

## Wyznaczanie terenu ochrony pośredniej ujęcia wód podziemnych. Porównanie wyników uzyskanych metodami analitycznymi z modelowaniem numerycznym

Robert Duda<sup>1</sup>, Bogumiła Winid<sup>2</sup>, Robert Zdechlik<sup>1</sup>

**Delineation of wellhead protection area. Comparative study of results obtained by analytical methods and numerical modeling.** Prz. Geol., 63: 694–699.

*Abstract.* In case of groundwater intakes with a low well discharge, localized in simple hydrogeological conditions, the wellhead protection area (WHPA) can be delineated by one of available analytical methods. The differences between the WHPA ranges delineated by analytical methods, give rise to the question which method would be optimal to be used to handle simple hydrogeological conditions. Analytical methods considered in the study include the Wyssling method, the Krijgsman and Lobo-Ferreira (K&L-F) method, and the Analytical Element Method (AEM). WHPA delineated using analytical methods are compared with data obtained from hydrogeological numerical model, which becomes the reference method. The study was performed for two single wells, and a simplified case was considered too, whereby two wells were represented by an equivalent one. The criterion used in the assessment is the distance upstream from the well to the zone boundary ( $L_u$ ), for various time-of-travel to the intake (1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 years), and the shape and lateral extent of the WHPA. Discrepancies between the analytical methods vary depending on the time-of-travel, reaching 11% at most. Discrepancies between the analytical methods and numerical modelling results for single wells vary depending on the time-of-travel and the employed analytical approach, reaching 25% at most. For time-of-travel longer than 5 years, the maximal distances  $L_u$  calculated by the analytical methods are found to be smaller than those obtained by the reference method. The study indicates that results obtained by compared analytical methods are rather similar each other, but not similar to numerical modelling data. For scenario with the equivalent well there is major discrepancy between the reference values and analytical data.

**Keywords:** groundwater protection, wellhead protection area, WHPA, source protection zone, analytical methods, numerical model, time-of-travel

Właściwe wyznaczenie terenu ochrony pośredniej strefy ochronnej (SO) ujęcia wód podziemnych jest istotnym elementem ochrony ujmowanych wód. W przypadku studni o stosunkowo małych wydajnościach, do ok. 40–50 m<sup>3</sup>/h, zlokalizowanych w prostych warunkach hydrogeologicznych do wyznaczania zasięgu SO nadal często stosuje się metody analityczne. Są one oparte na bardzo uproszczonym schemacie przepływu wód, zakładającym jednorodną, izotropową warstwę wodonośną, bez zaburzeń ciągłości, o stałej miąższości oraz jednolitych wartościach parametrów hydrogeologicznych.

Różnorodność metod analitycznych rodzi pytanie, która z nich jest najodpowiedniejsza do stosowania w określonych warunkach hydrogeologicznych. Raymond i in. (2006) porównywali rezultaty wyznaczania SO metodą elementów analitycznych (AEM) i obliczonego promienia okręgu zasięgu oddziaływania studni (*calculated fixed radius* – CRF). Mogheir & Tarazi (2010) analizowali wyniki uzyskane metodami: CRF, wzorów analitycznych oraz AEM. Miller i in. (2003) porównali metodę CRF z wynikami modelowania numerycznego. Porównanie metod wyznaczania SO na podstawie wielkości otrzymanych obszarów dyskusowali również Miller (2005), Strobl & Robillard (2006), Paradis i in. (2007) oraz Dong i in. (2013). Badania te nie pozwoliły jednak na wskazanie, która z metod jest najlepsza do wyznaczania zasięgu SO w prostych warunkach hydrogeologicznych. Brak jednoznacznej oceny zastosowanych metod analitycznych może wynikać m.in. z prowadzenia porównań na przykładach rzeczywistych ujęć, działa-

jących w odmiennych warunkach hydrogeologicznych. Ponadto porównania prowadzono zazwyczaj względem metody CRF, której podstawowym założeniem jest brak przepływu w warstwie wodonośnej. W rzeczywistych warunkach geologicznych jest to sytuacja bardzo nietypowa, stąd też wiarygodność tej metody oraz porównań przeprowadzonych względem jej wyników jest dyskusyjna.

Duda i in. (2013) dokonali kolejnej oceny metod wyznaczania SO na przykładzie dopływu do pojedynczej studni. Porównywali rezultaty otrzymane metodami: Wysslinga (Wyssling, 1979), AEM (Ceric & Haitjema, 2005) oraz Krijgsmana i Lobo-Ferreiry (Krijgsman & Lobo-Ferreira, 2001; Moinate & Lobo-Ferreira, 2005). Jako relatywnie najdokładniejszą wskazano metodę AEM. Różnice między wynikami poszczególnych metod nie były jednak na tyle duże, żeby zdyskwalifikować pozostałe oceniane metody, a jednoznaczne wskazanie najlepszej metody okazało się niemożliwe.

W niniejszej pracy podjęto kolejną próbę oceny stosowanych metod, po przeprowadzeniu badań w szerszym zakresie. Ich celem było porównanie zasięgów SO otrzymanych wybranymi metodami analitycznymi w warunkach dopływu do dwóch studni eksploatacyjnych, a na tej podstawie odpowiedź na pytanie, czy jest możliwe jednoznaczne wskazanie najdokładniejszej metody analitycznej. Dodatkowo sprawdzano, czy dla studni eksploatacyjnych położonych blisko siebie jest możliwe wyznaczenie zasięgu SO metodą uproszczoną, polegającą na przeprowadzeniu obliczeń analitycznych dla zlokalizowanej pomiędzy

<sup>1</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; duda@agh.edu.pl, robert.zdechlik@agh.edu.pl.

