

Janusz MACHER

Różnice we współczynnikach filtracji wyznaczonych różnymi metodami na przykładzie piasków wydmych rejonu Warszawy

WSTĘP

Przy wszelkich pracach i robotach inżynierskich, w których rozpatrywane jest zagadnienie wód podziemnych, konieczna jest znajomość przepuszczalności skał. Wielkością obrazującą to zjawisko jest tzw. współczynnik filtracji (przepuszczalności), zwany również z uwagi na charakter płynu (woda), jaki przechodzi w tym wypadku przez skały, współczynnikiem wodoprzepuszczalności. Współczynnik filtracji (k) zależy przede wszystkim od porowatości lub szczelinowości skały, a ściśle mówiąc od ilości i wielkości porów lub szczelin oraz temperatury przepływającej wody. Wyraża się on stosunkiem prędkości pozornej (V) i spadku hydraulicznego (I) i równy jest prędkości przepływu przez skały.

Współczynnik filtracji określić można różnymi metodami, a mianowicie:

- a — w badaniach terenowych przez pompowanie lub zalewanie otworów itp.;
- b — badaniami laboratoryjnymi (na aparatach zwanych permeametrami);
- c — na podstawie składu granulometrycznego i wzorów empirycznych.

Za najbardziej dokładne metody uważa się próbną pompowanie lub zatapianie otworów. Badania te są jednak bardzo kosztowne i często wymagają długiego okresu czasu. Toteż przy projektowaniu pewnych prac hydrogeologicznych lub przy prowadzeniu tych prac na etapie wstępnym, współczynniki filtracji określa się przeważnie metodami mniej kosztownymi i nie wymagającymi dłuższego okresu badań, tj. metodami laboratoryjnymi. Niekiedy przy projektach wstępnych przyjmowane są wartości współczynników filtracji z odpowiednich tabel. Tabele te oparte są prawie wyłącznie na wynikach badań prowadzonych za granicą. Z badań laboratoryjnych bardziej dokładne wyniki daje

metoda wyznaczania współczynników filtracji na permeametrach. Jako najprostszą i najtańszą metodę należy uznać określenie współczynników filtracji (w oparciu o skład granulometryczny badanych skał oraz niekiedy ich porowatość) na podstawie wzorów empirycznych. Metoda ta nadaje się jednak wyłącznie dla skał luźnych (przeważnie piasków). Istnieje szereg wzorów opracowanych przez różnych badaczy: Hazena, Slichtera, Seelheima, Krügera, Zamarina i innych (I. W. Garmonow i A. W. Lebediew, 1952 oraz I. A. Skabałanowicz, 1960). Poszczególne wzory są mniej lub bardziej skomplikowane, a uzyskane przy ich pomocy wyniki dla jednej i tej samej skały (piasku) różnią się nieraz bardzo. Wzory te były opracowywane na podstawie badań różnych skał, których własności wodoprzepuszczalności znacznie różniły się i dlatego też wzory empiryczne dają przeważnie dla jednej próbki różne wartości współczynników. Jak widać z powyższego, stosowalność wzorów empirycznych jest znacznie ograniczona.

Celem niniejszej pracy jest wykazanie na przykładzie piasków wydmych różnic w uzyskiwanych współczynnikach filtracji, otrzymanych przy pomocy różnych wzorów i porównanie tych wyników z wynikami osiągniętymi metodami laboratoryjnymi oraz podanie zakresu stosowalności wzorów empirycznych dla wybranych skał luźnych. Badania dotychczasowe stanowią fragment pracy długofalowej, która ma objąć badania wielu skał luźnych, występujących na obszarze Polski. W pierwszym etapie przeprowadzono badania piasków wydmych w rejonie Warszawy. Przy wyborze tego obszaru kierowano się stosunkowo dużą jednorodnością tych utworów zarówno co do składu granulometrycznego, jak i mineralnego.

Praca niniejsza w zasadzie ma charakter teoretyczny, jednak pewne wnioski, jakie dają się wyciągnąć, mogą mieć znaczenie praktyczne. Wstępną wzmiankę o wynikach tych badań podano w 1960 r. (S. Turek).

OGÓLNE DANE DOTYCZĄCE PIASKÓW WYDMOWYCH W REJONIE WARSZAWY ORAZ NIEKTÓRE ICH WŁASNOŚCI

Do badań pobrano próbki piasków wydmych z dwunastu wytypowanych punktów w rejonie Warszawy; połowa próbek pochodzi z prawego brzegu Wisły (głównie taras praski), a reszta z obszaru Puszczy Kampinoskiej (fig. 1). Próbki pobierano z różnych partii wydym: wierzchołkowych, zboczowych i wewnętrznych, jak również z wydym rozwianych.

Omawiane piaski wydmy są pochodzenia eolicznego. Duże nagromadzenie się tych piasków w rejonie Warszawy miało miejsce pod koniec plejstocenu (w dani- i feniglacjale), kiedy nastąpiło ożywienie czynników eolicznych, powodujących powstanie olbrzymich wydym piaszczystych (J. Samsonowicz, 1927). Wydmy te łącząc się tworzyły potężne wały, rozciągające się zgodnie z kierunkiem biegu rzek. Rzeki dostarczały materiału na powstawanie wydym. Istnieje kilka pokoleń wydym, przy czym najstarsze znajdują się już w znacznej odległości od Wisły (wyższe tarasy), natomiast najmłodsze leżą w sąsiedztwie rzeki. Niektóre potężne wydmy paraboliczne tworzyły się w znacznych okresach czasu (S. Lencewicz, 1922).

