

# Znaczenie uwzględniania gradientu początkowego w ochronie wód podziemnych

*Janusz Hauryłkiewicz  
Politechnika Koszalińska*

Recenzent: *Barbara Namysłowska-Wilczyńska  
Politechnika Wroclawska*

## 1. Wstęp

Wody podziemne chroni się przed zanieczyszczeniem m.in. przez ustanawianie stref ochronnych źródeł i ujęć oraz obszarów ochronnych zbiorników wody podziemnej (por. [4,5]). Na terenach stref i obszarów ochronnych wprowadza się określone ograniczenia użytkowania, które muszą być rekompensowane odpowiednimi odszkodowaniami, niekiedy znacząco wysokimi. Zakres ograniczeń i wysokość odszkodowań zależą oczywiście od wielkości strefy lub obszaru ochronnego i zrozumiała jest tendencja do racjonalnego zmniejszania wielkości stref lub obszarów ochronnych.

Racjonalne określenie tej wielkości opiera się m.in. na specjalistycznych obliczeniach hydrogeologicznych związanych z przyjęciem adekwatnych modeli matematycznych i ich parametrów dla najistotniejszych czynników rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń w ośrodku gruntowo-wodnym (konwekcja, absorpcja, dyspersja, wymywanie).

Niniejsza praca dotyczy tylko konwekcji. Powszechnie przyjmowanym modelem do prognozowania rzeczywistej prędkości przemieszczania się wody podziemnej między dwoma punktami jest prawo Darcy:

$$u = k i / n_e \quad (1)$$

gdzie:

- $u$  - rzeczywista średnia prędkość przepływu wody podziemnej [m/s],
- $k$  - współczynnik filtracji [m/s],
- $i$  - gradient (spadek) hydrauliczny [-],
- $n_e$  - porowatość efektywna gruntu [-].

Z prawa Darcy korzysta się niezależnie od tego, czy grunt jest przepuszczalny, czy słabo przepuszczalny lub półprzepuszczalny (por.[1, 2]).

I tak, zasięg strefy ochronnej ujęcia ustala się sumując do wartości 25 lat czas przesiąkania przez warstwę półprzepuszczalną nadkładu i czas przepływu przez przepuszczalną warstwę wodonośną, oba czasy obliczone na podstawie tego samego prawa Darcy. Nie uwzględnia się w takim obliczeniu tego, że przepływ wody przez wiele gruntów (w tym słabo przepuszczalne, półprzepuszczalne, czy też nieprzepuszczalne grunty nadkładu) następuje praktycznie dopiero po przekroczeniu przez gradient  $i$  granicznej (początkowej) wartości  $i_o$ , która dla glin jest rzędu 5, ale dla ilów rzędu 40. Obliczenia zasięgu strefy ochronnej pomijające gradient początkowy dają wartości niekiedy radykalnie zawyżone, co ma negatywne skutki gospodarcze i społeczne.

Celem niniejszej pracy jest analiza wpływu uwzględnienia gradientu początkowego na wielkość obszaru ochronnego zbiornika lub strefy ochronnej ujęcia wody podziemnej i na ładunek przesiąkających zanieczyszczeń w kilku typowych schematach hydrogeologicznych.

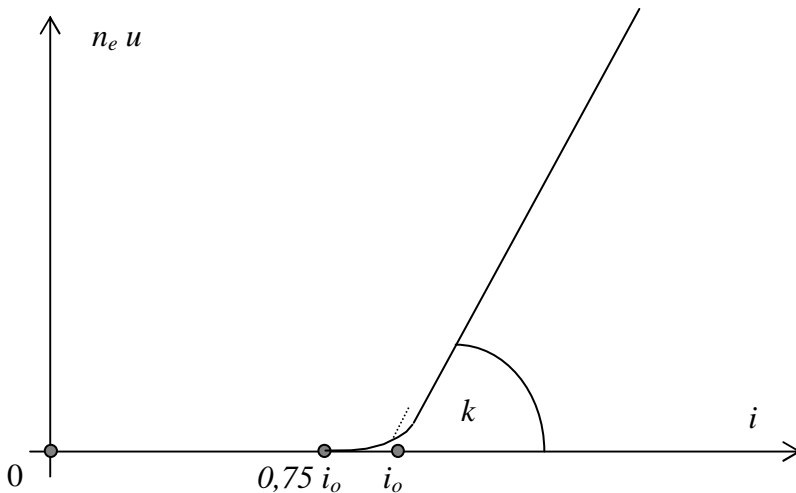
## 2. Prawo filtracji dla gruntów spoistych

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

$$u = k (i - i_o) / n_e, \quad (2)$$

gdzie:

$i_o$  - gradient początkowy, pozostałe oznaczenia - jak we wzorze (1).