<sup>2</sup> AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Wiertnictwa, Nafty i Gazu, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; winid@agh.edu.pl.

nimi studni zastępczej. Uznano, że oceny prawidłowości wyznaczania zasięgu SO metodami analitycznymi można dokonać przez porównanie uzyskanych rezultatów z zasięgiem SO wyznaczonym na podstawie modelu numerycznego. Dzięki dokładnemu odwzorowaniu warunków hydrogeologicznych rejonu projektowanego ujęcia model pozwala wiarygodnie wyznaczyć obszar spływu wód do studni (OSW). W konsekwencji otrzymany na modelu zasięg SO można traktować jako referencyjny w odniesieniu do rezultatów otrzymywanych metodami analitycznymi. Zasadniczym celem badań było wskazanie, która z ocenianych metod analitycznych pozwala wyznaczyć zasięg SO najbliższy referencyjnemu.

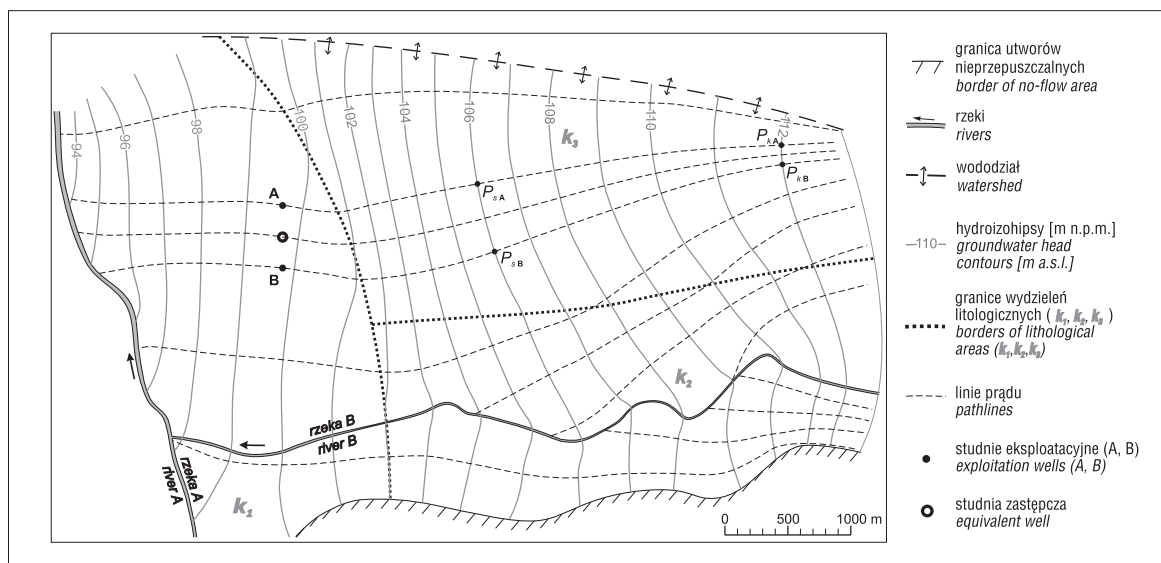
## METODYKA

Do obliczeń przyjęto hipotetyczny poligon badawczy, obejmujący powierzchnię ok. 20 km<sup>2</sup>, reprezentujący uproszczone warunki hydrogeologiczne. Założono występowanie w utworach porowych pojedynczego, swobodnego poziomu wodonośnego. Naturalne ograniczenie obszaru filtracji stanowią: od strony południowej – granica strefy dolinnej rzeki B, gdzie występuje kontakt z utworami nieprzepuszczalnymi, od strony zachodniej – rzeka A, od strony północnej – dział wód podziemnych (ryc. 1). Od strony wschodniej granicę obszaru badań przyjęto w oddaleniu od studni projektowanego ujęcia, na podstawie hydroizohipsy o znanej wartości (113 m n.p.m.). W pobliżu rzeki A występują piaski ze żwirami o współczynniku filtracji  $k_1 = 2,8 \cdot 10^{-4}$  m/s, przy rzece B zalegają piaski średnioziarniste ( $k_2 = 1,3 \cdot 10^{-4}$  m/s), na pozostałym obszarze piaski pylaste ( $k_3 = 6,1 \cdot 10^{-5}$  m/s), o porowatości aktywnej odpowiednio:  $n_{e1} = 0,25$ ,  $n_{e2} = 0,22$ ,  $n_{e3} = 0,16$ . Spąg warstwy wodonośnej zapada od rzędnej 85 m n.p.m. w części wschodniej, do 75 m n.p.m. w części północno-zachodniej. Przepływ wód podziemnych odbywa się ku zachodowi, główną bazą drenażu jest rzeka A. Naturalne zwierciadło wód podziemnych zalega na rzędnych od 94 m n.p.m. (w części północno-zachodniej) do 113 m n.p.m. (w części wschodniej). W strefie dolinnej zostanie wykonane ujęcie składające się z dwóch studni (A i B), roz-

mieszczonych w odległości 500 m, z wydatkiem eksploatacyjnym 1200 m<sup>3</sup>/d każda.

