

Zagadnienie zasięgu strefy ochronnej ujęcia wody podziemnej

Janusz Hauryłkiewicz*

The problem of groundwater intake protection area extent. Prz. Geol., 50: 230–236.

Summary. An influence of initial gradient in cohesive soils, various porosity types, recharge and intake variability on groundwater flow velocity, extent of groundwater protection area and related pollutant load of aquifer was analyzed. The possibility of reasonable change of some assumptions accepted in calculation practice was also presented. Considering, all these factors distinctly decrease the value of these physical quantities (sometimes practically down to zero), which brings about considerable economical, social and ecological profits.

Key words: groundwater, intake, protection areas

Wody podziemne chroni się przed zanieczyszczeniem m.in. przez ustanawianie stref ochronnych ujęć wody podziemnej (por. ustawa — Prawo Wodne, 2001). W strefie ochronnej wprowadza się określone ograniczenia użytkowania, które muszą być rekompensowane odpowiednimi odszkodowaniami, zrozumiała jest więc tendencja do racjonalnego jej zmniejszania.

Celem niniejszej pracy jest zwięzła analiza pewnych właściwości środowiska geologicznego, jak: porowatość efektywna, gradient początkowy w gruntach spoistych, zmienność zasilania i poboru, a także ich relacji do pewnych założeń przyjmowanych w aneksach do dokumentacji hydrogeologicznych i we wnioskach o ustanowienie strefy ochronnej — w aspekcie ochrony wody podziemnej. Rozważa się wpływ tych czynników na wielkość strefy ochronnej i na ładunek przesiąkających zanieczyszczeń w kilku typowych schematach hydrogeologicznych.

Wnioski z tej analizy, w przypadku ich potwierdzenia się w warunkach terenowych, mogą być wykorzystane do sformułowania racjonalnych przesłanek modyfikacji aktualnych procedur obliczeniowych zasięgu stref ochronnych i — w konsekwencji — modyfikacji zasad podejmowania decyzji o ustanawianiu tych stref.

Porowatość efektywna

Przez porowatość n rozumie się stosunek objętości porów w gruncie do objętości całego gruntu (objętości łącznej porów i szkieletu gruntowego). Przepływ wody podziemnej nigdy jednak nie obejmuje całkowitej objętości porów, lecz tylko jej część, która odniesiona do objętości całego gruntu jest porowatością efektywną n_e . Z całkowitej bowiem objętości porów n niedostępne dla przepływu są przestrzenie zajęte przez wodę adhezyjną (n_a), przez pęcherzyki powietrzne zaklinowane między ziarnami gruntu (n_p) i przez strefy „martwe” omijane strumieniem wody (n_m). W rezultacie porowatość efektywna powinna być obliczana jako:

$$n_e = n - n_a - n_p - n_m \quad [1]$$

Odjemniki w powyższym wzorze są weryfikowalne doświadczalnie w bardzo zróżnicowanym stopniu trudności i pewności. Porowatość adhezyjną n_a wyznaczać można laboratoryjnie na podstawie pomiarów masy próbki gruntu

wysuszanego w dwóch temperaturach: 105 i 140°C oraz pomiarów gęstości gruntu w tych temperaturach i gęstości szkieletu gruntowego. Oznaczenia te są na ogół dość łatwe i dokładne, jeśli w tych temperaturach ubytek masy następuje tylko wskutek odparowania wody. Porowatość pęcherzykową n_p można wyznaczać laboratoryjnie na próbce nasyconej wodą na podstawie zmniejszenia objętości próbki wskutek tak dobranego wzrostu ciśnienia porowego, który spowoduje zamknięcie pęcherzyków powietrznych. Badanie zaleca się wykonać za pomocą aparatu trójosiowego, komory konsolidacyjnej lub odpowiednio uszczelnionego edometru. Jest ono łatwe i dokładne. Porowatość „martwą” n_m można oszacować poddając próbkę gruntu kilku badaniom filtracji, każde w innym kierunku i zwrocie przepływu z wykorzystaniem aparatu do badania filtracji anizotropowej. To badanie daje z reguły wyniki zaniżone, wymaga dostępu do niestandardowej aparatury i jest mało dokładne. Zasygnalizowanej powyżej procedury badań nie zaopatruje się tutaj szczegółami techniki laboratoryjnej. Inną, bezpośrednią technikę wyznaczania n_e referuje Kim i in. (1997). W razie braku danych doświadczalnych przyjmuje się w USA $n_e = 0,1$ (Coduto, 1999).

Warto dodać, że porowatość adhezyjna zależy głównie od składu mineralogicznego i granulometrycznego gruntu oraz od składu chemicznego wody, porowatość pęcherzykowa zależy głównie od składu granulometrycznego gruntu, ciśnienia w wodzie porowej, temperatury, właściwości fizykochemicznych samej wody, porowatość martwa zależy głównie od tekstury gruntu, od składu granulometrycznego i od reżimu hydrodynamicznego strumienia wody podziemnej.

W gruntach jest też możliwe rozróżnienie porowatości intergranularnej i granularnej podobnie jak w skałach ze szczelinami (Witczak & Żurek, 2000). Pierwsza obejmuje przestrzenie między ziarnami gruntu, druga — mikropory w ziarnach gruntu. Woda błonkowa i adhezyjna w mikroporach przyjmuje drogą dyfuzji niektóre zanieczyszczenia opóźniając ich migrację w stosunku do prędkości przepływu wody między ziarnami. Wydaje się jednak, że w porównaniu ze skałami zdolność gruntów luźnych do opóźniania migracji zanieczyszczeń w omawiany sposób nie jest znacząca.

Uwzględnienie odjemników we wzorze [1] oznacza zwiększenie obliczeniowej prędkości przepływu wody przez grunt (wzór [2]) i na ogół powoduje zwiększenie zasięgu terenu ochronnego.

Gradient początkowy

Powszechnie przyjmowanym modelem do prognozowania rzeczywistej prędkości przemieszczania się wody podziemnej między dwoma punktami jest prawo Darcy'ego:

*Politechnika Koszalińska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska ul. Raclawicka 15/17, 75-620 Koszalin; kgeo@tu.koszalin.pl

**Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej, ul. Grunwaldzka 21, 60-783 Poznań; janusz.haurylkiewicz@rzgw.poznan.pl

$$u = v / n_e = k i / n_e \quad [2]$$

gdzie: u — rzeczywista średnia prędkość przepływu wody podziemnej [m/s], v — prędkość filtracji, k — współczynnik filtracji [m/s], i — gradient (spadek) hydrauliczny [–], n_e — porowatość efektywna gruntu [–]. Z prawa Darcy'ego korzysta się niezależnie od tego, czy grunt jest przepuszczalny, czy słabo przepuszczalny lub półprzepuszczalny (por. Ulman-Bortnowska, 1995; Macioszczyk i in., 1993; Macioszczyk, 1999).

