

# Nieprawidłowości przy ocenie czasu przesączania zanieczyszczeń przez strefę aeracji na podstawie formuł obliczeniowych stosowanych w praktyce hydrogeologicznej

Ewa Liszkowska<sup>1</sup>

**Anomalies in the assessment of pollution seepage time through the vadose zone based on formulas used in hydrogeological practice.** *Prz. Geol.*, 65: 1109–1014.

*Abstract.* Polish practitioners of hydrogeology normally use the formulas by either Bindeman, Bindeman as modified by Macioszczyk or by Bachmat and Collin to calculate the time of seepage of conservative pollutants through the vadose zone. These calculations require the knowledge of several hydrogeological parameters (coefficient of vertical permeability, effective porosity, volumetric humidity, intensity of filtration), and the lithology and thickness of the vadose zone. The results obtained depending on the formula used vary considerably, even by more than 1 order of magnitude, which results in differences in technical recommendations for water protection formulated on their basis, and thus has impact on the costs of this protection. Moreover, this variability of results negatively affects the credibility of hydrogeological studies, enhancing the possibility of manipulating the output values. Credibility of calculations depends essentially on two factors: choice of formula, as each has its drawbacks and restrictions, and correctness of the adopted calculation parameters, which are often only unverified estimates. The paper analyzes the most common mistakes and their impact on the calculated seepage time. The author signals the need for further theoretical and practical studies (including fieldwork and laboratory testing using modeling methods) of this problem. Research on the vadose zone should be one of the primary topics pursued, as risks of pollution in this zone results in the quality of water occurring below.

**Keywords:** vadose zone, seepage time, calculation errors

Do oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia infiltrujące z powierzchni terenu stosuje się bardzo wiele metod, np.: szacunkowych, parametrycznych, rangowych, znacznikowych, modelowania (Krogulec, 2004; Góra, 2012). Najbardziej rozpowszechnione w hydrogeologii stosowanej są jednak metody oparte na szacunkowych formułach obliczeniowych czasu przesączania przez strefę aeracji zanieczyszczeń konserwatywnych. Jeśli zanieczysz-

czenia ulegają przemianom (np. sorpcja, biodegradacja, rozpad radioaktywny), wprowadza się stosowne przeliczniki.

W polskiej praktyce hydrogeologicznej są wykorzystywane najczęściej trzy wzory: Bindemana (Kleczkowski, 1984), Bindemana z modyfikacją Macioszczyka (1999) oraz Bachmata i Collina (por. Witczak, Żurek, 1994), prezentowane w tabeli 1 pod numerami [1] do [3]. Jeśli jednak formuły te stosujemy do obliczeń dla tych samych warunków,

**Tab. 1.** Wyniki obliczeń czasu przesączania (t) przez strefę aeracji (w latach) i ich porównanie

**Table 1.** Results of calculations for the seepage time through the vadose zone (in years) and their comparison

Autor obliczeń <i>Author of calculation performed by</i>	Obiekt <i>Object</i>	Czas przesączania przez strefę aeracji w latach <i>Seepage time through the vadose zone (in years)</i>		
		wg Bindemana <i>Bindeman's formula</i> $t = \frac{m n_e}{\sqrt[3]{\omega^2 k_z}} \quad [1]$	wg Bindemana z modyfikacją Macioszczyka <i>Bindeman's formula modified by Macioszczyk</i> $t = \frac{m W_o}{\sqrt[3]{\omega^2 k_z}} \quad [2]$	wg Bachmata i Collina <i>Bachmat and Collin's formula</i> $t = \frac{m W_o}{\omega} \quad [3]$
Klojzy-Karczmarczyk, 2011	GZWP 141 – zbiornik rzeki / river reservoir dolna Wisła: QPM lower Wisła: QPM	12,1 średnio zagrożony <i>moderately threatened</i>	9,3 średnio zagrożony <i>moderately threatened</i>	52,3 słabo zagrożony <i>poorly threatened</i>
j.w. / as above	GZWP 150 – pradolina / proglacial valley Warszawa–Berlin (Koło–Odra): QP	7,7 średnio zagrożony <i>moderately threatened</i>	16,8 średnio zagrożony <i>moderately threatened</i>	22,9 średnio zagrożony <i>moderately threatened</i>
Macioszczyk, 1999	żwir piaszczysty / sandy gravel ił i ił pylasty / loam and silty loam	0,23 bardzo silnie zagrożony <i>very strongly threatened</i> 1,9 bardzo silnie zagrożony <i>very strongly threatened</i>	0,052 bardzo silnie zagrożony <i>very strongly threatened</i> 21,1 średnio zagrożony <i>moderately threatened</i>	3,33 silnie zagrożony <i>strongly threatened</i> 38,2 słabo zagrożony <i>poorly threatened</i>

Uzupełniono o ocenę stopnia zagrożenia wg klasyfikacji Witczaka, Żurek (1994),  $t$  – czas przesączania,  $k_z$  – współczynnik filtracji pionowej strefy aeracji,  $n_e$  – porowatość efektywna,  $W_o$  – wilgotność objętościowa,  $m$  – miąższość strefy aeracji,  $\omega$  – intensywność infiltracji

Supplemented with an assessment of the degree of hazard according to the classification of Witczak, Żurek (1994),  $t$  – filtration time,  $k_z$  – vertical filtration coefficient of the aeration zone,  $n_e$  – effective porosity,  $W_o$  – volumetric humidity,  $m$  – thickness of the aeration zone,  $\omega$  – intensity of infiltration

<sup>1</sup> Zakład Hydrogeologii i Ochrony Wód, Instytut Geologii, Uniwersytet im. A. Mickiewicza w Poznaniu, ul. Bogumiła Krygowskiego 12; licha51@o2.pl.

wyniki różnią się znacząco, nawet o więcej niż jeden rząd wielkości (por. np. Macioszczyk, 1999). Rozbieżności na podobnym poziomie uzyskała też Kłojzy-Karczmarczyk (2011), wykonując obliczenia czasu przesączania dla rてci na odcinkach dróg.

