

MODELE MATEMATYCZNE PODWÓJNEJ PRZEWODNOŚCI HYDRAULICZNEJ I ICH ZASTOSOWANIE DO INTERPRETACJI TESTÓW PIEZOMETRYCZNYCH NA OBSZARZE KWB BĘŁCHATÓW

MATHEMATICAL MODELS OF DUAL TRANSMISSIVITY AND EXAMPLES OF THEIR APPLICATION IN INTERPRETING PIEZOMETRIC TESTS CONDUCTED IN THE BĘŁCHATÓW LIGNITE MINE

FILIP WOLNY¹, MARIUSZ JAMRÓZ², JERZY GASIŃSKI², MAREK MARCINIAK¹, MARIUSZ KACZMAREK³

Abstrakt. Testy identyfikacyjne typu *slug test* lub PARAMEX realizowane w piezometrach generują oscylacyjną lub wykładniczą reakcję zwierciadła wody. Zgodnie z założeniami teoretycznymi w ośrodku jednorodnym ruch zwierciadła wody ma w większości przypadków charakter wykładniczy. Jednak podczas badań terenowych rejestrowano także dwuwkładniczy charakter ruchu zwierciadła wody, co może świadczyć o podwójnej przewodności hydraulicznej T utworów, w których zafiltrowano badany piezometr. W artykule zaproponowano dwa modele matematyczne podwójnej przewodności, które wykorzystano do identyfikacji parametrów hydrogeologicznych niejednorodnych utworów wodonośnych. Przedstawiono podstawy teoretyczne, algorytmy interpretacyjne oraz przykłady identyfikacji podwójnej przewodności hydraulicznej. Estymacje przewodności wykonano z wykorzystaniem programu PARAMEX 4 oraz środowiska obliczeniowego MATLAB. Zaprezentowano wyniki estymacji przewodności hydraulicznej dla wybranych piezometrów zafiltrowanych w utworach niejednorodnych na terenie Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów. Przeanalizowano także ograniczenia proponowanych algorytmów interpretacyjnych.

Słowa kluczowe: *slug test*, metoda PARAMEX, przewodność hydrauliczna, heterogeniczność.

Abstract. Piezometric tests such as the slug test or PARAMEX test usually result in observing damped oscillations or exponential movement of the water level. However, during some tests, a bi-exponential response of the water table has been recorded. Bi-exponential movement may indicate the presence of a dual-permeability medium around the piezometer screen. Such medium is composed of two subdomains, each characterized by different hydraulic properties (including transmissivity, T). The paper aims to present two mathematical models – the piecewise exponential model and the bi-exponential model – which were applied in order to interpret the results of slug test conducted in heterogeneous sediments of the Bełchatów Lignite Mine. Theoretical background, interpretation algorithms and examples of dual transmissivity estimation for several chosen piezometers are presented. All necessary calculations were performed using PARAMEX 4 and MATLAB software. Furthermore, the limitations of the interpretation algorithms are discussed.

Key words: slug test, PARAMEX method, transmissivity, heterogeneity.

WSTĘP

Badania typu *slug test* polegają na wywoływaniu wewnątrz piezometru zmian położenia zwierciadła wody i obserwacji jego powrotu do położenia początkowego. Najczę-

ściej stosowanymi metodami uzyskania zmian położenia zwierciadła są napełnianie piezometru lub szczypanie z jego obrębu określonej objętości wody, albo umieszczenie w piezometrze przedmiotów o odpowiedniej objętości i ciężarze. Ponadto wahania zwierciadła wody można uzyskiwać

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, ul. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań; e-mail: filip.wolny@amu.edu.pl.

² PGE Górnictwo i Energetyka Konwencjonalna SA, Oddział Kopalnia Węgla Brunatnego Bełchatów, Rogowiec ul. Św. Barbary 3, 97-400 Bełchatów.

³ Uniwersytet Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy, Wydział Matematyki, Fizyki i Techniki, ul. M.K. Ogińskiego 16, 85-092 Bydgoszcz.

przez sprężanie lub zasysanie powietrza z piezometru po uprzednim jego uszczelnieniu (metoda PARAMEX) (Marciniak, 1999; Marciniak i in., 2013).