**Rys. 1.** Zależność prędkości  $n_e u$  filtracji wody przez grunt od spadku hydraulicznego  $i$   
**Fig. 1.** Artificial velocity  $n_e u$  versus hydraulic gradient  $i$

Wspólny z prawem Darcy jest jedynie liniowy charakter związku prędkości przepływu ze spadkiem hydraulicznym. Wielkość  $i_o$  we wzorze (2) nie jest, ściśle mówiąc, gradientem początkowym, lecz parametrem prostoliniowej części wykresu funkcji  $n_e u(i)$  wg rys. 1. Rzeczywista wartość gradientu początkowego jest w przybliżeniu o 25% mniejsza, lecz ta nieścisłość nie ma praktycznego znaczenia (por. [3]) ze względu na bardzo mały zakres nieliniowości.

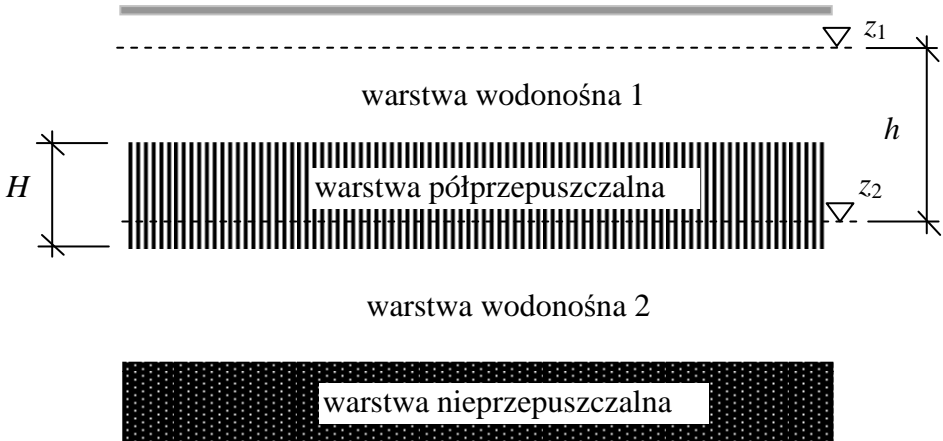
Wartość gradientu początkowego wzrasta wraz z wytrzymałością wody błonkowej w gruncie na ścinanie ([3]), a ta zależy nie tylko od średnicy porów, ale i od właściwości chemicznych zarówno wody porowej, jak i cząstek szkieletu gruntowego, dlatego należy ją wyznaczać doświadczalnie.

Prawo filtracji (2) oznacza szczelną (w określonym przedziale spadku hydraulicznego) ochronę warstwy wodonośnej przykrytej nadkładem gruntu spoistego. Ma to bezpośrednie konsekwencje dla wielkości obszaru ochronnego zbiornika lub strefy ochronnej wokół ujęcia wody podziemnej. W dalszych rozdziałach niniejszej pracy analizuje się je w kilku często spotykanych schematach warunków hydrogeologicznych. O gruntach budujących w tych schematach przestrzeni gruntową zakłada się, że są pod względem właściwości filtracyjnych jednorodne i izotropowe.

### **3. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim niezmienny**

Schemat hydrogeologiczny przedstawiony jest na rys. 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. Wpływ gradientu początkowego ilustruje się tu przykładem łatwym do uogólnienia.

Przykład 1. Niech  $H = 5$  m,  $h = 10$  m,  $i = 10 / 5 = 2$ , warstwa półprzepuszczalna ma  $k = 10^{-8}$  m/s,  $n_e = 0,2$ ,  $i_o = 3$ . Według powszechnie zalecanej procedury należy orzec, że przesączanie przez warstwę półprzepuszczalną wystąpi z prędkością przepływu wg wzoru (1)  $u = 10^{-8} \cdot 2 / 0,2 = 10^{-7}$  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 (2) dla gruntów spoistych przepływu wody przez warstwę półprzepuszczalną nie będzie, gdyż spadek hydrauliczny ( $=2$ ) jest mniejszy od gradientu początkowego ( $=3$ ). Obszaru ochronnego zatem wyznaczać nie trzeba.



