

Czas przesączania pionowego wody jako wskaźnik stopnia ekranowania warstw wodonośnych

Tadeusz Macioszczyk*

Oceny czasów przesączania pionowego wody w strefie aeracji (nienasyconej) wykonywane w oparciu o najczęściej wykorzystywane wzory wykazują znaczne, niczym nieuzasadnione różnice. Dotyczy to również stosowanych u nas wzorów Witczaka i Żurek oraz Bindemana. Wzory te różni sposób wyznaczania średniej rzeczywistej prędkości przesączania pionowego. W pierwszym przypadku z rocznej infiltracji efektywnej J_E po podzieleniu przez wilgotność objętościową w_{0i} strefy aeracji. We wzorze Bindemana jest to prędkość oszacowana jako wartość pierwiastka trzeciego stopnia z iloczynu kwadratu tejże infiltracji efektywnej ω ($J_E = \omega$) i współczynnika filtracji pionowej k' , po podzieleniu przez porowatość aktywną n_0 . Dla uwiarygodnienia otrzymywanych ocen autor proponuje wykorzystywać formułę Bindemana z zamianą w niej porowatości aktywnej n_0 na wilgotność objętościową w_{0i} tak jak w propozycji Witczaka i Żurek (1994). Proste eksperymenty numeryczne pokazują, że oceny tak zmodyfikowanym wzorem stają się wyraźnie bardziej racjonalnymi. Unikamy przeceniania ekranującej roli utworów dobrze przepuszczalnych (przez 5 m warstw żwirów piaszczystych czas przesączania spada z 3,33 lat do 29 dni) z utrzymaniem w racjonalnych granicach ekranującej roli ilów, gdyż czas przesączania spada z 33,2 lat tylko do 21,1 lat. Otrzymane wyniki są też racjonalniejszymi względem wyników otrzymanych z oryginalnego wzoru Bindemana, które wynosiły odpowiednio: 83 dni dla piasków oraz 1,9 lat dla ilów. W artykule podano także wzór dla przypadku warstw niejednorodnych (z wtórnym rozwarstwieniem strefy aeracji na wiele warstw jednorodnych), a także wzory na przesączanie przez warstwy rozdzielające przy pełnym nasyceniu.

Słowa kluczowe: czas przesączania pionowego, strefa aeracji i saturacji, stopień wrażliwości warstw wodonośnych

Tadeusz Macioszczyk— **Time of the vertical seepage as an indicator of the aquifers' vulnerability.** Prz. Geol., 47: 731–736.

S u m m a r y. The most frequently used formulas for the assessment of the vertical seepage time in the unsaturated zone produce the unfounded differences in the obtained results. The same is in Poland with the Witczak and Żurek as well as Bindeman formula. These formulas differently determine the vertical seepage average real velocity. In the first case this velocity equals the annual effective infiltration J_E divided by the volumetric moisture w_{0i} in the unsaturated zone. In the Bindeman formula the velocity is estimated as the 3rd degree of a root of the product of the square of the effective infiltration ω ($J_E = \omega$) and the vertical hydraulic conductivity k' and then divided by the active porosity n_0 . To make the estimates reliable the author proposes to use the Bindeman formula replacing the active porosity n_0 with the volumetric moisture w_{0i} as proposed by Witczak and Żurek. Simple numerical experiments show that the estimates obtained from such modified formula become explicitly more rational. We avoid to overestimate the vulnerability role of the high permeable soils (in case of sandy gravel 5 m thick the seepage time falls from 3.33 years to 29 days) keeping the clay vulnerability role within the rational limits as the seepage time falls only from 33.2 to 21.1 years. The obtained results are more rational with regard to the results obtained from the original Bindeman formula which amount to 83 days for sands and 1.9 years for clays respectively. The paper also presents the formula for the case of non-homogeneous layers (with the subdivision of the unsaturated zone into a number of the homogeneous sublayers) — as well as the seepage estimate formulas for the saturated separating layers.

Key words: time of the vertical seepage, saturated and unsaturated zone, aquifers' vulnerability

Ocena podatności warstw wodonośnych na zanieczyszczenia z powierzchni należy do najważniejszych zadań hydrogeologa, przy określaniu zasad ochrony wód podziemnych zarówno w skali regionalnej, jak i w skali poszczególnych ujęć i źródeł wód podziemnych. Szczególnie jest to istotne przy określaniu zasad ochrony Głównych Zbiorników Wód Podziemnych, tj. przy wyznaczaniu obszarów ochronnych dla tych zbiorników, jak też przy projektowaniu i ustanawianiu stref ochronnych ujęć i źródeł wód podziemnych. W przypadku GZWP wypracowano w tej mierze jako kryterium czas dopływu wody do warstwy wodonośnej GZWP (Kleczkowski i in., 1991), a w przypadku stref ochronnych ujęć, obligatoryjnie jako kryterium ich wymiarowania przyjęto czas dopływu wody do ujęcia (Rozporządzenie MOŚNiL z 5.11.1991 r.). W obu przypadkach ocena czasu przesączania przez strefę aeracji oraz przez rozdzielające warstwy słabo przepuszczalne ma