W obliczeniach analitycznych zazwyczaj uwzględniane są uśrednione wartości parametrów hydrogeologicznych, np. gradientu hydraulicznego czy współczynnika filtracji. Przy uśrednianiu wartości parametrów ważne jest określenie obszaru, w którego obrębie jest to przeprowadzane. Wartości uśrednione są istotne głównie na obszarze ograniczonym izochroną 25 lat dopływu wody do studni. W tym celu na mapie hydroizohips przy granicy obszaru badań przyjęto punkt  $P_k$ , w którym znane jest położenie zwierciadła wody, zlokalizowany na dochodzącej do ujęcia linii prądu (ryc. 1). Do obliczenia średniego gradientu przyjęto na tej samej linii prądu punkt  $P_s$ , zlokalizowany w miejscu odpowiadającym połowie różnicy położenia zwierciadła wody pomiędzy punktem  $P_k$  a studnią. Punkt  $P_s$  stanowi granicę obszaru uśredniania wartości parametrów. Wykorzystując wartości uśrednione, wyznaczano przebieg izochrony 25 lat, porównując go z granicą obszaru uśredniania ( $P_s$ ). Przyjęto założenie, że jeżeli izochrona 25 lat, wyznaczona na podstawie średniego gradientu, znalazłaby się znacznie dalej od ujęcia niż punkt  $P_s$ , to lokalizacja tego punktu zostanie przesunięta w górę strumienia wód. Natomiast gdyby izochrona przebiegała bliżej ujęcia, to punkt  $P_s$  zostałby przesunięty w jego stronę. Działanie prowadzono aż do uzyskania zgodności obu obszarów. W efekcie wyznaczony zasięg SO jest położony na obszarze, dla którego uśredniono wartości parametrów. Wartość współczynnika filtracji ( $k$ ) obliczono jako średnią harmoniczną dla oddzielnych linii prądu osiągniętych poszczególne studnie (tab. 1). Obliczenia przeprowadzono niezależnie dla studni A i B, a także dla przypadku uproszczonego, w którym dwie projektowane studnie zastąpiono jedną, zlokalizowaną w połowie odległości między studniami A i B, której przypisano ich sumaryczną wydajność.

Do porównania wybrano metody Wysslinga, AEM oraz Krijgsmana i Lobo-Ferreiry (K&L-F), bazujące na obliczaniu odległości między studnią a rozpatrywaną izochroną w górę strumienia wód. Główną porównywaną wielkością jest więc odległość  $L_0$ , określana od studni w górę strumienia przepływu do punktu przecięcia z założoną izochroną. Pa-



Ryc. 1. Założenia poligonu badawczego – schemat naturalnych warunków hydrogeologicznych  
Fig. 1. The assumptions of test site – scheme of natural hydrogeological conditions

**Tab. 1.** Uśrednione wartości parametrów hydrogeologicznych do obliczeń analitycznych**Table 1.** Average values of hydrogeological parameters for analytical calculations

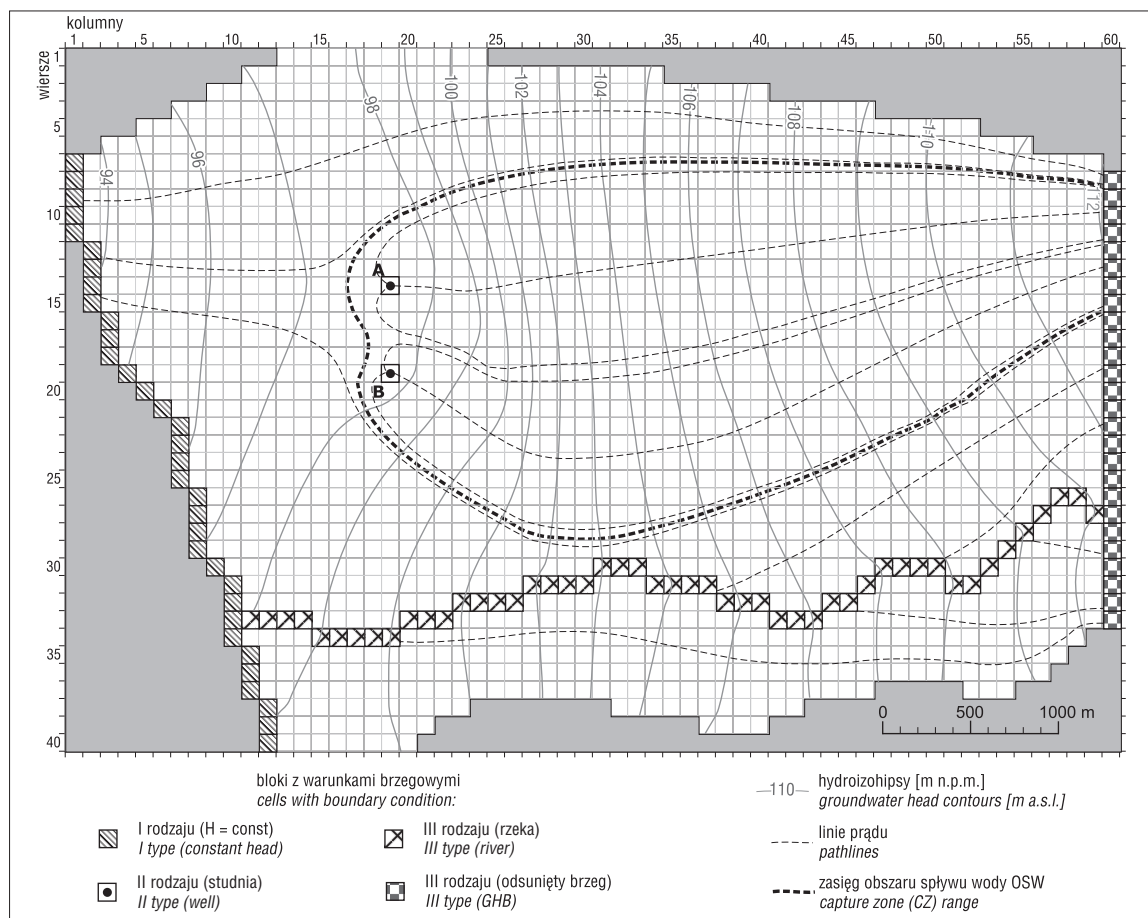
Studnia/ Well	Parametr/ Parameter	$k_{sr}$ [m/s]	$I_{sr}$ [-]	$n_{esr}$ [-]
A		$8,0 \cdot 10^{-5}$	$3,84 \cdot 10^{-3}$	0,18
B		$8,4 \cdot 10^{-5}$	$3,52 \cdot 10^{-3}$	0,18
Zastępcza/equivalent		$8,3 \cdot 10^{-5}$	$3,62 \cdot 10^{-3}$	0,18