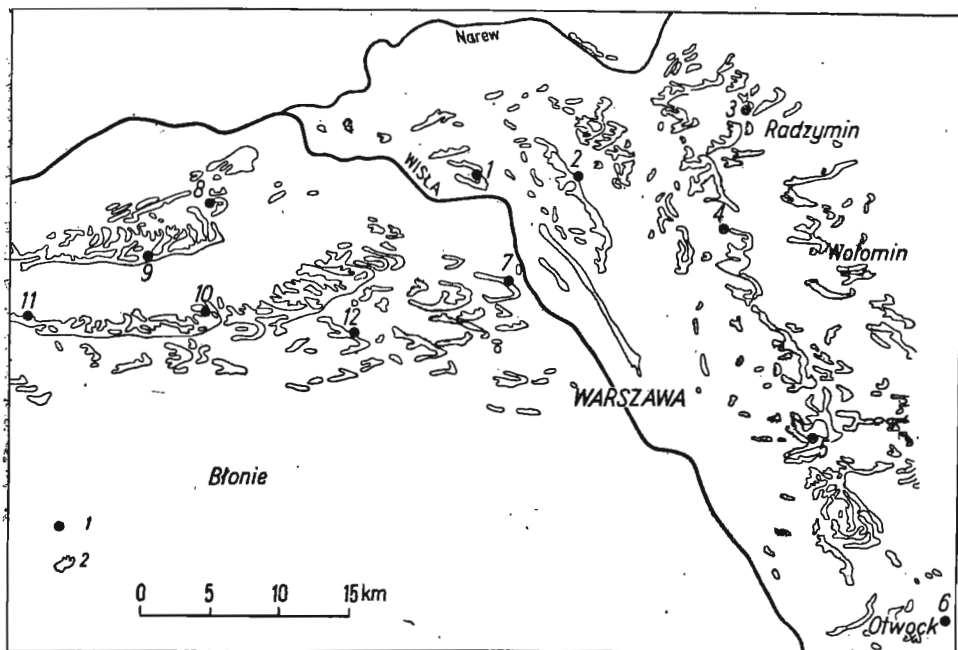


Fig. 1. Miejsca pobrania próbek piasków wydumowych do badań filtracji
Sites of sampling the dune sands for study on filtration

- 1 — miejsca pobrania próbek: 1 — Rajszew, 2 — Józefów, 3 — Zjawisko, 4 — Struga, 5 — Stara Miłocna, 6 — Świerk, 7 — Buraków, 8 — Oybulice Duże, 9 — Dąbrowa, 10 — Rostoka, 11 — Załasek, 12 — Marlew;
2 — obszary piasków wydumowych (według S. Z. Różyckiego i S. Zwierza, 1952)
1 — sites of sampling;
2 — areas of dune sands (after S. Z. Różycki and S. Zwierz, 1952)

WŁASNOŚCI MECHANICZNO-FIZYCZNE

Piaski wydumowe składają się prawie wyłącznie z materiału kwarcowego, bardzo dobrze obtoczonego; są one barwy żółtej.

W celu ustalenia przeciętnego składu granulometrycznego badanych piasków, wykonano 120 przesiewów (po 10 z każdej próbki) oraz sporządzono odpowiednią ilość wykresów krzywej uziarnienia, z których wybrano 12 najbardziej typowych (fig. 2) i włączono do zestawienia wyników (tab. 1).

Najmniejsze ziarna mają poniżej 0,05 mm średnicy, a najgrubsze nie osiągają 2,0 mm. Zawartość poszczególnych frakcji w badanych próbkach przedstawia się następująco:

ziarna poniżej 0,05 mm	0,0 ÷ 12,0%
ziarna 0,05 ÷ 0,25 mm	26,5 ÷ 83,5%
ziarna 0,25 ÷ 0,5 mm	9,0 ÷ 61,0%
ziarna 0,5 ÷ 1,0 mm	1,0 ÷ 22,0%
ziarna 1,0 ÷ 2,0 mm	0,0 ÷ 1,0%

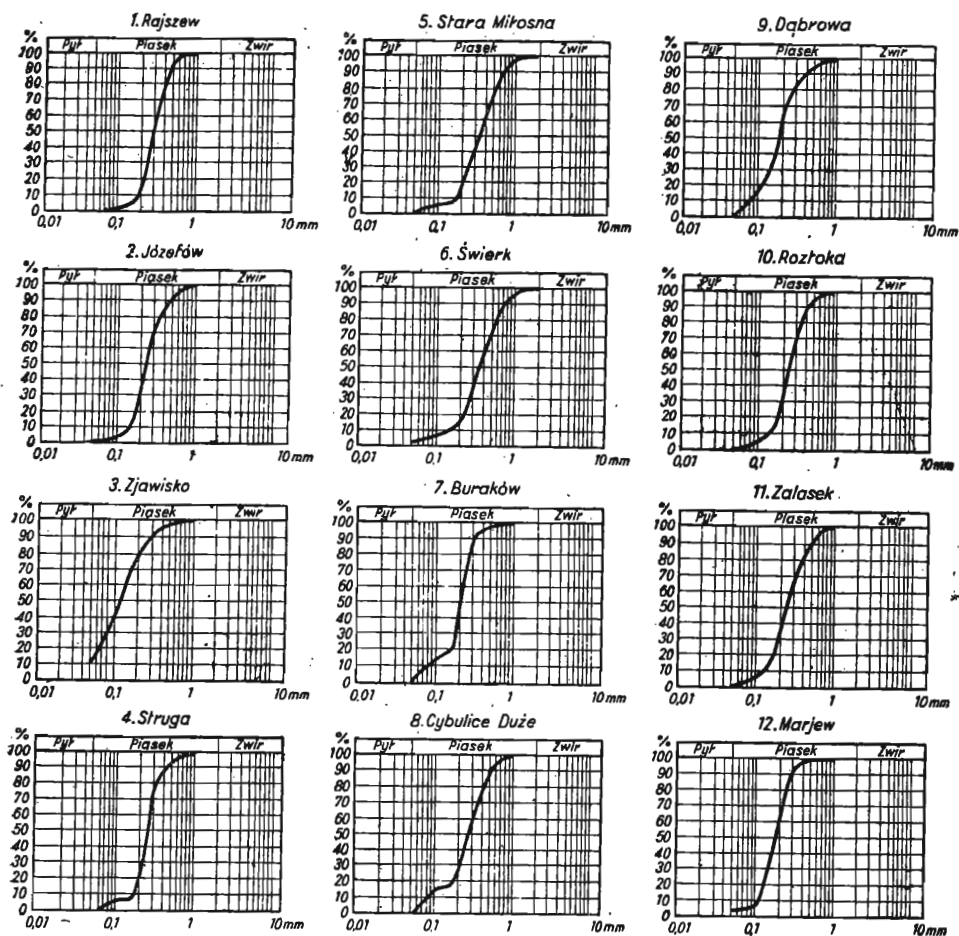


Fig. 2. Krzywe uziarnienia piasków wydmych z rejonu Warszawy
Grain size curves of dune sands from the Warszawa region