Powszechnie stosowanymi modelami matematycznymi wykorzystywanymi do interpretacji *slug testów* są modele Bouwera i Rice'a (1976), Bredehoefta i Papadopulos (1980), Coopera i in. (1965) oraz Hvorsleva (1951). Wszystkie te modele zakładają homogeniczność analizowanej warstwy wodonośnej. W rzeczywistości wiele warstw charakteryzuje się licznymi niejednorodnościami, które mogą w sposób znaczący modyfikować dynamikę ruchu wody. W takich przypadkach podczas wykonywania *slug testu* można zaobserwować nietypowy, dwuwykładniczy powrót zwierciadła wody do położenia początkowego. Pierwsza faza tego powrotu przebiega relatywnie szybko, natomiast druga – relatywnie wolno. Autorzy artykułu zakładają, że taki charakter ruchu zwierciadła jest widoczny w piezometrach zafiltrowanych w utworach o podwójnej przepuszczalności hydraulicznej. Zgodnie z definicją przytaczaną w wielu publikacjach, są one szczególnym typem utworów o podwójnej porowatości, które składają się z dwóch tzw. subdomen. Jedna subdomena – np. matryca porowata – pełni funkcję magazynującą, druga – np. sieć szczelin – odpowiada za filtrację. W utworach o podwójnej przepuszczalności hydraulicznej przepływ wody zachodzi w obu subdomenach. Do utworów tego rodzaju należy zaliczyć utwory szczelinowo-porowe, szczelinowe o różnych sieciach spękań, a także warstwowane (Leij i in., 2012). Subdomeny zatem różnią się parametrami hydrogeologicznymi, m.in. przewodnością hydrauliczną T oraz współczynnikiem filtracji k .

Celem artykułu jest przedstawienie dwóch modeli matematycznych do wyznaczania parametrów hydrogeologicznych niejednorodnych warstw wodonośnych w szczególności, gdy charakteryzują się podwójną przepuszczalnością hydrauliczną. Pierwszy to model przedziałami eksponencjalny, który umożliwi wyznaczenie parametrów hydrogeologicznych za pomocą algorytmu obliczeniowego programu PARAMEX 4. Metodę PARAMEX, wraz z odpowiednimi procedurami identyfikacyjnymi, z powodzeniem od lat stosuje się m.in. w kopalni węgla brunatnego w Bełchatowie w celu określania sprawności piezometrów. Drugi model, tzw. model bieksponencjalny, jest nową propozycją autorów niniejszej publikacji na identyfikację parametrów w przypadku zaobserwowania niewykładniczego powrotu poziomu wody do położenia ustalonego w trakcie wykonywania *slug testu*. W artykule zaprezentowano również wyniki identyfikacji przewodności hydraulicznej T z zastosowaniem omawianych modeli dla wybranych piezometrów.

Należy zaznaczyć, że wyznaczenie współczynników filtracji k utworów warstwowanych wymaga dokładnych danych o miąższości poszczególnych warstw w strefie okółofiltrowej piezometru. Ponadto bardzo trudne może być określenie współczynników filtracji skał litych, które charakteryzują się obecnością odrębnych systemów szczelin, np. gęstszej sieci spękań na wybranym odcinku strefy okółofiltrowej.

METODY BADAŃ

MODEL PRZEDZIAŁAMI EKSPONENCJALNY

Założenia teoretyczne algorytmu obliczeniowego dla testu PARAMEX przewidują dwie możliwości powrotu zwierciadła wody do położenia ustalonego – oscylacje tłumione oraz ruch aperiodyczny (Marciniak, 1999; Kaczmarek i in., 2016). W zdecydowanej większości przypadków obserwuje się ruch aperiodyczny, a krzywą wzniosu lub opadania zwierciadła $s(t)$ można opisać za pomocą funkcji wykładniczej:

$$s(t) = s_0 [1 - \exp(\lambda t)] \quad [1]$$

gdzie:

s_0 – depresja początkowa [m],

λ – wykładnik potęgowy zależny od przewodności hydraulicznej ($\lambda < 0$) [1/s].

Autorzy artykułu proponują aproksymować dwuwykładniczy ruch zwierciadła wody za pomocą dwóch teoretycznych krzywych wykładniczych (fig. 1A), zakładając, że początkowo dominuje lepsza przewodność, a następnie – gorsza. Takie założenie upraszcza rzeczywisty powrót zwierciadła wody do położenia początkowego, ale do celów praktycznych często jest wystarczające.