Na podstawie wyników obliczeń dokonujemy finalnej oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie, stosując różne, choć nieznacznie różniące się klasyfikacje. Z oceny tej wynikają konkretne zalecenia praktyczne w odniesieniu do ochrony wód: uzyskane krótkie czasy przesączania  $t$  oznaczają, w przypadku projektowanych inwestycji, konieczność zastosowania technicznych zabiegów ochronnych, zaś długie (>25 lat) – brak konieczności ochrony. Dotyczy to również ujęć wód podziemnych (np. Rodzoch, 1997, 2003; Duda i in., 2013), ale także obszarów ochronnych GZWP (np. Herbich i in., 2009). Zarówno w procedurze opracowania mapy wrażliwości (Duda i in., 2011), jak i określania stref ochronnych (Duda i in., 2013) zaleca się wyznaczać czas przesączania wzorem Bachmata i Collina, dającym skrajne wyniki. Różnice w obliczeniach uzyskanych na podstawie ww. wzoru i wzoru Bindemana były powodem dociekań Macioszczyka (1999) i zaproponowania nowej, „bardziej racjonalnej” formuły obliczeniowej.

Celem pracy jest ocena, na ile metody obliczeniowe są wiarygodne, szczególnie przy obserwowanej w opracowaniach użytkarnych dużej swobodzie w przyjmowaniu parametrów obliczeniowych.

#### DANE DO OBLICZEŃ – OCENA WIARYGODNOŚCI

Wiarygodność obliczeń zależy od danych wejściowych i od zastosowanego wzoru. Bez znajomości wzorów obliczeniowych trudno ocenić wpływ ewentualnych, bezpośrednich błędów.

Wzory na wyznaczanie czasu przesączania  $t$  przez strefę aeracji i przykładowe wyniki obliczeń zostały zestawione w tabeli 1. Oceniono też stopień zagrożenia zanieczyszczeniem. Przypomniano wzory najprostsze, które powinny być stosowane wyłącznie dla ośrodków jednorodnych, niewarstwianych, ponieważ wyprowadzono dla takich układów, co często nie jest uwzględniane przy obliczeniach.

Do obliczeń czasu przesączania  $t$  jest potrzebna znajomość współczynnika filtracji pionowej strefy aeracji  $k_z$ , porowatości efektywnej tej strefy  $n_e$  (lub wilgotności objętościowej  $W_o$ ), miąższości strefy aeracji  $m$  oraz intensywności infiltracji  $\omega$ . Ta ostatnia cecha, zanikająca okresowo, wymaga znajomości wielkości opadu  $P$  i wskaźnika infiltracji efektywnej  $w$ , gdyż:

$$\omega = P \cdot w \quad [4]$$

Duda i in. (2013) uwzględnili czynniki wpływające na niepewność. Większość parametrów (np.  $k_z$ ,  $n_e$ ,  $W_o$ ) jest przyjmowana jednak z tabel, co wzbudza wątpliwość.

Poniżej przeprowadzono analizę wątpliwości w odniesieniu do danych stosowanych do obliczeń, wraz z oceną ich wpływu na uzyskane wyniki.

**Współczynnik filtracji strefy aeracji  $k_z$ .** Z uwagi na objętość artykułu, nie podjęto rozważań oceny wiarygodności współczynnika filtracji, wyznaczonego na podstawie wzorów empirycznych, w większości wiążących jego wartość z uziarnieniem gruntu. Zagadnienia te rozważano w pracy doktorskiej Zięby (2013), m.in. odnoszącej się do tego problemu i pokazującej skutki praktyczne błędnej oce-

ny współczynnika filtracji, znacznie wykraczające poza analizowany tu problem czasu przesączania przez strefę aeracji, czy też w pracy Drożdżaka (2011). Jeśli nawet współczynnik filtracji wyznaczono mniej lub bardziej wiarygodnymi wzorami empirycznymi, jego wielkość należy skorygować, bowiem uzyskany wynik dotyczy wodoprzepuszczalności **poziomej strefy saturacji**, a nie jej wodoprzepuszczalności **pionowej**. Uśredniony współczynnik filtracji pionowej strefy saturacji jest na ogół o 1 rząd wielkości mniejszy od poziomej (np. Wojewoda, 1985; Tarka 2003), a różnice zacierają się wraz z głębokością, wskutek zamykania się porów i szczelin pod wpływem chociażby ciśnienia geostatycznego. Jednak w strefie przypowierzchniowej należy oczekiwać największej anizotropii przepuszczalności, szczególnie pomiędzy strefą korzeniową (z uprzywilejowanymi drogami migracji), a strefą poniżej, ze spowolnieniem procesu migracji (Bury, 1994).