**Rys. 2.** Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej, reżim stały  
**Fig. 2.** Semipermeable layer over the aquifer, constant state

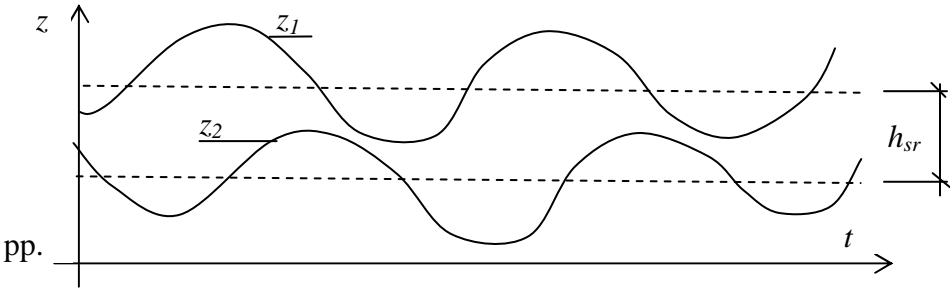
#### 4. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim zmienny nieeksploatacyjny

Schemat hydrogeologiczny jak w rozdziale 3 i na rys. 2 z tym, że rzędne  $z_1$  i  $z_2$  powierzchni piezometrycznych są zmienne w czasie  $t$ , na przykład dla określonego profilu pionowego w sposób ilustrowany wykresami funkcji  $z_1(t)$  i  $z_2(t)$  na rys. 3. Poziome linie kreskowe wyrażają średnie rzędne odpowiednich powierzchni różniące się o wartość  $h_{sr}$ , pionowe odległości między krzywymi natomiast - różnice rzędnych w niektórych momentach. Różnice te podzielone przez miąższość  $H$  warstwy półprzepuszczalnej dają wartość spadku hydraulicznego  $i$  w tej warstwie, którego zmienność czasową w danym profilu pionowym przedstawia rys.4. Pozioma linia na rzędnej  $i_o$  wyznacza na tym wykresie przedziały czasowe  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$ ,  $\Delta t_3$ , jedynie w których prawo filtracji dla gruntów spoistych (2) dopuszcza zachodzenie przepływu wody między warstwami 1 i 2; poza tymi przedziałami filtracja jest blokowana. 25-letni czas dopływu do warstwy 2 obejmuje zarówno okresy płynięcia wody  $\Delta t_i$  ( $i = 1, 2, 3, \dots$ ), jak i okresy stagnacji wody między tymi przedziałami. Długość drogi, jaką przebędzie w tym czasie filtrująca woda, należy obliczać według wzoru

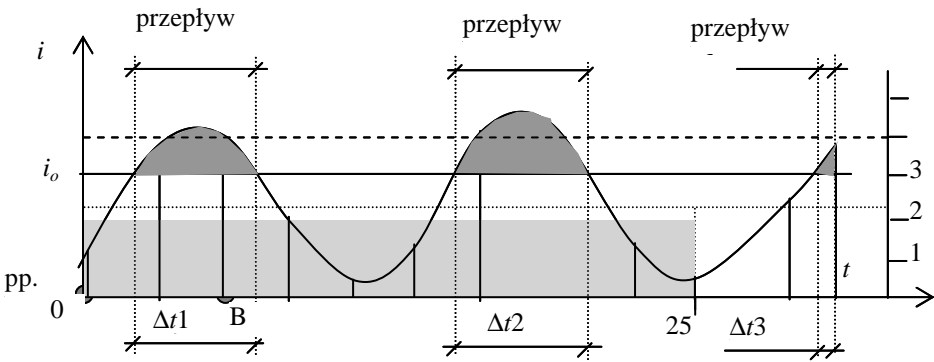
$$s = \int u dt = (k/n_e) \int (i - i_o) dt, \quad (3)$$

tj. całkę jako sumę zacieniowanych pól na rys.4 ponad linią na rzędnej  $i_o$ . Tak obliczoną długość drogi przepływu należy porównać z miąższością  $H$  warstwy 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.



