

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

otworów obserwacyjnych, pierwszego w nieznaczonej odległości od studni, drugiego w znacznie większej, w granicach jednak jeszcze zasięgu depresji.

Poziome zwierciadło wody zakłada jednak istnienie zbiornika z wodą stojącą i wyczerpywanie wody z tego zbiornika przez zwiększanie rozmiarów leja depresyjnego. Wyznaczenie współczynnika  $k$  musi się oprzeć zatem na równoczesnym pomiarze wszystkich depresyj, oraz chwilowego wydatku pompowania. Wypadek rzeczywiście poziomego zwierciadła wody zdarzy się w praktyce tylko wyjątkowo i to najczęściej tylko wtedy, gdy pompowanie ma obniżyć poziom wody gruntowej dla założenia fundamentów. Przy pracach wodociagowych, oraz w większości prac, związanych z posadowieniem fundamentów mamy do czynienia nie z poziomem, lecz pochyłym zwierciadłem wody, leżącym zatem w spadku.

Zgodnie z zasadami podanymi w poprzednim rozdziale przyjmujemy te same wzory, normujące zależność między depresją a wydatkiem, licząc jednak depresję nie od poziomego lecz od pochyłonego zwierciadła wody. Wobec tego jednak, że woda w gruncie jest w ruchu, na kierunkach wypadkowych z kierunku pierwotnego przed budową studni oraz kierunku koncentrycznego ku studni, dla wyznaczania współczynnika  $k$  może być miarodajnym pomiar depresji tylko w przekroju prostopadłym do kierunku ruchu, gdzie zatem zwierciadło wody leży w poziomie i gdzie składowa prędkości, wynikająca ze spadku zwierciadła wody, jest w kierunku studni równą zeru.

Takie ułożenie otworów obserwacyjnych w stosunku do studni, z której jest pompowana woda, wymaga uprzedniej znajomości kierunku spadku zwierciadła wody metodą podaną przez Thiem'a, zamieszczoną w rodz. III.

Dla wody artezyjskiej metoda pozostaje ta sama, zmienia się tylko wzór, w który znalezione wartości muszą być wstawione, na:

$$z_2 - z_1 = \frac{Q}{2ka} \ln \frac{x_2}{x_1}$$

gdzie  $a$  jest grubością warstwy wodonośnej.

#### a) Metoda Forchheimer'a-Rosłóńskiego.

Jeśli studnia jest zapuszczona do warstwy wodonośnej i spoczywa krawędziami wieńca na tej warstwie, podczas gdy cała studnia tkwi w warstwie nieprzepuszczalnej, o ile średnica studni

jest dostatecznie duża, aby po przerwaniu pompowania przez pewien dłuższy czas mogła przyjąć całą dopływającą z warstwy przepuszczalnej wodę, to do wyznaczenia współczynnika  $k$  można użyć wzoru Forcheimer'a zrewidowanego odpowiednio przez R. Rosłońskiego i zastosowanego do użytku, a podanego na str. 255—258 jego publikacji \*).

Depresja w studni o płaszczu nieprzepuszczalnym, o ile skutkiem bagrowania nie zmieniono zbytnio właściwości otaczającego terenu, da się przedstawić wzorem:

$$s = H - h_0 = \frac{Q}{4kr}$$

gdzie  $H - h_0$  jest depresją w studni,  $Q$  ilością pompowanej wody,  $k$  współczynnikiem przepuszczalności, a  $r$  promieniem studni.

Przy raptownem wstrzymaniu krótkotrwałego pompowania całą ilość wody naporowej chwyta li tylko studnia, zatem w czasie  $dt$  ilość:

$$Qdt = \pi r^2 h_0$$

stąd po wstawieniu wartości  $Q$  z równania poprzedniego otrzymujemy (wzór Forcheimer'a):

$$dt = \frac{\pi r}{4k} \frac{dh_0}{H - h_0}$$

Z ostatniego równania otrzymujemy po scałkowaniu i przy założeniu, że czasowi  $t_1$  odpowiada depresja  $H - h_2$ , a czasowi  $t_2$  depresja  $H - h_1$ , przyczem  $H - h_2 > H - h_1$  (jak to się dzieje przy wznoszeniu się zwierciadła wody w studni):