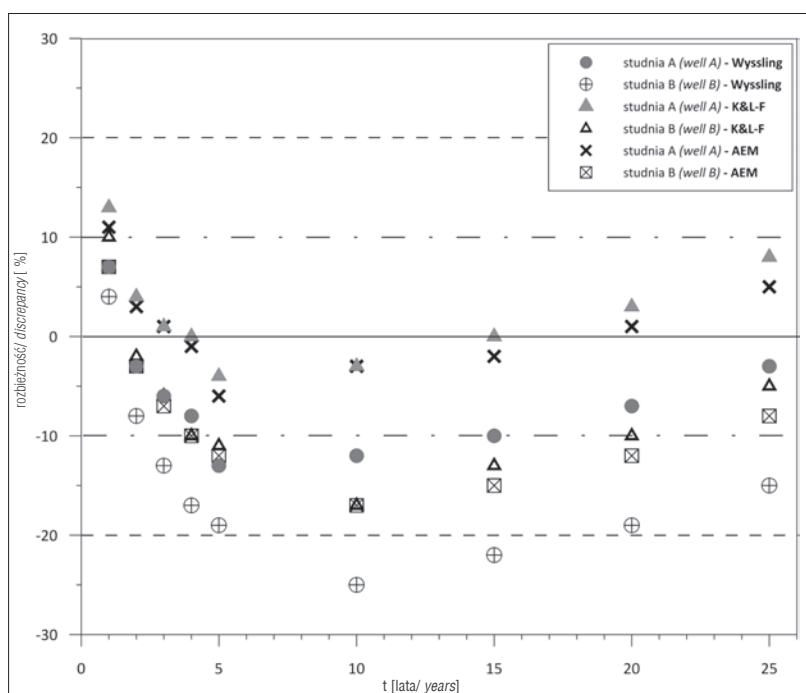
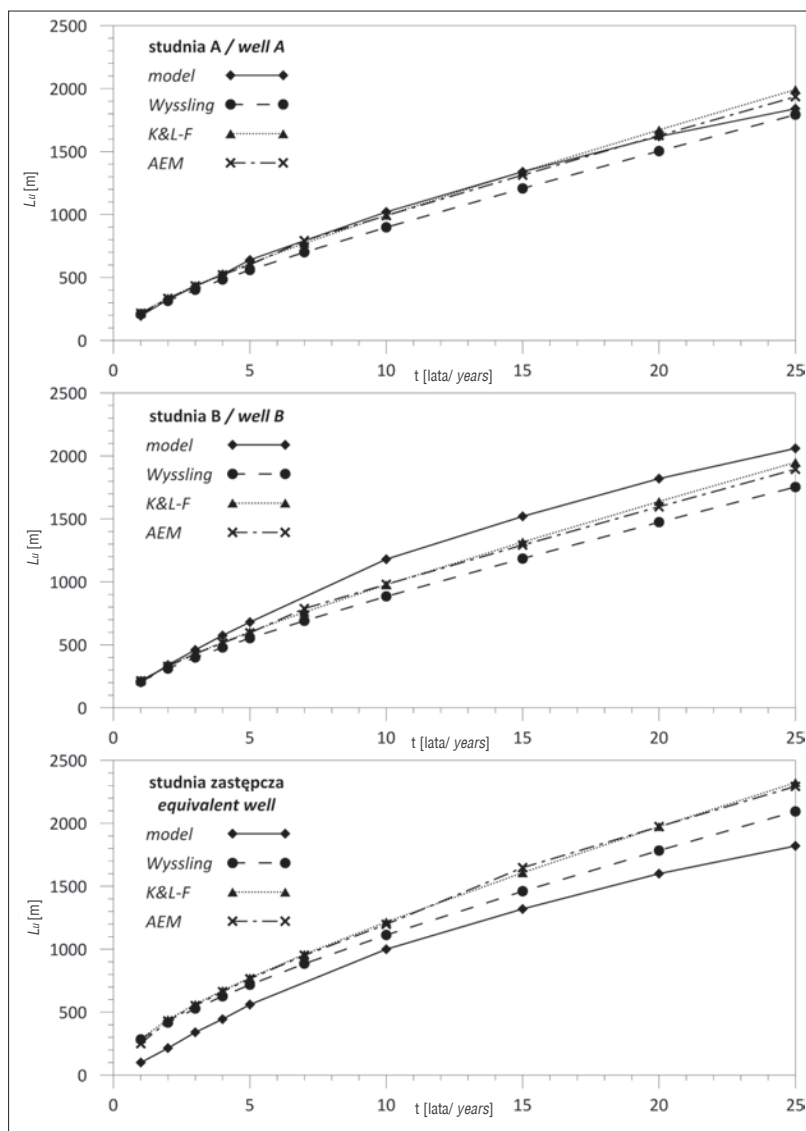
rametr ten wybrano jako kryterium porównania, ponieważ jako najdłuższy wymiar zasięgu SO ma największy wpływ na wielkość obszaru SO. Ponadto odległość  $L_u$  w większym stopniu niż pozostałe wymiary SO zależy od czasu dopływu wód do ujęcia. Dodatkowym kryterium porównania był kształt SO wyznaczony dla izochrony 25 lat dopływu wody do studni. Porównanie prowadzono oddzielnie dla studni A i B, a także dla wariantu uwzględniającego pojedynczą studnię zastępczą zlokalizowaną w połowie odległości między tymi studniami, o wydajności równej sumie wydatków studni A i B. Odległości w górę strumienia wód podziemnych pomiędzy studniami a rozpatrywanymi izochronami 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15 i 25 lat porównano z odległościami dla odpowiednich izochron otrzymanymi z modelowania. Obliczenia analityczne prowadzono wzdłuż linii prądu dla układu hydrodynamicznego w warunkach naturalnych, tj. bez oddziaływania studni (ryc. 1).