**Rys. 3.** Zmiany rzędnych zwierciadła wody podziemnej w profilu pionowym warstw 1 i 2  
**Fig. 3.** Time - behaviour of groundwater heads in some profile of layers 1 and 2



**Rys. 4.** Zmiany spadku hydraulicznego między warstwami 1 i 2  
**Fig. 4.** Time - behaviour of hydraulic gradient between layers 1 and 2

*Przykład 2.* Niech – jak w przykładzie 1 -  $H = 5$  m,  $h_{sr} = 10$  m, warstwa półprzepuszczalna ma  $k = 10^{-8}$  m/s,  $n_e = 0,2$ ,  $i_o = 3$ . Według powszechnie zalecanej procedury należy obliczyć przeciętny spadek hydrauliczny  $i = 10 / 5 = 2$  i orzec, że przesączanie przez warstwę półprzepuszczalną wystąpi z prędkością przepływu wg wzoru (1)  $u = 10^{-8} \cdot 2 / 0,2 = 10^{-7}$  m/s, zaś czas przesiąkania wyniesie  $5 \text{ m} / 10^{-7} \text{ m/s} = 5 \cdot 10^7 \text{ s} = 1,6$  roku. 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  $25 \cdot 3,15 \cdot 10^7 \cdot 10^{-7} = 78,8$  m. Tę drogę wyraża też wielkość pola prostokąta słabo zacieniowanego na rys. 4 pod linią na rzędnej  $i = 2$ , (równa 50 lat) pomnożona przez współczynnik  $k / n_e = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s.

Wykonując obliczenia wg prawa (3), należy z okresu 25 lat na rys. 4 zsumować pola powierzchni pod krzywą  $i(t)$  znajdujące się ponad rzędną  $i_o = 3$  (mocno zacienione) i tę sumę pomnożyć przez współczynnik  $k / n_e = 5 \cdot 10^{-8}$  m/s. To pole obliczone na podstawie rys. 4 wynosi 9,36 lat, zatem długość drogi przepływu wody w okresie 25 lat wynosi  $9,36 \cdot 3,15 \cdot 10^7 \cdot 5 \cdot 10^{-8} = 14,7$  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 rys. 4), 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  $1 \text{ m}^2$  wynosi  $u n_e \cdot 1 \text{ m}^2 = 2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{s}$ , a objętość wody wprowadzonej do warstwy 1 wyniesie  $2 \cdot 10^{-8} \text{ m}^3 / \text{s} \cdot (25-1,6) \cdot 3,15 \cdot 10^7 \text{ s} = 14,7 \text{ m}^3$  (na każdy  $1 \text{ m}^2$ ).

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

$$V = \int q dt = k \int (i - i_o) dt, \quad (4)$$

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 wg rys. 4 wskazują, że na przepłynięcie wody przez warstwę półprzepuszczalną (z przerwami na stagnację) trzeba 6,3 lat (od punktu 0 do punktu B na rys. 4). Całkowanie wg wzoru (4) rozciągnięte na przedział czasu na rys. 4 od punktu B do końca okresu 25 lat daje wartość całki równą 5,82 lat, skąd

$$V = 10^{-8} \cdot 5,82 \cdot 3,15 \cdot 10^7 = 1,83 \text{ m}^3.$$

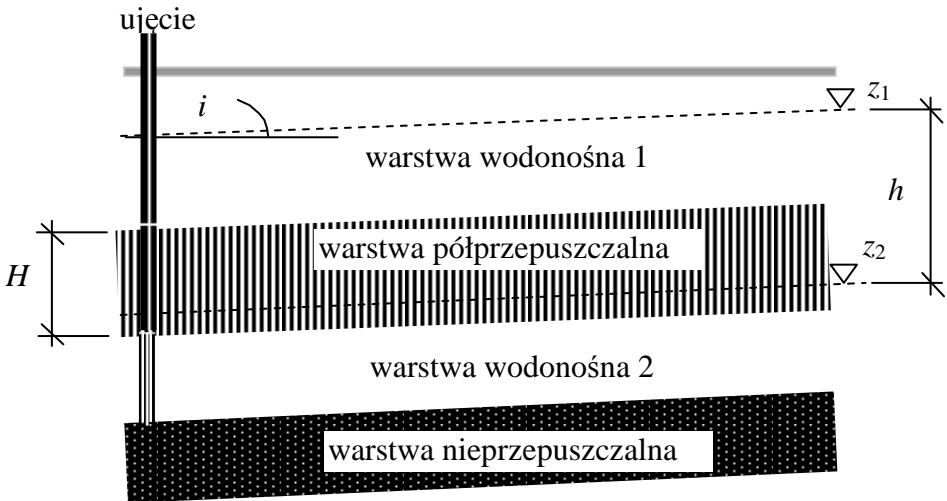
Uwzględnienie gradientu początkowego pozwala uznać, że objętość zanieczyszczeń wprowadzonych do warstwy 2 będzie stanowiła zaledwie  $1,83/14,7 = 0,12$  objętości prognozowanej bez uwzględnienia tego gradientu. Może to być przesłanką do wnioskowania o nieustanawianiu obszaru ochronnego z powodu małego stopnia zagrożenia.

