

Niektóre nieprawidłowości w obliczeniach czasu przesączania wody podziemnej przez pakiet warstw w strefie saturacji

Janusz Haurylkiewicz*



Some common errors in calculations of the time of vertical seepage through a pack of homogeneous layers in the saturated zone. Prz. Geol., 53: 668–672.

Summary. *egal permits concerning water usage often contain improperly calculated time of vertical seepage through a pack of homogeneous layers in the saturated zone.. Usually the following mistakes against the rules of hydraulics are made: (1) it is assumed that hydraulic gradient in each layer of the package is equal to the gradient corresponding to the package as a whole; (2) the formula used is wrong because it is based on inadequate assumption, (3) the formula is right but is not used in correct way, (4) time duration of flow through the layer of high permeability is neglected, (5) too high value of the active porosity is assumed. An example is shown comparing the incorrect calculations with the ones consistent with the hydraulics laws. Some of the above mistakes result in significant underestimation of the seepage time (up to 60 % in the example used), some others overestimate the time, hence they affect the correctness of implementation of Polish Water Law concerning protection zones of water intakes and lead to improper administrative decisions.*

Key words: vertical seepage time, saturated zone

W operatach wodnoprawnych, dokumentacjach hydrogeologicznych, aneksach, ekspertyzach itp., w związku z zagadnieniem potrzeby ustanawiania terenu ochrony pośredniej ujęcia wody podziemnej, spotyka się obliczenia czasu przepływu wody przez warstwowy nakład w strefie saturacji według ryc. 1 (Haurylkiewicz, 2002). W niektórych opracowaniach obliczenia te są niezgodne z zasadami hydrauliki lub warunkami środowiskowymi. Celem niniejszej pracy jest zwrócenie uwagi na trzy rodzaje błędów obliczeń.

Błąd pierwszego rodzaju występuje w kilku postaciach: jawne założenie jednakowego spadku, nieświadome posłużenie się błędnym wzorem z literatury, błędne posłużenie się wzorem poprawnym. Błędy te polegają na tym, że autorzy obliczają czas przepływu wody, niezależnie dla każdej warstwy i przy tym samym spadku hydraulicznym, obliczanym jako:

$$i = \frac{H}{h_1 + h_2 + h_3 + h_4}, \quad [1]$$

a następnie te czasy sumują, albo też każdej warstwie przyporządkowują tę samą różnicę poziomów H . Nie zwracają przy tym uwagi na to, że spadki hydrauliczne w poszczególnych warstwach na ogół nie mogą być jednakowe, nie mogą być także jednakowe rzeczywiste prędkości przepływu, i na to, że ukryte w takim obliczeniu prędkości filtracji wody w poszczególnych warstwach są różne, co narusza warunek ciągłości przepływu. Przy braku rozprętu wody na boki i poprawnym obliczaniu, prędkość filtracji we wszystkich warstwach jest ta sama, ale różne są z reguły w poszczególnych warstwach spadki hydrauliczne i rzeczywiste prędkości przepływu.

Drugi błąd polega na korzystaniu ze wzoru [1] niezależnie od tego, czy rozważa się czas wędrówki cząsteczki zanieczyszczonej wody od poziomu 1 do poziomu 3, czy

też od poziomu 2 do poziomu 3. W pierwszym wypadku ważny jest wzór [1] i uśrednianie odwrotności współczynnika filtracji na czterech warstwach, w drugim wypadku z obliczeń wg wzoru [1] należy pominąć miąższość h_1 i przyjmować czas odpowiadający sumie miąższości

$$h_2 + h_3 + h_4 \quad [2]$$

Trzeci błąd polega na zakładaniu zbyt wielkich wartości porowatości aktywnej gruntu (tj. stosunku objętości porowej czynnej w gruncie podczas filtracji do całkowitej objętości gruntu).

Błędy te ilustruje się przykładami obliczeń na tle obliczeń poprawnych.

Obliczenie poprawne

Obliczenia hydrauliczne przepływu przez pakiet warstw mogą być szczegółowe lub ogólne; w pierwszym wypadku oblicza się potrzebne elementy w poszczególnych warstwach i dla całego pakietu, w drugim — tylko dla całego pakietu. Sumowanie we wzorach rozciąga się na uwzględniane warstwy pakietu, indeksy dla przejrzystości pominięto.