Do badań porównawczych wykorzystano model numeryczny przyjętego poligonu badawczego, który został opisany przez Dudę i in. (2013). Model oparto na metodzie różnic skończonych (FDM) z wykorzystaniem algorytmu MODFLOW (McDonald & Harbaugh, 1988). Zastosowano dyskretyzację na podstawie siatki bloków kwadratowych o wymiarach  $\Delta x = \Delta y = 100$  m; model składa się z 40 wierszy i 60 kolumn (ryc. 2). Do odwzorowania elementów oddziałujących na wody podziemne zastosowano warunki brzegowe (Zdehlik & Kulma, 2009): I rodzaju (rzeka A o dobrym kontakcie hydraulicznym wód powierzchniowych z podziemnymi), II rodzaju (zasilenie z infiltracji opadów) III rodzaju (rzeka B o ograniczonym kontakcie hydraulicznym z warstwą wodonośną oraz odsunięta granica hydrauliczna od strony wschodniej). Prognoza uwzględnia pracę dwóch studni symulowanych warunkiem brzegowym II rodzaju. Zasięgi SO wyznaczano z wykorzystaniem programu typu MODPATH, umożliwiającego śledzenie cząstek wody w górę strumienia przyływu wód (Pollock, 1989).

## REZULTATY

Wyniki obliczeń odległości  $L_u$ , charakteryzującej położenie izochron od studni A i B w górę strumienia wód, wskazują, że dla izochron od 1 do 5 lat odległości są do siebie zbliżone, natomiast bardziej różnicują się w przypadku izochron o czasie dłuższym niż 5 lat (ryc. 3). Różnice narastają wraz z rozpatrywanym czasem dopływu wody do studni i wynoszą maksymalnie 11%. Dla każdej izochrony

**Ryc. 2.** Prognozowany układ zwierciadła wód podziemnych i linie prądu w warunkach pracy studni A i B (wg Dudy i in., 2013, zmienione)**Fig. 2.** Predicted groundwater head contours and main pathlines for wells A and B discharges (after Duda et al., 2013, modified)



**Ryc. 3.** Odległości  $L_u$  w funkcji czasu dopływu dla studni A i B oraz studni zastępczej  
**Fig. 3.** Distance  $L_u$  vs. time-of-travel for wells A, B and the equivalent well

najmniejszą odległość  $L_u$  uzyskano metodą Wysslinga. Odległości otrzymane metodami K&L-F i AEM są większe i zbliżone do siebie, a zarazem wyraźnie odbiegają od rezultatów uzyskanych metodą Wysslinga.

Dla poszczególnych czasów dopływu wody do studni A i B określono także względne różnice między wynikami obliczeń analitycznych a rezultatami modelowania (ryc. 4). Analiza otrzymanych rezultatów wskazuje, że odległości  $L_u$  charakteryzujące położenie izochron w górę strumienia wód, otrzymane metodami analitycznymi dla przedziałów czasowych 1, 2, 3, 4 i 5 lat, są zbliżone do wartości otrzymanych na modelu numerycznym – rozbieżność na ogół nie przekracza 10%, a maksymalnie wynosi 19% odległości otrzymanej na modelu. Odległości  $L_u$  najbardziej zbliżone do referencyjnych uzyskano metodami K&L-F i AEM.

