

ROZDZIAŁ VII.

WYZNACZENIE WSPÓŁCZYNNIKA PRZEPUSZCZALNOŚCI.

Wartość współczynnika przepuszczalności k musi być znana przy wszystkich robotach, przy których mamy do czynienia z wodą gruntową, naturalną lub sztuczną, a zatem przy ujęciach wodociągowych, fundamentowaniu, filtracji wody na filtrach powolnych i pośpiesznych.

Współczynnik k może być oznaczony, mniej dokładnie, na podstawie znajomości porowatości pokładu wodonośnego, oraz grubości ziarn z których jest on złożony, bardziej dokładnie, przy pomocy prób pompowania. Ponieważ jednak warstwy przepuszczalne nigdy nie są złożone z materiału jednolitego, zdarza się zawsze, że na tym samym terenie, doświadczalnie oznaczony współczynnik przepuszczalności, w różnych punktach terenu posiada bardzo różne wartości tak, że nawet z doświadczalnych, a zatem bardziej ściśle wyznaczonych wartości współczynnika, zbyt daleko idących wniosków wysnuwać nie można. Gdy próba pompowania jest zabiegiem bardzo kosztownym, przy projektowaniu pewnych robót wstępnych będzie zwykle celowe oprzeć się li tylko na określeniu teoretycznym współczynnika, a zatem jedynie na podstawie znajomości grubości ziarna oraz porowatości pokładu.

1. Teoretyczne oznaczenie współczynnika przepuszczalności.

a) Metody: Slichter-King, Allen-Hazen.

Slichter⁵⁴⁾ przeprowadził analizę przepływu wody dla idealnego gruntu, złożonego z samych kul o jednakowej średnicy. Analizując drogę jaką struga musi zrobić między kulami, oraz przekroje wolne na drodze strugi, określił spad ciśnienia na tej drodze, dla przyjętego średniego przekroju, oraz dla oporów obliczonych podług praw ruchu laminarnego, ustalonych wzorami Poiseuille-Lamb'a. Długość drogi, kształty i pola, przekroje

na niej, oraz przestrzenie puste między kulami, czyli porowatość, zależą od położenia środków kul względem siebie. Łącząc proste-
mi środki kul obok siebie leżących i wyznaczając kąt przestrzen-
ny między niemi, Slichter wyprowadza wzory na porowatość
przestrzenną oraz porowatość w przekroju, w zależności od kąta θ .
Maximum porowatości przestrzennej będzie dla kąta $\theta = 84^{\circ}59'$
i wyniesie 47% , minimum dla kąta: $60^{\circ}2'$ i wynosi $25,95\%$. Poro-
watość w przekroju wzrasta w tych granicach w stopniu cokol-
wiek wyższym niż porowatość przestrzenna i wynosi dla 26%
porowatości przestrzennej $9,37\%$ porowatości w przekroju płą-
skim, zaś dla 47% porowatości przestrzennej $21,17\%$ w prze-
kroju płaskim.

TABELA 12.

związku między kątem θ , porowatością przestrzenną i w przekroju płaskim.

Kąt θ	$60^{\circ}2'$	$61^{\circ}18'$	$62^{\circ}36'$	$64^{\circ}3'$	$65^{\circ}37'$	$67^{\circ}21'$
Porowatość przestrzenna $\%$.	26	28	30	32	34	36
Porowatość w przekroju $\%$.	9,37	10,45	11,55	12,66	13,78	14,91
Kąt θ	$69^{\circ}17'$	$71^{\circ}28'$	$74^{\circ}3'$	$77^{\circ}10'$	$81^{\circ}25'$	$81^{\circ}59'$
Porowatość przestrzenna $\%$.	38	40	42	44	46	47
Porowatość w przekroju $\%$.	16,05	17,19	18,32	19,46	20,57	21,17

Wzór Slichter'a na przepływ ilości wody q na *min*, przy spa-
dzie zwierciadła i , grubości ziarna d , dla miar angielskich brzmi:
 $q = 0,2012 \frac{d^2}{\mu c} i$ stóp sześć. na stopę kwadr., przyczem d jest
grubością ziarna wyrażoną w *mm*, μ współczynnikiem lepkości,
 c stałą zależną od porowatości przestrzennej, podług niżej podanej
tabeli, i spadem jednostkowym.

W miarach metrycznych, dla wszystkich wymiarów wyrażo-
nych w centymetrach:

$$q = 10,221 \frac{d^2}{\mu c} i \text{ cm}^3/\text{cm}^2/\text{sek} \quad (134a)$$

Ten sam wzór dla d w *mm*, zaś pola w m^2 i objętości w m^3
będzie brzmiał:

$$q = \frac{10,221 d^2}{10^4 c \mu} i \text{ m}^3/\text{m}^2/\text{sek} \quad (134b)$$

Kładąc w tych wzorach $i=1$ otrzymamy wartość współczyn-
nika k dla wzoru Darcy: $v = k i$, gdyż objętość q , podana we wzo-
rach na jednostkę powierzchni przekroju, jest niczem innem jak
prędkością poruszania się wody.