I tak, zasięg strefy ochronnej ujęcia ustala się z warunku 25-letniego czasu wymiany wody w warstwie wodonośnej (ustawa — Prawo wodne, 2001), ale też sumując do wartości 25 lat czas przesiąkania przez warstwę półprzepuszczalną nadkładu i czas przepływu przez przepuszczalną warstwę wodonośną (Macioszczyk i in., 1993), oba czasy obliczone na podstawie tego samego prawa Darcy'ego. Nie uwzględnia się w takim obliczeniu tego, że przepływ wody przez wiele gruntów (w tym słabo przepuszczalne, półprzepuszczalne, czy też tzw. nieprzepuszczalne grunty nadkładu) następuje praktycznie dopiero po przekroczeniu przez gradient i granicznej (początkowej) wartości i_o , która dla piasków gliniastych i pyłów może być rzędu 1, dla glin 5, ale np. dla iłów montmorylonitowych rzędu 70 (por. Sergeev, 1971). Obliczenia zasięgu strefy ochronnej pomijające gradient początkowy mogą według autora dawać wartości niekiedy radykalnie zawyżone, co ma negatywne skutki gospodarcze i społeczne (Hauryłkiewicz, 1999).

Filtracja w gruntach spoistych w naturalnym środowisku geologicznym nie podlega prawu Darcy'ego, gdyż prędkość przemieszczania się wody w gruncie określona jest następującym wzorem:

$$u = k (i - i_o) / n_e \quad [3]$$

gdzie: i_o [–] gradient początkowy, pozostałe oznaczenia — jak we wzorze [2]. Wielkość i_o we wzorze [3] nie jest, ściśle mówiąc, gradientem początkowym, lecz parametrem prostoliniowej części wykresu 1 funkcji $v(i)$ (według ryc. 1). Funkcja ta wraz ze zmniejszaniem się spadku hydraulicznego i przyjmuje kształt nieliniowy, malejąc stopniowo do zera. Przepływ wód w przedziale małych spadków hydraulicznych zmniejsza się na tyle radykalnie, że według autora można go pominąć przyjmując, że dla gradientów mniejszych od gradientu początkowego ($i < i_o$) przepływu nie ma.

Wartość gradientu początkowego wzrasta wraz z wytrzymałością wody błonkowej w gruncie na ścinanie — przeciętnie 10^{-7} kPa (Mironenko & Szestakov, 1974), a ta

wzrasta wraz ze zmniejszaniem się temperatury i średnicy porów, ponadto zależy od właściwości chemicznych zarówno wody porowej, jak i cząstek szkieletu gruntowego, dlatego należy ją wyznaczać doświadczalnie. Ponieważ średnica porów i porowatość zależą od naprężenia efektywnego σ' w gruncie, więc też i gradient początkowy zależy od naprężenia efektywnego, teoretycznie według związku logistycznego, ryc. 1, linia $i_o(\sigma')$ (Hauryłkiewicz, 1996). W rezultacie prędkość filtracji v jest funkcją rosnącą spadku i , oraz funkcją malejącą naprężenia efektywnego σ' , według ryc. 1, przy czym współczynnik filtracji k też maleje ze wzrostem σ' . Geometrycznym obrazem funkcji $v(i, \sigma')$ jest powierzchnia prostokątna.

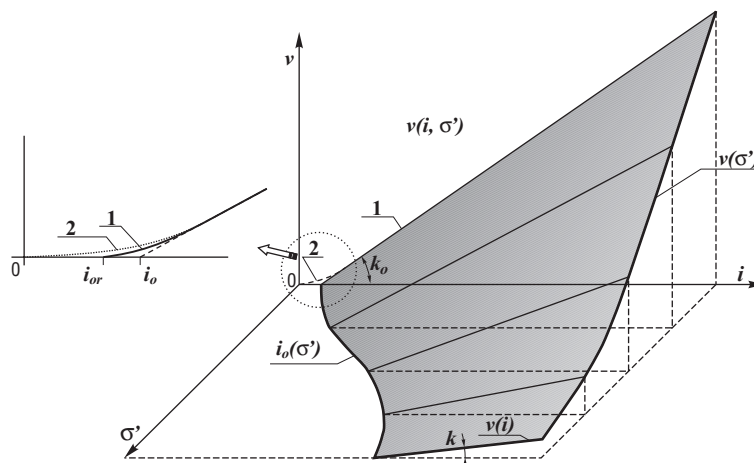
Trzeba zaznaczyć, że uogólnione prawo Darcy'ego według wzoru [3] zostało sformułowane jeszcze w pierwszej połowie XX w. w związku z rozwiązywaniem problemów konsolidacji i odkształceń gruntów spoistych dla potrzeb głównie geotechniki (zob. Cytowicz, 1951; Sergeev, 1971; Mironenko & Szestakov, 1974; Cytowicz, Ter-Martirosjan, 1981) i hydrogeologii (zob. Silin-Bekczurin, 1965) i miało dobre potwierdzenie doświadczalne na próbkach gruntów o strukturze nienaruszonej oraz na próbkach o strukturze przerobionej, poddanych filtracji wody w warunkach zbliżonych do warunków naturalnych.

Jednak już w latach 70. ubiegłego wieku doświadczeniom owym wytknięto niekontrolowanie wpływu istotnych czynników, jak np. obecność pęcherzyków powietrza w wodzie, migracja cząstek szkieletu gruntowego (prowadząca do tzw. kolmatacji wewnętrznej), efekt elektrokinetyczny, gradient stężenia związków chemicznych w wodzie, zakażenie kulturami bakteryjnymi, pęcznienie, konsolidacja. Sygnalizowano doświadczenia, (m.in. S. Hansbo) ukierunkowane na weryfikację związku [3] organizowane w warunkach możliwie pełnej kontroli wymienionych wyżej czynników (w warunkach idealnych), które to doświadczenia nie potwierdzały istnienia gradientu początkowego, wykazywały jedynie znaczące zmniejszenie współczynnika filtracji przy małych wartościach spadku hydraulicznego (zob. Goldstein, 1979), co prowadziło do modyfikacji związku prędkości filtracji ze spadkiem hydraulicznym do postaci wyrażonej krzywą 2 na ryc. 1, dla której $i_{or} = 0$.

