w nach Zunker (1923)	888



Bestimmung von k

$$k = \frac{v}{i} = \frac{Q}{F} \cdot \frac{l}{h}$$

Bei turbulenter Filterströmung

sind Trägheitskräfte zu überwinden. Die Grenze zwischen turbulent und laminar gibt die Reynoldssche Zahl an:

für Kreisrohre gilt:

$R_e > 2320$: turbulent;

$<$ laminar:

hierbei ist: $R_e = \frac{v \cdot D}{\nu}$

v = Geschwindigkeit

D = Rohrdurchmesser

ν = kin. Zähigkeit

$= \frac{\eta}{\rho} \left[\frac{cm^2}{sec}\right]$

$\eta = \left[\frac{gr \cdot sec}{cm^2}\right]$

$\rho = \frac{\gamma}{g} = \left[\frac{gr \cdot sec^2}{cm^4}\right]$

$\nu = \left[\frac{gr \cdot sec}{cm^2} \cdot \frac{cm^4}{gr \cdot sec^2}\right] = \left[\frac{cm^2}{sec}\right]$

für offene Gerinne gilt:

$R''_e = \frac{v \cdot R}{\nu}$; $R = \frac{U}{F}$

$R''_e = \frac{R_e}{4}$

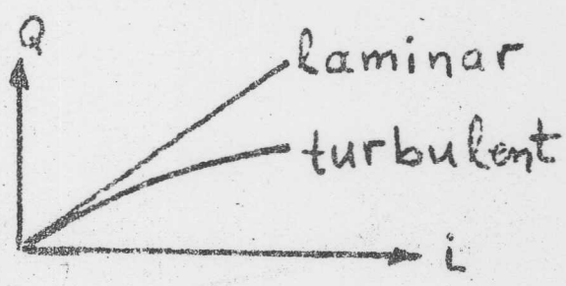
Die Grenze für die laminare Sickerströmung wurde von Dachler unter Verwendung einer reynoldsschen Zahl zu

$R''_e = \frac{v \cdot d}{\nu} = 50$ angegeben, (d = maßgebender Korndurchmesser

d.h. bei $R''_e \leq 50$ liegt laminare Sickerströmung vor.

Man kann sich jedoch merken, daß für $d < 5$ mm laminare und für $d > 5$ mm turbulente Sickerströmung vorliegt.

Im turbulenten Bereich der Sickerströmung ist das Gesetz von Darcy nicht mehr gültig, die Filtergeschwindigkeit kann hier dargestellt werden durch ein Gesetz von der Form

$v = \alpha \cdot i^{\beta}$

wobei: $\beta = \frac{1}{2} \div 1$