Między współczynnikiem c , a porowatością przestrzenną p^*) zachodzi, podług Slichter'a zależność następująca:

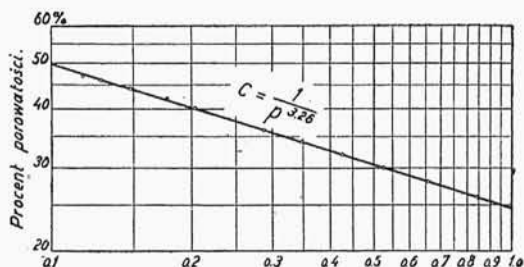
$$c = B \left(1 - \frac{p}{100} \right); B = \frac{1}{\left(1 - \frac{\pi}{4} \cos \Theta \right)^2} \cong \frac{1}{\varphi^2} \quad (135)$$

gdzie Θ jest kątem między prostymi, łączącymi środki kul w rzucie na płaszczyznę, współczynnik μ jest współczynnikiem lepkości φ porowatością powierzchniową. Współczynnik $1:c$ podano w poniższym zestawieniu:

TABELA 13.

Porowatość przestrzenna p	26%	27%	28%	29%	30%	31%	32%	33%
$1:c$	0,01 187	0,01 350	0,01 517	0,01 694	0,01 905	0,02 122	0,02 356	0,02 600
p	34%	35%	36%	37%	38%	39%	40%	41%
$1:c$	0,02 878	0,03 163	0,03 437	0,03 808	0,04 154	0,04 524	0,04 922	0,05 339
p	42%	43%	44%	55%	46%	47%		
$1:c$	0,05 789	0,06 267	0,06 776	0,07 295	0,07 838	0,08 455		

Nazywając przez p procent porowatości, wyliczone teoretycznie współczynniki c rosną w stosunku do około $1:p^{3,26}$. Teoretycznie porowatość dla ziarn kulistych nie może przekraczać 47% lecz dla ziarn niekulistych może być i większa. Rys. 149 podaje wykres zależności $c:100$ od p dla wartości p od 24,8% do 50%. Współczynnik k , wyliczony dla różnych średnic ziarn gruntu d mm oraz procentów porowatości p podano w tabeli 13 dla temperatury $10^\circ C$. Przyjmując w naszych warunkach temperaturę przeciętną $8^\circ C$ i odpowiadający tej temperaturze współczynnik lepkości 0,0138, otrzymamy we wzorze Slichter'a współczynnik k tylko w zależności od porowatości przestrzennej i średnicy ziarna w mm:



Rys. 149.

Zależność współczynnika Slichter'a $c:100$ od porowatości.

$$k = 0,07406 \frac{d^2}{c} \text{ m/sek} \quad (136)$$

*) We współczynniku k musi być zawarta porowatość przestrzenna p a nie porowatość powierzchniowa φ , gdyż tylko ta pierwsza jest miarodajna dla ilości wody przepływającej przez jednostkę przekroju w gruncie. Współczynnik k ma wprawdzie wymiar prędkości, lecz nie rzeczywistej a obliczeniowej. Porowatość p nie może być uważana za jednoznaczna z porowatością m (Hydrologia Cz. I str. 127), w której to ostatniej uwzględniona jest także objętość wody hygroskopijnie związanej. Porowatość m jest zatem zawsze większa od porowatości p .

T A B E L A 14.
Współczynniki przypuszczalności k w cm/sek dla wzoru Slichter'a przy temperaturze $t=10^{\circ}C$,
średnicy d w mm .

$p\%$	$d=0,010\ mm$	0,012	0,014	0,015	0,016	0,018	0,020	0,025
26	0,000 009 289	0,000 013 333	0,00 001 815	0,00 002 083	0,00 002 371	0,00 003 001	0,00 003 708	0,00 005 788
27	10 382	14 964	02 037	02 389	02 660	03 368	04 161	06 495
28	11 865	17 049	02 202	02 664	03 031	03 836	04 788	07 400
29	13 192	18 984	02 585	02 967	03 375	04 272	05 277	08 241
30	14 910	21 420	02 916	03 236	03 809	04 820	05 948	08 990
31	16 471	23 692	03 225	03 702	04 211	05 330	06 581	10 282
32	18 422	26 494	03 606	04 140	04 709	05 961	07 361	11 498
33	20 218	29 132	03 965	04 552	05 179	06 554	08 095	12 643
34	22 482	32 348	04 403	05 054	05 751	07 278	08 985	14 040
35	24 589	35 385	04 816	05 528	06 290	07 961	09 828	15 357
36	27 087	39 046	05 314	06 100	06 941	08 785	10 843	16 946
37	29 507	42 512	05 787	06 643	07 558	09 566	11 811	18 452
38	32 395	46 680	06 354	07 294	08 299	10 503	12 966	20 261
39	35 206	50 630	06 892	07 911	09 002	11 393	14 121	21 977
40	38 484	55 345	07 533	08 648	09 840	12 453	15 370	24 022
41	41 528	59 826	08 143	09 347	10 635	13 460	16 619	25 965
42	45 197	65 087	08 859	10 170	11 571	14 645	18 079	28 250
43	48 788	70 169	09 551	10 964	12 474	15 788	19 492	30 455
44	52 925	76 156	10 366	11 900	13 539	17 135	21 155	33 054
45	56 750	81 691	11 119	12 765	14 523	18 381	22 692	35 457
46	61 200	88 092	11 991	13 764	15 661	19 821	24 472	38 235

T A B E L A 14.