Wyniki tych eksperymentów zostały później potwierdzone przez innych badaczy i dziś uznaje się, że w warunkach niewystępowania czynników zakłócających, w warunkach idealnych, ważne jest prawo Darcy'ego [2] z nieliniowym fragmentem początkowym (por. Mitchell, 1993). Gradient początkowy dokumentowany dawnymi doświadczeniami był efektem zakłóceń przez wymienione wyżej czynniki, być może przez jeszcze inne również.

Ryc. 1. Zależność prędkości v filtracji od spadku hydraulicznego i oraz od naprężenia efektywnego σ' ; 1 — warunki naturalne, 2 — warunki idealne

Fig. 1. Artificial velocity v versus hydraulic gradient i and effective stress σ' ; 1 — natural conditions, 2 — ideal conditions



Tab. 1. Orientacyjne wartości gradientu początkowego i_0
Table 1. Approximate values of initial gradient i_0

L.p.	Grunt	Zawartość frakcji ilowej %	Gradient początkowy
1	mało spoisty	0–10	0–2
2	średnio spoisty	10–20	2–5
3	zwięzły spoisty	20–30	5–10
4	bardzo spoisty	ponad 30	ponad 10
5	torf rozłożony	poniżej 5	1–3

ródła: lp.2 — Sergeev, 1971 i Silin-Bekczurin, 1965, lp.3 i 4 — Sergeev, 1971, lp.5 — Masłow i Kotov, 1971, lp.1 — ekstrapolacja autorska (brak udokumentowania).

Uwaga. Zdaniem autora podane wartości są mniejsze od przeciętnych i odpowiadają gruntem prekonsolidowanym pod obciążeniem rzędu przynajmniej 100 kPa, lub zalegającym współcześnie na głębokości większej niż 5 m (w strefie aeracji) lub 10 m (w strefie saturacji)

W naturalnym środowisku geologicznym owe czynniki jednak mogą działać. Na ich aktywność wskazują liczne doniesienia naukowe. Zwraca się w nich uwagę zwłaszcza na żywotność bakterii produkujących gaz (Bułyczew, 1974), nawet na głębokości ponad 100 m (Olańczuk-Neyman & Wargin, 1994), na migrację węglowodorów ku powierzchni terenu (Pałys, 2000), nawet z głębokości wielu dziesiątków kilometrów (Gold, 1999), na kolmatację wewnętrzną (Mitchell, 1993). Według autora dla filtracji w warunkach naturalnych pozostaje ważny wzór [3] oparty na licznych doświadczeniach i ważne jest praktycznie znaczące wyhamowywanie przepływu przy spadku hydraulicznym mniejszym od gradientu początkowego. W wypadku jednak, gdy nawet bardzo małe przepływy muszą być z pewnych powodów brane pod uwagę, istotnym zagadnieniem do rozstrzygnięcia w odpowiednio zorganizowanych badaniach jest charakter przepływu w obszarze nieliniowym.

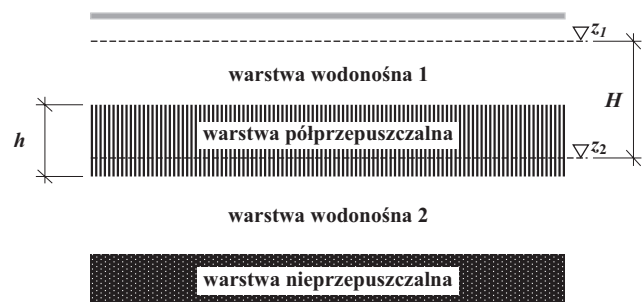
Ważność zarówno wzoru [3] jak i wzoru [2] należy tłumaczyć odnośniami się tych wzorów do radykalnie różnych układów szkielet gruntowy–woda porowa–powietrze porowe.

Z powyższego wynika, że do prognozy prędkości przepływu wody podziemnej potrzebne są wartości gradientów początkowych odpowiednich warstw gruntu. Podobnie jak współczynnik filtracji gruntu, tak i jego gradient początkowy może być wyznaczany zasadniczo trzema metodami: korelacji empirycznych, laboratoryjnymi i terenowymi. W odróżnieniu jednak od informacji zebranej obecnie o współczynniku filtracji, informacja o gradientach początkowych rozmaitych gruntów jest bardzo uboga. Skupia się ona głównie w publikacjach i dokumentacjach ukierunkowanych geotechnicznie. Brak jednak najczęściej sprecyzowania warunków, w jakich przeprowadzono doświadczenia; domniemywać można jedynie, że były one organizowane bez doprowadzania próbek do naturalnego stanu naprężenia, i że grunt w nich był prekonsolidowany. W tej sytuacji zalecić można z dziedziny metod empirycznych orientacyjne wartości według tab. 1 (kompilacja autorska) oraz z dziedziny metod laboratoryjnych wyznaczanie gradientu początkowego w odpowiednio przystosowanym edometrze na próbkach gruntu w warunkach modelujących stan naturalny. W dziedzinie badań terenowych można się spodziewać wkrótce rozszerzenia o gradient początkowy rzeczywego zakresu pomiarowego stożków do sondy wciskanej CPT (*cone penetration test*).

Jeśli przyjąć, że obowiązuje prawo filtracji [3] oznacza to możliwość prawie szczelnej (w określonym przedziale spadku hydraulicznego $i < i_{or}$) ochrony warstwy wodonośnej przykrytej nakładem gruntu spoistego, w którym $i_{or} > 0$, i w którym nie ma okien hydraulicznych, szczelin, kanalików (pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego) lub tp., czego sprawdzenie wymaga jednak określonych prac badawczych, m.in. terenowych. Miało by to bezpośrednie konsekwencje zmniejszające radykalnie wielkość obszaru ochronnego zbiornika lub strefy ochronnej wokół ujęcia wody podziemnej, a także wielkość ładunku zanieczyszczeń wprowadzanych w warstwę wodonośną. W poniższych przykładach analizuje się je w kilku często spotykanych schematach warunków hydrogeologicznych. O gruntach budujących w tych schematach poszczególne warstwy zakłada się, że są pod względem właściwości filtracyjnych jednorodne i izotropowe.