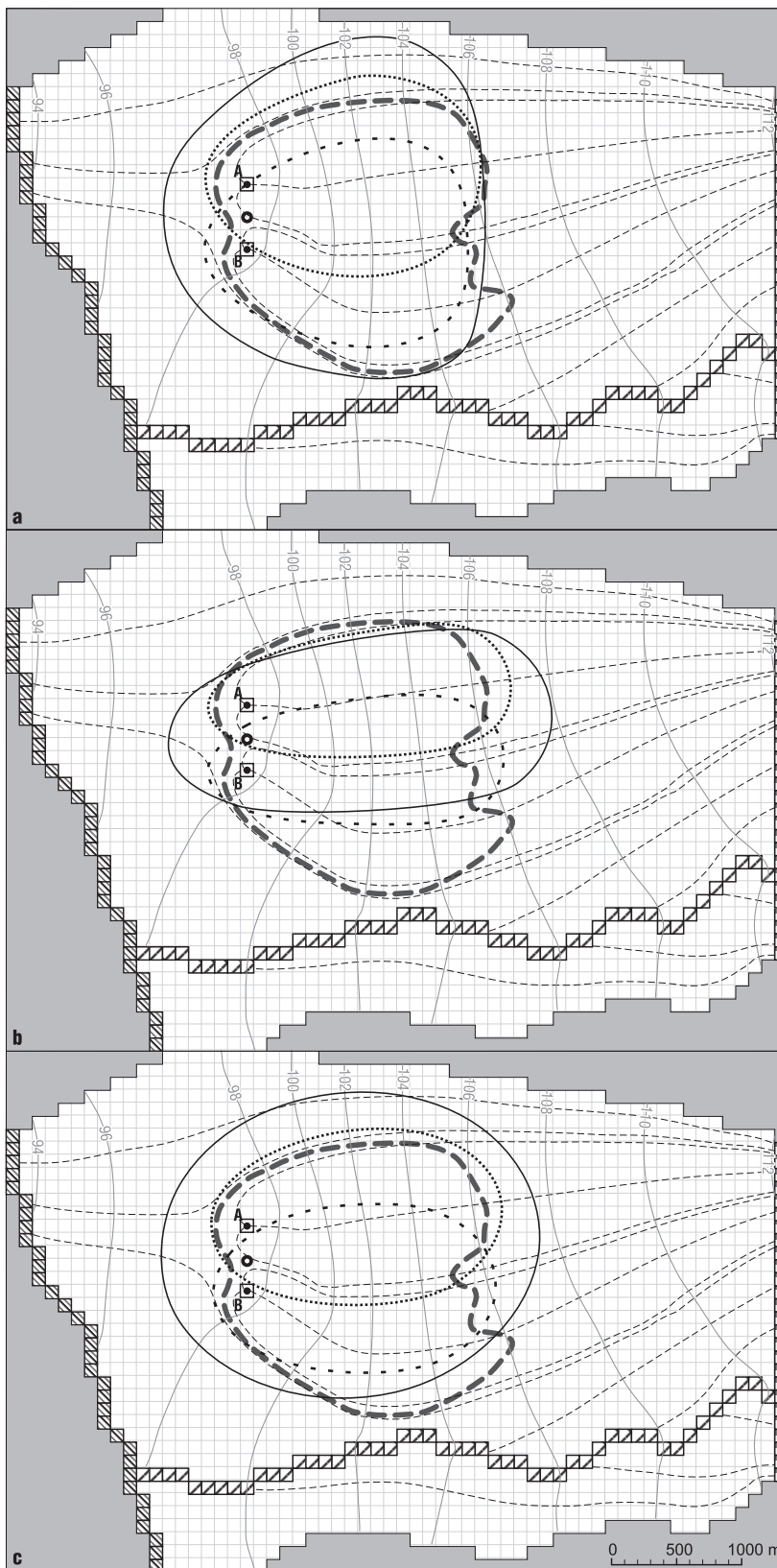
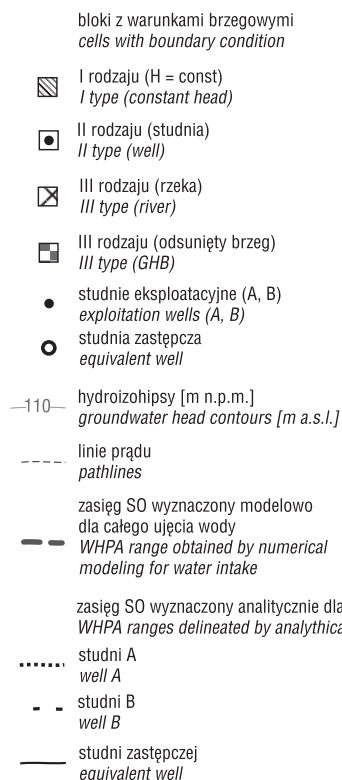
Dla studni A i B w przedziałach czasowych 5, 10 i 15 lat zróżnicowanie odległości uzyskanych metodami analitycznymi jest większe. Najlepszą zgodność z wynikami referencyjnymi uzyskano metodą K&L-F, dla której rozbieżność wynosi 0–17% oraz metodą AEM z rozbieżnością 2–17%. Mniejszą zgodność wykazują wyniki uzyskane metodą Wysslinga – rozbieżność sięga 25%. Z kolei dla czasów dopływu wody do studni 20 i 25 lat rozbieżność między wartościami uzyskanymi metodami analitycznymi a wartościami referencyjnymi, zmienia się w granicach od 1 do 12% dla AEM, od 3 do 10% dla metody K&L-F, oraz od 3 do 19% dla metody Wysslinga (ryc. 4). Obliczone analitycznie odległości  $L_u$  w porównaniu z wartościami referencyjnymi są w zasadzie niedoszacowane. Największe rozbieżności występują dla izochron 10 i 15 lat.