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = s_{01}[1 - \exp(\lambda_1 t)] & \text{dla } t_0 \leq t < t_b \\ s_2(t) = s_{02}[1 - \exp(\lambda_2 t)] & \text{dla } t_b \leq t < t_f \end{cases} \quad [2]$$

Przy użyciu algorytmu PARAMEX są obliczane dwie wartości przewodności hydraulicznej. Przewodność subdomeny o lepszych parametrach filtracji T_{prx1} jest obliczana z krzywej wykładniczej aproksymującej pierwszy fragment krzywej dwuwykładniczej (terenowej) – od czasu t_0 do czasu „przejścia” t_b . Przewodność subdomeny o gorszych parametrach filtracji T_{prx2} jest obliczana z krzywej wykładniczej aproksymującej, drugi etap dwuwykładniczego ruchu zwierciadła wody obserwowanego w trakcie testu – od czasu t_b do czasu końca testu t_f . Niewielkie zmiany przy wyborze czasu t_b nie powodują istotnych zmian identyfikowanych wartości przewodności.

MODEL BIEKSPONENCJALNY

Model zakłada, że krzywa dwuwykładnicza opisująca ruch zwierciadła wody w piezometrze jest efektem superpozycji dwóch krzywych wykładniczych w całym przedziale czasowym $(0; t_f)$ (fig. 1B). W tym modelu działanie obu przewodności hydraulicznych występuje przez cały czas trwania *slug testu* (t_0 do t_f):

$$s(t) = M_0 + M_1 [1 - \exp(-t/\tau_1)] + M_2 [1 - \exp(-t/\tau_2)] \quad [3]$$

gdzie:

$M_0, M_1, M_2, \tau_1, \tau_2$ – stałe modelu.

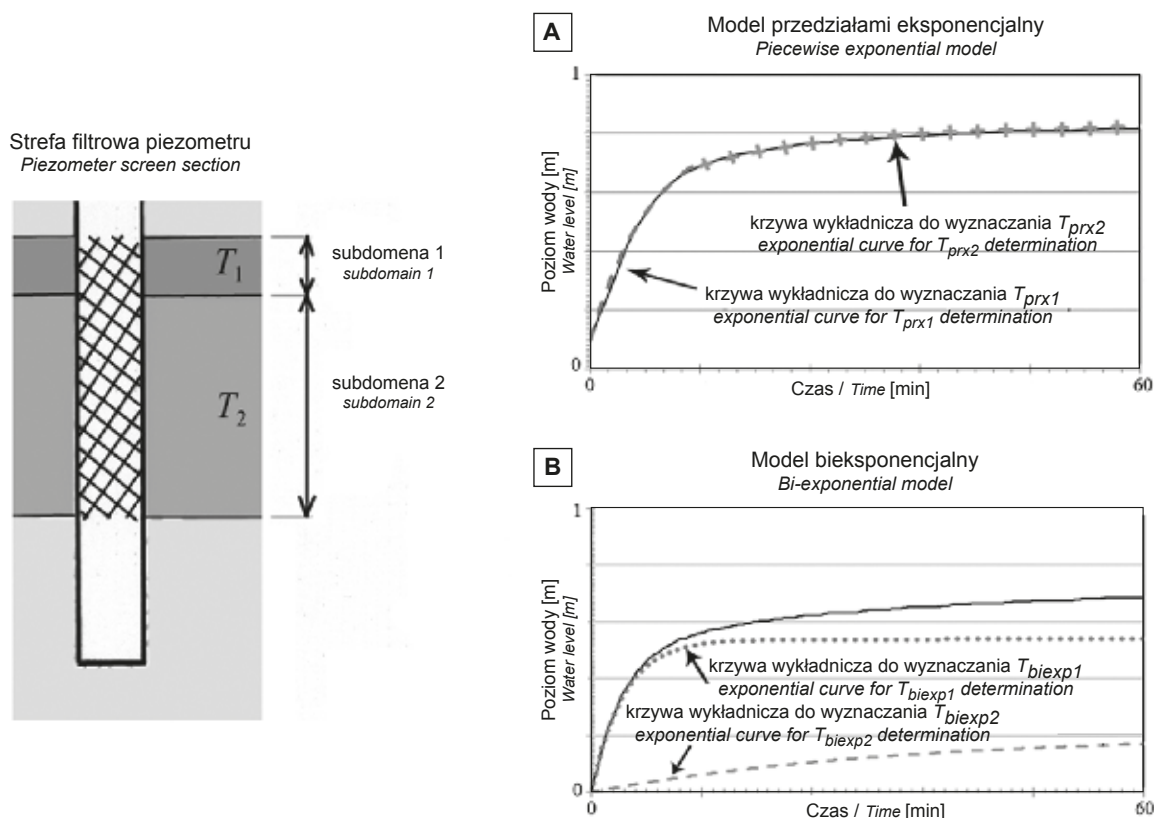


Fig. 1. Piezometr obejmujący dwie subdomeny o różnych parametrach filtracyjnych oraz schematy interpretacyjne: A – model przedziałami eksponencjalny (prx); B – model biekspencjalny (biexp)