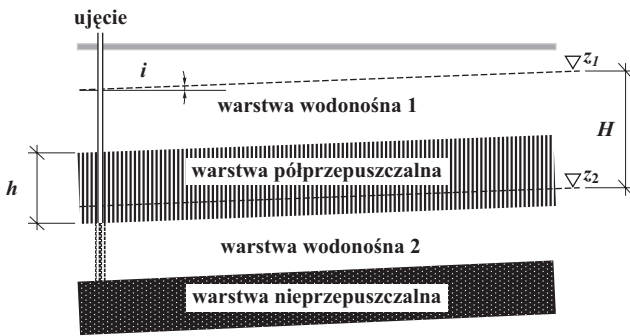
Przykład 1. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim niezmienny (ryc. 2). Warstwa półprzepuszczalna o miąższości h rozdziela dwie warstwy wodonośne: 1 i 2, w których zwierciadła piezometryczne są poziome i mają rzędne z_1 i z_2 odpowiednio, przy czym ich różnica wynosi H . Należy rozważyć możliwość przesączania się zanieczyszczonej wody z warstwy 1 do warstwy 2. Niech $h = 5$ m, $H = 10$ m, $i = 10/5 = 2$, warstwa półprzepuszczalna ma $k = 10^{-8}$ m/s, $n_e = 0,2$, $i_0 = 3$. Według powszechnie zalecanej procedury należy orzec, że przesączanie przez warstwę półprzepuszczalną wystąpi z prędkością przepływu według wzoru [2] $u = 10^{-8} \cdot 2/0,2 = 10^{-7}$ m/s, zaś czas przesiąkania wyniesie $5 \text{ m}/10^{-7} \text{ m/s} = 5 \cdot 10^7 \text{ s} = 1,6$ roku (rok ma $3,15 \cdot 10^7$ sekund). Ponieważ czas przesiąkania jest mniejszy niż 25 lat, obszar ochronny powinien objąć całą powierzchnię terenu z danymi warunkami hydrogeologicznymi. Jednakże zgodnie z prawem filtracji [3] dla gruntów spoistych przepływu wody przez warstwę półprzepuszczalną praktycznie nie będzie, gdyż spadek hydrauliczny ($=2$) jest mniejszy od gradientu początkowego ($=3$). Obszaru ochronnego zatem wyznaczać nie trzeba, jeśli małe przesączanie przy $i_{or} < i < i_0$ jest do pominięcia; jeśli nie jest ono do pominięcia, to należy zbadać wartość i_{or} . W dalszych przykładach ta uwaga dotycząca małych przepływów pozostaje w mocy, ale się jej nie powtarza.

Przykład 2. Warstwa półprzepuszczalna nad strumieniem wody podziemnej. Reżim niezmienny w warunkach braku eksploatacji ujęcia (ryc. 3). Warstwa półprzepuszczalna o miąższości h rozdziela dwie warstwy wodonośne: 1 i 2, w których zwierciadła piezometryczne są płaskie i mają spadek i , przy czym ich różnica wynosi H . Należy rozważyć możliwość przesączania się zanieczyszczonej wody z warstwy 1 do warstwy 2 i ewentualny zasięg strefy ochronnej aktualnie nieczynnego ujęcia w górę strumienia. Niech (jak w przykładzie 1) $h = 5$ m, $H_{sr} = 10$ m, warstwa



Ryc. 2. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej, reżim stały

Fig. 2. Semipermeable layer over the aquifer, steady state



Ryc. 3. Warstwa półprzepuszczalna nad strumieniem wody podziemnej

Fig. 3. Semipermeable layer over the groundwater stream

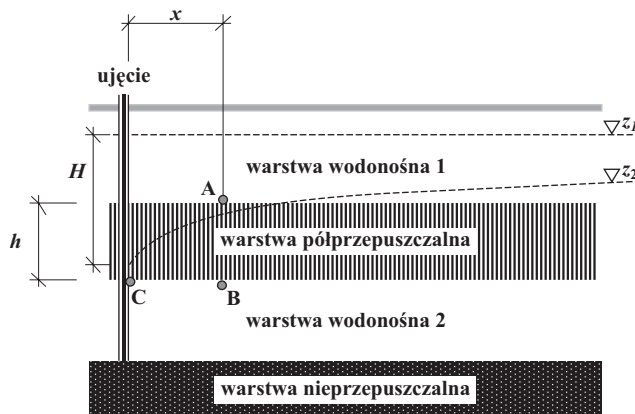
półprzepuszczalna ma $k = 10^{-8}$ m/s, $n_e = 0,2$, $i_o = 3$, warstwa wodonośna 2, natomiast $k = 10^{-3}$ m/s i $n_e = 0,3$. Spadek hydrauliczny $i = 0,001$.

W wariantcie obliczeń pomijających gradient początkowy czas przesiąkania przez warstwę nadkładu oblicza się jak w przykładzie 1, wynosi on 1,6 roku. Strefa ochronna powinna sięgnąć w górę strumienia na odległość odpowiadającą przepływowi w warstwie 2 w ciągu $25 - 1,6 = 23,4$ lat. Prędkość przepływu wody w warstwie 2 równa jest zgodnie ze wzorem [2] $10^{-3} \cdot 10^{-3}/0,3 = 3,33 \cdot 10^{-6}$ m/s, i 23,4-letnia droga przepływu wynosi $3,33 \cdot 10^{-6} \times 23,4 \times 3,15 \times 10^7 = 2455$ m. Strefa ochronna ujęcia powinna zatem sięgnąć w górę strumienia na odległość 2,5 km.

W wariantcie obliczeń uwzględniających gradient początkowy przesiąkania przez warstwę nadkładu nie będzie, gdyż w tej warstwie spadek hydrauliczny $i = 2$ jest mniejszy od gradientu początkowego. Strefa ochronna jest zatem zbędna.

Przykład 3. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim eksploatacyjny niezmienny, nie obniżający powierzchni piezometrycznej poniżej stropu zbiornika (ryc. 4). Największy spadek hydrauliczny (i największa też ewentualna nadwyżka spadku ponad wartość gradientu początkowego) wystąpi w bezpośrednim sąsiedztwie ujęcia. Tam też czas przepływu przez warstwę półprzepuszczalną będzie najkrótszy. Dla tego zatem profilu pionowego należy wykonywać obliczenia, a za spadek i należy przyjąć wartość H/h według oznaczeń na ryc. 4.