Dla wariantu dotyczącego studni zastępczej różnice między poszczególnymi czasami dopływu wody do studni zmieniają się w sposób nieregularny; największa różnica względna występuje dla izochrony 1 roku. Odległości  $L_u$  uzyskane analitycznie dla studni zastępczej różnią się znacznie od rezultatów z modelu. Różnice wynoszą od 150 do ok. 500 m, zwięk-

**Ryc. 4.** Rozbieżności między odległościami  $L_u$  otrzymanymi metodami analitycznymi i metodą modelowania, w zależności od czasu dopływu  
**Fig. 4.** Discrepancies between distance  $L_u$  obtained by analytical methods and modeling method vs. time-of-travel

szając się wraz z wydłużeniem czasu dopływu wody do studni (ryc. 3). Jednak rozbieżności względne zmniejszają się wraz z wydłużeniem czasu dopływu: dla przedziałów 1 roku i 2 lat przekraczają o 100% wartość odniesienia; dla 3, 4 i 5 lat wynoszą 28–66%, a dla izochron 10–25 lat od 11 do 28% wartości określonej modelowaniem.

Najlepsza zgodność wyznaczonych analitycznie kształtów i zasięgów SO z ich odpowiednikami uzyskanymi na modelu numerycznym występuje w przypadku wyników uzyskanych metodami Wysslinga i AEM (ryc. 5a i c). Rezultaty tych metod wykazują większą zgodność szerokości SO określonej w kierunku prostopadłym do strumienia przepływu wód z wynikami metody referencyjnej niż w przypadku metody K&L-F. W metodzie K&L-F kształt SO dla studni zastępczej różni się od kształtu uzyskanego na modelu, a obszar objęty SO jest niedoszacowany w kierunku prostopadłym do kierunku przepływu wód podziemnych (ryc. 5b).



**Ryc. 5.** Zasięgi SO wyznaczone dla czasu 25 lat dopływu wody do ujęcia, określone metodami analitycznymi: Wysslinga (a), K&L-F (b), AEM (c) oraz metodą modelowania (wg Dudy i in., 2013, zmienione)  
**Fig. 5.** WHPA ranges for 25-year time-of-travel, obtained by analytical methods: Wyssling (a), K&L-F (b), AEM (c) and by numerical modeling (after Duda et al., 2013, modified)

## DYSKUSJA

Przyjęte kryteria oceny porównawczej wykazują, że zasięgi SO uzyskane wybranymi metodami analitycznymi, są przeważnie do siebie zbliżone. Analiza najdłuższego wymiaru SO, przeprowadzona dla rozpatrywanych czasów dopływu wody do ujęć, ukazuje bliską zgodność wyników metod AEM i K&L-F. Porównanie obszarów SO wyznaczonych dla czasu dopływu 25 lat (ryc. 5) wskazuje podobieństwo wyników metod Wysslinga i AEM.

Rezultaty obliczeń analitycznych nie są identyczne z wynikami referencyjnymi (model). Otrzymana analitycznie odległość  $L_u$  może świadczyć o nieznacznej przewadze metod K&L-F i Wysslinga nad metodą AEM. Jednak niewielkie różnice między wynikami uzyskanymi poszczególnymi metodami oraz najbardziej zbliżony do referencyjnego kształt i zasięg SO uzyskany metodą AEM nie upoważniają do stwierdzenia, że wyniki otrzymane metodą AEM są mniej dokładne. Na rozbieżność wyników analitycznych w stosunku do referencyjnych może mieć wpływ fakt, że w obliczeniach analitycznych przyjęto wartość współczynnika filtracji uśrednioną wzdłuż linii prądu strumienia wód w obszarze spływu. Natomiast w modelu czasy przepływu liczone są na podstawie wartości parametrów zadeklarowanych w poszczególnych blokach modelu. W konsekwencji występują różnice między zasięgiem izochron określonym modelowaniem a odległościami wyliczonymi analitycznie (ryc. 3). Większa zgodność rezultatów metod analitycznych i modelowania występuje w przypadku studni A, gdzie średnia wartość współczynnika filtracji jest nieco mniejsza niż w pobliżu studni B. Większa niezgodność w rejonie studni B może wynikać również z modyfikacji układu hydrodynamicznego na skutek oddziaływania rzeki B, co nie jest uwzględniane w metodach analitycznych. W przypadku studni B większe odległości  $L_u$  otrzymano z modelowania niż z obliczeń.