Obliczenie szczegółowe przedstawione jest przykładowo w tab. 1 w nawiązaniu do ryc. 1. Kol. 1 podaje liczbę porządkową warstwy pakietu, kol. 2 — miąższość warstwy, kol. 3 i 4 — współczynnik filtracji gruntu warstwy, kol. 5 — iloraz miąższości i współczynnika filtracji, kol. 6 — spadek hydrauliczny w warstwie, kol. 7 — stratę energii w warstwie, kol. 8 — porowatość aktywną, kol. 9 — iloczyn porowatości i miąższości (kolumna ta nie jest potrzebna do obliczenia szczegółowego; wykorzystuje się ją w obliczeniu ogólnym), kol. 10 — prędkość przepływu, kol. 11 — czas przepływu przez warstwę.

Tok obliczeń jest następujący. Kol. 1–4 i 8 wypełnia się stosownie do wyników rozpoznania hydrogeologicznego. Suma z kol. 5 potrzebna jest do obliczenia średniego współczynnika filtracji prostopadłej do uwarstwienia wg wzoru [3]

*Katedra Geotechniki, Politechnika Koszalińska, ul. Raclawicka 15, 75-620 Koszalin; janusz.haurylkiewicz@rzgw.poznan.pl

Tab.1. Obliczenie poprawne spadków, strat energii i czasów przepływu w warstwach pakietu
 Table 1. Correct calculation of gradients, head loss and flow duration for layers of the package

Lp. No	h m	k		h/k	i = 2,26/k	ΔH = ih m	n	nh m	u = 2,26/n m/rok m/year	t = h/u rok year
		m/s	m/rok m/year	rok year						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	5	0,001	31500	0,00016	7,1746E-05	0,00036	0,2	1	11,3	0,442478
2	2	1E-08	0,315	6,34921	7,17460317	14,3492	0,05	0,1	45,2	0,044248
3	4	0,0001	3150	0,00127	0,00071746	0,00287	0,15	0,6	15,06667	0,265487
4	9	0,000001	31,5	0,28571	0,07174603	0,64571	0,1	0,9	22,6	0,39823
Σ	20			6,63635		14,9981		2,6		1,150442

$$k_s = \frac{\sum h}{\sum \frac{h}{k}} \quad [3]$$

tutaj $k_s = 20 / 6,636 = 3,014$ m/rok. Oblicza się średni spadek hydrauliczny wg wzoru

$$i_s = \frac{H}{\sum h} = 15 / 20 = 0,75 \quad [4]$$

średnią prędkość filtracji

$$v_s = k_s i_s = 3,014 * 0,75 = 2,26 \text{ m/rok} \quad [5]$$

(rok ma $365 * 24 * 3600 \text{ s} = 3,15 * 10^7 \text{ s}$) i dalej w poszczególnych warstwach, w kol. 6 spadek hydrauliczny

$$i = v_s / k = 2,26 / k \quad [6]$$

w kol. 7 — stratę energii

$$\Delta H = i h \quad [7]$$

Suma w kol. 7 powinna być zgodna z założonym spadkiem energii $H = 15$ m na grubości pakietu. W kol. 9 oblicza się iloczynny nh i ich sumę 2,6 m, w kol. 10 — rzeczywiste prędkości przepływu

$$u = v_s / n = 2,26 / n \quad [8]$$

w kol. 11 — czas przepływu przez warstwę

$$t = h / u \quad [9]$$

i czas sumaryczny 1,15 lat.

Warto zwrócić uwagę na kłóćący się z intuicyjnym odczuciem wielu osób wynik obliczeń: oto w warstwie drugiej o najmniejszej przepuszczalności największa jest

prędkość przepływu i najkrótszy czas przepływu. Wyjaśnieniem jest największy w tej warstwie spadek hydrauliczny i najmniejsza porowatość aktywna.