Wzrost poboru z ujęcia powoduje też wzrost spadku hydraulicznego i , wzrost ewentualnej nadwyżki tego spadku ponad gradient początkowy i skrócenie czasu przesiąkania przez warstwę półprzepuszczalną a w



Ryc. 4. Warstwa półprzepuszczalna nad eksploatowanym zbiornikiem wody podziemnej.

Fig. 4. Semipermeable layer over the exploited aquifer

konsekwencji wzrost zasięgu strefy ochronnej ujęcia. W tym schemacie hydrogeologicznym suma czasu przesiąkania przez nadkład (odcinek AB) i czasu przepływu poziomego w warstwie wodonośnej 2 (odcinek BC) zależy od odległości x rozważanego profilu pionowego od ujęcia i jest najmniejsza dla profilu bezpośrednio przyległego do ujęcia.

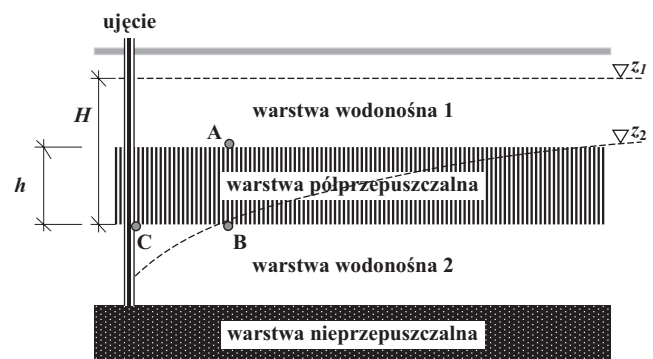
Jeśli spadek hydrauliczny wynikający z wartości H jest mniejszy niż gradient początkowy, to uwzględnienie tego gradientu prowadzi do orzeczenia o zbędności strefy ochronnej, jego zaś nieuwzględnienie wskazuje na potrzebę ustanowienia strefy. Jeśli spadek hydrauliczny jest większy od gradientu początkowego, to uwzględnienie tego gradientu spowoduje zmniejszenie obliczeniowej prędkości przepływu przez nadkład i zmniejszenie zasięgu strefy ochronnej w porównaniu z zasięgiem obliczanym z pominięciem gradientu początkowego i wpłynie korzystnie (zmniejszając) na objętość zanieczyszczeń wprowadzanych do warstwy 2 w ciągu 25 lat.

Przykład 4. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim eksploatacyjny niezmienny, obniżający powierzchnię piezometryczną poniżej stropu zbiornika (ryc. 5). W tym reżimie maksymalna wartość spadku hydraulicznego występuje na całej powierzchni obniżenia zwierciadła wody w warstwie 2 poniżej spągu nadkładu (odcinek BC). Ta wartość maksymalna równa jest H/h , gdzie H jest różnicą rzędnych zwierciadła wody w warstwie 1 i spągu nadkładu, h zaś — miąższością nadkładu. W takich warunkach hydrogeologiczno-eksploatacyjnych wzrost poboru nie spowoduje wzrostu spadku hydraulicznego w bezpośrednim sąsiedztwie ujęcia, gdyż jego wartość H/h pozostaje stała na odcinku BC przy zmianach poboru.

Wzrost poboru powoduje jednak pogłębienie i rozszerzenie lejka depresyjnego, a przez to — jeśli H/h będzie większe od gradientu początkowego — poszerzenie obszaru przesiąkania przez nadkład. Jednak i w tym reżimie uwzględnienie w obliczeniach filtracji gradientu początkowego spowoduje zmniejszenie tego obszaru przesiąkania i w konsekwencji zmniejszenie strefy ochronnej ujęcia i ładunku zanieczyszczeń w porównaniu z obliczeniami pomijającymi gradient początkowy.

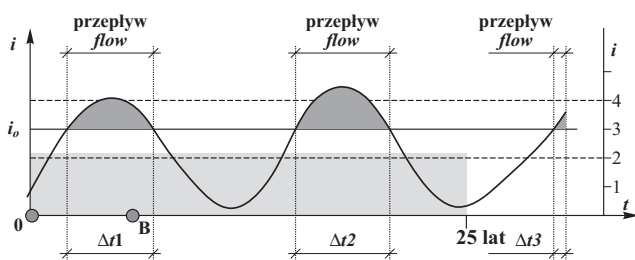
Zmienność zasilania i poboru

Ta właściwość hydrodynamicznego reżimu warstwy wodonośnej i jej otoczenia geologicznego uwzględniana jest w większości obliczeń przez zakładanie modelu ruchu ustalonego ze średnimi wartościami zasilania i poboru. Nie



Ryc. 5. Warstwa półprzepuszczalna nad eksploatowanym zbiornikiem wody podziemnej częściowo o zwierciadle swobodnym

Fig. 5. Semipermeable layer over the exploited aquifer partially with free groundwater surface



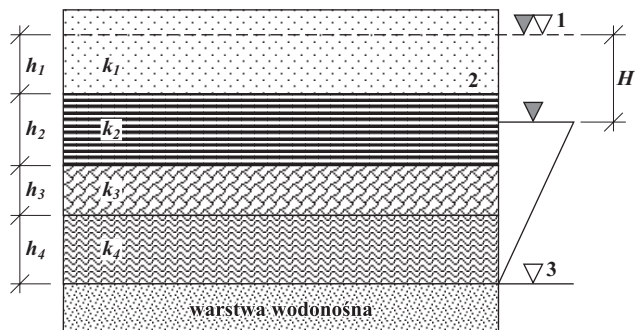
Ryc. 6. Zmiany spadku hydraulicznego między warstwami 1 i 2
 Fig. 6. Time-behaviour of hydraulic gradient between layers 1 and 2

powoduje to znaczącego odejścia od stanu rzeczywistego, gdy nie uwzględnia się gradientu początkowego. Uwzględnienie jego zmusza do uznania, że nie ma zasilania warstwy wodonośnej zanieczyszczoną wodą przesiąkającą przez nadkład w tych okresach, w których spadek hydrauliczny jest mniejszy od gradientu początkowego.