istotne znaczenie przy wymiarowaniu stref ochronnych. Dokładność i poprawność tego szacunku wpływa więc bezpośrednio na koszty organizacji i utrzymywania stref ochronnych. Koszty te w przypadku obszarów ochronnych GZWP obciążają budżet, a więc każdego obywatela — koszty dotyczące stref ochronnych natomiast obciążają dysponenta ujęć i wpływają wprost na cenę produkowanej wody, są to więc również koszty społeczne, jako że konsumentem wody jest cała społeczność lokalna, związana z określonym systemem zaopatrzenia w wodę.

W przedstawionej sytuacji do powszechnej praktyki hydrogeologicznej wchodzi obowiązek oceny czasów przesączania pionowego zarówno przez strefę aeracji, jak i przez warstwy rozdzielające. Obserwuje się, jak zwykle w początkach wykorzystania nowych metod stosunkowo dużo niepewności, a nawet niepoprawności przy szacowaniu czasu przesączania zarówno przez strefę aeracji, jak i przez warstwy nasycone i warstwy rozdzielające. Występuje wiele kontrowersji, a nawet pytań zgłaszanych do Komisji Dokumentacji Hydrogeologicznych i to niezależnie od faktu, że problemom tym poświęca się stosunkowo dużo uwagi w piśmiennictwie hydrogeologicznym (Bury, 1995; Kleczkowski i in., 1991; Macioszczyk, 1995;

*Wydział Geologii, Uniwersytet Warszawski, ul. Żwirki i Wigury 93, 02-089 Warszawa

Macioszczyk i in., 1993, 1994; Rodzoch, 1997; Szczepański & Szklarczyk, 1995; Witczak & Żurek, 1994). Dodajmy, że sprawa z metodycznego i teoretycznego punktu widzenia wcale nie jest prosta i jednoznaczna. Pierwszym problemem dyskusyjnym, jest tu problem jednoznacznego określenia, że zgodnie z przepisami w obliczeniach, o których mowa, chodzi o tzw. „rzeczywistą” prędkość przesączania się wody, nie zaś o prędkość przenoszenia się frontu zanieczyszczenia (czy też maksimum fali zanieczyszczenia), która jest zawsze, ze względu na opóźnienie, mniejsza. Odpowiada więc to tzw. modelowi tłokowemu, co jest równoznaczne z zachowaniem pewnego rodzaju współczynnika bezpieczeństwa, gwarantującego to, że zanieczyszczenie powinno się w ujęciu (bądź w warstwie) pojawić później niż wynikać to będzie z oszacowanego czasu dopływu wody.

W przypadku wymiarowania stref ochronnych ujęć i źródeł przyjmuje się, że strefa ochronna obejmuje obszar spływu wody do ujęcia, a w przypadku, gdy jest on bardzo duży, część tego obszaru ograniczoną izochroną 25 lat (dla terenu wewnętrznego 30 dni). Obszary te powinny być wyznaczane zawsze, nawet w przypadku, gdy stopień ekranowania będzie uzasadniał możliwość rezygnacji z ustanawiania terenu ochrony pośredniej. Zarówno właściciel ujęcia jak i organa zajmujące się gospodarowaniem terenem będą mogły świadomie nadzorować postępujący stopień rozpoznania warunków hydrogeologicznych i ewentualnie korygować lub aktualizować decyzje wyznaczające granice strefy ochronnej.

Wspomniane niejednoznaczności i obserwowane różnice w podejściu do obliczeń czasu pionowego przesączania wody jako wskaźnika stopnia ekranowania warstw wodonośnych od powierzchni, w tym również zapytania skierowane do Komisji Dokumentacji Hydrogeologicznych skłaniają autora do przedstawienia swego rodzaju uwag podsumowujących problematykę oszacowań czasu przesączania pionowego.

Ocena czasu przesączania pionowego w warstwach o pełnym nasyceniu

Przesączanie pionowe przy pełnym nasyceniu występuje bądź jako przesączanie międzywarstwowe przez warstwy rozdzielające i odbywa się wtedy pod wpływem spadku hydraulicznego, wynikającego z różnicy stanów w sąsiadujących warstwach wodonośnych, bądź jest to przesączanie o swobodnym charakterze, dla którego przyjmuje się, że odbywa się przy spadku hydraulicznym równym jedności, co jest równoznaczne z założeniem, że jest to przesączanie pod wpływem własnego ciężaru wody. Ta druga sytuacja występuje przykładowo w słaboprzepuszczalnych warstwach zawieszonych lub w pewnym sensie w układzie warstwy wodonośnej o zwierciadle napiętym z warstwą słaboprzepuszczalną w nadkładzie wykształconą aż do powierzchni terenu. Do sprawy tej powrócimy pod koniec artykułu.