Obliczenie ogólne dostarcza wartości średnich: prędkości filtracji wg wzoru [5] 2,26 m/rok, porowatości średniej wg wzoru

$$n_s = \frac{\sum nh}{\sum h} = 2,6 / 20 = 0,13 \quad [10]$$

średniej prędkości przepływu

$$u_s = v_s / n_s = 2,26 / 0,13 = 17,38 \text{ m/rok} \quad [11]$$

i łącznego czasu przepływu przez pakiet warstw

$$t = \frac{\sum h}{u_s} = 20 / 17,38 = 1,15 \text{ lat} \quad [12]$$

Gdy potrzebny jest jedynie czas przepływu, to korzysta się ze wzoru [12] przekształconego z wykorzystaniem poprzednio podanych zależności do postaci

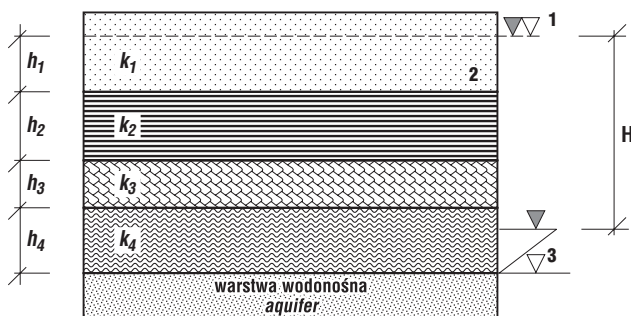
$$t = \frac{\sum \left(\frac{h}{k}\right) \sum nh}{H} = 6,636 * 2,6 / 15 = 1,15 \text{ lat} \quad [13]$$

Tak przedstawia się procedura obliczania poprawnego.

Obliczenia niepoprawne

1°. Jednakowy spadek hydrauliczny w warstwach.

Zakłada się poprawnie średni spadek hydrauliczny jw. równy 0,75, a następnie prędkości filtracji i przepływu w poszczególnych warstwach oblicza się wg schematu tab. 2 dla właściwych tym warstwom współczynników filtracji i



Ryc. 1. Schematyczny profil słaboprzepuszczalnego nadkładu 4-warstwowego nad warstwą wodonośną; h_1, \dots, h_4 — miąższość warstwy, k_1, \dots, k_4 — współczynnik filtracji pionowej

Fig. 1. Four-layered low-permeable package over aquifer; h_1, \dots, h_4 — thickness of layer, k_1, \dots, k_4 — coefficient of vertical permeability

Tab. 2. Obliczenie czasów przepływu w warstwach pakietu, błędne wskutek założenia jednakowego spadku w każdej warstwie
 Table 2. Calculation of flow duration for layers of the package, incorrect because of assumed equal gradients in each layer

Lp. No	h m	k		v = 0,75k	n	u = v/n m/rok m/year	t = h/u rok year
		m/s	m/rok m/year	m/rok m/year			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	5	0,001	31500	23625	0,2	118125	4,233E-05
2	2	1E-08	0,315	0,23625	0,05	4,725	0,4232804
3	4	0,0001	3150	2362,5	0,15	15750	0,000254
4	9	0,000001	31,5	23,625	0,1	236,25	0,0380952
Σ	20						0,461672

porowatości aktywnych, przyjmując niepoprawnie ten spadek jednakowy we wszystkich warstwach pakietu. Czas przesiąkania stanowi tu 40 % czasu obliczonego poprawnie.

Warto zwrócić uwagę na zgodny w tym wypadku z intuicyjnym odczuciem wielu osób wynik błędnych obliczeń: oto w warstwie drugiej o najmniejszej przepuszczalności najmniejsza jest prędkość przepływu i najdłuższy czas przepływu. Wyjaśnieniem jest bezpodstawnie zakładany jednakowy we wszystkich warstwach spadek hydrauliczny, który nie różnicuje warunków przepływu w poszczególnych warstwach pakietu.

Przykład powyższy powinien też być przestrożą przed zbytnim poleganiem na swej intuicji, dotyczącej zjawisk hydraulicznych w gruntach.

2°. Wykorzystanie błędnego wzoru z literatury. Obliczanie czasu przepływu z wynikiem jak w tab. 2 jest też nieprawidłowe (podane w tab. 3) przy posługiwaniu się wzorem (wg wzoru [6] — Macioszczyk, 1999),

$$t = \frac{\sum h}{H} \sum \left(\frac{hn}{k} \right) \quad [14]$$

Wzór [14] odpowiada obliczeniom referowanym w związku z tab. 2, gdyż wynika z niego, że spadek hydrauliczny w każdej warstwie ma być taki sam i równy spadkowi średniemu. Wzór ten otrzymać też można z błędnego założenia takiej samej prędkości przepływu w każdej warstwie i w całym pakiecie.