## 5. Warstwa półprzepuszczalna nad strumieniem wody podziemnej. Reżim niezmienny w warunkach braku eksploatacji ujęcia

Schemat hydrogeologiczny przedstawiony jest na rys. 5. 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 przesączenia się zanieczyszczonej wody z warstwy 1 do warstwy 2 i ewentualny zasięg strefy ochronnej aktualnie nieczynnego ujęcia w górę strumienia.

**Przykład 3.** Niech – jak w przykładzie 1 -  $H = 5$  m,  $h_{sr} = 10$  m, warstwa 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 wariancie 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 (1)  $10^{-3} * 10^{-3} / 0,3 = 3,33 * 10^{-6}$  m/s, i 23,4-letnia droga przepływu wynosi  $3,33 * 10^{-6} * 23,4 * 3,15 * 10^7 = 2455$  m. Strefa ochronna ujęcia powinna zatem sięgać w górę strumienia na odległość 2,5 km.



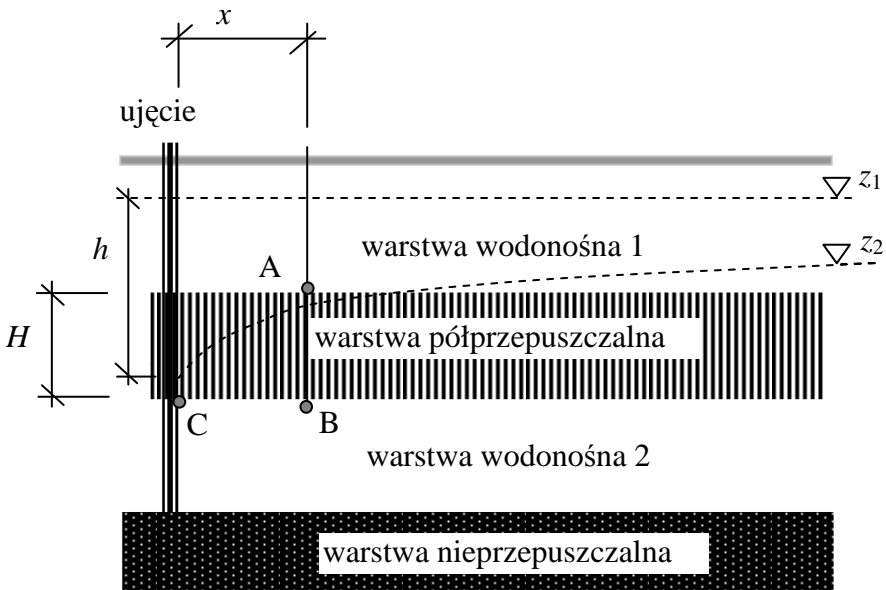
**Rys. 5.** Warstwa półprzepuszczalna nad strumieniem wody podziemnej  
**Fig. 5.** Semipermeable layer over the groundwater stream

W wariancie 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.

Powyższe rozważania dotyczące reżimu niezmiennego można rozszerzyć na reżim zmienny analogicznie do rozdziału 4.

## 6. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim eksploatacyjny niezmienny, nie obniżający powierzchni piezometrycznej poniżej stropu zbiornika

Schemat hydrogeologiczny przedstawiony jest na rys. 6. W takim reżimie eksploatacyjnym do każdego profilu pionowego w leju depresyjnym można odnieść ustalenia rozdziału 3. 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 według procedury rozdziału 3, tzn. za spadek  $i$  przyjąć należy wartość  $h/H$  według oznaczeń na rys. 6.



**Rys. 6.** Warstwa półprzepuszczalna nad eksploatowanym zbiornikiem wody podziemnej  
**Fig. 6.** Semipermeable layer over the exploited aquifer



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 konsekwencji wzrost zasięgu strefy ochronnej ujęcia.

W tym schemacie hydrogeologicznym suma czasu przesiąkania przez nadkład (odcinek AB na rys. 6) 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.