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = \frac{\pi r}{4k} \int_{H-h_2}^{H-h_1} \frac{dh_0}{H - h_0} \quad \text{czyli:} \quad t_2 - t_1 = \frac{\pi r}{4k} \ln \frac{H - h_2}{H - h_1}$$

$$\text{lub:} \quad k = \frac{\pi r}{4(t_2 - t_1)} \ln \frac{H - h_2}{H - h_1} \quad (148)$$

Przyjmując za początek liczenia czasu chwilę zaprzestania pompowania, czyli kładąc  $t_1 = 0$  i pisząc zamiast  $t_2$  zmienną  $t$ , a za-

\*) Rosłoński<sup>16)</sup>.

miast  $H - h_2 = S$ , oraz zamiast  $H - h_1 = s$  i przechodząc na logarytmy dziesiętne otrzymujemy:

$$t = \frac{\pi r}{4k} 2,3021 \log \frac{S}{s} \quad (149)$$

a kładąc: 
$$\frac{\pi r}{4k} 2,3021 = 60 C \quad (149a)$$

otrzymujemy wzór:

$$t = C \log \frac{S}{s} \quad (149b)$$

(gdzie czas  $t$  w minutach)

określający prawo wznoszenia się wody w studni, przyczem  $C$  jest stałą z obserwacji, dającą się obliczyć przez wyrównanie spostrzeżeń,  $S$  końcową depresją słupa wody tuż przed zaprzestaniem pompowania,  $s$  depresją, odpowiadającą czasowi  $t$ , liczoną od nieobniżonego zwierciadła wody.

Jest to wzór podobny do tego, jaki znalazł doświadczalnie Slichter<sup>54)</sup> dla głębokich studzieni t. zw. kalifornijskich:

$$t = \frac{17,25 A}{c} \log \frac{H}{h} \quad (150)$$

Wzór (149b) wskazuje na prostolinijny związek między  $t$  a  $\log \frac{S}{s}$ , tak długo jednak, dopóki jak to wynika z założenia, cała ilość napływającej wody gromadzi się li tylko w studni, nie zaś poza nią w lejku depresyjnym.

Jeżeli zwierciadło wody skutkiem dłuższego pompowania zostało w otoczeniu studni obniżone poniżej warstwy nieprzepuszczalnej, to związek  $t = C \log \frac{S}{s}$  nie pozostaje prostolinijny, krzywa wznoszenia się wody (w funkcji czasu) pocznie wtedy przebiegać niemal stycznie do nieobniżonego poziomu wody, od którego liczymy depresję  $S$  i  $s$ , a zależność między  $t$  a  $\log \frac{S}{s}$  przedstawi się jako parabola, której gałęź, zrazu prosta poczyną się odginać ku górze. Stąd wynika, że przyjęcie poziomu wody zbyt wysokiego w stosunku do tego, jaki faktycznie w otoczeniu studni istnieje,

daje z wykresu parabolę, nie zaś prostą, podobnie jak i przyjęcie poziomu zbyt niskiego. W tym ostatnim przypadku otrzymamy parabolę odgiętą ku dołowi. Oba przypadki można łatwo sprawdzić prostym rachunkiem. Mając powyższe w pamięci, wyznaczenie współczynnika  $k$  nie przedstawi pozatem żadnych trudności, nie wymaga żadnych robót przygotowawczych, żadnych otworów wiertniczych, a ogranicza się jedynie do obserwacji wznoszenia się wody w studni, które można łatwo pomierzyć.

Prawo wznoszenia się wody, wyrażone równaniem  $t = C \log \frac{S}{s}$ , sprawdzono po kolei we wszystkich studniach ujęcia w Przemyśle.

Jako przykład niech posłuży następująca tabela, zawierająca wyniki obserwacji ze studni Nr. 3, stanowiąca uzupełnienie rys. 153.

STUDNIA Nr. 3. TABELA 16.

Obliczenie  $C_3$  z pompowania dnia 23.IX.1919 r.;  $S = 196,30 - 189,85 = 6,45$  m.