Ciąg dalszy.

<i>p</i> %	<i>d</i> = 0,030 mm	0,035	0,040	0,045	0,050	0,055	0,060	0,065
26	0,00 008 337	0,00 011 345	0,00 014 816	0,00 018 753	0,00 023 153	0,00 028 015	0,00 033 340	0,00 039 128
27	09 352	12 731	16 627	021 045	025 979	031 438	037 415	043 910
28	10 655	14 504	18 945	023 976	029 601	035 816	042 621	050 024
29	11 865	16 153	21 100	026 702	032 965	039 888	047 469	055 711
30	13 387	18 225	23 801	030 126	037 196	045 004	053 558	062 856
31	14 808	20 153	26 322	033 314	041 130	049 765	059 225	069 506
32	16 557	22 537	29 437	037 255	045 994	055 653	066 235	077 730
33	18 204	24 780	32 364	040 963	050 568	061 190	072 823	085 464
34	20 218	27 518	35 939	045 488	056 157	067 952	080 871	094 907
35	22 115	30 099	39 312	049 755	061 426	074 327	088 451	103 813
36	24 402	32 214	43 511	054 906	067 788	082 019	097 607	114 555
37	26 572	36 166	47 235	059 786	073 807	089 310	106 288	124 741
38	29 179	39 711	51 872	065 645	081 043	098 063	116 701	136 966
39	31 646	43 074	56 259	071 204	087 904	106 367	126 584	148 566
40	34 589	47 082	61 496	077 831	096 085	116 265	138 363	162 390
41	37 391	50 891	66 469	084 126	103 860	125 670	149 557	175 520
42	40 678	55 370	72 324	091 530	113 001	136 731	162 718	190 968
43	43 855	59 691	77 967	098 672	121 814	147 399	175 419	205 870
44	47 602	64 787	84 618	107 096	132 220	159 983	190 391	223 450
45	51 060	69 495	90 769	114 879	145 342	171 609	204 231	239 686
46	55 056	74 941	97 881	123 882	152 937	185 058	220 233	258 463

ciąg dalszy.

T A B E L A 14

$p\%$	$d = 0,070 \text{ mm}$	0,075	0,080	0,085	0,090	0,095	0,100
26	0,00 045 377	0,00 052 080	0,00 059 272	0,00 066 914	0,00 075 017	0,00 083 581	0,0 009 289
27	050 927	058 460	066 516	075 087	084 181	093 796	10 382
28	058 015	066 802	075 774	085 547	095 906	106 856	11 865
29	064 611	074 174	084 392	095 266	106 803	119 003	13 192
30	072 901	083 681	095 211	107 490	120 503	134 267	14 910
31	080 614	092 541	105 289	118 863	133 258	148 472	16 471
32	090 145	103 485	117 747	132 922	149 018	166 038	18 422
33	099 122	113 782	129 464	146 146	163 850	182 560	20 218
34	110 074	126 357	143 765	162 297	181 952	202 734	22 482
35	120 393	138 207	157 254	177 526	199 024	221 750	24 589
36	132 860	152 516	173 530	195 902	221 030	244 703	27 017
37	144 670	166 075	188 954	213 309	239 140	266 453	29 507
38	158 846	182 350	207 471	234 214	262 582	292 566	32 395
39	172 296	197 791	225 042	254 050	284 813	317 343	35 206
40	188 390	216 198	245 986	277 694	311 323	346 872	38 484
41	203 567	233 683	265 884	300 152	336 505	374 935	41 528
42	221 482	254 252	289 278	326 576	366 122	410 195	45 197
43	238 765	274 088	311 854	352 055	394 692	439 764	48 788
44	259 147	297 490	338 472	382 109	428 383	477 304	52 925
45	277 975	319 106	363 077	409 875	459 514	511 994	56 750
46	299 762	344 116	391 531	441 997	495 531	552 118	61 200

Przykład: $p = 30\%$, $d = 0,045 \text{ mm}$, $h = 0,00030126 \text{ cm/sek}$.

U w a g a: dla średnicy ziarn 10-krotnie większej, wartości h zwiększają się 10^3 razy, np. dla $p = 26\%$; $d = 0,07 \text{ mm}$; $h = 0,00045377$; $d = 0,7 \text{ mm}$; $h = 0,045377$.