Strefa aeracji odnosi się zasadniczo do współczynnika **przewodności hydraulicznej = przewodnictwa wodnego**, który zależy od stopnia nasycenia gruntu wodą, zmieniającego się w czasie i w przestrzeni. Przepływ jest skutkiem istnienia gradientu wilgotności, ściślej: ciśnienia ssania. Otrzymujemy wtedy tzw. równanie Richardsa, które w oryginalnej postaci opisuje ruch wody właśnie w ośrodkach nienasyconych.

Pomijając problemy terminologiczne i utrzymując stosowane nazewnictwo, współczynnik filtracji dla jednorodnej strefy aeracji  $k_z$  można obliczyć np. ze wzoru Szestakowa, czy też na podstawie modelu infiltracji Schoellera (vide Rogoż, 2012). Można też wykorzystać pracę Żurek i Czopa (2010), którzy wymieniają inne wzory empiryczne, np. van Genuchtena, do którego jest potrzebna znajomość  $k$  w strefie saturacji i wilgotności objętościowej w strefie aeracji. Wzory te są rzadko stosowane w praktyce hydrogeologicznej.

Dla gruntów spoistych współczynnik  $k_z$  strefy aeracji przyjmujemy najczęściej z tabel (np. Pazdro, Kozerski, 1990), w których możliwy przedział zmienności wynosi dwa rzędy. Teoretycznie możemy więc współczynnik ten zaniżyć lub zawyżyć nawet 100-krotnie, a nie uwzględniając anizotropii przepuszczalności – nawet 1000-krotnie. Z tego powodu należy konsekwentnie stosować do obliczeń półempiryczny, uniwersalny wzór Kozeny–Carmana (Liszkowska, 1996) dla gruntów o różnej przepuszczalności. Wysoką poprawność wyników obliczeń współczynnika filtracji uzyskanych ww. wzorem wykazał m.in. Drożdżak (2011), przy zastosowaniu metod statystycznych, skonfrontowanych z badaniami własnymi.

Błąd przy ocenie współczynnika  $k_z$  w strefie aeracji nie przekłada się liniowo na czas przesączania  $t$ , obliczony wzorami [1] i [2], gdyż  $k_z$  występuje w nich pod pierwiastkiem. Kleczkowski (1984) podaje przykład obliczenia tego czasu dla następujących danych:  $k_z = 1$  m/dobę,  $n_e = 0,2$ ,  $\omega = 2,5 \times 10^{-4}$  m/dobę = 90 mm/rok,  $m = 5$  m. Wynosi on odpowiednio  $t = 333$  dni, podczas gdy dla wartości  $k_z$  o 1 rząd mniejszej (0,1 m/dobę) uzyskujemy  $t = 555$  dni, a więc nawet nie 2-krotnie dłuższy. Ale jeśli popełnimy błąd przy ocenie  $k_z$  o 2 rzędy wielkości, to przekłada się to już na czas rzędu 925 dni, co oznacza w klasyfikacji Witczaka i Żurek (1994) inny stopień oceny zagrożenia.

**Porowatość efektywna  $n_e$ ,** przyjmowana często jako równa całkowitej  $n$ , też wzbudza dyskusję i powoduje błędy obliczeniowe. Najczęściej jest ona szacowana, co oznacza, że nawet porowatość całkowita nie jest obliczana cho-

ciażby na podstawie znajomości gęstości właściwej  $\rho_s$  i objętościowej szkieletu gruntowego  $\rho_d$  ze wzoru:

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} \quad [5]$$

gdzie:

$$\rho_d = \frac{100\rho}{100 + W} \quad [6]$$

Do wzoru wilgotność wagową ( $W$ ) należy wstawić w %, zaś  $\rho$  jest gęstością objętościową. Obydwa potrzebne parametry są znane chociażby z badań geologiczno-inżynierskich.

Bez większych błędów można przyjąć, że założenie  $n = n_e$  jest poprawne tylko w przypadku żwirów. Dla gruntów o drobniejszym uziarnieniu przepływ wody wolnej odbywa się nie przez wszystkie pory, nawet jak są ze sobą połączone. Istotne dla przepływu jest najmniejsze przewężenie porów, na co wpływają: wielkość, kształt ziaren, różnoziarnistość, zagęszczenie, czyli geometria porów (Zięba, 2013). Część wody jest blokowana ze względu na zbyt wąskie kanały i obecność powietrza, które utrudniając infiltrację, obniżają wodoprzepuszczalność (np. wody stykowe = zakątkowe, ograniczone powierzchniami cząstek, nie mają możliwości ruchu). Dotyczy to już drobnoziarnistych gruntów sypkich. Dla piasków porowatość efektywna może być mniejsza od całkowitej co najmniej o 10–20% (por. np. McWhorter, Sunada, 1981; Handbook..., 1990), a dla piaskowców górnokarbońskich Górnośląskiego Zagłębia Węglowego nawet o 10–40% (Pazdro, 1983). Z kolei dane Marciniaka i in. (1999) dla ilów miocenu–pliocenu porowatość efektywną określoną porozometrycznie szacują na poziomie 2,5%, przy porowatości całkowitej  $n = 20,6\%$ .