Jak widać z powyższego zestawienia, największy procent stanowi frakcja 0,05÷0,25 mm, a najmniejszy — frakcja 1,0÷2,0 mm (występuje zresztą tylko w dwóch próbkach nr 5 i 6), a więc są to piaski drobnoziarniste (próbki nr 2, 4, 7, 8, 9, 10, 11, 12), niekiedy drobnoziarniste nieco pylaste (próbka nr 3). Dla lepszego zobrazowania składu granulometrycznego tych piasków wykonano specjalny diagram (fig. 3).

Przeciętna średnica ziarna (d_{50}) wahała się od 0,110 mm (próbka nr 3) do 0,340 mm (próbka nr 5 i 6). Obliczony współczynnik niejednorodności uziarnienia (U), będący stosunkiem dwóch charakterystycznych średnic badanych utworów (d_{60} i d_{10}) wykazał, że piaski wydmyne charakteryzują się równym ($U = 2÷3,6$) lub nawet bardzo równym ziarnem (U poniżej 2).

B. Krygowski (1956) zajmował się, między innymi, badaniami granulometrycznymi piasków wydmych. Badania te dotyczyły składu

mechanicznego i petrograficznego oraz stopnia obtoczenia. Biorąc za kryterium stopień zaokrąglenia ziarna B. Krygowski wydzielił w Polsce dwie prowincje piasków wydmych: zachodnią i wschodnią. Badane przez autora piaski wydmy z rejonu Warszawy należą do prowincji wschodniej. Piaski wydmy tej prowincji odznaczają się według B. Krygowskiego dużym stopniem zaokrąglenia, co świadczyłoby o ich większej wodoprzepuszczalności w porównaniu z piaskami z prowincji zachodniej. B. Krygowski, obok praktycznego znaczenia badań granulometrii, widzi tę metodę jako pomocną przy rozwiązywaniu zagadnień stratygrafii czwartorzędu.

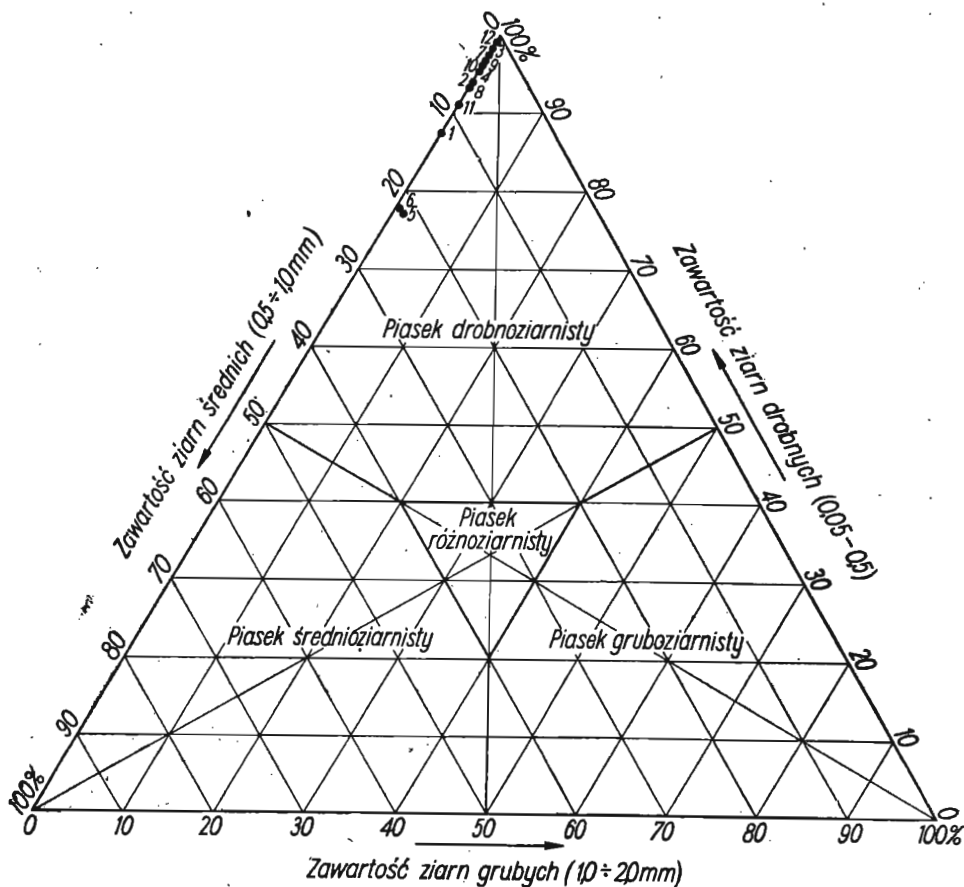


Fig. 3. Diagram składu granulometrycznego piasków wydmych z rejonu Warszawy
Diagram of granulometric composition of dune sands from the Warszawa region

Jedną z najważniejszych cech skał luźnych, jakie należy znać przy rozpatrywaniu zagadnień przepuszczalności, jest obok składu granulometrycznego również porowatość. Z uwagi na to, że pobrane próbki

posiadały naruszoną strukturę, nie można było ustalić właściwej porowatości. Podaną w tabeli 1 porowatość wyznaczono orientacyjnie (drogą nasączenia prób), toteż otrzymane wartości należy uznać za przybliżone. Tak oznaczona porowatość badanych piasków wydmowych wynosiła przeciętnie 30% (maksymalna 38% w próbce nr 12).