Dla temperatur odmiennych od 10°C należy przeprowadzić poprawkę, podaną w poniższem zestawieniu:

TABELA 15.

stopni C	0	4	5	6	7	8	9	10	11	12
mnożnik wartości otrzy-										
manej z wzoru (134)	0,736	0,840	0,862	0,891	0,916	0,949	0,971	1,000	1,023	1,056
stopni C	13	14	20							
mnożnik	1,091	1,119	1,297							

Teorja Slichter'a przyjmuje jako podstawę rozważań ziarna o równej średnicy kształtu kulistego. W naturze ziarn takich niema. Ziarna nie są w żadnym wypadku kuliste, pozatem wszystkie pokłady przepuszczalne zawierają ziarna różnej średnicy. Przy zastosowaniu wzorów Slichter'a do warunków naturalnych należałoby zatem określić taką średnicę zastępczą, któraby dała ten sam opór dla ruchu wody co grunt naturalny.

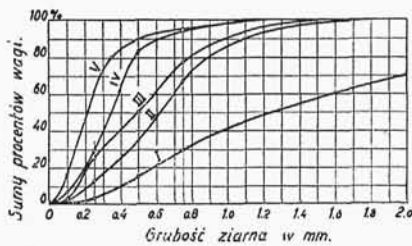
Badania Allen-Hazen'a i następnie King'a doprowadziły do wniosku, iż jako średnicę zastępczą (effective size) można przyjąć średnicę tego ziarna, które wraz z pozostałemi drobniejszymi daje w sumie 10% wagi próbki z danego pokładu. Wynika z tego bezpośrednio, że ziarna o drobnej średnicy mają większy wpływ na przepuszczalność pokładu niż ziarna grubsze, co zresztą jest też zupełnie zrozumiałe i naturalne.

Allen-Hazen wprowadził równocześnie pojęcie współczynnika jednostajności, jako stosunku średnicy ziarn których suma wraz z drobniejszymi wynosi w danym materiale 60% wagi, do średnicy miarodajnej, o sumie 10% wagi. Współczynnik ten gra pewną rolę przy piaskach filtracyjnych filtrów sztucznych na wodę wodociagową i nie powinien przekraczać wartości pięć.

Autorzy niemieccy w pracach nad ruchem wód gruntowych powołują się często na wyniki badań Piefke'go. Piefke, przy studjach nad ujęciem wody gruntowej dla Berlina koło Müggelsee, podaje analizę mechaniczną 5-ciu rodzajów gruntu, ich porowatość, oraz współczynnik przepuszczalności określony przez pompowanie. Dane te są poniżej powtórzone. Na rys. 150 podano wykres krzywej przesiewności.

Próbka	I	II	III	IV	V
Ziarna o średn. do 0,25 mm . . .	3 g	13 g	3 g	6 g	16 g
" " 0,25—0,5 mm . . .	12 "	22 "	22 "	23 "	64 "
" " 0,50—0,75 " . . .	14 "	32 "	25 "	54 "	15 "
" " 0,75—2,00 " . . .	41 "	33 "	27 "	11 "	3 "
" " wyżej 2,00 mm. . .	30 "	—	23 "	6 "	2 "

Próbka	I	II	III	IV	V
Znaleziona porowatość przestrzenna	24,9%	31,4%	32,3%	33,6%	34,0%
Średnica ziarna miarodajnego dla 10% sumy ciężarów ziarn	0,4 mm	0,23 mm	0,16 mm	0,14 mm	0,08 mm
Podany przez Piefke'go współczynnik przepuszczalności k	0,00 303	0,000 901	0,000 538	0,000 273	0,000 101
Współczynnik obliczony wzorem Slichter'a (m/sek)	0,0 001 165	0,0 000 857	0,0 000 467	0,0 000 403	0,0 000 134
dla 1:c równego	0,0 100	0,0 222	0,0 250	0,0 282	0,0 287



Rys. 150.

Krzywe przesiewności dla piasków koło Müggelsee.

poniżej podano grubości ziarna dla 60% oraz współczynnik jednostajności, będący stosunkiem średnicy ziarna dla 60% do średnicy dla 10%.

Próbka	I	II	III	IV	V
Średn. ziarna miarodajnego dla 10%	0,40	0,23	0,16	0,14	0,08 mm
Detto dla 60%	1,62	0,70	0,60	0,39	0,245 „
Współczyn. jednostajności	4,05	3,04	3,75	2,89	3,06 „

Metoda Slichter'a nie daje wyników ścisłych, ponieważ jednak łatwiej jest zrobić analizę mechaniczną gruntu i ocenić jego porowatość niż przeprowadzić kosztowną próbę pompowania, daje ona bardzo dobre usługi dla badań wstępnych, przybliżonych, pozwalając na orientację co do rzędu cyfr przewidzianego wydatku studzien przy pompowaniu, a zatem i co do rozmiarów instalacji przy projektowaniu jakichś urządzeń służących do pompowania.

Jak widać z powyższego zestawienia różnica między k obliczonem wzorem Slichter'a a podanem przez Piefke'go jest bardzo znaczna. Z doświadczeń Piefke'go wynikałoby, że dla obliczenia współczynnika k miarodajną jest większa średnica niż ta, która odpowiada 10%. Dla tychże pomiarów Piefke'go

Allen-Hazen, na podstawie badań nad przepuszczalnością piasków filtracyjnych podał wzór na współczynnik przepuszczalności, wyrażony w $m/24godz$:

$$k = c d^2 (0,7 + 0,03 t) \quad m/24godz \quad (137)$$

przyczem d jest wyrażone w mm , t w stopniach C , stała c jest współczynnikiem o wartości 700 do 1000. Porowatości wzór nie uwzględnia. Wzór zasadniczo nie różni się od wzoru Slichter'a.

b) Pomiary w Detroit.