L.	Czas $t$ minut w $m$	Depresja w $m$	$\frac{S}{s}$	$\log \frac{S}{s}$	$t \log \frac{S}{s}$	$\left(\log \frac{S}{s}\right)^2$
1	2	5,97	1,080	0,0 335 854	0,0 671 708	0,0 011 280
2	4	5,50	1,172	0,0 691 970	0,2 767 880	0,0 047 882
3	6	5,03	1,282	0,1 079 917	0,6 479 502	0,0 116 622
4	8	4,58	1,408	0,1 486 942	1,1 895 536	0,0 221 099
5	10	4,16	1,550	0,1 904 664	1,9 046 664	0,0 362 775
6	12	3,76	1,715	0,2 343 719	2,8 124 628	0,0 478 422
7	14	3,41	1,891	0,2 768 053	3,8 752 742	0,0 766 212
8	16	3,09	2,087	0,3 196 012	5,1 136 192	0,1 021 450
9	20	2,54	2,539	0,4 047 260	8,0 945 200	0,1 638 032
10	25	1,99	3,241	0,5 107 066	12,7 676 653	0,2 608 212
11	30	1,57	4,108	0,6 136 600	18,4 098 000	0,3 765 785
12	39	1,01	6,386	0,8 052 383	31,4 042 937	0,6 484 086
13	50	0,63	10,238	1,0 102 192	50,5 109 600	1,0 205 430
14	60	0,40	16,125	1,2 074 997	72,4 499 820	1,4 580 547
					$\Sigma \left( t \log \frac{S}{s} \right) = 208,8 105 062$	$\Sigma \left( \log \frac{S}{s} \right)^2 = 4,2 307 834$

Jeżeli w odniesieniu do prostokątnego układu współrzędnych odetniemy na osi  $x$ -ów w podziałce logarytmicznej wartości  $\frac{S}{s}$ , na osi  $y$ -ów w podziałce zwykłej czas  $t$ , otrzymujemy szereg punktów, leżących

bezsprzecznie na jednej prostej (rys. 153), potwierdzającej związek:

$$t = C_3 \log \frac{S}{s}$$

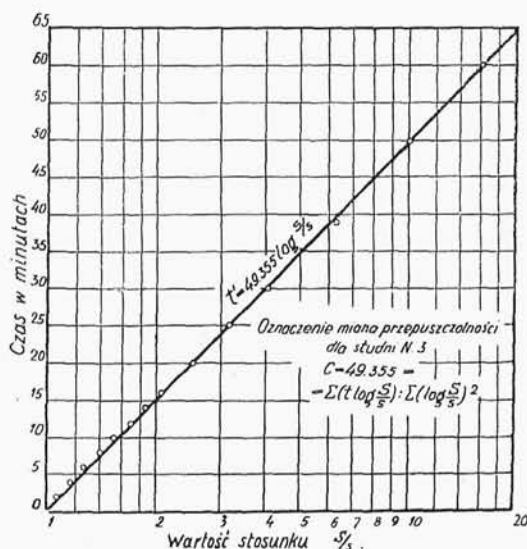
Postępując w myśl rachunku wyrównawczego, otrzymujemy z powyższego równania:

$$\sum (t) = C_3 \sum \left( \log \frac{S}{s} \right)$$

$$\sum \left( t \log \frac{S}{s} \right) = C_3 \sum \left( \log \frac{S}{s} \right)^2$$

a stąd:

$$C_3 = \frac{\sum \left( t \log \frac{S}{s} \right)}{\sum \left( \log \frac{S}{s} \right)^2}$$



Rys. 153.

Oznaczenie miana przepuszczalności studni.

Ponieważ z poprzedzającej tabelki jest  $\sum \left( t \log \frac{S}{s} \right) = 208,810$ , zaś  $\sum \left( \log \frac{S}{s} \right)^2 = 4,230$ , przeto  $C_3 = 49,355$ .

Z wartości  $C$  łatwo obliczyć wartość  $k$ , pamiętając, że  $2,302 \frac{\pi r}{4k} = 60C$ , ponieważ czas obserwowano w minutach nie w sekundach, w przeciwieństwie do wartości  $k$  liczonych zazwyczaj w systemie metr-sekunda. Dla studzien pralkowickich, gdzie promień studni  $r = 1,00$  jest:

$$k = \frac{0,031\,333}{C} \cong \frac{0,03}{C}$$

zatem dla studni 3-ej współczynnik przepuszczalności  $k_3 = 0,000\,608$ . Podobnie obserwowane i obliczone wartości dla reszty studzien w Przemysłu, zestawione poniżej, dają następujący obraz zmiennej przepuszczalności złoża dyluwjalnego:

$C_2 = 44,074$	$k_2 = 0,000\,682$
$C_3 = 49,355$	$k_3 = 0,000\,608$
$C_4 = 24,540$	$k_4 = 0,001\,224$
$C_5 = 26,116$	$k_5 = 0,001\,149$
$C_6 = 35,848$	$k_6 = 0,000\,838$
$C_6 = 34,226$	$k_6 = 0,000\,874$
$C_7 = 62,076$	$k_7 = 0,000\,484$
$C_8 = 85,173$	$k_8 = 0,000\,350$

Przykład drugi: Studnia II w Ozimieniu, wodociąg Polminu, pomiar R. Rosłowski<sup>16)</sup> z 30.X.1924 r. Średnica studni 1,30 m. Pomiar ustalonego wydatku dla różnych depresyj dał wyniki następujące:  $s = 1,10\,m$ ,  $Q = 4,55\,l/sec$ ,  $s = 0,985\,m$ ,  $Q = 4,38\,l/sec$ ,  $s = 2,09\,m$ ,  $Q = 6,31\,l/sec$ . Cecha wydatku studni dla  $s = 1$  jest  $3,25\,l/sec$  na metr depresji.

Dnia 31.X.1925 zwierciadło wody w studni leżało na  $4,51\,m$  poniżej krawędzi cembrzyny. Przez pompowanie osiągnięto depresję  $2,80\,m$  i w dwuminutowych odstępach czasu mierzono od krawędzi cembrzyny poziom podnoszącej się wody (Rys. 154). W poniższym zestawieniu podano: czas w minutach, depresję  $s$  mierzoną od cembrzyny, depresję mierzoną od pierwotnego poziomu wody zatem pomniejszoną o  $4,51\,m$  w końcu logarytm stosunku  $S:s$ , dla  $S = 2,80\,m$ .

TABELA 17.

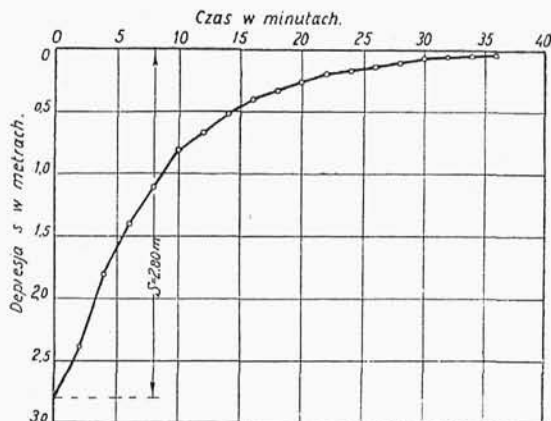
czas w minutach	depresja od cembrzyny	depresja od zw. wody	log. stosunku $S:s$ .
2	6,90	2,39	0,06 819
4	6,315	1,805	0,19 068
6	5,910	1,400	0,30 103
8	5,615	1,105	0,40 380
10	5,315	0,805	0,54 136
12	5,180	0,670	0,62 108
14	5,030	0,520	0,73 959
16	4,91	0,40	0,84 510
18	4,84	0,33	0,92 864
20	4,77	0,26	1,02 718
22	4,71	0,20	1,14 613
24	4,68	0,17	1,21 671
26	4,65	0,14	1,30 103
28	4,615	0,105	1,42 597
30	4,58	0,07	1,60 206
32	4,565	0,055	1,70 680
34	4,56	0,05	1,74 819
36	4,55	0,04	1,84 510

Wykreślając na osi rzędnych czas w minutach, a na odciętych logarytmy stosunku  $S:s$ , odczytamy przy  $\log S:s = 1,0$  wartość stałej  $C = 19,44$  dla równania prostej  $t = C \log(S:s) = 19,44 \log(S:s)$  (rys 155).