Dla gruntów spoistych przyjmowanie porowatości efektywnej równej całkowitej jest niedopuszczalne i wynika prawdopodobnie z niezrozumienia zjawiska ruchu wody przez słabo przepuszczalne ośrodki nienasycone. Porowatość ogólna nie uwzględnia bowiem roli wód fizycznie związanych, zmniejszających przekrój porów, wynikający z ich geometrii oraz stopnia skonfigurowania cząstek (Parylak, Zięba, 2012). Porowatość efektywna w ilach może nawet przyjmować wartość zero, gdyż przy dużej powierzchni właściwej, pory mogą być całkowicie wypełnione wodami silnie związanymi i bykowymi, co w praktyce oznacza, że są one gruntami nieprzepuszczalnymi (Grabowska-Olszewska, 1977). Należy też pamiętać, że uruchomienie przepływu wody w gruntach spoistych wymaga istnienia gradientu początkowego, zależnego od właściwości filtracyjnych, który niekiedy może nawet przekraczać wartość 10 (Grabowska-Olszewska, 1998), podczas gdy w obliczeniach czasu przesączania przyjmujemy ten gradient na poziomie 1.

Błędy przy przyjmowaniu porowatości efektywnej gruntów, polegające na ogół na jej zawyżaniu, prowadzą do zaniżenia rzeczywistej prędkości przesączania, a więc do wydłużenia czasu przesączania. Jest to zależność liniowa, bowiem  $n_e$  we wzorze [1] występuje w liczniku. Stosując wzór [2], który od wzoru [1] różni się tylko występującą w liczniku wilgotnością objętościową, wstawioną w miejscu porowatości efektywnej, uzyskuje się podobne wyniki obliczeń czasu przesączania. Relacje wyników, wyznaczonych tymi wzorami, zależą od stosunku wartości  $n_e$  do  $W_o$ . Jaką więc, teoretycznie rzecz ujmując, powinno się przyjmować wartość  $n_e$  do  $W_o$ ?

**Wilgotność objętościowa**  $W_o$  jest w praktyce często błędnie utożsamiana z wilgotnością wagową  $W$ .

Wilgotność wagową  $W$  wyraża się stosunkiem masy wody  $m_w$ , usuniętej w procesie suszenia, do całkowitej masy gruntu suchego  $m_s$ :

$$W = m_w/m_s \quad [7]$$

zaś objętościową  $W_o$  – stosunkiem objętości wody zawartej w porach  $V_w$  do objętości całej próby gruntu  $V$ :

$$W_o = V_w/V \quad [8]$$

Wilgotność wagową można przeliczyć na objętościową, stosując prosty wzór:

$$W_o = (\rho_d/\rho_w) \cdot W \quad [9]$$

gdzie:

$\rho_w$  – gęstość wody [g/cm<sup>3</sup>], a przy  $\rho_w = 1$  g/cm<sup>3</sup>

$$W_o = \rho_d \cdot W \quad [10]$$

Ze wzorów [9] i [10] wynika, że wilgotność objętościowa powinna być wyraźnie (nawet 1,5–2-krotnie) wyższa od wagowej, o tyle bowiem różni się gęstość objętościowa szkieletu gruntowego  $\rho_d$  od gęstości wody  $\rho_w$ .

Jednak w praktyce hydrogeologicznej  $W_o$  nie jest ani wyznaczana, ani obliczana. Przyjmuje się ją wprost np. z tabeli Witczaka i Żurek (1994) na poziomach 0,1 = 10% (piaski drobnoziarniste neogenu), 0,38 (iły neogenu) lub 0,32 (lessy) (Kachnic, 1995), czy też z ostatnio zmodyfikowanej ww. tabeli w pracy Dudy i in. (2013).

Ponadto  $W_o$  nie jest tożsama ze stopniem nasycenia porów wodą  $S_r$ , co sugerują Żurek i Czop (2010), pisząc: „wielkość ciśnienia porowego wody wynika bezpośrednio ze stopnia nasycenia porów wodą, czyli wilgotności objętościowej”. Jednakże stopień nasycenia porów wodą  $S_r$  jest stosunkiem objętości wody zawartej w porach  $V_w$  do całkowitej objętości porów  $V_p$ ,

$$S_r = V_w/V_p \quad [11]$$

podczas gdy wilgotność objętościowa  $W_o$  jest stosunkiem objętości wody zawartej w porach  $V_w$  do całkowitej objętości gruntu  $V$ .

Oznacza to, że wilgotność objętościowa w strefie aeracji zbudowanej z gruntów sypkich jest zawsze mniejsza od stopnia nasycenia porów wodą, gdyż  $V = V_p + V_s$ , gdzie  $V_s$  jest objętością szkieletu gruntowego.

Twierdzenie to dotyczy tylko gruntów sypkich. Wynika to z metodyki oznaczania wilgotności naturalnej: w temperaturze 105–110°C jest usunięta cała zawartość wody wolnej oraz większość wody związanej. Oznacza to, że grunty sypkie są całkowicie wysuszone, zaś w gruntach spoistych istnieje możliwość zachowania wody silnie związanej (Myślińska, 1992).

Brak rozróżnienia tych dwóch rodzajów wilgotności jest podejściem powszechnym: „w praktyce inżynierskiej wilgotność objętościowa często zastępowana jest wilgotnością w procentach masy. Innym jeszcze sposobem przedstawiania tej zależności jest użycie stopnia nasycenia gruntu zamiast wilgotności” (Wójcik, 2005).

W celu określenia wartości wilgotności objętościowej należy uwzględnić tylko wilgotność wagową i gęstość objętościową szkieletu gruntowego.