Ocena czasu przesączania międzywarstwowego przez rozdzielający kompleks słaboprzepuszczalny

Przy tej ocenie dopuszczalne jest założenie, że straty filtracyjne są ograniczone do strat przy przepływie pionowym tylko w warstwie rozdzielającej oraz, że do pominięcia jest tu wpływ gradientu początkującego filtrację. Przy

tych założeniach czas przesączania przez rozdzielającą warstwę wyraża formuła:

$$t_p = m' / U', \quad [1]$$

gdzie: m' — miąższość rozdzielającej warstwy słaboprzepuszczalnej — [m],

U' — prędkość „rzeczywista” przesączania pionowego rozumiana jako stosunek prędkości filtracji v' do porowatości aktywnej rozdzielającej warstwy słaboprzepuszczalnej n_0 :

$$U' = v' / n_0 \quad [m/a].$$

Tu warto uzmysłwić, że we wzorze [1] musi być przyjęta wartość prędkości rzeczywistej przesączania wody U' , a nie prędkość filtracji v' (co zdarza się niestety w niektórych opracowaniach), która jest przecież wielkością fikcyjną, odniesioną do przepływu przez przekrój skały, w której odbywa się filtracja, a nie do przekroju efektywnego równego przekrojowi przestrzeni porowej.

Z prawa Darcy'ego, uwzględniając [1] można więc wyznaczyć czas przesączania pionowego jako:

$$t_p = \frac{m'^2 \times n_0}{k' \times \Delta H} \quad [2]$$

gdzie:

k' — pionowy współczynnik filtracji warstwy rozdzielającej — [m/a],

ΔH — różnica stanów w sąsiadujących, rozdzielonych słaboprzepuszczalną warstwach wodonośnych:

$$\Delta H = (H_1 - H_2)$$

gdzie:

H_1, H_2 — stany w sąsiadujących warstwach wodonośnych, [m].

Sprawa wyraźnie komplikuje się, w przypadku gdy rozdzielający kompleks jest niejednorodny. Przyjmując niejednorodność uporządkowaną w postaci rozwarstwienia na poszczególne warstewki jednorodne o kolejnych miąższościach m'_i i współczynnikach filtracji k'_i . Czas przesączania pionowego przez taki kompleks o miąższości $m' = \sum m'_i$ ocenić można jako:

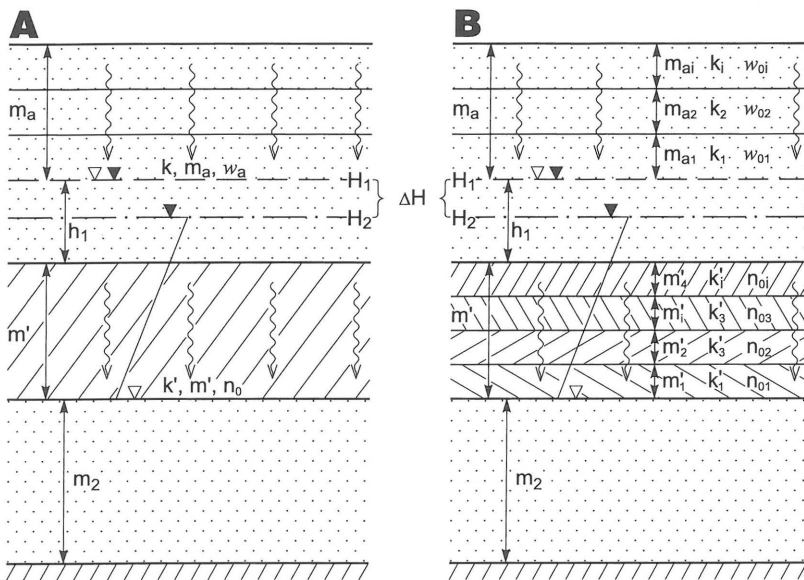
$$t_p = \frac{\sum m'_i}{U'_{sr}} \quad [3]$$

$$\text{z tym, że: } U'_{sr} = \left(\frac{k'}{n_0} \right)_{sr} \times I'_{sr} \quad [4]$$

W analizowanym przypadku występuje przepływ prostopadły do uwarstwienia, stąd wartość średnią $(k'/n_0)_{sr}$ wyznaczmy ze wzoru:

$$\left(\frac{k'}{n_0} \right)_{sr} = \frac{\sum m'_i}{\sum \frac{m'_i \times n_{0i}}{k'_i}} \quad [5]$$

Po uwzględnieniu, że $I'_{sr} = \sum \Delta H_i / \sum m'_i = \Delta H / m'$ otrzymamy:



Ryc. 1. Schemat pionowego przesączania wody przez jednorodną (A)/niejednorodną (B) strefę aeracji i przez jednorodną (A)/niejednorodną (B) słaboprzepuszczalną rozdzielającą warstwę

m_a, m_{ai} — miąższość strefy aeracji, miąższość i -tego przewarstwienia strefy aeracji, [L]; h_1, m_2 — miąższość warstwy o zwierciadle swobodnym, o zwierciadle napiętym, [L]; $m', \sum m'_i$ — miąższość rozdzielającej warstwy słaboprzepuszczalnej jednorodnej i niejednorodnej, [L]; i — nr kolejnego przewarstwienia strefy aeracji lub rozdzielającej warstwy słaboprzepuszczalnej, [1]; H_1, H_2 — stany warstwy o zwierciadle swobodnym i napiętym, [L]; n_0, n_{0i} — porowatość aktywna rozdzielającej warstwy słaboprzepuszczalnej i jego i -tego przewarstwienia, [1]; w_0, w_{0i} — wilgotność objętościowa strefy aeracji i jego i -tego przewarstwienia, [1]; k, k_i — współczynnik filtracji strefy aeracji i i -tego jej przewarstwienia, [L/T]; k', k'_i — j.w. słaboprzepuszczalnej warstwy rozdzielającej

Fig. 1. Scheme of vertical seepage through the homogeneous (A)/non-homogeneous (B) unsaturated zone and the homogeneous (A)/non-homogeneous (B) semi-permeable separating layer.

m_a, m_{ai} — thickness of the unsaturated zone, thickness of the i -th interbedding in the unsaturated zone, [L]; h_1, m_2 — thickness of the unconfined, confined aquifer [L]; $m', \sum m'_i$ — thickness of the the homogeneous and non-homogeneous semi-permeable separating layer, [L]; i — index of the successive interbedding in the unsaturated zone or semi-permeable separating layer, [1]; H_1, H_2 — hydraulic head in the unconfined and confined aquifer, [L]; n_0, n_{0i} — active porosity of the semi-permeable separating layer and its i -th interbedding, [L]; w_0, w_{0i} — volumetric moisture of the unsaturated zone and its i -th interbedding, [L]; k, k_i — hydraulic conductivity of the unsaturated zone and its i -th interbedding, [L/T]; k', k'_i — hydraulic conductivity of the semi-permeable separating layer, [L/T]

$$t_p = \frac{m'}{\Delta H} \times \sum \frac{m'_i \times n_{0i}}{k'_i} \quad [6]$$

Należy zauważyć, że powyższy wzór można wykorzystać również w wersji z uwzględnieniem przesączania pionowego zarówno przez rozdzielające warstwy słaboprzepuszczalne jak i przez nadległą warstwę wodonośną o zwierciadle swobodnym, traktując ją jak dodatkowe przewarstwienie.

Strukturę i sens fizyczny wielkości, przedstawionych i dalej wymienionych wzorów, dodatkowo ilustruje ryc. 1 przedstawiająca schemat przesączania wody między warstwami.

Ocena czasu przesączania pionowego przy niepełnym nasyceniu, tj. przez strefę aeracji

a) Ocena czasu przesączania według formuły zaproponowanej przez Witczaka i Żurek (1994):

$$t_a = \sum_1^n \frac{m_{ai} \times w_{0i}}{J_E} \quad [8]$$

gdzie:

m_{ai} — miąższość kolejnych przewarstwień, [m],

t_a — czas przesączania pionowego, [a],

w_{0i} — przeciętna wilgotność objętościowa kolejnych przewarstwień strefy aeracji, [1],

J_E — infiltracja efektywna roczna ($J_E = P \times w$), [m/a],

P — wysokość opadów roczna, [m/a],

w — wskaźnik infiltracji efektywnej, [1],

i — nr kolejnego przewarstwienia,

n — liczba przewarstwień.

Założono więc, bez bliższego uzasadnienia, że szybkość przesączania pionowego w strefie aeracji zależy wprost od intensywności infiltracji efektywnej, a przejście do jej wartości „rzeczywistej” a więc prędkości w przestrzeni porowej (nie w pełni wysyczonej) osiąga się na drodze podzielenia przez wilgotność objętościową utworów. Autorzy zalecają przyjmowanie wartości tego parametru za Wiłunem (1987) dla skał luźnych oraz dla skał litych według ich ocen na podstawie analizy danych z innych źródeł bibliograficznych (Witczak & Żurek, 1994). Wartości w_0 zmieniają się w szerokim zakresie od 0,067 dla żwirów i rumoszu nie zailonego do 0,38÷0,49 dla ilów, namulów i mułów, a w przypadku torfów nawet do 0,75 oraz dla skał litych w przedziale od ok. 0,01 i 0,02 dla skał „z rzadką siecią szczelin” i skał węglanowych szczelinowo krasowych do 0,25 dla margli i opok z dominującą makroszczelinowatością. Jest to zróżnicowanie bardzo duże i

wyzwalać będzie nieraz nieoczekiwane zróżnicowanie w oszacowaniach prędkości przesączania niezgodne z naszymi oczekiwaniami na podstawie przepuszczalność (współczynnik filtracji) utworów budujących strefę aeracji. Dla porównania poniżej przedstawia się ocenę czasów przesączania przez pięciometrową strefę aeracji zbudowaną z utworów o zróżnicowanej przepuszczalności przy tym samym opadzie.