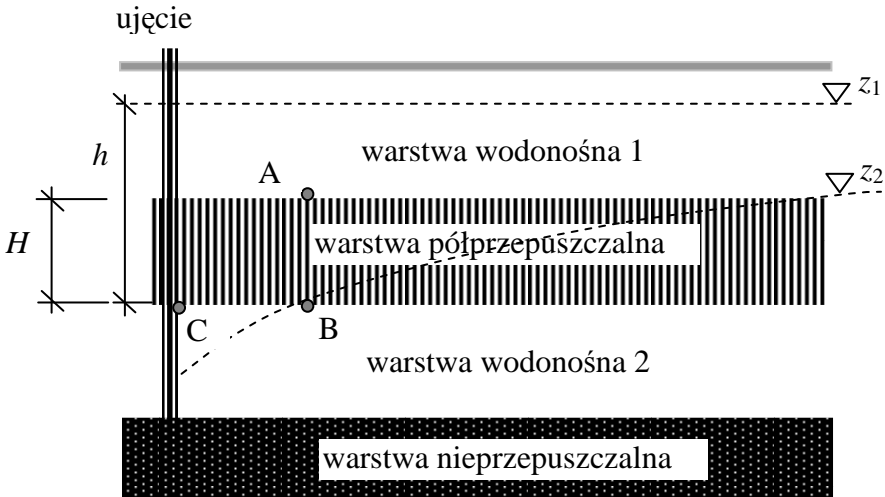
Jeśli spadek hydrauliczny wynikający z wartości  $h$  jest mniejszy niż gradient początkowy, to uwzględnienie tego gradientu prowadzi do orzeczenia o zbędności strefy ochronnej, jego zaś nieuwzględnienie wskazuje na potrzebę ustanowienia strefy. Jeśli spadek hydrauliczny jest większy od gradientu początkowego, 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. Podobnie też do przykładu 2 uwzględnienie gradientu początkowego wpływa korzystnie (zmniejszająco) na objętość zanieczyszczeń wprowadzanych do warstwy 2 w ciągu 25 lat.

Powyższe rozważania dotyczące reżimu niezmiennego w przypadku zbiornika dają się rozszerzyć na reżim zmienny analogicznie do rozdziału 4 i na strumień wody podziemnej analogicznie do rozdziału 5.

## **7. Warstwa półprzepuszczalna nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim eksploatacyjny niezmienny, obniżający powierzchnię piezometryczną poniżej stropu zbiornika**

Schemat hydrogeologiczny przedstawiony jest na rys. 7. W tym reżimie maksymalna wartość spadku hydraulicznego występuje na całej powierzchni obniżenia zwierciadła wody w warstwie 2 poniżej spągu nadkładu (rys. 7, 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 przy zmianach poboru.

Wzrost poboru powoduje jednak pogłębienie i rozszerzenie leja 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 powoduje zmniejszenie tego obszaru przesiąkania i w konsekwencji zmniejszenie strefy ochronnej ujęcia w porównaniu z obliczeniami pomijającymi gradient początkowy.



**Rys. 7.** Warstwa półprzepuszczalna nad eksploatowanym zbiornikiem wody podziemnej częściowo o zwierciadle swobodnym.

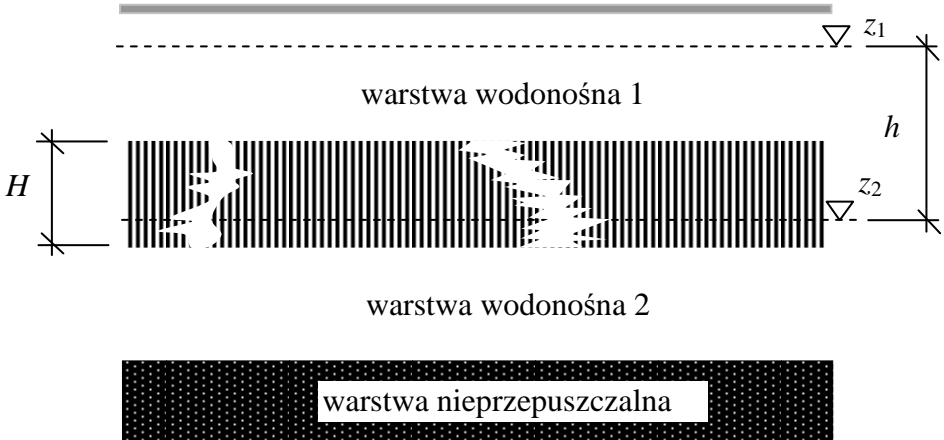
**Fig. 7.** Semipermeable layer over the exploited aquifer partially with free groundwater surface