Duda i in. (2013) bezpośrednio porównali relację wartości  $n_e$  do  $W_o$ , na podstawie stabelaryzowanych danych w artykule Witczaka i Żurek (1994) oraz prac innych autorów.

Porównywanie ww. parametrów prowadzi do dezorientacji i wymaga oceny ich wiarygodności. Na przykład w pracy Witczaka i Żurek (1994) dla piasków drobnoziarnistych wilgotność objętościową szacuje się na poziomie 0,1 (10%), a w pracy Dudy i in. (2013) wilgotność tę podano łącznie dla piasków drobnoziarnistych i pylastych na poziomie 15–17%. Równocześnie piaski pylaste włączono do grupy z gliniastymi, szacując tę wilgotność na poziomie 18–23%. W rezultacie nieznaczne finalne błędy dla czasu przesączania wynoszą ok. 5–10%. Pojawiają się też wątpliwości, np.: dlaczego uśredniona wilgotność objętościowa nie różnicuje się w funkcji genezy, miąższości i wieku osadów, dlaczego dla gruntów drobnoziarnistych niespoistych jest ona zbliżona, a nawet czasami przewyższa porowatość efektywną. W tym ostatnim przypadku (por. stosunek  $n_e$  i  $W_o$  dla piasków drobnoziarnistych i pylastych oraz piasków pylastych i gliniastych), w zasadzie jest bliska granicy pełnego nasycenia w strefie aeracji, co oznacza brak uśrednienia.

Jeśli nawet przyjmijemy z błędem rzędu 10–40%, że we wszystkich gruntach wodonośnych  $n_e = n$ , to w strefie aeracji porowatość całkowita (nie mówiąc już w porowatości efektywnej) powinna być zawsze większa od wilgotności objętościowej, gdyż w tej strefie objętość wody jest zawsze mniejsza niż objętość porów. Wynika to bezpośrednio z definicji tych dwóch parametrów. Warto więc na podstawie wzoru [5] obliczyć porowatość całkowitą  $n$  i porównać ją z tabelaryczną, uśrednioną, wilgotnością objętościową  $W_o$ . Takie postępowanie daje możliwość częściowej weryfikacji prawidłowości danych przyjętych do obliczeń.

Dłuższe czasy przesączania dla gruntów niespoistych należy wyznaczać ze wzoru Bindemana, a nie ze wzoru z modyfikacją Macioszczyka. Prawdopodobną przyczyną odmiennego wyniku niż oczekiwany teoretycznie z obu wzorów, może być nie do końca prawidłowy dobór parametrów obliczeniowych.

W przypadku, gdy strefa aeracji jest zbudowana z gruntów niewodonośnych (spoistych) stosunek  $n_e$  do  $W_o$  jest zasadniczo odmienny –  $n_e$  może nawet dążyć do 0, na ogół przy rosnącej (wraz ze spadkiem  $n_e$ ) wilgotności objętościowej. W rezultacie czasy przesączania obliczone wzorem Bindemana powinny być niższe niż obliczone ww. wzorem z modyfikacją Macioszczyka, co potwierdzają wyniki obliczeń Macioszczyka (1999).

Pojawiają się znaczące błędy w ocenie  $n_e$  gruntów spoistych przy obliczaniu czasu przesączania przez te grunty (nawet 2–3-krotne zawyżenie tego czasu we wzorze Bindemana). Według Haurylkiewicza (2005) ten parametr jest przyczyną popełnianych błędów przy oznaczaniu stref ochronnych ujęć, prowadzących do ich przewymiarowania.

Wartość przeciętną wilgotności objętościowej można stosować dla inwestycji obszarowych, o charakterze sub- lub regionalnym, a nie lokalnych. W przypadku inwestycji lokalnych powinna być uwzględniona jej zmienność czasowa, przy zastrzeżeniu, że obliczony czas przesączania dotyczy konkretnego okresu pomiaru. Celowym byłoby również jego obliczenie dla teoretycznych przedziałów zmienności parametrów obliczeniowych.

Problem ten ma znaczenie praktyczne, bowiem oznacza ocenę reprezentatywności danych obliczeniowych, w tym także współczynnika filtracji pionowej strefy aeracji, który zależy od tej wilgotności. W strefie przesączania

o głębokości  $l$  przyjmuje się, że jest on wielkością stałą – tak wynika z założeń wzoru Bindemana i ze zmodyfikowanego wzoru Macioszczyka. Prowadząc obliczenia na podstawie wzoru [2], można jednak popełnić błędy w szacowaniu współczynnika filtracji oraz wilgotności objętościowej. Parametry te powinny być kompatybilne, gdyż pierwszy zależy od drugiego. We wzorze [3] współczynnik filtracji bezpośrednio nie występuje, ale wilgotność objętościowa, od której on zależy, znajduje się w liczniku. Współczynnik filtracji jest więc w tym wzorze pośrednio uwzględniony. Jest to bardziej prawidłowe rozwiązanie, aniżeli dwukrotne uwzględnianie, często błędnie oszacowanych, niekompatybilnych parametrów przepuszczalności, poprzez wprowadzenie do wzorów  $k_z$  i  $W_o$ , które powinny się ze sobą korelować. Uwaga Macioszczyka (1999), że we wzorze Witczaka i Żurek (1994) pominięto wpływ współczynnika filtracji, nie wydaje się być słuszna.