Odpowiednie obliczenia przedstawiają się następująco:

1) Dla żwirów piaszczystych:

Dane: $P = 0,6$ m/a $m_a = 5$ m $w = 0,2$ $w_0 = 0,08$

Wynik obliczenia:

$$t_a = \frac{5m \times 0,08}{0,6m/a \times 0,2} = 3,33a$$

2) Dla ilów, ilów pylastych:

Dane: $P = 0,6$ m/a $m_a = 5$ m $w = 0,083$ $w_0 = 0,38$
Wynik obliczenia:

$$t_a = \frac{5m \times 0,38}{0,6m/a \times 0,083} = 38,2a$$

Wyniki tych obliczeń są dosyć nieoczekiwane. To prawda, że ily ekranują warstwę wodonośną skuteczniej i czas przesączania zbliża się do 40 lat. Jednak nieoczekiwanie wysoką funkcję ekranowania wyznacza się w tej metodzie żwirom piaszczystym, dla których przesączanie przez warstwę 5-metrową wyraźnie przekracza trzy lata.

b) Ocena prędkości i czasu przesączania wg formuły Bindemana zalecanej przez Kleczkowskiego (red.) — 1984 r., prowadzi do następujących wzorów:

$$U_a = \frac{1}{n_0} \cdot \sqrt[3]{\omega^2 \times k'}$$

stąd: [9]

$$t_a = \frac{m_a \times n_0}{\sqrt[3]{\omega \times k'}} \quad [10]$$

gdzie:

U_a — „rzeczywista” średnia prędkość przesączania pionowego przez strefę aeracji, [m/d],

t_a — czas przesączania pionowego przez strefę aeracji, [d],

n_0 — porowatość efektywna (aktywna), [1],

ω — roczna infiltracja efektywna ($\omega = P \times w$), [m/d],

P — wysokość opadów, [m/d],

w — wskaźnik opadów, [1],

k' — współczynnik pionowej filtracji strefy aeracji, [m/d],

m_a — miąższość strefy aeracji, [m].

Dla przykładów wybranych jak w przypadku a) otrzymamy teraz następujące wyniki:

1) Dla żwirów piaszczystych:

Dane: $m_a = 5$ m

$n_0 = 0,35$

$k' = 0,001$ m/s = 86,4 m/d

$w = 0,2$

$P = 0,6$ m

$\omega = (0,6 \times 0,2)/365 = 0,000329$ m/d

2) Dla ilów i ilów pylastych:

Dane: $m_a = 5$ m

$n_0 = 0,035$

$k' = 0,00000001$ m/s = $8,64 \times 10^{-4}$ m/d

$w = 0,083$

$\omega = (0,6 \times 0,083)/365 = 0,000136$ m/d,

$P = 0,6$ m

Wyniki obliczeń:

$$\text{Ad. 1. } t_a = \frac{5 \times 0,35}{\sqrt[3]{0,000329^2 \times 86,4}} = 83,1d, \quad \text{tj. } t_a = 0,23a$$

$$\text{Ad. 2. } t_a = \frac{5 \times 0,035}{\sqrt[3]{0,000136^2 \times 86,4 \times 10^{-4}}} = 694,8d, \quad \text{tj. } t_a = 1,9a$$

Widzimy znaczne różnice w ocenie czasu przesączania pionowego przez strefę aeracji. Są to różnice systematyczne i zwraca na to uwagę Rodzoch (1997). Z metody Bindemana uzyskujemy zawsze znacznie mniejsze wartości czasu przesączania. W przedstawionym przykładzie dla

Tab. 1. Wartości wilgotności objętościowej w_0 — [1] w zależności od litologii strefy aeracji według Witzaka & Żurek (1994)

L.p.	Rodzaj skały	w_0 — [1]	L.p.	Rodzaj skały	w_0 — [1]
skały lite			13.	lessy	0,32
1.	skały lite z rzadką siecią szczelin	0,01	10.	gliny pokrywowe	0,32
2.	sk.węglanowe szczelinowo-krasowe	0,02	11.	gliny piaszczys. morenowe	0,24
3.	margle, opoki z domin. makroszczel.	0,03	12.	gliny zwięzłe morenowe	0,26
4.	margle, opoki z dom. mikroszczelin.	0,25	14.	less ilasty	0,36
5.	żwirowce, piaskowce bez szczelin	0,10	15.	ily (pliocen, miocen)	0,38
skały luźne			16.	pyły i ily zastoiskowe	0,33–0,41
6.	rumosze niezailone, żwiry czyste	0,067	17.	namuły muły	0,40–0,41
7.	ut.piasz.żwir., posp., piaski śr.i grubz.	0,07–0,10	18.	piaski próchnicze	0,20
8.	piaski drobnziarniste	0,10	19.	pyły próchnicze	0,35
9.	piaski pylaste i gliniaste	0,23–0,24	20.	torfy	0,75