A piezometer screening two subdomains with different hydraulic properties and two interpretation schemes:
A – the piecewise exponential model (prx); B – the bi-exponential model (biexp)

Poszczególne krzywe opisywane są trzema następującymi równaniami:

1) zmiana położenia zwierciadła wody pod wpływem lepszej przewodności:

$$s_{1a}(t) = M_{1a} \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1a}} \right) \right) \quad [4]$$

2) zmiana położenia zwierciadła wody pod wpływem gorszej przewodności:

$$s_{2a}(t) = M_{2a} \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_{2a}} \right) \right) \quad [5]$$

3) zmiana położenia zwierciadła wody pod wpływem obu przewodności:

$$s_a(t) = M_{0a} + s_{1a}(t) + s_{2a}(t) = M_{0a} + M_{1a} \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_{1a}} \right) \right) + M_{2a} \left(1 - \exp \left(-\frac{t}{\tau_{2a}} \right) \right) \quad [6]$$

Identyfikacja wartości przewodności hydraulicznej jest realizowana metodami optymalizacyjnymi w środowisku obliczeniowym MATLAB.

OBSZAR BADAŃ

Obszarem badań były pola górnicze „Bełchatów” oraz „Szczerców”, wchodzące w skład KWB Bełchatów. Przez 12 lat stosowania na tym obszarze metody PARAMEX przeanalizowano ponad 400 piezometrów. W ok. 12% przypadków zarejestrowano dwuwykładniczą krzywą wzniosu wody w trakcie testu. Wykluczono takie możliwe przyczyny odchylenia krzywej od formy wykładniczej jak: oddziaływanie pomp odwadniających w sąsiedztwie, niesprawny korek łożyskowy oraz nieprawidłowo wykonana obsypka strefy filtrowej. Odchylenia krzywej od postaci wykładniczej obserwowano także podczas wykonywania testów PARAMEX na innych obiektach na terenie Polski.

Bełchatowski kopalnia węgla brunatnego leży w tzw. rowie Kleszczowa, który znajduje się w obrębie synklinorium szczecińsko-łódzko-miechowskiego. Rów ten jest zorientowany równoleżnikowo, ma długość 40–50 km, szerokość 4–5 km oraz głębokość 350 m, co czyni go najgłębszym zapadliskiem neotektonicznym Niziny Polskiej. Powstał w wyniku ruchów tektonicznych skał podłoża w trakcie orogenezy alpejskiej (Gruszka, van Loon, 2007).

Podłoże to stanowią utwory jurajskie i kredowe w postaci piaskowców, wapieni, łupków oraz margli (Toma-

szewska i in., 2010). Utwory permskie występują wyłącznie w rejonie wysadu solnego Dębina. Rów Kleszczowa wypełniają osady neogeńskie (wczesnego miocenu oraz pliocenu) oraz czwartorzędowe, głównie w postaci węgla brunatnego, piasków i gliny. Ich dyslokacje są spowodowane deformacjami tektonicznymi podłoża, szczególnie w rejonie stref uskokuowych oraz wysadu solnego (Haluszczak, 2007).

Eksploatacja złoża bełchatowskiego wiąże się nie tylko z wybieraniem węgla brunatnego ze złoża, lecz także z przemieszczaniem ogromnej ilości utworów nadkładu i ich zwałowaniem w sąsiednich rejonach. Procesy te mogą zaburzać warunki tektoniczne w rejonie badań, skutkując m.in. zjawiskami sejsmicznymi, wtórnym spękaniami skał oraz ich przemieszczaniem (Drzymała, Ciężkowski, 2011).

W pierwszym etapie badań wybrano takie piezometry, w których zaobserwowano dwuwykładniczą krzywą ruchu zwierciadła wody w trakcie wykonywania testu PARAMEX. Przyjęto, że taka krzywa świadczy o występowaniu utworów o podwójnej przepuszczalności hydraulicznej w strefie okołofiltrowej. Następnie, na podstawie zarejestrowanej krzywej ruchu zwierciadła wody w piezometrach, wyliczono dwie wartości przewodności hydraulicznej utworów strefy okołofiltrowej odpowiednio dla dwóch rozważanych modeli – przedziałami eksponencjalnego oraz bieksponencjalnego.