Wpływ innych czynników na wyniki obliczeń czasu przesączania, jak np. niejednorodności litologicznej strefy aeracji, a w konsekwencji skokowych zmian wilgotności objętościowej, jej miąższości, nieliniowości  $k_z$  w gruntach nienasyconych, stopnia „zapiecztowania” terenu (z ograniczeniem infiltracji), w szczególności na wilgotność objętościową wymaga dodatkowej analizy. We wzorach Bindemana i Macioszczyka, przyjęto założenie o stałości infiltracji. To założenie nie oznacza jednak stałości wilgotności objętościowej. Wynik obliczony na podstawie ww. wzorów wyznacza czas  $t$  dla przemieszczania się punktu na jednoznacznie określonej drodze i dla jednoznacznie określonego zakresu czasowego. Z tego powodu przy obliczeniach należy uwzględnić przestrzenno-czasową zmienność tych parametrów. Na zmienność współczynnika filtracji w strefie aeracji w funkcji wilgotności objętościowej wskazują Żurek i Czop (2010), modelując warunki przepływu w trakcie infiltracji w badaniu lizymetrycznym. Uwzględniają tę zmienność również gleboznawcy (np. Iwanek i in., 2004), badając wpływ dokładności oszacowania współczynnika przewodnictwa hydraulicznego na zgodność dopasowania wyników obliczeniowych do wartości empirycznych tego współczynnika. Kolejny problem (por. Grabowska-Olszewska, 1998) stanowi przypadek nienasyconych gruntów spoistych, które często są gruntami pęczniejącymi. Analizowane wzory nie uwzględniają tych zagadnień. Należy poprawnie oceniać dane wstawiane do tych niedoskonałych i bardzo uproszczonych wzorów, wyprowadzonych dla ośrodków izotropowych.

Błąd w ocenie wilgotności objętościowej  $W_o$  jest tak samo ważący jak błąd w ocenie  $n_e$  – przy jej zawyżeniu, prowadzi do zaniżenia rzeczywistej prędkości przesączania, a więc do wydłużenia czasu przesączania. Jest to zależność liniowa, bowiem we wzorach [2] i [3] wilgotność objętościowa występuje w liczniku. Przy założeniu jej wartości na poziomie wilgotności wagowej ( $W_o = W$ ) uzyskujemy 1,5–2-krotne zaniżenie czasu przesączania. Może to oznaczać zmianę oceny stopnia zagrożenia zanieczyszczeniem.

**Wskaźnik infiltracji efektywnej  $w$** , na ogół przyjmowany dla warstw wodonośnych Polski niżowej na poziomie 0,3–0,05 (Pazdro, Kozerski, 1990), jest niezbędny do oceny rocznej infiltracji efektywnej. Dla zmiennych fałd nie utworów wysoczyzny polodowcowej przyjmuje się wskaźnik infiltracji na poziomie  $w = 0,15$ . Dla inwestycji

lokalnych często nie są prowadzone badania lizymetryczne, czy też obliczenia bilansu wód podziemnych.

Kolejne zagadnienie dotyczy oceny krytycznej głębokości, przy której ta infiltracja zanika. Problem jest związany z sygnalizowaną już miąższością strefy aeracji, a w konsekwencji – głębokością parowania (np. Małecki, 1998). W przypadku dwóch przeciwstawnych frontów związanych z ruchem wody w dół w wyniku infiltracji oraz ruchem w górę w wyniku ewapotranspiracji i podsiąkania kapilarnego, gdy te dwa wektory równoważą się lub ten drugi przewyższa infiltrację, zasadniczo nie występuje zjawisko przesączania pionowego w dół przez strefę aeracji. W okresach suchych zanikająca infiltracja bywa natomiast powszechna, a mokrych zdarzają się opady przekraczające zdolności infiltracyjne przypowierzchniowej strefy aeracji.

Obszary zabudowy miejskiej charakteryzują się istotnym ograniczeniem infiltracji  $w$ , niezależnej od wykształcenia litofacialnego.

We wzorach [1] i [2] wyznaczających czas przesączania  $t$  współczynnik intensywności infiltracji  $\omega$  występuje w mianowniku pod pierwiastkiem 3. stopnia lub we wzorze [3] stanowi proporcjonalność odwrotną. W tym ostatnim przypadku, jeśli  $\omega$  maleje, to czas przesączania rośnie liniowo. Natomiast dla wzorów [1] i [2] jest to zależność bardziej spłaszczona (omówiona wcześniej dla współczynnika  $k_z$ ). Przyjmuje się, że ponieważ intensywność infiltracji  $\omega$  zależy od poziomu opadów, to jest uzasadnione zmniejszenie zależności czasu przesączania  $t$  w funkcji  $\omega$ , co uwzględniają wzory [1] i [2], w których parametr ten występuje w mianowniku pod pierwiastkiem 3. stopnia.

## PODSUMOWANIE

Niezależnie od oceny czy czasy przesączania  $t$  są zażyżone, czy zaniżone, wyniki te są dyskusyjne. Jeśli czasy przesączania różnią się nawet o 1 rząd wielkości, to zarówno wiarygodność obliczeń, jak i obiektywność wyznaczania terenów ochronnych ujęć wód podziemnych stają się wątpliwe.