3°. Nieprawidłowe wykorzystanie poprawnego wzoru. Spotyka się też niepoprawne wykorzystanie poprawnego wzoru [2] z pracy (Macioszczyk, 1999), określającego czas przesiąkania przez jedną warstwę gruntu

$$t = \frac{h^2 n}{kH} \quad [15]$$

Wzór ten dla jednej odosobnionej warstwy jest poprawny, ale gdy analizuje się pakiet warstw, błędnie przyjmuje się w niektórych opracowaniach dla każdej warstwy tę samą wartość różnicy poziomów wody H . Prowadzi to do błędnych obliczeń wykonywanych wg wzoru

$$t = \frac{1}{H} \sum \left(\frac{h^2 n}{k} \right) \quad [16]$$

np. jak w tab. 4.

Tak obliczony błędnie czas stanowi zaledwie 5% czasu obliczanego poprawnie. Przyczyną tak znaczącego odstępstwa od wyniku poprawnego jest błędne założenie o podaniu każdej warstwy tej samej różnicy poziomów wody $H = 15$ m, która przecież w rzeczywistości rozkłada się na wszystkie warstwy pakietu.

Opisane tu trzy sposoby błędnego obliczania czasu przesiąkania, spotykane w operatach lub nawet w przyjętych dokumentacjach hydrogeologicznych, **wyznaczają krótszy czas przesiąkania, niż czas rzeczywisty, podwy-**

Tab. 3. Obliczenie czasu przepływu w warstwach pakietu, niepoprawne wskutek posłużenia się błędnym wzorem [6] z pracy (Macioszczyk, 1999), tu wzór [14]

Table 3. Calculation of flow duration for layers of the package, incorrect because of using wrong formula [6] from (Macioszczyk, 1999), formula [14] here

Lp. No	h m	k		n	hn/k/0,75 rok year
		m/s	m/rok m/year		
1	5	0,001	31500	0,2	4,2328E-05
2	2	1E-08	0,315	0,05	0,42328042
3	4	0,0001	3150	0,15	0,00025397
4	9	0,000001	31,5	0,1	0,03809524
Σ	20				0,46167196

Tab. 4. Obliczenie czasu przepływu w warstwach pakietu z błędnym wykorzystaniem poprawnego wzoru [2] z pracy (Macioszczyk, 1999), tu wzór [15]

Table 4. Calculation of flow duration for layers of the package with wrong usage of right formula [2] from (Macioszczyk, 1999), formula [15] here

Lp. No	h m	k		n	h ² 2n/k/15 rok year
		m/s	m/rok m/year		
1	5	0,001	31500	0,2	1,0582E-05
2	2	1E-08	0,315	0,05	0,04232804
3	4	0,0001	3150	0,15	5,0794E-05
4	9	0,000001	31,5	0,1	0,01714286
Σ	20				0,05953228

ższają zatem bezpieczeństwo ujęcia, ale niekiedy ich wyniki mogą być argumentem uniemożliwiającym ustanowienie strefy ochronnej — terenu ochrony bezpośredniej przez organ właściwy do wydania pozwolenia wodnoprawnego, podczas gdy w rzeczywistości organ taką strefę mógłby ustanowić, gdyż poprawnie obliczony czas wymiany wody w warstwie wodonośnej mógłby przekroczyć 25 lat, teren ochrony pośredniej nie byłby konieczny i można by zastosować przepisy Prawa wodnego art. 52 ust. 3 i art. 58. ust. 5.

4°. Pomijanie czasu przepływu przez warstwę o dużej przepuszczalności. Przyjęto dane według ryc. 1 i tab. 1. Obliczenie poprawne łącznego czasu przesączania przez warstwy 2, 3 i 4 polega na zsumowaniu czasów odpowiadających tym warstwom, tj. według tab. 1 $t = 0,044248 + 0,265487 + 0,39823 = 0,708$ roku. Można też obliczenia wykonać odrębnie dla warstw 2, 3 i 4, jak w tab. 5, jeśli wiadomo, jaka jest różnica poziomów piezometrycznych odpowiadająca pakietowi tych trzech warstw; w obliczeniach tab. 5 założono ją jako 15 m, tak jakby w warstwie 1 ewentualna strata energii wody była znikoma. Można też posłużyć się od razu wzorem [13]:

$$t = \frac{\sum \left(\frac{h}{k}\right) \sum nh}{H} = 6,63619 * 1,6 / 15 = 0,708 \text{ roku.}$$