INTERPRETACJA WYNIKÓW

Poniżej przedstawiono wyniki interpretacji pomiarów oraz modelowania dla 10 piezometrów, po pięć dla pól Bełchatów (BEL) i Szczerców (SZC). W przypadku obu pól przedstawiono wyniki dla wszystkich kompleksów wodonośnych monitorowanych za pomocą sieci piezometrów: czwartorzędowego (I), paleogeńskiego – tzw. „trzeciorzędu podwęglowego” (II) oraz mezozoicznego (jury górnej lub kredy – III) (tab. 1).

W dziewięciu analizowanych piezometrach filtr miał długość 5 m, w jednym piezometrze (BEL-KT-93-1) był krótszy, a jego długość wynosiła 3,5 m. Strefy filtrowe analizowanych piezometrów charakteryzują się zatem wystarczająco dużą powierzchnią, żeby uchwycić pionową niejednorodność warstwy lub występowanie kilku różnych warstw wodonośnych. W większości przypadków świadczy o tym opis litologiczny strefy okołofiltrowej, sugerujący obecność dwóch różnych dróg przepływu wody.

Wyniki obliczeń przewodności hydraulicznej za pomocą modelu przedziałami eksponencjalnego (indeksy prx) oraz modelu bieksponencjalnego (indeksy $biexp$) zestawiono w tabeli 2. Zawiera ona także obliczenia uśrednionych wartości przewodności z dopasowania jednej funkcji wykładniczej do krzywej terenowej, a więc działania wykonywanego typowo w ramach testu PARAMEX oraz *slug testu*, zakładając jednorodność warstwy wodonośnej. Ponadto porównanie uzyskanych zestawów przewodności hydraulicznej przedstawiono na figurze 2. Odległość od linii $T_1 = T_2$ charakteryzuje stopień niejednorodności analizowanych ośrodków wodonośnych (duże wartości T_{prx1}/T_{prx2} oraz T_{biexp1}/T_{biexp2}).

W celu określenia jakości dopasowania wskazań modelu do ruchu wody zaobserwowanego w terenie należy obliczyć wartości błędów RMSE i NRMSE:

$$RMSE = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{pred} - h_{obs})^2} \quad [7]$$

$$NRMSE = \frac{RMSE}{h_{max} - h_{min}} \quad [8]$$

gdzie:

h_{obs} – wysokość zwierciadła wody zaobserwowana w piezometrze w trakcie PARAMEX / *slug testu*,

h_{pred} – wysokość wody obliczona z wykorzystaniem omawianej metody analitycznej,

h_{max} , h_{min} – odpowiednio najwyższy i najniższy poziom zwierciadła wody zaobserwowany w trakcie testu; dwie krzywe wykładnicze są analizowane łącznie celem otrzymania po jednej wartości błędów RMSE i NRMSE dla przedziałów czasowych $(0; t_b)$ oraz $(t_b; t_p)$ (Wolny i in., 2018).

Jakość dopasowania obu modeli do danych terenowych wyrażono w błędach RMSE i NRMSE (tab. 3). Błędy te przedstawiają różnice pomiędzy terenową krzywą dwuwykładniczą a wykładniczymi krzywymi teoretycznymi generowanymi przez modele. Nieznacznie niższe błędy uzyskano dla modelu bieksponencjalnego niż dla modelu przedziałami eksponencjalnego. Obliczając uśrednioną wartość przewodności T_{sr} przez dopasowanie do danych terenowych jednej krzywej wykładniczej, otrzymuje się 2–14-krotnie wyższe błędy niż w przypadku modelu bieksponencjalnego oraz 2–8-krotnie wyższe błędy niż w przypadku modelu przedziałami eksponencjalnego.

PODSUMOWANIE

Dwuwykładniczy ruch zwierciadła wody w piezometrach zaobserwowano w przypadku ok. 12% testów PARAMEX wykonanych na obszarze KWB Bełchatów. Wykluczając niesprawność piezometrów lub oddziaływanie pomp odwadniających, można postawić hipotezę, że przyczyną takiego ruchu jest występowanie w strefie okołofiltrowej piezometrów utworów o podwójnej przepuszczalności hydraulicznej. Opis litologiczny zafiltrowanych utworów potwierdza hipotezę przyjętą przez autorów.