Uwaga: Dla skał litych podano wartości przeciętne

związków piaszczystych są to różnice ponad czterdziestokrotne, a dla utworów ilastych nawet dwudziestokrotne.

Różnice między wzorami wyrażają się tym, że nieco mniejszą rolę we wzorze Bindemana przypisuje się infiltracji efektywnej (występuje pod pierwiastkiem), uwzględnia się w nim natomiast wpływ współczynnika filtracji, co Witczak i Żurek (1994) pomijają całkowicie. Niemniej istotną różnicą, jest uwzględnianie przez ostatnich autorów wilgotności objętościowej utworów strefy aeracji zamiast porowatości aktywnej. Co dla utworów o niepełnym nasyceniu wydaje się bardziej logicznym. Brak jest jednak jednoznacznych podstaw do opowiedzenia się, który z przedstawionych sposobów szacowania czasu przesączania pionowego jest bliższy rzeczywistym wartościom. Wzór Witczaka i Żureka prawdopodobnie daje wartości zawyżone (na czas przesączania), gdyż weryfikowany był obserwacjami szybkości przenoszenia wskaźników chemicznych a ten proces z natury jest powolniejszy, ze względu na znane zjawisko „opóźnienia”.

c) Propozycja oceny czasu przesączania wzorem zmodyfikowanym. W przedstawionej sytuacji, pamiętając o tym, że przepisy o strefach ochronnych, wymiarowanie ich uzależniają od czasu dopływu wody (a nie czasu dopływu frontu, czy kulminacji zanieczyszczenia), za celową uznaje się propozycję stosowania do szacunku czasu przesączania się wody przez strefę aeracji wzoru Bindemana zmodyfikowanego w ten sposób, że zamiast wartości porowatości aktywnej (efektywnej) należy do niego wstawiać wartość wilgotności objętościowej jako prawdopodobnie najbliższej porowatości aktywnej utworów występujących w strefie aeracji (o niepełnym nasyceniu). W ten sposób proponowany zmodyfikowany wzór na obliczanie czasu przesączania przez strefę aktywną przyjąłby postać następującą:

$$U_a = \frac{1}{w_0} \sqrt[3]{\omega^2 \times k'} \quad [11]$$

$$t_a = \frac{m_a \times w_0}{\sqrt[3]{\omega^2 \times k'}} \quad [12]$$

gdzie:

U_a — „rzeczywista”, średnia prędkość przesączania przez strefę aeracji [m/d],

t_a — czas przesączania pionowego przez strefę aeracji [d],

w_0 — wilgotność objętościowa, [1],

ω — roczna infiltracja efektywna ($\omega = P \times w$), [m/d],

P — wysokość opadów, [m/d],

w — wskaźnik opadów, [1],

k' — współczynnik pionowej filtracji strefy aeracji [m/d],

m_a — miąższość strefy aeracji, [m].

Stosowanie tego wzoru prowadziło do dalszego skrócenia czasu przesączania pionowego przez nienasycone utwory piaszczysto-żwirowe, natomiast w utworach ilasto-pylastych do wyraźnego wydłużenia tego czasu w stosunku do czasu obliczonego według wzoru Bindemana. W konsekwencji, zgodnie z naszym odczuciem i doświadczeniem, niejako pomniejszilibyśmy względem ocen wzorem Bindemana ekranującą rolę utworów piaszczysto-

żwirowych, z równoczesnym zwiększeniem tej roli w przypadku utworów ilasto-pylastych i gliniastych.

Dla przykładów przedstawionych wcześniej otrzymalibyśmy następujący szacunek przesączania przez pięciometrową strefę aeracji:

***Dla żwirów piaszczystych:**

Dane: $m_a = 5\text{m}$, $w_0 = 0,08$, $\omega = 0,000329\text{ m/d}$,
 $k' = 86,4\text{ m/d}$,

Wynik obliczeń:

$$t_a = \frac{5 \times 0,08}{\sqrt[3]{0,000329^2 \times 86,4}} = 19,0\text{d} = 0,052\text{a}$$

***Dla ilów i ilów pylastych:**

Dane: $m_a = 5\text{m}$, $w_0 = 0,38$, $\omega = 0,000132\text{ m/d}$,
 $k' = 86,4 \times 10^{-4}\text{ m/d}$

Wynik obliczeń:

$$t_a = \frac{5 \times 0,38}{\sqrt[3]{0,000132^2 \times 86,4 \times 10^{-4}}} = 7694,8\text{d} = 21,1\text{a}$$

Widzimy więc, że otrzymane rezultaty obliczeń zmodyfikowanym wzorem prawidłowo, zgodnie z oczekiwaniami, modyfikują ocenę czasu przesączania przez strefę aeracji.