Ciężar właściwy piasków wydmowych można przyjąć za równy ciężarowi właściwemu kwarcu — 2,65 g/cm³, ponieważ prawie wyłącznym składnikiem badanych piasków jest kwarc.

WYZNACZENIE WSPÓLCZYNNIKÓW FILTRACJI PIASKÓW WYDMOWYCH

METODA LABORATORYJNA

Metoda ta polega na przepuszczaniu wody przez badaną skałę, umieszczoną w specjalnych aparatach zwanych permeametrami. Istnieje wiele typów aparatów sporządzonych przez różnych badaczy, jednak wszystkie oparte są na aparacie Darcy'ego, jednego z twórców teorii ruchu laminarnego wód podziemnych. Prawo Darcy'ego wyraża się wzorem:

$$Q = FkI$$

gdzie: Q — ilość wody przechodzącej przez skałę w jednostce czasu w m³;

F — powierzchnia poprzeczna przekroju strumienia w m²;

k — współczynnik filtracji (przepuszczalności) w m/dobę;

I — gradient lub spadek hydrauliczny albo spadek ciśnienia na jednostkę drogi filtracji

Badanie wodoprzepuszczalności metodą laboratoryjną przeprowadzono przy pomocy dwóch typów permeametrów, a mianowicie: aparatu Wiłuna i aparatu (rurki) Kamieńskiego (W. G. Bogomołow, 1955; J. Marcher, 1954; Z. Wiłun, 1948). Aparat typu Wiłuna oparty jest na obserwacji ilości przepływającej wody w określonym czasie (Z. Wiłun, 1948), natomiast w rurce obserwowana jest prędkość opadania wody. Uzyskane średnie wyniki znajdują się w tabeli 1. Jak widać z załączonego zestawienia, wartości współczynnika filtracji otrzymane na aparacie Kamieńskiego są przeważnie wyższe niż otrzymane z aparatu Wiłuna, co można tłumaczyć słabszym ubiciem próbki. Ogółem wykonano 60 badań, z tego dla każdej próbki po dwa badania na aparacie Wiłuna i po trzy na rurce Kamieńskiego. Przy badaniu wodoprzepuszczalności na aparacie Wiłuna temperatura wody wahała się od +3,5°C do +8,7°C (przeciętnie do +5°C), a na rurce — od +9,2° do +15,8°C (przeciętnie ok. +13°C). Wszystkie podane w tabeli 1 współczynniki przeliczone zostały w odniesieniu do wody o temperaturze +10°C (temperatura zbliżona do przeciętnej temperatury płytszych wód podziemnych występujących w Polsce).

Poniżej przedstawiono średnie wyniki z obu aparatów dla poszczególnych próbek:

nr 1	0,00020 m/sek	nr 7	0,00012 m/sek
nr 2	0,00012 m/sek	nr 8	0,00013 m/sek
nr 3	0,00003 m/sek	nr 9	0,00009 m/sek
nr 4	0,00012 m/sek	nr 10	0,00013 m/sek
nr 5	0,00016 m/sek	nr 11	0,00013 m/sek
nr 6	0,00016 m/sek	nr 12	0,00007 m/sek

Średnie wartości współczynników filtracji wahają się więc od 0,00003 m/sek do 0,00020 m/sek, a przeciętna wynosi około 0,00012 m/sek. E. Prinz (1919) podaje, że I. M. K. Piennink badając przepuszczalność (nie wskazuje metody) piasków wydmyowych w Holandii (Haarlem), uzyskał współczynnik filtracji = 0,00020 m/sek. Współczynnik filtracji o takiej wartości lub do niej zbliżonej uzyskano badając próbki nr 1, 5 i 6. Nasuwa się przypuszczenie, że badane przez I. M. K. Piennink'a piaski składały się raczej z grubszych frakcji.

Dodatkowe określenie współczynnika filtracji metodą laboratoryjną przeprowadzono na specjalnie wykonanym modelu studni bezfiltrowej, opartej na wodonośnych piaskach wydmyowych częściowo przykrytych warstwą ilu. „Warstwę wodonośną“ zrobiono z próbek piasków: nr 1, 2, 4, 8, 10, 11. Przeprowadzone „próbne pompowanie“ na tym modelu dało wyniki, na podstawie których wyznaczony współczynnik filtracji badanych piasków wydmyowych wyniósł około 0,00019 m/sek, a więc jest on prawie taki, jaki uzyskał I. M. K. Piennink dla piasków wydmyowych w Holandii.

METODA EMPIRYCZNA

Określenie współczynników filtracji tą metodą dokonuje się przy pomocy wzorów opracowanych przez wielu badaczy. Pierwsi zastosowali tę metodę C. Piefke i E. H. King (E. Prinz, 1919) przy badaniu przepuszczalności skał (piaski i piaskowce). Prawie wszystkie wzory opierają się na porowatości i składzie granulometrycznym (charakterystyczne średnice ziarna, jak np. d_{10} , d_{50} itp.) badanej próbki, a niekiedy tylko na samym uziarnieniu. Wspomniane wyżej charakterystyczne średnice określone są w większości przypadków (np. według wzorów Hazena, Slichtera, Seelheima, Zauerbreja i innych) na podstawie krzywej uziarnienia (fig. 2) sporządzonej w siatce półlogarytmicznej lub rzadziej w prostej. W niektórych wzorach efektywne średnice obliczane są innymi sposobami, jak np. we wzorze Krügera średnica ta uzależniona jest od sumy ogólnej powierzchni ziarn.