Przykład 5. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim zmienny nieeksploatacyjny. Schemat hydrogeologiczny jak w przykładzie 1 i na ryc. 2 z tym, że rzędne z_1 i z_2 powierzchni piezometrycznych są zmienne w czasie t , np. dla określonego profilu pionowego różnice tych rzędnych w niektórych momentach podzielone przez miąższość h warstwy półprzepuszczalnej dają wartość spadku hydraulicznego i w tej warstwie, którego zmienność czasową w danym profilu pionowym przedstawia ryc. 6. Pozioma linia na rzędnej i_0 wyznacza na tym wykresie przedziały czasowe Δt_1 , Δt_2 , Δt_3 , jedynie w których prawo filtracji dla gruntów spolistych dopuszcza zachodzenie przepływu wody między warstwami 1 i 2; poza tymi przedziałami filtracja jest blokowana. Dwudziestopięcioletni czas dopływu do warstwy 2 obejmuje zarówno okresy płynięcia wody Δt_i ($i = 1, 2, 3, \dots$), jak i okresy stagnacji wody między tymi przedziałami. Długość drogi, jaką przebędzie w tym czasie filtrująca woda, należy obliczać według wzoru

$$s = \int u dt = (k/n_e) \int (i - i_0) dt \quad [4]$$

tj. całkę należy obliczać jako sumę zacieniowanych pól na ryc. 6 ponad linią na rzędnej i_0 . Tak obliczoną długość drogi przepływu należy porównać z miąższością h warstwy



Ryc. 7. Schematyczny profil nadkładu 4-warstwowego nad warstwą wodonośną;

h_1, \dots, h_4 — miąższości warstw, k_1, \dots, k_4 — współczynniki filtracji pionowej

Fig. 7. Scheme of the aquifer under 4-layers cover;

h_1, \dots, h_4 — layers thickness, k_1, \dots, k_4 — vertical filtration coefficients

półprzepuszczalnej, i jeśli okaże się ona mniejsza od h , oznaczać to będzie, iż w ciągu 25 lat woda nie zdąży przepłynąć przez warstwę półprzepuszczalną, zbędne będzie zatem ustanawianie obszaru ochronnego na terenie o danych warunkach hydrogeologicznych. Niech — jak w przykładzie 1 — $h = 5$ m, $H_{gr} = 10$ m, warstwa półprzepuszczalna ma $k = 10^{-8}$ m/s, $n_e = 0,2$, $i_0 = 3$. Według powszechnie zalecanej procedury należy obliczyć przeciętny spadek hydrauliczny $i = 10/5 = 2$ i orzec, że przesączenie przez warstwę półprzepuszczalną wystąpi z prędkością przepływu według wzoru [2] $u = 10^{-8} \cdot 2 / 0,2 = 10^{-7}$ m/s, zaś czas przesiąkania wyniesie $5 \text{ m} / 10^{-7} \text{ m/s} = 5 \times 10^7 \text{ s} = 1,6$ roku. Ponieważ czas przesiąkania jest mniejszy niż 25 lat, obszar ochronny powinien objąć całą powierzchnię terenu z danymi warunkami hydrogeologicznymi. W ciągu 25 lat długość drogi przepływu wody wyniosłaby $25 \times 3,15 \times 10^7 \times 10^{-7} = 78,8$ m. Tę drogę wyraża też wielkość pola prostokąta słabo zacieniowanego na ryc. 6 pod linią na rzędnej $i = 2$, (równa 50 lat) pomnożona przez współczynnik $k/n_e = 5 \times 10^{-8}$ m/s.

Wykonując obliczenia według prawa [3], należy z okresu 25 lat na ryc. 6 zsumować pola powierzchni pod krzywą $i(t)$ znajdujące się ponad rzędnią $i_0 = 3$ (mocno zacieniowane) i tę sumę pomnożyć przez współczynnik $k/n_e = 5 \times 10^{-8}$ m/s. To pole obliczone na podstawie ryc. 6 wynosi 9,36 lat, zatem długość drogi przepływu wody w okresie 25 lat wynosi $9,36 \times 3,15 \times 10^7 \times 5 \times 10^{-8} = 14,7$ m. W tym wypadku decyzja o ochronie wód podziemnych bazująca jedynie na czasie przepływu zanieczyszczenia z warstwy 1 do warstwy 2 okazuje się taka sama, jak przy powszechnie zalecanej procedurze obliczeń. Łatwo sprawdzić, że gdyby gradient początkowy miał wartość 4 (linia pozioma kreskowa na poziomie $i = 4$ na ryc. 6), wtedy decyzja orzekałaby o zbędności obszaru ochronnego.

Jednak uwzględnienie gradientu początkowego zmniejsza znacząco obliczeniową masę zanieczyszczeń wprowadzonych z warstwy 1 do warstwy 2 w ciągu 25 lat, co może stanowić przesłankę dodatkową do podjęcia decyzji o nieustanowieniu obszaru ochronnego.

Mianowicie, w wariacie obliczeń pomijających gradient początkowy natężenie przepływu na 1 m^2 wynosi $un_e \times 1 \text{ m}^2 = 2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s}$, a objętość zanieczyszczonej wody wprowadzonej do warstwy 1 wyniesie $2 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{s} \times (25 - 1,6) \times 3,15 \times 10^7 \text{ s} = 14,7 \text{ m}^3$ (na każdy 1 m^2).

W wariacie obliczeń uwzględniających gradient początkowy natężenie przepływu q na 1 m^2 jest zmienne w czasie i objętość wody wprowadzonej do warstwy 1 należy obliczać ze wzoru:

$$V = \int q dt = k \int (i - i_0) dt \quad [5]$$

przy czym całkowanie należy rozciągnąć na okres zaczynający się w momencie ukazania się pierwszej kropli wody z warstwy 1 na stropie warstwy 2, a kończący się wraz z upływem 25 lat liczonych od momentu przeniknięcia tej kropli przez strop warstwy półprzepuszczalnej; z okresu 25 lat należy odliczyć czas potrzebny do przepływu wody przez warstwę półprzepuszczalną. Obliczenia wykonane dla danych według ryc.6 wskazują, że na przepłynięcie wody przez warstwę półprzepuszczalną (z przerwami na stagnację) trzeba 6,3 lat (od punktu 0 do punktu B). Całkowanie według wzoru [5] rozciągnięte na przedział czasu na ryc. 6 od punktu B do końca okresu 25 lat daje wartość całki równą 5,82 lat, skąd $V = 10^{-8} \times 5,82 \times 3,15 \times 10^7 = 1,83 \text{ m}^3$. Uwzględnienie gradientu początkowego pozwala uznać, że objętość zanieczyszczeń

wprowadzonych do warstwy 2 będzie stanowiła zaledwie 1,83/14,7 = 0,12 objętości prognozowanej bez uwzględnienia tego gradientu. Może to być przesłanką do wnioskowania o nieustanawianie obszaru ochronnego z powodu małego stopnia zagrożenia.