## 8. Warstwa półprzepuszczalna z oknami hydrogeologicznymi nad zbiornikiem wody podziemnej. Reżim niezmienny

Schemat hydrogeologiczny przedstawia rys. 8. W warstwie półprzepuszczalnej występują nieregularnie rozmieszczone okna hydrogeologiczne zbudowane z gruntu przepuszczalnego, mające zmienne przekroje i nachylenia. Niech  $j$ -temu oknu hydrogeologicznemu będą przyporządkowane: taki sam przepuszczalny grunt o współczynniku filtracji  $k_p$ , średni przekrój poprzeczny  $f_j$ , spadek hydrauliczny  $i_j$ , gliniastej warstwie półprzepuszczalnej natomiast: grunt o współczynniku filtracji  $k_g$ , średni przekrój poprzeczny  $f_g$ , spadek hydrauliczny  $i_g$ , gradient początkowy  $i_o$ .

W wariacie obliczeń pomijających gradient początkowy sumaryczny przepływ zanieczyszczonej wody z warstwy 1 do warstwy 2 na rozważanym obszarze oblicza się jako

$$Q_p = k_p \sum i_j f_j + k_g i_g f_g . \quad (5)$$



**Rys. 8.** Warstwa półprzepuszczalna z oknami hydrogeologicznymi nad zbiornikiem wody podziemnej, reżim niezmienny

**Fig. 8.** Semipermeable layer with hydrogeological windows over the aquifer, steady state

W wariacie obliczeń uwzględniających gradient początkowy przepływ ten obliczać należy jako:

$$Q_u = k_p \sum i_j f_j + k_g (i_g - i_o) f_g. \quad (6)$$

Rozważyć należy dwa wypadki. W pierwszym, gdy  $i_g < i_o$ , stosunek  $Q_p / Q_u = q$  ma postać:

$$q = (k_p \sum i_j f_j + k_g i_g f_g) / k_p \sum i_j f_j = 1 + k_g i_g f_g / k_p \sum i_j f_j, \quad (7)$$

przy czym zazwyczaj  $k_g / k_p = 10^{-8} / 10^{-3} = 10^{-5}$ ,  $i_g / i_j \approx 1$ ,  $f_g / \sum f_j \approx 10 - 10^6$ , zatem wartość  $q$  jest zawsze większa od jedności, ale bardzo mocno zależy od stosunku powierzchni budowanej przez gliny do sumarycznej powierzchni okien hydrogeologicznych budowanych przez piaski. Wpływ sposobu obliczania przepływu zaczyna być znaczący dopiero przy stosunku tych powierzchni równym  $10^5$  (wtedy  $q = 2$ ); przy stosunku powierzchni równym  $10^6$   $q = 11$ .

W drugim wypadku, gdy  $i_g > i_o$ , stosunek  $Q_p / Q_u = q$  ma postać:

$$q = (k_p \sum i_j f_j + k_g i_g f_g) / (k_p \sum i_j f_j + k_g (i_g - i_o) f_g) = \quad (8)$$

$$\approx (1 + 10^{-5} f_g / \sum f_j) / (1 + 10^{-5} (1 - i_o / i_p) f_g / \sum f_j),$$

której wartość zależy nie tylko od stosunku powierzchni nadkładu do powierzchni okien hydrogeologicznych, ale i od stosunku gradientu początkowego do spadku hydraulicznego w danym reżimie. Przykładowo, przy stosunku powierzchni równym  $10^6$  i spadku hydraulicznym nieznacznie przekraczającym gradient początkowy, wartość  $q$  jest rzędu 11, zaś przy stosunku powierzchni równym  $10^5$  oraz  $i_o / i_p = 0,5$  wartość  $q$  jest równa już tylko 1,3. Zawsze jednak  $q > 1$ .

Ponieważ wartość  $q$  wyraża też stosunek między obliczeniowymi ładunkami zanieczyszczeń wprowadzanych do warstwy 2 w dwóch wariantach obliczeń, więc przy małych stosunkowo oknach hydrogeologicznych strefa ochronna może być niepotrzebna, jeśli uwzględni się gradient początkowy.