W opracowaniu niniejszym określono współczynniki filtracji (tabela 1) przy pomocy następujących wzorów:

A. Wzór Hazena

$$k = c \cdot d_{10}^2 (0,7 \div 0,03 t)$$

gdzie k — współczynnik filtracji w m/dobę;

c — stała empiryczna, zależna od stopnia niejednorodności uziarnienia i częściowe porowatości, waha się od 400 do 1200;

Skład granulometryczny i współczynniki filtracji piasków wydmowych z rejonu Warszawy

Nr próbki	Miejsce pobrania próbki	Głębokość pobrania próbki w m	Zawartość ziarn w % poszczególnych frakcji					Średnice ziarn w mm				U współczynnik niejednorodności uziarnienia	Porowatość	Współczynniki filtracji (k_{10})												Wartość do wzoru Hazena		
			poniżej 0,05 mm	0,05 ÷ 0,25 mm	0,25 ÷ 0,5 mm	0,5 ÷ 1,0 mm	1,0 ÷ 2,0 mm	d ₆₀	d ₅₀	d ₁₇	d ₁₀			Laboratoryjne — na aparatach:				Empiryczne — na podstawie wzorów:										
														Wiłuna		Kamieńskiego (rurka)		Hazena		Slichtera		Zauerbreja		Seelheima			Krügera	
														m/dobę	m/sek.	m/dobę	m/sek.	m/dobę	m/sek.	m/dobę	m/sek.	m/dobę	m/sek.	m/dobę	m/sek.		m/dobę	m/sek.
1	Rajszew, wydma zalesiona	0,5	0,0	26,5	61,0	12,5	—	0,340	0,300	0,215	0,185	1,84	30	14,69	0,00017	19,87	0,00023	41,04	0,00048	4,32	0,00005	7,62	0,00009	29,25	0,00034	15,37	0,00018	1200
2	Józefów, wydma rozwiana i zalesiona	0,5	1,0	55,0	38,0	6,0	—	0,260	0,240	0,165	0,140	1,86	35	8,64	0,00010	11,23	0,00013	22,54	0,00026	4,32	0,00005	8,29	0,00010	18,72	0,00022	11,62	0,00015	1150
3	Zjawisko, wydma rozwiana	0,5	12,0	77,5	9,0	1,5	—	0,130	0,110	0,055	0,050	2,6	31	1,73	0,00002	2,59	0,00003	1,00	0,00001	0,35	< 0,00001	< 0,57	0,00001	3,93	0,00005	3,22	0,00004	400
4	Struga, wydma rozwiana	3,0	0,0	51,5	44,0	4,5	—	0,265	0,245	0,170	0,150	1,77	30	8,64	0,00010	11,23	0,00013	27,00	0,00031	3,46	0,00004	4,77	0,00006	19,50	0,00023	10,43	0,00012	1200
5	Stara Miłosna, wydma	5,0	0,0	28,0	49,0	22,0	1,0	0,400	0,340	0,200	0,160	2,5	30	11,23	0,00013	16,42	0,00019	30,72	0,00036	3,46	0,00004	6,60	0,00008	37,57	0,00043	27,08	0,00031	1200
6	Świerk, wydma rozwiana zalesiona	1,0	1,0	28,0	48,5	22,0	0,5	0,400	0,340	0,200	0,130	3,08	30	12,10	0,00014	15,55	0,00018	19,44	0,00023	2,59	0,00003	6,60	0,00008	37,57	0,00043	21,77	0,00025	1150
7	Buraków, wydma rozwiana	3,0	0,5	69,5	27,5	2,5	—	0,230	0,210	0,120	0,080	2,88	30	10,07	0,00012	9,50	0,00011	7,68	0,00009	0,86	0,00001	2,38	0,00003	7,51	0,00009	10,43	0,00012	1200
8	Cybulice Duże, wierzchołek wydmy	0,5	0,0	44,0	49,5	6,5	—	0,290	0,265	0,150	0,080	3,63	30	10,37	0,00012	12,10	0,00014	7,68	0,00009	0,86	0,00001	3,71	0,00004	22,82	0,00026	17,03	0,00020	1200
9	Dąbrowa, wydma zalesiona	1,0	0,0	78,0	19,0	3,0	—	0,190	0,175	0,095	0,075	2,53	35	8,64	0,00010	6,05	0,00007	6,72	0,00008	0,86	0,00001	2,74	0,00003	9,95	0,00012	9,31	0,00011	1200
10	Roztoka wydma zalesiona	3,0	0,0	56,0	40,0	4,0	—	0,260	0,230	0,160	0,130	2,0	30	11,23	0,00013	10,37	0,00012	20,28	0,00023	1,72	0,00002	4,22	0,00005	17,19	0,00020	14,20	0,00016	1200
11	Zalasek, wydma rozwiana	3,0	0,0	54,0	37,0	9,0	—	0,265	0,235	0,155	0,125	2,12	31	12,96	0,00015	9,50	0,00011	18,72	0,00022	2,59	0,00003	4,54	0,00005	17,94	0,00021	14,20	0,00016	1200
12	Mariew, wydma rozwiana	2,0	1,5	83,5	14,0	1,0	—	0,185	0,170	0,115	0,105	1,61	38	6,91	0,00008	5,18	0,00006	12,10	0,00014	2,59	0,00003	5,68	0,00007	9,39	0,00011	7,25	0,00008	1100

d_{10} — średnica efektywna w mm;

t — temperatura wody w °C (przy wodzie o temp. +10°C wyrażenie w nawiasie równa się jedności).

Wzór ten stosuje się dla piasków i żwirów o średnicy efektywnej w zasadzie od 0,1 do 3,0 mm i współczynniku niejednorodności poniżej 5. Wartość c (I. A. Skabałanowicz, 1960) przyjmuje się w zależności od procentowej zawartości najmniejszych frakcji (np. 0,00÷0,05 mm).

Obliczone przy pomocy tego wzoru współczynniki filtracji badanych piasków wahały się dla różnych próbek od 0,00001 do 0,00048 m/sek, średnio — 0,00021 m/sek, a więc średni współczynnik jest blisko dwa razy większy od uzyskanego przy pomocy aparatów, natomiast prawie taki sam jak uzyskany na modelu.