Podczas interpretacji testów PARAMEX lub *slug testów* wykonywanych w piezometrach filtrowanych w utworach o podwójnej przepuszczalności hydraulicznej można każdorazowo wyliczyć zestaw dwóch wartości przewodności hydraulicznej, nawet jeżeli większość subdomen biorących udział w filtracji jest nieznana. Określenie zestawu współczynników filtracji takich utworów wymaga bardzo szczegółowego rozpoznania hydrogeologicznego, które jest standardem w KWB Bełchatów. W przypadku warstwowanych utworów porowych jest ono możliwe, kiedy są znane miąższości zafiltrowanych utworów.

Tabela 1

Wykaz piezometrów zafiltrowanych w utworach o podwójnej przepuszczalności hydraulicznej

List of piezometers screening dual-permeability formations

Kompleks wodonośny	Nazwa piezometru	Opis litologiczny strefy filtrowej
Czwartorzęd (I)	BEL-PW-424-2BIS	piasek ciemnoszary, drobnoziarnisty z niewielką domieszką średnioziarnistego
	SZC-PS-169-1	warstwa piasku ciemnoszarego, drobnoziarnistego oraz niewielka warstwa piasku szaropopielatego, bardzo drobnoziarnistego i pylastego z wkładkami mułku
Paleogen (II)	BEL-KT-93-1	piasek szarobrzązowy, drobnoziarnisty, miejscami z domieszką średnioziarnistego
	BEL-PW-424-2	piasek szarobrzązowy, drobnoziarnisty
	SZC-PS-161-2	warstwa piasku ciemnoszarego, średnio- i drobnoziarnistego, lokalnie z niewielką domieszką żwiru oraz warstwa piasku szarobrzązowego, drobnoziarnistego z domieszką średnioziarnistego
	SZC-PS-191-1	piasek jasnobrzązowy, drobnoziarnisty oraz piasek szarobrzązowy, drobnoziarnisty ze średnioziarnistym, w spągu z domieszką żwiru
	SZC-PS-225-1A	warstwa piasku ciemnoszaro-brązowego, drobnoziarnistego oraz warstwa piasku jasnoszarego, drobnoziarnistego
Mezozoik (III)	BEL-KT-117BIS	piaskowiec zielonoszary, bardzo drobnoziarnisty, glaukonitowy, marglisty, słabo zwięzły, lokalnie zbrekcionowany, występują częste spękania pionowe, wskaźnik RQD = 10%
	BEL-PW-404-BIS-2	wapień szary, onkolitowy w formie luźnej brekcji okrucowej
	SZC-PS-232	wapień szarokremowy, onkolitowy, miejscami o charakterze grochowca, gruboławicowy; w stropie z wkładkami brekcji drobnookrucowej, wskaźnik RQD = 60%

Tabela 2

Wyniki estymacji zestawów wartości przewodności hydraulicznej z modelu przedziałami eksponencjalnego (T_{prx}), z modelu bieksponencjalnego (T_{biexp}), a także uśrednione wartości przewodności (T_{sr})Transmissivity estimates from: the piecewise exponential model (T_{prx}), bi-exponential model (T_{biexp}), and averaged single transmissivity values (T_{sr})

Kompleks wodonośny	Nazwa piezometru	T_{1prx}	T_{2prx}	T_1/T_{2prx}	T_{1biexp}	T_{2biexp}	T_1/T_{2biexp}	T_{sr}
		[m ² /s]		[-]	[m ² /s]		[-]	[m ² /s]
I	BEL-PW-424-2BIS	4,10E-04	1,45E-04	2,83	2,07E-03	2,88E-04	7,19	3,06E-04
	SZC-PS-169-1	1,33E-04	6,24E-05	2,13	7,42E-04	1,17E-04	6,33	1,04E-04
II	BEL-KT-93-1	4,63E-04	1,19E-04	3,90	1,99E-03	1,91E-04	10,43	3,27E-04
	BEL-PW-424-2	1,08E-04	2,40E-05	4,50	5,08E-04	3,87E-05	13,11	5,70E-05
	SZC-PS-161-2	6,91E-04	1,70E-04	4,06	3,76E-03	3,75E-04	10,02	3,81E-04
	SZC-PS-191-1	2,58E-04	9,28E-05	2,78	1,03E-03	5,33E-05	19,33	2,04E-04
	SZC-PS-225-1A	7,02E-04	2,36E-04	2,97	3,10E-03	4,23E-04	7,31	4,39E-04
III	BEL-KT-117-BIS	5,82E-04	5,50E-05	10,53	2,77E-03	1,13E-04	24,55	2,25E-04
	BEL-PW-404-BIS-2	6,40E-05	3,00E-05	2,11	3,47E-04	6,58E-05	5,28	4,60E-05
	SZC-PS-232	1,33E-04	5,29E-05	2,51	4,32E-04	9,43E-05	4,58	9,66E-05