Pięciometrowa warstwa żwirów piaszczystych z całą pewnością przetransportuje strumień infiltracyjny w czasie krótszym niż 3,33 lata (choć zanieczyszczenie, zwłaszcza początek jego fali, może w specyficznych warunkach przemieszczać się niemal tak długo) i będzie ten czas bliższy wyliczonym około dwudziestu dniom. Natomiast strumień taki przez warstwę ilów i ilów pylastych z pewnością przemieszczał się będzie w czasie pośrednim między 2 lata (wg Bindemana) a 38 lat (wg Witczaka & Żureka, 1994.), stąd otrzymana z proponowanego wzoru zmodyfikowanego wartość 21 lat dobrze przystaje do naszych wyobrażeń o ekranującej roli utworów ilastych i jest również bliska klasom potencjalnego zagrożenia GZWP, na podstawie czasów przesączania przez strefę aeracji według Kleczkowskiego i in. (1991).

Do obliczeń czasu przesączania pionowego przez strefę aeracji zaproponowanym tu wzorem [12] zaleca się przyjmowanie wartości wilgotności objętościowej w_0 według Witczaka & Żureka (1994), zestawionych w tab.1.

Witczak i Żurek (1994) zalecają stosowanie swego wzoru dla przypadku niejednorodnej strefy aeracji, rozwarstwionej na warstewki jednorodne, poprzez zwykłe zsumowanie czasów przesączania (nazywają to czasem wymiany) przez poszczególne przewarstwienia, co tylko częściowo — w pewnych warunkach jest dopuszczalne. Można tak postępować tylko w przypadku, gdy przewarstwienia w sposób uporządkowany z góry w dół charakteryzują się coraz to niższymi wartościami wilgotności objętościowej wyzwalającej narastanie prędkości przesączania. W przeciwnym przypadku na poszczególnych przewarstwiach woda będzie się gromadzić (przynajmniej przejściowo) powodując powstawanie efemerycznych wód zawieszonych. W czasie ich istnienia przesączanie nie będzie już przesączaniem w strefie niepełnego nasycenia. Tak więc sumacyjny wzór będzie dla

takich przypadków bardzo przybliżony a dopuszczalność jego wykorzystania w takiej wersji wynika tylko z faktu wspomnianej „efemeryczności” pojawiania się w strefie aeracji takich wód zawieszonych. Przyjmując za Witczakiem i Żurko (1994) ich założenie o dopuszczalności wykorzystania wzoru sumacyjnego, z podanymi zastrzeżeniami, można również uznać za dopuszczalne przyjęcie wersji sumowej zaproponowanego wzoru zmodyfikowanego [12], który dla rozwarstwionej (niejednorodnej) strefy aeracji przyjmie postać:

$$t_a = \frac{\sum_1^n (m_{ai} \times w_{0i})}{\sqrt[3]{\omega^2 \times \frac{\sum m_{ai}}{\sum (m_{ai} / k'_i)}}} \quad [12a]$$

gdzie:

- i — oznacza nr kolejnego przewarstwienia strefy aeracji, [1],
 n — liczba przewarstwień, [1]; (inne oznaczenia przy wzorze [12]).

Kończąc przedstawiony tu przegląd metod oceny czasu przesączania pionowego wody przez strefę aeracji i przez warstwy rozdzielające warstwy wodonośne, warto za Rodzochem (1997) powtórzyć pogląd o bezwzględnej potrzebie (jeśli rozpoznanie warunków hydrogeologicznych to dopuszcza) oszacowania stopnia zmienności czasów przesączania przez strefę aeracji i przez warstwy rozdzielające w całym obszarze spływu lub obszarze ograniczonym izochroną 25-letniego dopływu wody do ujęcia, w celu racjonalnego ograniczenia powierzchni zewnętrznej terenu ochrony pośredniej. Dodajmy, że ważnym jest by przy tych obliczeniach uwzględnić zmienność zarówno miąższości jak i litologii strefy aeracji i warstw rozdzielających jak i zróżnicowania stanów zwierciadła wody podziemnej w poszczególnych sąsiadujących warstwach wodonośnych.