B. Wzór Slichtera

$$k = 88,3 d_{10}^2 m - \mu$$

gdzie k — współczynnik filtracji w m/dobę;

d_{10} — średnica efektywna w mm;

m — współczynnik zależy od porowatości, waha się od 0,01187 (por. 26%) do 0,08455 (por. 47%);

μ — współczynnik lepkości wody zależny od temperatury waha się od 0,0178 (0°C) do 0,0081 (30°C).

Wzór ten jest stosunkowo skomplikowany i dlatego niewygodny w użyciu. W literaturze podręcznikowej przytaczane są tablice zawierające już obliczone współczynniki (dla różnej porowatości i średnicy). Opierając się na jednej z tablic (E. Czetwertyński, 1958) opracowano nomogram do wzoru Slichtera (fig. 4).

Zastosowanie nomogramu pozwala na szybkie określenie współczynników dla piasku o każdej średnicy miarodajnej. Określone przy pomocy tego nomogramu współczynniki wahały się poniżej 0,00001 do 0,00005 m/sek. W porównaniu ze współczynnikami obliczonymi przy pomocy innych wzorów, daje się zauważyć stosunkowo niewielkie różnice w wartościach dla różnych próbek. Średni współczynnik dla wszystkich próbek wyniósł 0,00003 m/sek, jest on najniższy ze wszystkich średnich współczynników, jakie uzyskano dla piasków wydmowych różnymi metodami.

C. Wzór Zuerbreja

$$k_{10} = \beta \frac{n^3}{(1-n)^2} d_{17}^2$$

gdzie k_{10} — współczynnik filtracji dla wody o temp. +10°C, w m/dobę;

β — współczynnik empiryczny zależny od niejednorodności i wielkości ziarna waha się od 1150 do 3010, najczęściej wynosi 2880÷3010;

n — porowatość w częściach jedności;

d_{17} — średnica efektywna w mm.

Wielkość β przyjęto dowolnie za 3000, gdyż brak jest dokładnych kryteriów co do stosowalności tego współczynnika empirycznego.

Współczynniki przepuszczalności dla poszczególnych próbek obliczone przy pomocy tego wzoru wahały się od poniżej 0,00001 do 0,00010 m/sek, średnio 0,00006 m/sek.

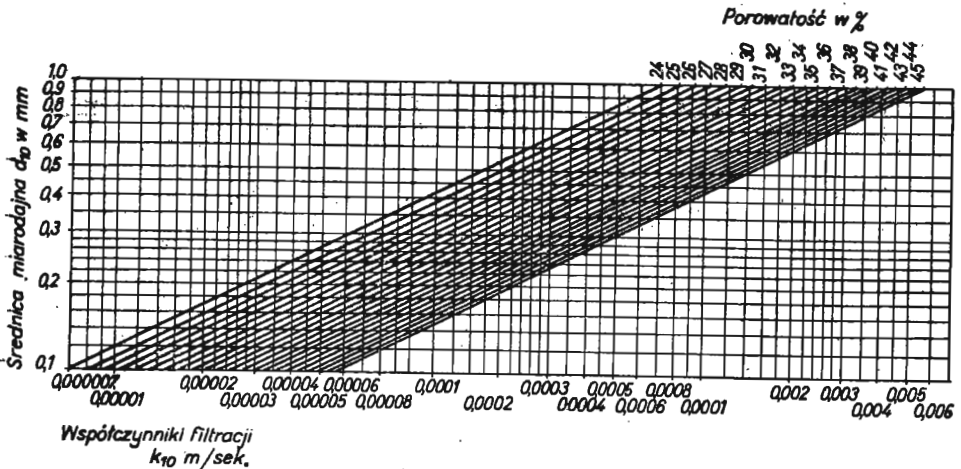


Fig. 4. Nomogram do wzoru Slichtera
Nomogram to the Slichter's formula

Wzór ten w porównaniu z wzorem Slichtera daje wartości nieco większe, wahaają się one w większych granicach. Uwzględnia on również nieco większą średnicę efektywną (d_{17}) niż wzór Hazena czy Slichtera (d_{10}). W porównaniu z wynikami uzyskanymi przy pomocy innych wzorów daje on, podobnie jak wzór Slichtera, zaniżone wartości:

D. Wzór Seelheima

$$k_{10} = 325 d_{50}^2$$

gdzie k_{10} — współczynnik filtracji dla wody o temp. $+10^{\circ}\text{C}$ w m/dobę;

d_{50} — przeciętna średnica w mm;

325 — stała empiryczna;

Wzór ten jest prosty w porównaniu z dotychczas przytoczonymi i uwzględnia już nie średnicę efektywną (d_{10} lub d_{17}), a przeciętną (d_{50}). Współczynniki filtracji określone tym wzorem wahały się od 0,00005 do 0,00043 m/sek. Średnia wartość 0,00022 m/sek była prawie taka sama jak we wzorze Hazena. A więc współczynniki obliczone przy pomocy wzoru Seelheima mają również duże wartości.

E. Wzór Krügera

$$k_{10} = 322 \frac{n}{(1-n)^2} d_q^2$$

gdzie k_{10} — współczynnik filtracji w m/dobę;

n — porowatość w częściach. jednostki;

d_q — średnica efektywna w mm;

$$d_q = \frac{100}{N \sum_1 \frac{g_i}{\delta_i}}$$

N — ilość frakcji według analizy;

g_i — procentowa zawartość danej frakcji;

δ_i — przeciętna średnica danej frakcji w mm.

Wzór jest dość skomplikowany, co znacznie utrudnia obliczanie współczynników filtracji. Z uwagi na fakt, że wzór ten uwzględnia bardzo ważny parametr jakim jest sumaryczna powierzchnia ziarn (a więc rozmiar wszystkich ziarn) daje on dość dobre wyniki. Współczynniki filtracji dla różnych próbek wahały się od 0,00004 do 0,00031 m/sek. Przeciętny współczynnik wyniósł 0,00016 m/sek, a więc był bliski współczynnikom uzyskanym na permeametrach, jak i wynikom uzyskanym na przyrządzie modelowym.