Wszystkie wzory ze względu na formułę i metodykę wprowadzania danych do obliczeń prowadzą do błędów. Te wykorzystujące wilgotność objętościową, a nie porowatość efektywną, są obciążone błędami porównywalnymi. Wydaje się jednak, że formuła uwzględniająca wilgotność objętościową bardziej precyzyjnie opisuje zjawisko przesączania wody. Porowatość efektywna określa potencjalną, maksymalną zdolność gruntu do przewodzenia wody (infiltracji), przy założeniu stałej intensywności zasilania infiltracyjnego, co w warunkach naturalnych dla konkretnej strefy aeracji nigdy nie znajduje odzwierciedlenia. Nawet właściwe wyznaczenie wilgotności objętościowej w pomiarze jednokrotnym nie oznacza jej reprezentatywności, uwzględniając w tym współczynnik filtracji.

W przypadku inwestycji lokalnych nie należy stosować równania Richardsa, wykorzystywanego w modelowaniu prognozującym stosunki powietrzno-wodne przez geoboznawców (np. Janik, 2009). Można natomiast przyjąć wyniki geoboznawczych prac teoretycznych, polowych czy laboratoryjnych, wykorzystujących modelowanie matematyczne i konfrontujących badania empiryczne z teorią. Ponieważ geoboznawcza strefa aeracji sięga głębokości 1–2 m, jest ona dla pomiarów łatwiej dostępna.

Wskazane jest podjęcie prac teoretycznych i praktycznych (w tym polowych i laboratoryjnych) z wykorzystaniem metod modelowania. Badania strefy aeracji powinny być jednymi z pierwszoplanowych, ponieważ zagrożenia zanieczyszczeniem tej strefy przekładają się na jakość wód niżej występujących. W przypadku opracowań regionalnych należy wyeliminować nieprawidłowości, wynikające z podejścia do parametrów hydrogeologicznych ze zbyt dużą dowolnością.

W opracowaniach kartograficznych (w różnej skali – od 1 : 50 000 do 1 : 500 000), w których również wykorzystuje się te formuły obliczeniowe (np. Herbich i in., 2008; Duda i in., 2011) dla uzyskania wiarygodnej oceny podatności wód podziemnych na zanieczyszczenia należy przyjąć uśrednione parametry hydrogeologiczne.

Autorka dziękuje Recenzentom za sugestie i uwagi.

## LITERATURA

- BURY W. 1994 – Metodyka wykorzystania znaczników naturalnych i sztucznych do prognozowania migracji zanieczyszczeń przez naturalne bariery strefy aeracji. Pr. dokt., AGH Kraków, s. 108.
- DROŻDŻAK R. 2011 – Wpływ chemizmu filtrującej wody na mierzoną wartość przepuszczalności gruntów. Pr. dokt., AGH, Kraków, s. 155.
- DUDA R., WITCZAK S., ŻUREK A. 2011 – Mapa wrażliwości wód podziemnych Polski na zanieczyszczenie 1 : 500 000. Metodyka i objaśnienia tekstowe. Wyd. AGH, Kraków, s. 138.
- DUDA R., WINID B., ZDECHLIK R., STĘPIEŃ M. 2013 – Metodyka wyboru optymalnej metody wyznaczania zasięgu stref ochronnych ujęć zwykłych wód podziemnych z uwzględnieniem warunków hydrogeologicznych obszaru RZGW w Krakowie. Wyd. AGH, Kraków, s. 154.
- GÓRA S., 2012 – Podatność wód podziemnych na zanieczyszczenia w warunkach płytkiego górnictwa węglowego i zatapiania kopalń w północno-wschodniej części Górnoląskiego Zagłębia Węglowego. Pr. dokt., AGH Kraków, s. 133.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. (red.) 1977 – Gruntoznawstwo. Wyd. Geol., Warszawa, s. 358.
- GRABOWSKA-OLSZEWSKA B. (red.) 1998 – Geologia stosowana. Właściwości gruntów nienasyconych. PWN, Warszawa, s. 220.
- HANDBOOK of Ground Water Development, 1990 – Roscoe Moss Company, J. Wiley, New York, s. 493.
- HAURYŁKIEWICZ J. 1999 – Znaczenie uwzględniania gradientu początkowego w ochronie wód podziemnych. Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Koszalin: 143–156.
- HAURYŁKIEWICZ J. 2004 – Wpływ gradientu początkowego w gruntach nadkładu zbiornika wody podziemnej na zasięg strefy ochronnej ujęcia. [W:] Mat. XII Sem. Nauk. „Regionalne problemy ochrony środowiska w ujściu Odry. Środowisko w świetle dyrektyw Unii Europejskiej”. Kołobrzeg 2004, Wyd. Uczeln. PSzczec.: 17–22.
- HAURYŁKIEWICZ J. 2005 – Niektóre nieprawidłowości w obliczeniach czasu przesączania wody podziemnej przez pakiet warstw w strefie saturacji. Pr. Geol., 53 (8): 668–672.
- HERBICH P., NIDENTAL M., WOŹNICKA M. 2008 – Wskazania metodyczne do opracowania warstw informacyjnych bazy danych GIS Mapy Hydrogeologicznej Polski 1 : 50 000 „Pierwszy poziom wodonośny – wrażliwość na zanieczyszczenie i jakość wód”. Wyd. Państw. Inst. Geol., Warszawa, s. 70.
- HERBICH P., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., PRAŻAK J. 2009 – Metodyka wyznaczania obszarów ochronnych Głównych Zbiorników Wód Podziemnych dla potrzeb planowania i gospodarowania wodami w obszarach dorzeczy. Min. Środ., Warszawa; <http://www.psh.gov.pl/plik/id.4712,v.artykul.3338.pdf>.
- IWANEK M., KOWALSKI D., OLSZTA W. 2004 – Obliczanie współczynnika przewodnictwa hydraulicznego metodą van Genuchtena-Mualem w zależności od parametrów krzywej retencji wodnej. Acta Agrophysica, 3 (3), s. 17.
- JANIK G. 2009 – Technika TDR w modelowaniu ruchu wody glebowej. Wyd. UPrzyr., Wrocław, s. 99.
- KACHNIC M. 1995 – Zastosowanie systemu informacji przestrzennej (GIS) i programu WHPA do wyznaczenia stref ochronnych ujęcia wód pitnych w Bieżanowie – k/Krakowa. [W:] Mat. Konf. WPH, t. 8. Kraków–Krynica, 1995: 179–186.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.) 1984 – Ochrona wód podziemnych. Wyd. Geol., Warszawa, s. 328.