Sprawą strat ciśnienia na piaskach, używanych do filtracji wody wodociągowej, głównie na filtrach pospiesznych, zajmowano się w laboratorium filtrów w Detroit (Eng. News Record. Grudzień. 1932), gdzie poddawano próbie 8 piasków kalibrowanych o równym ziarnie od średnicy 0,829 mm do 0,997 mm , oraz 16 piasków niekalibrowanych o ziarnie zmiennem i współczynniku jednostajności od 1,1 do 1,8. Wyniki badań wykazały, że przy przepływach obracających się w granicach 50 do 155 mil., średnio 125 mil. gallonów na dobę i akr (prędkość filtrowania średnio 1,352 mm na sek), straty na spadzie są wprost proporcjonalne do grubości złoża, oraz do wydatku tj. prędkości przesiąkania. Wpływ temperatury na wydatek złoża w granicach 35 do 72° F (1,7 do 22,2° C) dał się ująć w zależność prostą, wyrażoną w stopniach C wprost proporcjonalną do: $\frac{5}{9}(t + 29,2)$. Strata na spadzie

jest zatem proporcjonalna do $\frac{9}{5(t + 29,2)}$. Zależność od średnicy ziarna wyraża się proporcjonalnością straty na spadzie do $1 : d^{1,89}$. Średnica ziarna wpływałaby wedle tych doświadczeń nie w stosunku do drugiej potęgi ziarna, lecz potęgi 1,89, wpływ średnicy byłby zatem mniejszy, niż znaleziony w innych doświadczeniach oraz na drodze teoretycznej. Porowatość wahała się dla piasków kalibrowanych, tj. równej średnicy ziarn, od 35,2% dla najgrubszego piasku 0,997 mm średnicy, do 38,7% dla piasku najdrobniejszego 0,289 mm średnicy, w przecięciu wynosiła 36,3%. Porowatość piasków niekalibrowanych naturalnych wahała się w granicach od 34% do 48% i była większa dla piasku o ziarnach kanciastych niż okrągłych tak, że wbrew przewidywaniu, piasek o ziarnach kanciastych okazał się bardziej przepuszczalny od piasku o ziarnach okrągłych, a to z powodu większej porowatości złoża. Wpływ

porowatości znaleziono mniejszy niż u Slichter'a i w Cobble Mountain; dał się on wyrazić zależnością $0,0246(69,43 - p)$, gdzie p jest procentem porowatości. Mały wpływ porowatości tłumaczyć zapewne można tem, że granice w jakich badania były robione były zbyt szczupłe, co pozwoliło zależność krzywolinią ująć w prostszy wzór prostoliniowy.

Wynik badań laboratoryjnych streszcza się we wzorze na stratę ciśnienia h wyrażonej w stopach, przy grubości warstwy piasku l w calach, średnicy ziarna d w mm , p procencie porowatości, t temperaturze w stopniach Fahrenheita i q objętości wydatku filtra w milionach gallonów ameryk. na akr powierzchni i na dobę (1 U. S. gallon = 3,79 l):

$$h = \frac{0,242}{10^3} \frac{q L (69,43 - p)}{d^{1,89} (t + 20,6)} \text{ stóp} \quad (138)$$

Przechodząc na miary metryczne i temperaturę w stopniach C, średnicę ziarna zatrzymując w mm , a wydatek w $m^3/m^2/dobę$ otrzymamy wzór na stratę spadku dla grubości filtra L metrów:

$$h = \frac{0,00173 q L (69,43 - p)}{d^{1,89} (29,2 + t)} \text{ metrów} \quad (138a)$$

stąd współczynnik przepuszczalności k wyrażony w $m/24godz.$ będzie równy:

$$k = 578 d^{1,89} (t + 29,2) \frac{1}{(69,43 - p)} \quad (139)$$

Wstawiając w ten wzór porowatość równą 45%, temperaturę $t = 10^0$, otrzymamy współczynnik k równy:

$$k = 935 d^{1,89} m/24godz \quad (139a)$$

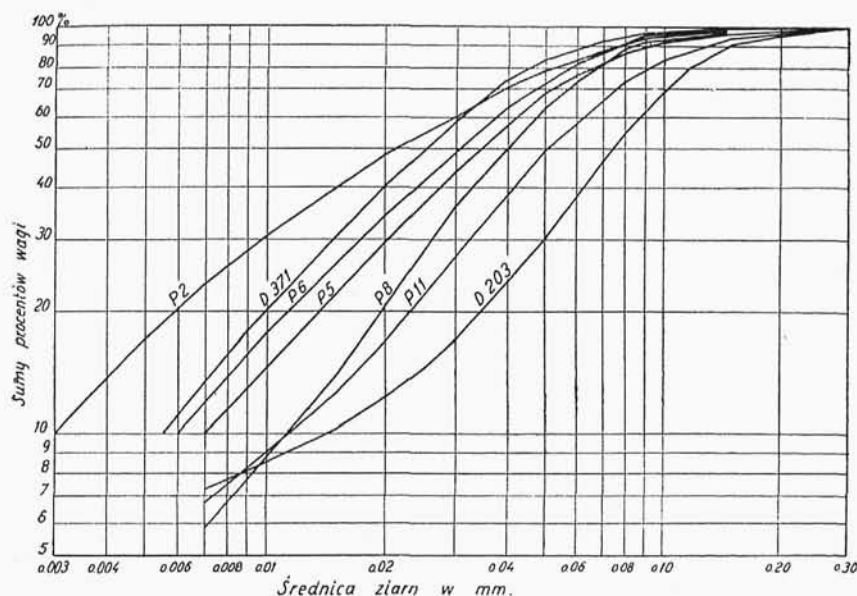
W identycznych warunkach wzór Allen-Hazen'a daje wartość na k od 700 do 1 000 d^2 , zgodność tych dwu wzorów jest zatem znaczna, co wynika z tego, że oba były wyprowadzone na podstawie badań podobnych piasków filtracyjnych. Wstawiając te same wartości na porowatość i temperaturę we wzór Slichter'a otrzymamy:

$$k = \frac{10,221 d^2}{10^4 \times 0,0131} \times 0,07295 \times 86400 = 491 d^2 \quad (139b)$$

Wzór Slichter'a daje zatem niższe wartości na k od wzorów wyżej podanych. Przyczyna tego leży prawdopodobnie w wysokim współczynniku jednostajności piasków używanych na filtrach.

c) Badania w laboratorium Cobble Mountain.

Badania tam przeprowadzone tyczyły się materiałów, używanych do budowy spławianych grobli ziemnych (hydraulic fill dams), a zatem do materiałów, posiadających z natury rzeczy bardzo



Rys. 151.

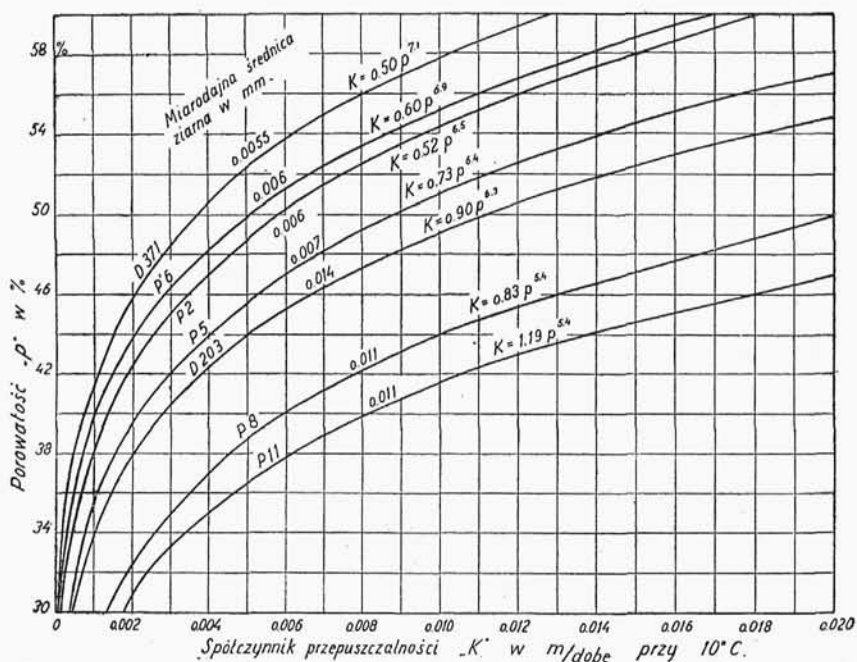
Krzywe przesiewności dla piasków z laboratorium w Cobble Mountain.

drobne ziarno. Badania wykonano dla materiałów o grubości ziarna schodzącego poniżej 0,01 mm. W wyniku badań ustalono, że współczynnik wydajności terenu jest zależny od:

- 1) kwadratu grubości ziarna miarodajnego, podług oznaczenia Allen-Hazen'a, przyczem wartość współczynnika tego zwiększa się, o ile krzywa przesiewności ma przebieg łagodny, tj. gdy ponad 10% materiału grubość ziarna szybko się zwiększa; wartość ta natomiast maleje, o ile krzywa ma przebieg stromy, tj. gdy i w dalszej części odsiewu materiału ponad 10% przeważają ziarna drobne (rys. 151).

- 2) Od temperatury, w prostej zależności od współczynnika lepkości, zgodnie z prawem Poiseuille'a.
3. Od porowatości, przyczem nazywając porowatość (w procentach) przez p , otrzymano zależność współczynnika od p w potęgce od 5,36 do 7,06, średnio od 6-ej potęgi (rys. 152). Nanosząc w podziałce logarytmicznej wartość podanego przez Slichter'a współczynnika $1:c$, w zależności od $p^0\%$, otrzymamy związek, dający się zastąpić prawie dokładnie prostą o nachyleniu $1:3,26$ (rys. 149), co odpowiada takiemu wykładnikowi porowatości. Wykładnik 3,26 dla wzoru Slichter'a jest zatem znacznie niższy od znalezionego w Cobble Mountain (wynoszącego przeciętnie 6,0).