Obliczenie niepoprawne polega na przyjęciu, że nie jest istotne, skąd zacznie się wędrówka wody zanieczyszczonej: z poziomu 1 zwierciadła wody wg ryc. 1, czy z poziomu 2 — tj. ze spągu górnej warstwy nawodnionej —

w obu wypadkach czas oblicza się przyjmując średnie wartości dla pakietu warstw 1, 2, 3 i 4, otrzymując 1,15 lat, „bo przecież jest jasne, że przez warstwę 1 o dużej wodoprzepuszczalności woda przesączy się natychmiast”. Obliczenia wykonuje się poprawnym wzorem [13] bezpodstawnie zastosowanym do całości pakietu warstw 1–4 i otrzymuje się:

$$t = \frac{\sum \left(\frac{h}{k}\right) \sum nh}{H} = 6,63635 * 2,6 / 15 = 1,15 \text{ roku.}$$

Tymczasem obliczenie poprawne szczegółowe (tab. 1) ujawnia, że właśnie przez warstwę 1 woda przesącza się najdłużej.

Opisany tu sposób błędnego obliczania czasu przesiąkania przez część pakietu, spotykany w operatach lub nawet w przyjętych dokumentacjach hydrogeologicznych, **wyznacza dłuższy czas przesiąkania, niż czas rzeczywisty, obniża zatem bezpieczeństwo ujęcia, a niekiedy wynik takiego obliczenia może być argumentem pozwalającym na niezgodne z Prawem wodnym ustanowienie strefy ochronnej — terenu ochrony bezpośredniej przez organ właściwy do wydania pozwolenia wodnoprawnego, podczas gdy w rzeczywistości organ takiej strefy nie miałby prawa ustanowić, bo potrzebna by była strefa z terenem ochrony pośredniej**, gdyż poprawnie obliczony czas wymiany wody w warstwie wodonośnej mógłby być krótszy niż 25 lat, teren ochrony pośredniej byłby konieczny i przepisy Prawa wodnego art. 52 ust. 3 i art. 58. ust. 1 i 5 kierowałyby procedurę prawną ustanawiania strefy ochronnej ujęcia do dyrektora regionalnego zarządu gospodarki wodnej.

Tab. 5. Obliczenie poprawne spadków, strat energii i czasów przepływu tylko w części warstw pakietu

Table 5. Correct calculation of gradients, head loss and flow duration for only some layers of the package

Lp. No	h m	k		h/k rok year	i = 2,26/k	ΔH = ih	n	nh m	u=2,26/n m/rok m/year	t = h/u rok year
		m/s	m/rok m/year			m				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	2	1E-08	0,315	6,34921	7,17460317	14,3492	0,05	0,1	45,2	0,04425
3	4	0,0001	3150	0,00127	0,00071746	0,00287	0,15	0,6	15,0667	0,26549
4	9	0,000001	31,5	0,28571	0,07174603	0,64571	0,1	0,9	22,6	0,39823
Σ	15			6,63619		14,9978		1,6		0,70796

Różnica czasów w tym przykładzie, obliczanych poprawnie i niepoprawnie, jest też istotna dla planowania harmonogramu czynności zabezpieczających warstwę wodonośną przed skażeniem z powierzchni terenu lub ze spągu przypowierzchniowej warstwy nawodnionej (np. stare studnie kopane). Tab. 1 pokazuje, że właśnie przez warstwę 1 o bardzo dobrej wodoprzepuszczalności woda będzie przesączała się najdłużej.

Ten przykład ponownie ukazuje zawodność intuicji wielu ludzi co do reżimu filtracji przez pakiet warstw.

5°. Zakładanie zbyt dużej porowatości aktywnej. Przepływ wody podziemnej nie obejmuje całkowitej objętości porów, lecz tylko jej część, która odniesiona do objętości całego gruntu jest porowatością aktywną. Z całkowitej bowiem objętości porów niedostępne dla przepływu są przestrzenie zajęte przez wodę adhezyjną, przez pęcherzyki powietrzne zaklinowane między ziarnami gruntu i przez strefy „martwe” omijane strumieniem wody. Porowatości aktywnej nie należy więc przyjmować jako równej porowatości gruntu, lecz znacząco mniej, czego skutkiem obliczeniowym będzie zwiększenie obliczeniowej prędkości przepływu wody przez grunt (wzór [8]) i zwiększenie zasięgu terenu ochronnego.