- KLOJZY-KARCZMARCZYK B. 2011 – Ocena zagrożenia zanieczyszczeniem rzeźną wód podziemnych w wyniku oddziaływania wybranych odcinków dróg na obszarze centralnej Polski. Śródkowo-Pomorskie Tow. Nauk. Ochr. Środ. Rocznik Ochr. Środ., 13: 1767–1782.
- KROGULEC E. 2004 – Ocena podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie w dolinie rzecznej na podstawie przesłanek hydrodynamicznych. Geologia UW, t. 449, Wyd. UW, Warszawa, s. 177.
- LISZKOWSKA E. 1996 – Wzór Kozeny-Carmana uniwersalnym wzorem na obliczanie współczynnika filtracji. Geologos, 1. Wyd. Continuo, Wrocław: 193–202.
- MACIOSZCZYK T. 1999 – Czas przesączania pionowego wody jako wskaźnik stopnia ekranowania warstw wodonośnych. Prz. Geol., 47 (8): 731–736.
- MAŁECKI J. 1998 – Rola strefy aeracji w kształtowaniu składu chemicznego płytkich wód podziemnych wybranych środowisk hydrogeochemicznych. Biul. Państw. Inst. Geol., 381, Warszawa, s. 219.
- McWHORTER D.B., SUNADA D.K. 1981 – Ground Water Hydrology and Hydraulics. Water Resources Publications, Fort Collins, Colorado, s. 290.
- MARCINIAK M., PRZYBYŁEK J., HERZIG J., SZCZEPAŃSKA J. 1999 – Badania współczynnika filtracji utworów półprzepuszczalnych. Wyd. Sorus, Poznań, s. 101.
- MYŚLIŃSKA E. 1992 – Laboratoryjne badania gruntów. PWN, Warszawa, s. 244.
- PARYŁAK, K., ZIĘBA Z. 2012 – Metoda określania parametrów przestrzeni porowej gruntów niespoistych z uwzględnieniem kształtu cząstek. Inż. Mor. Geotech., 4: 361–366.
- PAZDRO Z. 1983 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa, s. 575.
- PAZDRO Z., KOZERSKI B. 1990 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa, s. 624.
- ROGOŹ M. 2012 – Metody obliczeniowe w hydrogeologii. Wyd. Nauk. „Śląsk”, Katowice, s. 530.
- RODZOCH A. 1997 – Ocena wrażliwości warstw wodonośnych na zanieczyszczenie w projektowaniu stref ochronnych dla ujęć wód podziemnych i obszarów GZWP. [W:] Mat. Konf. WPH, Poznań-Kiekrz, t. 8: 183–188.
- RODZOCH A. 2003 – Wyznaczanie stref ochronnych ujęć wód podziemnych w systemach wielowarstwowych – przykład ujęcia komunalnego w Pabianicach. [W:] Mat. Konf. WPH, t. 11, cz. 1, Gdańsk: 425–432.
- TARKA R. 2003 – Własności hydrogeologiczne utworów kredy w Sudetach na podstawie badań laboratoryjnych. [W:] Mat. Konf. WPH, t. 9, cz. 1 – Gdańsk 2003: 237–244.
- WITCZAK S., ŻUREK A. 1994 – Wykorzystanie map glebowo-rolniczych w ocenie ochronnej roli gleb wód podziemnych. Metodyczne podstawy ochrony wód podziemnych. Wyd. AGH. 155–180.
- WOJEWODA J. 1985 – Anizotropia przepuszczalności górnokredowych piaskowców progów Radkowa (Sudety Środkowe). Prz. Geol., 33(4): 221–224.
- WÓJCIK E. 2005 – Zależność między wilgotnością a ciśnieniem ssania w gruntach spoistych Warszawy. [W:] Mat. Konf. WPH, t. XII, Toruń: 731–736.
- ZIĘBA Z. 2013 – Wpływ cech kształtu cząstek drobnoziarnistych gruntów niespoistych na ich wodoprzepuszczalność. Pr. dokt., UPrzyr., Wrocław, s. 106.
- ŻUREK A., CZOP M. 2010 – Modelowanie warunków przepływu i przekształceń składu chemicznego wód opadowych w trakcie procesu infiltracji, na przykładzie doświadczenia lizymetrycznego. Biul. Państw. Inst. Geol., 442: 181–188.