Uproszczenie, polegające na odwzorowaniu ujęcia zespołowego jedną studnią zastępczą o sumarycznej wydajności, skutkuje znaczącą różnicą wyników analitycznych w stosunku do referencyjnych, co prowadzi do przeszacowania zasięgu SO. Najmniejsze przeszacowanie występuje przy zastosowaniu metody Wysslinga. Zgodność zasięgu i kształtu SO określonych analitycznie z zasięgiem referencyjnym zależy od zakładanej wydajności rozpatrywanej studni. Jest to zrozumiałe, gdyż wydajność jest istotnym parametrem w formułach określających zasięg SO.

Badania zrealizowano, przyjmując określone, specyficzne warunki hydrogeologiczne w rejonie ujęcia. Rezultaty porównań dla odmiennych warunków hydrogeologicznych mogą się różnić od wykazanych w tej pracy.

## WNIOSKI

Rezultaty przeprowadzonych badań nadal nie pozwalają na stwierdzenie w sposób jednoznaczny, która z rozpatrywanych metod analitycznych jest najwłaściwsza w zastosowaniu przy wyznaczaniu zasięgu SO ujęcia zlokalizowanego w prostych warunkach hydrogeologicznych. Wskazanie, która z ocenianych metod analitycznych najlepiej wyznacza zasięg SO, bez sprecyzowania konkretnych

warunków hydrogeologicznych w rejonie ujęcia, może okazać się trudne. Wyniki badań wykazują, że celowe jest przeprowadzenie analizy porównawczej dla studni zlokalizowanych w wariantowo zróżnicowanych warunkach hydrogeologicznych.

Wyznaczenie SO ujęcia zespołowego metodami analitycznymi w sposób uproszczony jedynie dla studni zastępczej o wydatku będącym sumą wydatków poszczególnych studni nie jest właściwym sposobem postępowania, ponieważ błąd wyznaczenia SO jest zbyt duży. Uproszczenie takie może skutkować znaczącą różnicą uzyskanego zasięgu SO w odniesieniu do zasięgu otrzymanego na modelu lub będącego efektem sumowania zasięgów SO wyznaczonych oddzielnie dla kilku studni.

Prace badawcze realizowano w ramach badań statutowych Katedry Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej WGGiOŚ (11.11.140.026) oraz Katedry Inżynierii Naftowej WWNiG (11.11.190.555) AGH w Krakowie.

## LITERATURA

- CERIC A. & HAITJEMA H. 2005 – On Using Simple Time-of-Travel Capture Zone Delineation Methods. *Ground Water*, 43 (3): 408–412.
- DONG Y., XU H. & LI G. 2013 – Wellhead protection area delineation using multiple methods: a case study in Beijing. *Environ. Earth Sci.*, 70: 619–628.
- 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 RZGW w Krakowie. RZGW w Krakowie, Wyd. AGH w Krakowie WGGiOŚ: s. 154 [http://www.krakow.rzgw.gov.pl/download/wytyczne\_strefy\_ochronne.pdf]
- KRIJGSMAN B. & LOBO-FERREIRA J.P.C. 2001 – A methodology for delineating wellhead protection areas. *Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon*: 75.
- MCDONALD M.G. & HARBAUGH A.W. 1988 – A modular three dimensional finite-difference ground-water flow model. *USGS Techniques of Water Resources Investigations, Book 6*, Washington, DC: 586.
- MILLER C. 2005 – The use of a GIS to compare the land areas captured by very basic and complex wellhead protection area models. *J. Environ. Health*, 68 (4): 21–26.
- MILLER C., CHUDEK P. & BABCOCK S. 2003 – A comparison of wellhead protection area delineation methods for public drinking water systems in Whatcom county, Washington. *J. Environ. Health*, 66 (2): 17–24.
- MOGHEIR Y. & TARAZI G. 2010 – Comparative identification of wellhead protection areas for municipal supply wells in Gaza. *J. Water Resour. Prot.*, 2 (2): 105–114.
- MOINANTE M.J. & LOBO-FERREIRA J.P. 2005 – On wellhead protection assessment methods and a case-study application in Montemor-o-Novo, Portugal. [W:] *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on hydrology and management of Water Resources Guimaraes, Portugal*, July 11–14.
- PARADIS D., MARTEL R., KARANTA G., LEFEBVRE R., MICHAUD Y., THERRIEN R. & NASTEV M. 2007 – Comparative study of methods for WHPA delineation. *Ground Water*, 45 (2): 158–167.
- POLLOCK D.W. 1989 – Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the US Geological Survey modular three dimensional finite-difference groundwater flow model. *USGS open-file report 89–381*, Reston, Virginia.
- RAYMOND H.A., BONDOC M., MCGINNIS J., METROPULOS K., HEIDER P., REED A. & SAINES S. 2006 – Using analytic element models to delineate drinking water source protection areas. *Ground Water*, 44 (1): 16–23.
- STROBL R.Q. & ROBILLARD P.D. 2006 – Comparison of several US EPA-Recommended and German wellhead protection area delineation methods in agricultural settings. *Water SA*, 32 (4): 507–517.
- WYSSLING L. 1979 – Eine neue Formel zur Berechnung der Zuströmungsdauer (Laufzeit) des Grundwassers zu einem Grundwasser-Pumpwerk. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 72 (2): 401–406.
- ZDECHLIK R. & KULMA R., 2009 – Kilka uwag o modelowaniu filtracji wód podziemnych. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 436: 569–574.