Wysoki wykładnik porowatości w Cobble Mountain wynika zapewne z użycia do prób materiałów o bardzo drobnym ziarnie



Rys. 152.

Krzywe zależności współczynnika k od porowatości dla piasków z laboratorium
w Cobble Mountain.

przy którym warstewka wody, otaczająca ziarno na skutek przyczepności, stosunkowo znacznie zmniejsza przestrzeń wolną dla przepływu wody między ziarnami, i tym samym zwiększa

opory a zmniejsza wydatek. Na prawdziwość tego wniosku wskazuje także fakt, że dla ziarna miarodajnego 0,011 mm wykładnik znaleziono 5,4, dla 0,0055 mm podniósł się do 7,1, był zatem tem większy im mniejsze ziarno. Struktura gruntu w miarę malenia ziarna musi przechodzić w coraz bardziej wrzecionowatą, (wabenförmig), charakteryzującą gliny i ily.

Przy stosunkowo bardzo grubem ziarnie jakie miano w Detroit zależność od porowatości mogła być określona pierwszą potęgą porowatości, zwłaszcza w szczupłych granicach porowatości tam badanych 34% do 48%.

W wyniku badań określono współczynnik k przepuszczalności skorygowanym wzorem Allen-Hazen'a. Znaleziono mianowicie, że dla materiałów o grubości ziarna miarodajnego między 0,003 mm a 0,012 mm, przy temperaturze $10^{\circ}C = 50^{\circ}F$ i przy porowatości 45%, współczynnik wzoru Allen-Hazen'a jest równy 150, tak że wzór otrzymuje kształt: $v = 150 d^2$ i $m/24$ godz, stąd po wprowadzeniu zmiennej temperatury i porowatości, współczynnik przepuszczalności k określono wzorem:

$$k = 150 d^2 \left(\frac{p}{45} \right)^6 \left(\frac{t+10}{60} \right) m/24 \text{ godz} \quad (140)$$

dla p w procentach porowatości, d grubości ziarna w mm i t temperatury w stopniach Fahrenheit'a. Przeliczając ten wzór na stopnie Celsjusza otrzymamy:

$$k = 1,50 d^2 \left(\frac{p}{45} \right)^6 (3t + 70) m/24 \text{ godz} \quad (141)$$

Porowatość materiałów sypanych czy też spławianych waha się w znacznie mniejszych granicach niż średnica ziarna. Z tego powodu decydującym czynnikiem dla przepuszczalności materiału jest zawsze średnica, a w mniejszym stopniu porowatość. I tak w ziemnej zaporze Cobble Mountain spławione jądro, praktycznie biorąc zupełnie szczelne, miało miarodajną średnicę 0,009 mm przy 50% porowatości i współczynniku jednostajności 8, natomiast warstwy zewnętrzne grobli, jakkolwiek miały do 20% porowatości, lecz przy dużej średnicy miarodajnej, były zupełnie przepuszczalne. W zaporach koło Dayton na rzece Miami w kilka lat po ukończeniu budowy, określono w jądrze porowatość materiału na 40%, lecz przy miarodajnej średnicy ziarna tylko 0,002 mm, przy współczynniku jednostajności dochodzącym do 15, materiał okazał się zupełnie nie-

przepuszczalnym, a współczynnik k równym $0,0144 \text{ m/dobę}$. (Proceedings A. S. C. E. Hydraulic fill dams, October 1932, Discussion, January 1933). *)

d) Inne wzory.

Seelheim podaje wzór na prędkość pozorną w gruncie o średnicy ziarna d w cm , przyjętej jako średnica przeciętna, tj. odpowiadająca 50% wagi, dla spadku i oraz temperatury $12^\circ C$:

$$v = 37,6 d^2 i \text{ cm/sek} \quad (142)$$

przy przyjęciu średnicy w mm wzorowi temu odpowiada współczynnik k :

$$k = 325 d^2 \text{ m/24 godz}$$

wartość zatem znacznie niższa niż u Allen-Hazen'a. Wzór nie uwzględnia jednak porowatości i wprowadza inne pojęcie średnicy.

We wzorze Seelheim'a należy przy obliczaniu spadku wody odjąć od wysokości ciśnienia wysokość: $0,58 : d$ w cm . Poprawka ta musi być zrobioną o ile poziom wody znajduje się w obrębie warstwy wodonośnej, tj. przy wolnem zwierciadle wody.

Na obfitym materiale doświadczalnym oparł swój wzór Kröber.