UWAGI KOŃCOWE

Piaski wydmy w rejonie Warszawy składają się przeważnie z ziarn drobnych, niekiedy z domieszką średnich lub pylastych. Porowatość orientacyjna tych piasków wynosi przeciętnie około 30%, a maksymalnie dochodzi do 40%. Współczynnik niejednorodności uziarnienia waha się w dość dużych, jak na utwór eoliczny, granicach — od 1,61 do 3,63.

Przepuszczalność tych piasków określona była jedynie metodami laboratoryjnymi i empirycznymi. Uzyskane wyniki dla poszczególnych prób wahały się w bardzo dużych granicach — od poniżej 0,00001 do 0,00048 m/sek. Za najbardziej miarodajne należy uznać współczynniki filtracji wyznaczone na przyrządzie modelowym, które średnio wynoszą 0,00019 m/sek, czyli 16 m/dobę. W przyrządzie modelowym piaski wydmy znajdowały się w warunkach zbliżonych do warunków terenowych. Współczynnik uzyskany na modelu jest bardzo bliski współczynnikom filtracji piasków wydmych z Holandii, badanych przez J. M. K. Penninka. Współczynniki uzyskane na permeametrach dały nieco mniejsze wyniki niż uzyskano na modelu, tj. 0,00012 m/sek. Jest to średni wynik z badań na dwu różnych aparatach.

Należy podkreślić, że niższe wartości daje aparat Wiluna, co tłumaczyć należy większym stopniem ubicia próbki niż w rurce Kamieńskiego.

Średnie wartości współczynników uzyskane przy pomocy wzorów empirycznych przedstawia poniższe zestawienie:

według wzoru Hazena	$k_{10} = 0,00021$ m/sek
według wzoru Slichtera	$k_{10} = 0,00003$ m/sek
według wzoru Zauerbreja	$k_{10} = 0,00006$ m/sek
według wzoru Seelheima	$k_{10} = 0,00022$ m/sek
według wzoru Krügera	$k_{10} = 0,00016$ m/sek

Wartości uzyskane przy pomocy poszczególnych wzorów różnią się od siebie, niektóre nawet bardzo znacznie (wzory Seelheima i Slichtera). Najbardziej zbliżone do współczynników uzyskanych laboratoryjnie są współczynniki filtracji obliczone według wzorów: Hazena, Seelheima i Krügera. Wydaje się, że te ostatnie najlepiej charakteryzują przepuszczalność „terenową” piasków wydmyowych. Natomiast wzory Slichtera i Zauerbreja raczej nie nadają się do obliczania współczynników filtracji dla piasków wydmyowych. Jako najbardziej odpowiedni wzór do obliczania wodoprzepuszczalności piasków wydmyowych wydaje się być wzór Krügera. Należy podkreślić, że jest on dość skomplikowany w użyciu, co w pewnym stopniu zmniejsza jego zalety.

Autor obliczył również współczynniki filtracji wyłącznie na podstawie krzywej uziarnienia, wykorzystując „charakterystyczną” średnicę ziarna badanych piasków wydmyowych. Za najbardziej „charakterystyczną” średnicę dla piasków wydmyowych rejonu Warszawy uznano d_{20} .

Przykład obliczania współczynnika filtracji na podstawie krzywej uziarnienia:

$$k_{10} = 0,001 \cdot d_{20} \text{ m/sek}$$

$$d_{20} = 0,06 \text{ mm (z krzywej uziarnienia)}$$

$$k_{10} = 0,001 \cdot 0,06 \text{ m/sek}$$

$$k_{10} = 0,00006 \text{ m/sek}$$

W ten sposób obliczony średni współczynnik filtracji dla badanych piasków wyniósł 0,00016 m/sek.

WNIOSKI

Stwierdza się, że:

1. Piaski wydmyowe rejonu Warszawy są prawie wyłącznie drobnoziarniste; daje się jednak zauważyć pewną zmienność w uziarnieniu, co ma znaczny wpływ na przepuszczalność.

2. Współczynniki filtracji piasków wydmyowych z tego rejonu mogą wahać się w pewnych granicach, a mianowicie od 0,00001 do 0,00030 m/sek; średnio wynoszą około 0,00020 m/sek.

3. Przy empirycznym określeniu współczynników należy posługiwać się wzorem Krügera lub formułą opracowaną przez autora: $k_{10} = 0,001 d_{20}$ m/sek.

4. Spośród metod laboratoryjnych dobre wyniki daje rurka Kamińskiego.

Zakład Hydrogeologii I.G.

Nadesłano dnia 10 października 1962 r.

PIŚMIENNICTWO

- BOGOMOŁOW W. G. (1955) — Podstawy hydrogeologii. Wyd. Geol. Warszawa.
 CZETWERTYNSKI E. (1958) — Hydraulika i Hydromechanika. Warszawa.
 ГАРМОНОВ И. В., ЛЕБЕДЕВ А. В. (1952) — Задачи по динамике подземных вод. Москва.

- KRYGOWSKI B. (1956) — Z badań granulometrycznych nad utworami plejstoceńskimi w Polsce zachodniej. *Biul. Inst. Geol.*, **100**, p. 503—608. Warszawa.
- LENCEWICZ S. (1922) — *Wydmy śródlądowe Polski*. Warszawa.
- LEWIŃSKI J., ŁUNIEWSKI A., MAŁKOWSKI S., SAMSONOWICZ J. (1927) — *Przewodnik geologiczny po Warszawie i okolicy*. Warszawa.
- MACHER J. (1954) — Szybkie wyznaczenie współczynnika przepuszczalności gruntu. *Prz. geol.*, nr 5, p. 195—196. Warszawa.
- PRINZ E. (1919) — *Handbuch der Hydrologie*. Berlin.
- СКАВАЛЛАНОВИЧ И. А. (1960) — *Гидрогеологические расчеты*. Москва.
- TUREK S. (1960) — Badania hydrogeologiczne. *Pr. Inst. Geol.*, **30**, p. 375—380. Warszawa.
- WIĘJUN Z. (1948) — *Gruntoznawstwo drogowe*. Warszawa.