Ze wzoru:  $\frac{\pi r}{4k} 2,302 = 60 C$  obliczymy wartość współczynnika przepuszczalności  $k$ :

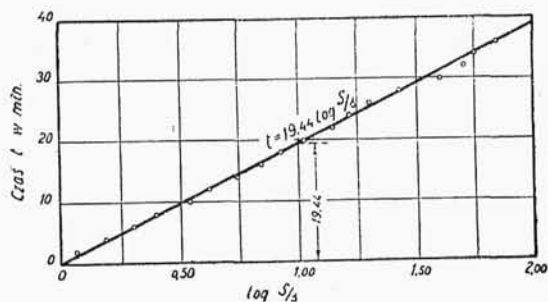
$$k = \frac{2,302 \times 3,14 \times 0,65}{4 \times 60 \times 19,44} = 0,001$$

a stąd cechę wydatku terenu:  $e:k = 0,00325:0,001 = 3,25$ .



Rys. 154.

Zależność między czasem pompowania i wielkością depresji dla studni w Ozimieniu.



Rys. 155.

Oznaczenie miana przepuszczalności  $C$  dla studni w Ozimieniu.

Zaznaczyć należy, że powyższa bardzo prosta metoda daje wyniki ściśle tylko pod warunkiem spełnienia założeń, dla których

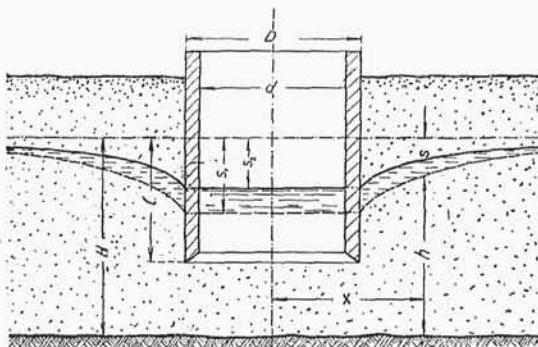


wzory zostały ustawione, a zatem, że studnia ma płaszcz nieprzepuszczalny, sięgający warstwy wodonośnej, oraz że cały dopływ wody po zaprzestaniu pompowania mieści się tylko w studni, która wobec tego musi mieć odpowiednio dużą średnicę.

b) Obliczenie współczynnika  $k$  z czasu wypełniania się lejka depresyjnego.

Określenie współczynnika przepuszczalności  $k$  może być dokonane przy pomocy podanych na str. 223 zależności, przez obserwację czasu zapełniania się stożka depresyjnego, po zatrzymaniu pompowania wody ze studni.

Przy studni szerokiej i płytkiej (rys. 156) zwierciadło wody już w niewielkiej odległości ułoży się stosownie do równania (97).



Rys. 156.

Po osiągnięciu stanu ustalonego, stosownie do oznaczeń na rys. 156 otrzymamy (dla  $l$  zagłębienia studni niżej zw. wody oraz  $s$  depresji):

$$H - h = s = \frac{Q}{2\pi k \sqrt{x^2 + (l-s)^2}} \quad (151)$$

stąd: 
$$x^2 + (l-s)^2 = \frac{Q^2}{4\pi^2 k^2 s^2} \quad (152)$$

ponieważ całkowita objętość stożka depresyjnego jest  $\int \pi x^2 ds$  więc wobec (152) będzie:

$$\int \left[ \frac{Q^2}{4\pi k^2 s^2} - \pi(l-s)^2 \right] ds = -\frac{Q^2}{4\pi k^2 s^2} + \frac{\pi}{3}(l-s)^3 + Const \quad (153)$$

Po nagłym zatrzymaniu pompowania wody, stożek zapełnia się w ten sposób, że początkowo pod wpływem istniejącego spad-

ku do studni dopływa pierwotna ilość wody. Jeśli więc w czasie  $t_1$  i  $t_2$  stan wody w studni stoi o  $s_1$  i  $s_2$  niżej pierwotnego poziomu wody, zaś  $D$  i  $d$  oznaczają średnicę zewnętrzną i wewnętrzną studni, a  $p$  porowatość przestrzenną, to ponieważ jednocześnie zapełniać się będzie przestrzeń w obrębie płaszcza studni, otrzymamy zależność:

$$Q(t_2 - t_1) = \frac{p Q^2}{4 \pi k^2} \left( \frac{1}{s_2} - \frac{1}{s_1} \right) - \frac{p \pi}{3} \left[ -s_2^3 - (l - s_1)^3 \right] + \\ + \frac{\pi}{4} (d^2 - p D^2) (s_1 - s_2) \quad (154)$$

stąd bez trudności obliczymy wartość współczynnika  $k$ .