Uwagi o niektórych założeniach praktyki hydrogeologicznej

Zasięg obliczeniowy strefy ochronnej zależy nie tylko od wyżej dyskutowanych czynników, ale i od założeń przyjmowanych zarówno co do metody obliczeń, jak i co do wielkości wykorzystywanych w tych metodach. Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie tych założeń, które według autora są błędne lub wydają się bardzo słabo uzasadnione. Część z nich może być analizowana ze stanowiska hydrogeologii, część jednak leży w zakresie problematyki społecznej lub prawnej.

1. Zapotrzebowanie na wodę. Do obliczeń czasu przepływu wody w warstwie wodonośnej do ujęcia dość często przyjmuje się zapotrzebowanie zbyt daleko wybiegające w przyszłość. Jeśli nawet za dziesięć lat będzie ono odpowiadało rzeczywistości, to przecież dziś z tego powodu nie ma potrzeby ustanawiania strefy ochronnej. Właściwszym ze stanowiska hydrogeologicznego jest opracowanie rozwiązania elastycznego, w którym granice strefy ochronnej mogłyby być korygowane, stosownie do znaczących zmian zapotrzebowania na wodę.

2. Obliczeniowy pobór z ujęcia. Określonymu zapotrzebowaniu rocznemu odpowiadają określone maksymalne wartości miesięczne, dobowe, godzinowe i sekundowe. Oblicza się je wprowadzając stosowne zwiększające współczynniki nierównomierności poboru. Spotyka się obliczenia zakładające maksymalny pobór dobowy, godzinowy lub nawet sekundowy. Tymczasem ze względu na bardzo małą prędkość przepływu wody w warstwie wodonośnej zmiany tej prędkości powodowane przez chwilowe, godzinowe lub dobowe zmiany poboru nie sięgają w ruchu nieustalonym daleko od ujęcia i dla izochrony 25-letniej poprawną wartością poboru jest wartość średnia roczna, dla izochrony zaś 30-dobowej — średnia (niekiedy maksymalna) miesięczna.

3. Ekranująca rola nadkładu. Sformułowanie w ustawie Prawo Wodne (2001) o 25-letnim czasie wymiany wody w warstwie wodonośnej kłócące się z intuicją hydrogeologa o ochronnej funkcji nadkładu spowodowało niejednolitość podejścia projektantów i ekspertów do obliczania zasięgu strefy ochronnej: jedni uwzględniają, inni nie uwzględniają tej funkcji. Właściwym wydaje się uwzględnianie nadkładu, nie tylko nieprzepuszczalnego lub półprzepuszczalnego, lecz także nadkładu przepuszczalnego, o czym świadczą wyniki odpowiednich obliczeń (Macioszczyk, 1999).

4. Analiza kosztów. Nawet prawidłowe ze stanowiska hydrogeologicznego wyznaczenie granic strefy ochronnej nie oznacza konieczności bezkrytycznego jej ustanowienia. Możliwości rozwiązania zadania dostarczenia odpowiedniej wody odbiorcom są przecież rozmaite:

□ ustanowienie strefy ochronnej z dopuszczeniem określonego rodzaju i stopnia kontrolowanego (monitoring) zanieczyszczania środowiska na tym terenie z równoczesną zamianą ograniczenia działalności konkretnych użytkowników terenu na ich partycypację w podwyższonych kosztach uzdatniania wody,

□ rezygnacja z ustanowienia strefy ochronnej połączona z uzyskaniem odpowiedniego ekwiwalentu od zakładów zanieczyszczających środowisko, przeznaczonego na poprawę technologii uzdatniania wody?

□ zmiana lokalizacji ujęcia na koszt odpowiednich zakładów, jeśli warunki hydrogeologiczne na to pozwalają

□ zastosowanie odpowiednich techniczno-przyrodniczych środków czynnej ochrony ujęcia, jeśli warunki hydrogeologiczne to uzasadniają, i inne jeszcze możliwości.

5. Prawidłowy przepływ informacji. Zazwyczaj uważa się, że wystarczy o ustanowieniu strefy ochronnej powiadomić odpowiedni zakład związany z ujęciem. Konieczne jest wszakże, aby o ustanowieniu strefy byli powiadamiani wszyscy jej użytkownicy, nie tylko aktualni, lecz i ewentualni przyszli. Wymaga to odpowiednich zapisów w księgach wieczystych i odpowiedniej informacji w praktyce gospodarki terenami. Szczególnie łatwo tu o naruszenie omawianej zasady w odniesieniu do zbiorników wody podziemnej, co da się udokumentować konkretnymi przypadkami z terenu Polski.

6. Wypada zaznaczyć, że w obliczeniach (w dokumentacjach, aneksach, ekspertyzach) czasu przepływu wody przez warstwowany nadkład w strefie saturacji spotyka się nie tak rzadko błędy natury hydraulicznej. Wskazuje się tu na dwa dość typowe, oba dotyczące pionowego ku dołowi przepływu przez nadkład warstwowany według ryc.7. Pierwszy błąd polega na tym, że autorzy obliczają czas przepływu wody, niezależnie dla każdej warstwy i przy tym samym spadku hydraulicznym, obliczanym jako

$$i = H / (h_1 + h_2 + h_3 + h_4), \quad [6]$$

a następnie te czasy sumują. Nie zwracają przy tym uwagi na to, że spadki hydrauliczne w poszczególnych warstwach na ogół nie mogą być jednakowe, i na to, że ukryte w takim obliczeniu prędkości filtracji wody w poszczególnych warstwach są różne, co narusza warunek ciągłości przepływu. Przy braku rozplywu 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 [6] niezależnie od tego, czy rozważa się wędrówkę cząsteczki zanieczyszczonej wody od poziomu 1 do poziomu 3, czy też od poziomu 2 do poziomu 3 (nie ma filtracji pionowej między poziomami 1 i 2). W pierwszym wypadku ważny jest wzór [6] i uśrednianie odwrotności współczynnika filtracji na czterech warstwach, w drugim wypadku z mianownika wzoru [6] należy usunąć miąższość h_1 i uśredniać odwrotność współczynnika filtracji na sumie miąższości $h_2 + h_3 + h_4$.