Należy także przyjąć, że przy swobodnym przesączaniu przy pełnym nasyceniu (np. w warstwach zawieszonych) dopuszczalnym jest założenie, że jest to filtracja przy jednostkowym spadku hydraulicznym tj. przy $J = 1$. Stosunkowo częstym przypadkiem takiej sytuacji, jest przypadek, kiedy pierwszą wyraźnie rejestrowaną w czasie budowy studni warstwą wodonośną jest warstwa piaszczysta o zwierciadle napiętym występująca pod dużej miąższości glinami lub innymi utworami słabo przepuszczalnymi. W przypadku takim niezależnie, czy obserwuje się w terenie studnie kopane o zwierciadle powyżej zwierciadła napiętego wspomnianej warstwy wodonośnej czy nie, warstwy glin występującej w nadkładzie warstwy wodonośnej, w żadnym przypadku nie można traktować jako strefy aeracji. Warstwa ta jest nasycona wodą, co najmniej do wysokości zwierciadła ustalonego w warstwie wodonośnej. Zwykle nawet wyżej, gdyż swobodne zwierciadło w glinach musi być tak położone, by zabezpieczyć

przetransportowanie strumienia infiltracyjnego do warstwy wodonośnej przez wytworzenie określonej wartości spadku hydraulicznego. Przeciwna sytuacja może mieć miejsce w strefie drenażowej i ujawniona wtedy będzie warunkami artezyjskimi w warstwie wodonośnej i zabagnieniami w warstwie przypowierzchniowej.

W przypadku braku informacji o stanach wody w studniach kopanych (lub ich braku) dopuszczalnym jest założenie, że przesączanie do warstwy wodonośnej odbywa się pod wpływem różnicy stanów statycznego i dynamicznego, równej depresji ujęcia. Do czasu tak oszacowanego, należy oczywiście dodać czas przesączania przez strefę aeracji, tj. od powierzchni terenu do rzędnej zwierciadła w studniach kopanych lub przy ich braku do rzędnej zwierciadła ustalonego w ujęciu.

Przedstawione powyżej rozważania poddano pod dyskusję na posiedzeniu Komisji Hydrogeologii Komitetu Nauk Geologicznych — PAN. Zebrani, w zasadzie wyrazili aprobatę dla zaproponowanego tu sposobu obliczania prędkości i czasu przepływu wody w przestrzeni porowej dla oceny rozmiarów stref ochronnych z tym, że w dyskusji podkreślono również aktualność i potrzebę wykorzystywania wzoru Witczaka-Żurek dla oceny prędkości lub czasu przemieszczania się substancji konserwatywnych, których znajomość jest przydatna a nieraz nawet konieczna, przy organizacji zagospodarowywania obszarów ochronnych.

Uczestnikom posiedzenia Komisji Hydrogeologii KNG — PAN, a zwłaszcza Profesorowi Stanisławowi Witczakowi, autor serdecznie dziękuje za życzliwą i wszechstronną dyskusję.

Literatura

- BURY W. 1995 — Prognozowanie pionowej migracji zanieczyszczeń konserwatywnych przez utwory przepuszczalne i półprzepuszczalne przy wykorzystaniu znaczników naturalnych i sztucznych. Współczesne problemy hydrogeologii, 7: 57–68.
 KLECZKOWSKI A.S. (red.) 1984 — Ochrona wód podziemnych. Warszawa.
 KLECZKOWSKI A.S. (red.) 1991 — Ochrona wód podziemnych w Polsce. Stan i kierunki badań. Publ. CPBP 04.10., SGGW-AR, Warszawa.
 MACIOSZCZYK T. 1995 — Praktyczne i naukowe aspekty projektowania stref ochronnych ujęć wód podziemnych., Mat. XI Symp. „Strefy ochronne ujęć i GZWP”, Częstochowa.
 MACIOSZCZYK T., RODZOCZ A. & FRĄCZEK 1993–1994 — Projektowanie stref ochronnych źródeł i ujęć wód podziemnych. Poradnik metodyczny. Warszawa.
 RODZOCZ A. 1997 — Ocena wrażliwości warstw wodonośnych na zanieczyszczenie w projektowaniu stref ochronnych dla ujęć wód podziemnych i obszarów GZWP. Współczesne problemy hydrogeologii, 8: 183–188.
 Rozporządzenie MOSZNiL z 5.11.1991 r. w sprawie zasad ustanawiania stref ochronnych źródeł i ujęć.
 SZCZEPAŃSKI A. & SZKLARCZYK T. 1995 — Zasady wyznaczania stref ochronnych na przykładach różnego typu ujęć wód., Mat. XI Symp. „Strefy ochronne ujęć i GZWP”, Częstochowa.
 WIECZYSTY A. 1970 — Hydrogeologia inżynierska. Kraków.
 WIŁUN Z. 1987 — Zarys geotechniki. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
 WITCZAK S. & ŻUREK A. 1994 — Wykorzystanie map glebo-rolniczych w ocenie ochronnej roli gleb dla wód podziemnych [W:] Kleczkowski A.S. (red.) — Metodyczne podstawy ochrony wód podziemnych, AGH: 155–180.