Dość często wszakże spotykaną wadą operatów i dokumentacji hydrogeologicznych jest zakładanie zbyt dużych wartości porowatości aktywnej dla poszczególnych gruntów, np. 0,35–0,5 dla piasków (takie wartości mogą odpowiadać przypowierzchniowym piaskom luźnym), co powoduje radykalne zmniejszenie obliczeniowej prędkości przepływu i wydłużenie obliczeniowego czasu przepływu na określonym dystansie, a także konsekwencje prawne jak wyżej.

Tytułem zalecenia podaje się poniżej wartości porowatości aktywnej (Bush & Luckner, 1972, 1974), których stosowanie będzie bardziej poprawne niż zakładanie wartości 0,35–0,5 (brak informacji o metodzie wyznaczania podanych wartości):

żwir	0,20–0,25
piasek gruby	0,15–0,20
piasek średni	0,10–0,15
piasek pylasty	0,08–0,12
pył piaszczysty	0,05–0,10
pył ilasty	0,03–0,08
ił pylasty	0,02–0,05

Wnioski

1. Praktyka weryfikacji operatów wodnoprawnych na pobór wody podziemnej wraz z odpowiednimi dokumentacjami hydrogeologicznymi ujawnia popełnianie przez niektórych autorów błędów w obliczeniach hydraulicznych czasu przesiąkania przez pakiety warstw gruntowych.

2. Błędy skupiają się wokół określenia gradientu hydraulicznego w poszczególnych warstwach i wokół zakładanych wartości porowatości aktywnej.

3. Dostrzeżone błędy dotyczące gradientu częściej skracają (co zwiększa bezpieczeństwo ujęcia), rzadziej wydłużają, czas przesiąkania w stosunku do czasu obliczonego poprawnie, a błędy dotyczące porowatości na ogół wydłużają ten czas (co zmniejsza bezpieczeństwo ujęcia).

4. Istnieją określone, a wskazane wyżej, konsekwencje natury prawnej opisanych błędów, dotyczące kompetencji organów administracyjnych (właściwych do wydania pozwoleń wodnoprawnych na pobór wody podziemnej) w zakresie ustanawiania stref ochronnych — terenów ochrony bezpośredniej — ujęć wody podziemnej.

5. Analiza błędów dotyczących gradientu hydraulicznego w przesiąkaniu w poprzek warstw ujawniła nieprawidłową dość często pracę intuicji człowieka, próbującego oszacować rozmaite relacje w hydraulicznych parametrach przesiąkania.

6. Zwraca uwagę luka prawna umożliwiająca dokumentatorom hydrogeologicznym wykonywanie — i przyjmowanie przez organy administracji geologicznej — kolejnych dokumentacji obciążonych omówionymi tu błędami, mimo powiadamiania tych organów o błędach.

Literatura

- BUSH K.-F. & LUCKNER L. 1972 — Geohydraulik. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
BUSH K.-F. & LUCKNER L. 1974 — Geohydraulik für Studium und Praxis. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart.
HAURYŁKIEWICZ J. 2002 — Zagadnienie zasięgu strefy ochronnej ujęcia wody podziemnej. *Prz. Geol.*, 50: 230–236.
MACIOSZCZYK T. 1999 — Czas przesączenia pionowego wody jako wskaźnik stopnia ekranowania warstw wodonośnych. *Prz. Geol.*, 47: 731–736.

Przegląd Geologiczny jest do nabycia:

- w Warszawie:
Państwowy Instytut Geologiczny, ul. Rakowiecka 4, punkt sprzedaży, budynek A, pok. 1 w godz. 9–15;
Kiosk na Wydziale Geologii UW, ul. Żwirki i Wigury 93;
- w Krakowie: Kiosk Skryptów, AGH łącznik A1–C1;
- w Poznaniu: Biblioteka Instytutu Geologii UAM, ul. Maków Polnych 16;
- w Sosnowcu: Wydział Nauk o Ziemi UŚląski, ul. Będzińska 60.