Tabela 3

Wartości błędów RMSE i NRMSE pokazujące różnice między krzywymi zwierciadła wody zaobserwowanymi w terenie a krzywymi teoretycznymi

RMSE and NRMSE values showing differences between observed and theoretical water level rate-of-rise curves

Kompleks wodonośny	Nazwa piezometru	Model <i>prx</i>		Model <i>biexp</i>		Przewodność uśredniona	
		RMSE [cm]	NRMSE [%]	RMSE [cm]	NRMSE [%]	RMSE [cm]	NRMSE [%]
I	BEL-PW-424-2BIS	0,853	1,09	0,283	0,36	3,324	4,25
	SZC-PS-169-1	1,495	1,96	0,421	0,55	4,302	5,64
II	BEL-KT-93-1	0,574	0,77	0,731	0,98	3,336	4,48
	BEL-PW-424-2	1,600	1,89	0,385	0,45	5,472	6,46
	SZC-PS-161-2	0,933	1,22	0,907	1,18	4,598	5,99
	SZC-PS-191-1	1,429	1,88	1,067	1,40	2,345	3,34
	SZC-PS-225-1A	0,957	1,23	0,913	1,09	3,770	4,51
III	BEL-KT-117BIS	0,249	1,04	0,302	0,35	2,035	8,51
	BEL-PW-404-BIS-2	0,876	1,25	0,275	0,37	3,395	4,83
	SZC-PS-232	0,866	1,18	0,217	0,30	2,699	3,69

W przypadku innych obiektów, o mniej szczegółowym rozpoznaniu niż ma to miejsce w KWB Bełchatów, warstwy geologiczne o małej miąższości lub strefy utworów zwierzających mogą być pomijane w opisie rdzenia wiertniczego, co może utrudnić rozpoznanie podwójnej przepuszczalności. Warto dodać, że w przypadku rozpoznania geologicznego pro-

wadzonego dla płytszych warstw wodonośnych należy położyć nacisk na wykonanie starannego i szczegółowego opisu litologicznego. Jest to ważne nie tylko przez wzgląd na możliwość stwierdzenia podwójnej przepuszczalności hydraulicznej, lecz także ze względu na możliwość uzyskania dokładniejszych wyników modelowania hydrogeologicznego.