Wnioski

1) Obliczenia zasięgu strefy ochronnej można według autora bardziej przybliżyć do rzeczywistości uwzględniając okoliczności zazwyczaj dziś pomijane, jak gradient początkowy, porowatość martwą i pęcherzykową, zmienność zasilania warstwy wodonośnej i zmienność poboru.

2) Nieliniowość prawa filtracji przy małych gradientach hydraulicznych i wynikający stąd tzw. gradient początkowy jest dla wielu przypadków doświadczalnie potwierdzoną właściwością przepływu wody podziemnej przez grunt spoisty w warunkach naturalnych. Uwzględnienie gradientu początkowego w obliczeniach (prędkości przepływu wody podziemnej, zasięgu strefy ochronnej ujęcia wody podziemnej, zasięgu powierzchni, na której odbywa się przesiąkanie, ładunku zanieczyszczeń wprowadzanych do warstwy wodonośnej przez przesiąkanie),

może zmniejszyć radykalnie wartości tych wielkości fizycznych (niekiedy do zera).

3) Najefektywniejsze jest uwzględnianie gradientu początkowego w wypadku nadkładu budowanego przez ropy lub grunty spoiste zwarte, nadkładu nie mającego okien hydrogeologicznych.

4) Uwzględnić gradient początkowy nadkładu można jedynie po upewnieniu się, że nadkład nie ma takich okien hydrogeologicznych, szczelin itp. i przepływ w obszarze nieliniowym nie będzie miał praktycznego znaczenia. Wymaga to stosownej analizy materiałów archiwalnych wspartej badaniami terenowymi i laboratoryjnymi. Prawdopodobieństwo nieciągłości nadkładu wzrasta bowiem wraz ze zmniejszaniem się jego miąższości.

5) Racjonalną wydaje się modyfikacja niektórych założeń przyjmowanych w obliczeniach zasięgu stref ochronnych.

6) W konsekwencji, uwzględnienie analizowanych tu czynników w obliczeniach może przynieść korzyści ekonomiczne, społeczne i ekologiczne.

7) Uwzględniając powyższe, celowe jest skierowanie wysiłku badawczego na dokładniejsze rozpoznanie praw przepływu wody gruntowej przez grunt spoisty w obszarze nieliniowym.

Literatura

- BUŁYCZEV V. G. 1974 — Mechanika dispersnych gruntov. Strojizdat, Moskva.
- CODUTO D. 1999 — Geotechnical engineering. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- CYTOVICZ N.A. 1951 (1963, 1979) — Mechanika gruntov. Gosstrojizdat, Moskva.
- CYTOVICZ N.A. & TER-MARTIROSIAN Z.G. 1981 — Osnovy prikladnoj geomechaniki v stroitelstve. Vys. Szk., Moskva.
- GOLD T. 1999 — Gorąca podziemna biosfera. Adamantan, Warszawa.
- GOLDSTEIN M.N. 1979 — Mechaniceskije svojstva gruntov. Strojizdat, Moskva.
- HAURYŁKIEWICZ J. 1996 — Analiza rozkładu reliktoowego ciśnienia porowego w warstwie jednoosiowo konsolidowanej. Z. Nauk. Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska, nr 12, Ser.: Budownictwo. Wyd. Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin: 7–50.
- HAURYŁKIEWICZ J. 1999 — Znaczenie uwzględniania gradientu początkowego w ochronie wód podziemnych. Roczn. Ochrona Środowiska, t. 1. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Koszalin, 143–156.
- KIM J., EDIL T. & PARK J. 1997 — Effective porosity and seepage velocity in column tests on compacted clay. J. Geotech. Geoenvironment. Engineering, 123: 1135–1142.
- MACIOSZCZYK T. 1999 — Czas przesączania pionowego wody jako wskaźnik stopnia ekranowania warstw wodonośnych. Prz. Geol., 47: 731–736.
- MACIOSZCZYK T., RODZIOCH A. & FRĄCZEK E. 1993 — Projektowanie stref ochronnych źródeł i ujęć wód podziemnych. Poradnik metodyczny. Min. OŚNiL, Warszawa.
- MASŁOV N. N. & KOTOV M. F. 1971 — Inżynierskaja geologija. Strojizdat, Moskva.
- MIRONENKO V. A. & SZESTAKOV V. M. 1974 — Osnovy gidrogeomechaniki. Nedra, Moskva.
- MITCHELL J.K. 1993 — Fundamentals of soil behavior. Wiley, N.Y.
- OLAŃCZUK-NEYMAN K. & WARGIN A. 1994 — Deterioration of groundwater quality at water intake plants in presence of sulfate reducing bacteria. Proceedings of The 1st International Conference on Municipal and Rural Water Supply and Water Quality, PZITS, Poznań.
- PAŁYS M. 2000 — Rozprzestrzenianie się węglowodorów ropopochodnych w gruntach i wodach podziemnych — uproszczone metody obliczeń. Mat. Sesji Nauk. z okazji Jubileuszu 70-lecia Prof. Zbigniewa Grabowskiego, Warszawa, kwiecień. 2000: 195.
- SERGEEV E. M. (red.) 1971 — Gruntovedenje. Izd. Mosk. Univ., Moskva.
- SILIN-BEKZURIN A.I. 1965 — Dinamika podzemnych vod. Izd. Mosk. Univ., Moskva.
- ULMAN-BORTNOWSKA M. (opr.) 1995 — Dokumentowanie zbiorników wód podziemnych i ustalanie zasad ochrony obszarów ich zasilania (wskazania). Min. OŚNiL, Warszawa.
- Ustawa z dn. 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (Dz. U. Nr 115, poz. 1229 z późn. zm.).
- WITCZAK S. & ŻUREK A. 2000 — Obliczenia zasięgu stref ochronnych ujęć wód podziemnych przy uwzględnieniu różnych typów porowatości. Mat. Symp. Nauk.-Techn. „Problemy wykorzystania wód podziemnych w gospodarce komunalnej”, Częstochowa: 109–115.