Forma wzoru ma kształt skomplikowany:

$$v = 173 \left[\frac{d}{90} i \right]^{\frac{0,8+d}{0,8+2d}} \text{ cm/sek} \quad (144)$$

Dwa ostatnie wzory dają naogół zgodne wartości współczynnika k we wzorze $v = ki$. Naprzykład przy d w cm i k w cm/sek otrzymuje się:

*) Przy poddaniu materiału posiadającego pewną porowatość, silnemu obciążeniu, w laboratorium Cobble Mountain zauważono zmniejszenie się porowatości. Dla piasku, mającego średnicę miarodajną $0,008 \text{ mm}$, porowatość ostateczna p , po obciążeniu go ciężarem L funtów na cal ang. dała się wyrazić wzorem:

$$100 - p = 49,3 L^{0,0428}$$

(funt na cal kwadr. równa się $0,0703 \text{ kg/cm}^2$).

	u Seelheim'a				u Kröber'a				
przy 1000 d	16	23	48	68	54	70	90	135	210
k : d ²	37	36	38	38	42	41	49	36	41

Wszystkie wzory powyższe na współczynnik k są ustawione na podstawie założenia, że prędkość wody w gruncie jest wprost proporcjonalna do spadku, względnie że spadek jest wprost proporcjonalny do prędkości. Zamiast jednego współczynnika stałego k trzeba by ustalić szereg współczynników, gdyby założyć równanie ruchu wody gruntowej w formie:

$$h = C_1 v + C_2 v^2 + \dots$$

Wszystkie doświadczenia dowodzą jednak, że w granicach praktycznego stosowania wzorów można przyjąć, jako ścisłą zależność prostą, uwidocznioną wzorem Darcy $h = c v$ lub $v = k i$.

Wpływ temperatury we wzorach teoretycznych wprowadzony współczynnikiem lepkości, zauważył przy próbach pompowania Kresnik, przyczem doszedł do wniosku, że przepuszczalność piasku grubszego rośnie wraz z temperaturą znacznie więcej niż drobniejszego tak, że jeśli oznaczymy współczynnik przepuszczalności przy temperaturze 10°C przez k_{10} , to dla innych temperatur będzie:

$$k = k_{10} \left[1 + 0,0745 (t - 10) \sqrt[5]{d} \right] \quad (145)$$

Naogół w terenie przepuszczalność gruntu zmienia się bardzo znacznie, częściowo dlatego, że zależy ona od wielkości ziarn a te rzadko kiedy są jednakowe na większej przestrzeni, częściowo dlatego, że mała domieszka gliny jest w stanie w bardzo znacznym stopniu zmniejszyć przepuszczalność.

Wzory empiryczne podane wyżej odnosiły się do ruchu wody w gruncie złożonym z piasku lub żwiru. W wypadku gruntów ilastych wzory te tracą swoją wartość. Badania nad przepuszczalnością gruntów ilastych przeprowadził Krüger i Zunker oraz Terzaghi. Ci pierwsi podali wzór na prędkość wody mający zastosowanie i przy gruntach ilastych:

$$v = \frac{p \gamma^2 i}{\mu u^2} \text{ cm/sek} \quad (146)$$

Oznaczają tu: p porowatość gruntu, γ jednostkowy ciężar właściwy ziarn (około 2,7), i spadek, μ współczynnik lepkości, u współ-

czynnik, mogący być określony specjalnym przyrządem Zunker'a przyczem jest on zależny od średnicy ziarn, mianowicie:

$$u = \frac{1}{d} = \frac{\gamma O}{60} \quad (147)$$

gdzie O jest sumą powierzchni w gramie gruntu wyrażoną w cm^2 .

Wartość u dla pewnych rodzajów gruntu wynosi:

ciężka glina	1 000
zwykła „	1 000 — 730
glina z piaskiem . . .	730 — 510
piasek z gliną. . . .	340 — 310
piasek	30

2. Metody wyznaczania współczynnika k oparte na próbach pompowania.

Ze wzoru zasadniczego na dopływ wody do studni przy poziomie zwierciadła:

$$z_2^2 - z_1^2 = \frac{Q}{2\pi k} \ln \left(\frac{x_2}{x_1} \right)$$

można obliczyć współczynnik k znając, względnie mając pomierzone: wydajność studni, odległość x_1 i x_2 otworów obserwacyjnych od osi studni, oraz mając zmierzone depresje w tych otworach, względnie odejmując od grubości warstwy H depresje, a zatem obliczając z_2 i z_1 . Wyznaczenie współczynnika można sobie ułatwić, przyjmując za x_1 promień studni r i wprowadzając w rachunek tylko depresję w samej studni. Jak jednak wiadomo, w depresji studziennej mieszczą się z reguły jeszcze straty na opory wlotowe oraz na tarcie w płaszczu studziennym, na skutek czego obliczone z_0 w studni jest obciążone znaczniejszym błędem, ponadto sam wymiar promienia studni r jest przy studniach rurowych bardzo mały, co również wpływa na zwiększenie błędu w obliczonym współczynniku k . Dalsze uproszczenie obliczenia, w przyjęciu dowolnem pewnej wielkości na zasięg depresji R i przyjęcie $z_1 = h_0$, $z_2 = H$, czyli zaniechanie zupełnie wiercenia otworów obserwacyjnych, powoduje dalsze znaczne zwiększenie błędu w wyznaczeniu współczynnika k . Prawidłowe wyznaczenie współczynnika k wymaga zatem wywiercenia przynajmniej dwu