Wzory na zapełnienie się lejów depresyjnego podaje również Weber<sup>55)</sup>.

Porchet<sup>42, 43)</sup> wyznaczył współczynnik przepuszczalności terenu na podstawie znanego wydatku studni  $Q$  przy depresji  $s$  z równania:

$$k = \frac{3 Q}{H_1^2 - h_1^2}, \text{ gdzie } H_1 = H + \frac{A}{O}, h_1 = h_0 + \frac{A}{O},$$

$H$  jest wysokością warstwy wodonośnej w czasie spoczynku,  $h_0$  w czasie pompowania,  $A$  polem przekroju studni,  $O$  obwodem płaszcza.

Dla studni kołowej o średnicy  $2r$  będzie:  $\frac{A}{O} = \frac{r}{2}$  Wstawiając

wartości otrzymamy równanie na  $k$ :

$$k = \frac{3 Q}{(H - h_0) (H + h_0 + r)} \quad (155)$$

Współczynnik przepuszczalności  $k$  można też obliczyć z pomierzonego, zapomocą najmniej dwu otworów, spadku zwierciadła wody  $i_1$  oraz  $i_2$  przy dwu ustalonych depresjach, dla dwu pompowanych ilości wody:  $Q_1$  i  $Q_2$ .

Otrzymamy mianowicie:

$$Q_1 = 2 \pi k z_1 \times i_1 \text{ oraz: } Q_2 = 2 \pi k z_2 \times i_2$$

stąd:

$$k = \left( \frac{Q_1}{i_1} - \frac{Q_2}{i_2} \right) : 2 \pi x (z_1 - z_2) \quad (156)$$

Granice praktyczne współczynnika przepuszczalności podaje Sichardt: od 0,0001 m/sek dla bardzo miążkich piasków wyd-

nowych, gdzie przepuszczalność jest już znikoma, do 0,01 m/sek dla grubych żwirów o bardzo równomiernem ziarnie.

Dla materiałów bardzo miążkich, o ziarnie miarodajnem 0,0003 do 0,012 mm, lecz przy równoczesnej dużej porowatości 45% i temperaturze 10°C, doświadczenia w Cobble Mountain wykazały prędkość przesiekania w metrach na dobę równą prawie dokładnie:  $150 d^2 i$  gdzie  $d$  jest średnicą w mm,  $i$  spadem jednostkowym.

Pomiary wodociągów lwowskich dla nowych studni terenu Kamieniobrodzkiego w dolinie Wereszycy wykazują współczynnik przepuszczalności 0,003, a w terenie Budzyńskim 0,0037. Woda gruntowa płynie tu przeważnie bardzo przepuszczalną warstwą jajczaków litotamniowych. Tak wysoki i wyższy współczynnik przepuszczalności wykazują tylko czyste żwiry dyluwjalne jak np. żwiry w lewobrzeżnym tarasie rzeki Stryja pod Stryjem, gdzie współczynnik dochodzi do 0,005 i 0,007. Przemulone żwiry dyluwjalne i alluwjalne w Karpatach wykazują z reguły znacznie mniejsze przepuszczalności. Podług pomiarów dla studjów wodociągowych, znaleziono współczynniki następujące:

1. Świniarsko, Dunajec, Nowy		
Sącz . . . . .	0,000 500 i więcej	m/sek
2. Kostrze, prawy brzeg Wisły	0,000 650 do 0,000 850	"
3. Warta, Poznań . . . . .	0,000 670	"
4. Bielany, Wisła, Kraków. .	0,000 812 do 0,000 850	"
5. Świerczków, Dunajec-Biała,		
Tarnów, średnio . . . .	0,000 750	"
6. Prałkowce, San, Przemyśl .	0,000 350 do 0,001 220	"
7. Czerniowce, Prut . . . . .	0,000 720 do 0,009 980	"
8. Uróż Bystrzyca (Drohobycz)	0,00 128	"
9. Gdynia, Cisowa . . . . .	0,0 016 do 0,00 043	"
10. Karaczynów, Budzyń (Lwów)	0,003 do 0,0 037	"
11. Duliby, Stryj . . . . .	0,0 050 do 0,0 070	"
12. Chełm spękana opoka . .	0,0033	"