## 9. Wnioski

- 1) Gradient początkowy jest doświadczalnie potwierdzoną właściwością gruntu spoistego, jednak niewykorzystywaną z reguły w obliczeniach hydrogeologicznych dotyczących określenia obszaru ochronnego zbiornika lub strefy ochronnej źródła lub ujęcia wody podziemnej.
- 2) Uwzględnienie gradientu początkowego w obliczeniach
  - prędkości przepływu wody podziemnej,
  - zasięgu obszaru ochronnego zbiornika lub strefy ochronnej ujęcia wody podziemnej,
  - zasięgu powierzchni, na której odbywa się przesiąkanie,
  - ładunku zanieczyszczeń wprowadzanych do warstwy wodonośnej przez przesiąkanie,zmniejsza 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) Efektywność uwzględniania gradientu początkowego może być niska w wypadku nadkładu mającego okna hydrogeologiczne o sumarycznej powierzchni (rzutu poziomego) większej niż  $10^5$  powierzchni tego nadkładu.
- 5) W konsekwencji, uwzględnienie gradientu początkowego w obliczeniach przynosi korzyści ekonomiczne, socjologiczne i ekologiczne.
- 6) Przykładowe obliczenia dla typowych warunków hydrogeologicznych dowodzą, że nierzadko można nawet zrezygnować z ustanawiania obszaru ochronnego lub strefy ochronnej.

## Literatura

1. *Dokumentowanie zbiorników wód podziemnych i ustalanie zasad ochrony obszarów ich zasilania (wskazania)*; [opr. **M. Ulman-Bortnowska**] Min.OŚZNiL, Warszawa, 1995.
2. **Macioszczyk T., Rodzoch A., Frączek E.:** *Projektowanie stref ochronnych źródeł i ujęć wód podziemnych. Poradnik metodyczny*. Min.OŚZNiL, Warszawa, 1993.
3. **Mironenko V. A., Szestakov V. M.:** *Osnovy gidrogeomechaniki*; Nedra, Moskwa, 1974.
4. Rozporządzenie Ministra Ochrony Środowiska, Zasobów Naturalnych i Leśnictwa z dnia 5 listopada 1991 r. w sprawie zasad ustanawiania stref ochronnych źródeł i ujęć wody (Dz. U. Nr 116, poz.504).
5. Ustawa z dnia 24 października 1974 r. – *Prawo wodne* (Dz. U. Nr 38, poz. 230 z późn. zm.).

## The significance of taking into account of initial gradient for groundwater protection

### Abstract

Taking account of initial gradient of cohesive soils has been referred as well as how it affects calculations of:

- groundwater flow velocity,
- extent of groundwater conservation area
- water supply protection zone
- percolation area and related pollutant load of aquifer.

It has been stated that mentioned above quantities decrease considerably when the initial gradient is regarded and that calculations result in big economical, social and ecological profits.

Taking the initial gradient into consideration radically decreases following physical values during calculation of:

- underground water flow velocity,
- tank's protective terrain range
- protective zone of underground water taking,
- surface range, on which there is soaking
- contamination load inserted to water-bearing layer due to soaking.

The most efficient is taking the initial gradient into consideration the initial gradient in the case of overcoater built by silt or coherent compact grounds.

Efficiency of taking the initial gradient into consideration may be low in the case of overcoater, which hydrogeological windows surface is greater than  $10^{-5}$  of surface of this overcoater.

Taking the initial gradient into consideration in calculations gives economical, sociological and ecological benefits – hypothetical calculations for the typical hydrogeological conditions prove, that frequently setting protective terrain or protective zone may be avoided.

Groundwater should be protected against pollution among other things by means of establishing of conservation areas or water supply zones. The extent of such area or zone should be large enough for properly long time of contaminated water seepage towards aquifer or intake.

If aquifer is confined essential time is taken for water vertical seepage in semipermeable layer covering the aquifer. This time is usually assessed provided that Darcy's flow law is valid. However one can take initial gradient in the covering layer into account and get considerable increasing of the water seepage time, substantial decreasing of the protection area extent and pollutant load of aquifer drop as well.

Examples are given of how taking initial gradient into account affects calculations of:

- groundwater flow velocity,
- extent of protection area
- related pollutant load.

Some typical hydrogeological conditions are in these examples examined:

- semipermeable layer over the aquifer in stable state and in unstable state,
- the same layer covering the groundwater stream,
- the exploited confined aquifer,
- the exploited partially unconfined aquifer, covering layer with permeable hydrogeological windows.

In all these cases the protection area decreases or even appears needless which results in big economical, social and ecological profits. In the case of covering layer with permeable hydrogeological windows these profits exist but aren't so large as in other cases: considerable effect appears when hydrogeological windows area is less than  $10^{-6}$  of covering layer area.