Януш МАХЕР

РАЗЛИЧИЯ В КОЭФФИЦИЕНТАХ ФИЛЬТРАЦИИ, ОПРЕДЕЛЯЕМЫХ РАЗНЫМИ МЕТОДАМИ, НА ПРИМЕРЕ ДЮННЫХ ПЕСКОВ РАЙОНА ВАРШАВЫ

Резюме

Коэффициент фильтрации, этот необходимый параметр при любых инженерных работах при наличии подземных вод, вычисляется различными (полевыми, лабораторными, эмпирическими) методами. Наиболее дешевыми, следовательно и относительно малоточными, являются коэффициенты определенные эмпирически с помощью формул выведенных разными авторами, в частности Газеном, Сээльгейном, Заурбрейном, Крюгером и др. Вычисленные таким образом коэффициенты могут применяться только лишь на предварительных этапах исследовательских работ или в виде дополнительных коэффициентов. Значения коэффициентов фильтрации определенных для одной и той же пробы песка с помощью разных формул, как правило, отличаются друг от друга. В гидрогеологической практике часто относительно произвольно применяются эмпирические формулы того или другого автора, не обращая внимания, для каких песков эта формула была выведена. Геологическим институтом, имея ввиду некоторое уточнение эмпирических коэффициентов фильтрации, ведутся исследовательские работы над установлением различий, получаемых для одной и той же пробы по наиболее известным формулам. В дальнейшем работы приведут к установлению, которая формула наиболее подходяща для данного типа песков, распространенных в Польше. Темой настоящей работы являются результаты исследований дюнных песков, отобранных в 12 местах в районе Варшавы. Это почти исключительно мелкозернистые, иногда слегка пылевидные пески. Коэффициент неоднородности (μ) колебался в довольно больших, как на золотые образования, пределах — от 1,6 до 3,6. Средний диаметр зерен (d_{50}) колебался в пределах от 0,11 до 0,34 мм. Эмпирические коэффициенты фильтрации k_{10} этих песков (0,00001 — 0,00048 м/сек), вычисленные с помощью вышеупомянутых формул сравнивались с коэффициентами (0,00002 — 0,00023 м/сек), определенными с помощью приборов называемых пермеаметрами (типа Вилуна и Каменьского — трубка), а также с помощью специально изготовленной модели (0,00019 м/сек). Наиболее близкие средние

значения для лабораторных коэффициентов получены по формуле Крюгера (0,00016 м/сек), в то время как по остальным рассматриваемым формулам получены заниженные (по Слихтеру — в 5 раз, по Зауэрбрею — почти в 3 раза) или завышенные (по Газену и Сээльгейму — почти в 1,5 раза) величины. Результаты выполненных работ позволили также составить простую формулу для определения коэффициента фильтрации дюнных песков района Варшавы, а именно:

$$k = 0,001 \cdot d_{20} \text{ м/сек}$$

где d_{20} — эффективный диаметр зерна в мм.

Коэффициент вычисленный с помощью этой формулы равен в среднем 0,00016 м/сек, следовательно столько, что и по формуле Крюгера.

Для рассматриваемого типа образований рекомендуется при вычислении эмпирических коэффициентов фильтрации пользоваться формулой Крюгера или приведенной выше.

Janusz MACHER

DIFFERENCES IN THE FILTRATION COEFFICIENTS COMPUTED BY MEANS OF VARIOUS METHODS, EXEMPLIFIED ON DUNE SANDS FROM THE WARSAW REGION

S u m m a r y

The filtration coefficient as an indispensable parameter in all engineering works dealing with the underground waters is calculated by means of various methods (field, laboratory and empirical methods). Least expensive, but relatively inaccurate are coefficients established empirically by means of formulae prepared by various authors, viz: Hazen, Slichter, Seelheim, Sauerbrey, Krüger and others. The coefficients established in that way may only be used in the preliminary stages of investigatory works, or as a supplementary ones. As a rule, the values of the filtration coefficients determined for only one sand sample by means of various formulae, differ from each other. In the hydrogeological practice, it is customary to apply fairly arbitrarily formulae of this or other authors, usually without taking into account the kind of sand that been used to compute the formula given.

In order to define more accurately the empirical filtration coefficients, the Geological Institute conducts the study on determination of differences when applying the most common formulae for the same rock sample. Determination of the formula that is most suitable for a given type of sands occurring in Poland, is the next purpose of study in question.

The purpose of present analysis is to discuss the results of study made on dune sands from 12 localities of the region of Warsaw. Almost exclusively, these sands are finegrained, sometimes slightly dusty, too. Index of heterogeneity of grain size (U) ranges — uncommonly as for such an aeolian product — in fairly great limits, i.e. from 1,6 to 3,6. The average grain diameter (d_{50}) varies from 0.11 to 0.34 mm. The empirical filtration coefficients k_{10} of these sands (0.00001 — 0.00048 m/sec) determined by means of the five formulae mentioned above, were compared with those (0.00002 — 0.00023 m/sec) established by means of apparatuses

called "permeameters" (pipe-like type, Kamiński), and in an especially constructed model (0.00019 m/sec), too. The values being the closest ones to the laboratory average coefficients (0.00012 m/sec) were obtained by means of the Krüger's formula (0.00016 m/sec), whereas the other formulae previously tested yielded results either too low (Slichter — fivefold, Sauerbrey — close to threefold) or too high (Hazen, Seelheim — almost one and a half times). The study allowed to establish a simple formula for determining the filtration coefficients of dune sands from the Warsaw region, as follows:

$$k_{10} = 0.001 d_{20} \text{ m/sec.}$$

where d_{20} means the actual size of grain in mm.

The coefficient computed using this formula averaged 0.00016 m/sec, thus, it has same value as obtained by means of the Krüger's formula.

When testing the types of formations discussed in this paper, the author recommends, with a view to obtain the empirical filtration coefficients, to use the Krüger's formula or the formula given above.