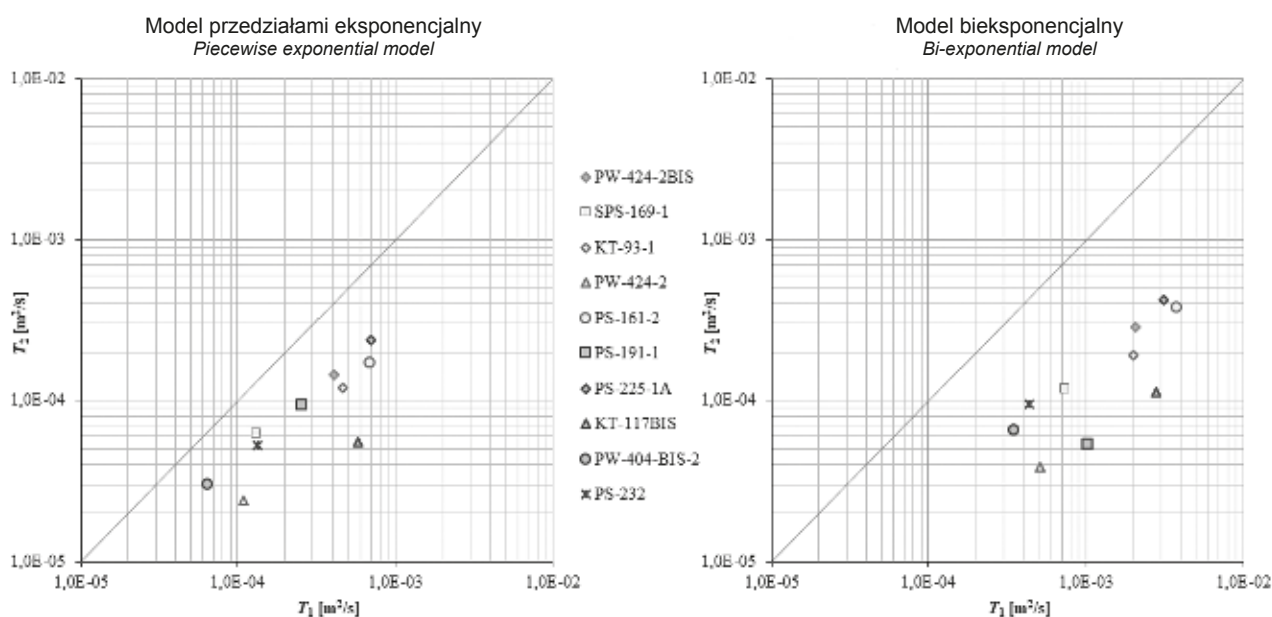


Fig. 2. Graficzne porównanie uzyskanych zestawów przewodności z wykorzystaniem obu modeli

A graphical comparison of the obtained pairs of transmissivity values from both models

LITERATURA

- BOUWER H., RICE R.C., 1976 – A slug test for determining hydraulic conductivity of unconfined aquifers with completely or partially penetrating wells. *Water Resour. Res.*, **12**, 3: 423–428.
- BREDEHOEFT J.D., PAPADOPULOS S.S., 1980 – A method for determining the hydraulic properties of tight formations. *Water Resour. Res.*, **16**, 1: 233–238.
- COOPER H.H. Jr., BREDEHOEFT J.D., PAPADOPULOS I.S., BENNETT R.R., 1965 – The response of well-aquifer systems to seismic waves. *J. Geophys. Res.*, **70**, 16: 3915–3926.
- DRZYMAŁA J., CIĘŻKOWSKI W. (red.), 2011 – Interdyscyplinarne zagadnienia w górnictwie i geologii T. 2. Oficyna Wydaw. PWroc., Wrocław.
- GRUSZKA B., van LOON A.J.(T.), 2007 – Pleistocene glaciolacustrine breccias of seismic origin in an active graben (central Poland). *Sediment. Geol.*, **193**, 1–4: 93–104.
- HALUSZCZAK A., 2007 – Dike-filled extensional structures in Cenozoic deposits of the Kleszczów graben (central Poland). *Sediment. Geol.*, **193**, 1–4: 81–92.
- HVORSLEV M.J., 1951 – Time-lag and soil permeability in ground-water observations. *Waterw. Exp. Stn., U.S. Army Corps of Eng., Vicksburg, Miss. Bulletin*, **36**.
- KACZMAREK M., WOLNY F., MARCINIAK M., 2016 – Joint estimation of hydraulic conductivities of two sand samples in a W-tube system with a bi-exponential response. *Hydrol. Res.*, **47**, 2: 344–355.
- LEIJ F.J., TORIDE N., FIELD M.S., SCIORTINO A., 2012 – Solute transport in dual-permeability porous media. *Water Resour. Res.*, **48**, W04523: 1–13.
- MARCINIAK M., 1999 – Identyfikacja parametrów hydrogeologicznych na podstawie skokowej zmiany potencjału hydraulicznego. Metoda PARAMEX. Wydaw. Nauk. UAM, Poznań.
- MARCINIAK M., KACZMAREK M., WOLNY F., 2013 – W-tube system with bi-exponential response – A model for permeability tests in heterogeneous aquifers. *J. Hydrol.*, **501**: 175–182.
- TOMASZEWSKA B., BUJAKOWSKI W., BARBACKI A.P., OLEWIŃSKI R., 2010 – Zbiornik geotermalny jury dolnej w rejonie Kleszczowa. *Prz. Geol.*, **58**, 7: 603–608.
- WOLNY F., MARCINIAK M., KACZMAREK M., 2018 – A method for the estimation of dual transmissivities from slug tests. *Hydrogeol. J.*, **26**, 2: 407–416.

SUMMARY

During slug tests performed in the Belchatów Lignite Mine, unusual bi-exponential water level movement was observed in about 12% of cases. It was assumed that this movement characterizes heterogeneous, dual-permeability aquifers and indicates the presence of two subdomains, *i.e.* pathways for water flow. The authors present two procedures of interpreting curves deviating from the exponential rise. Two mathematical models – the piecewise exponential

(PARAMEX) model and the bi-exponential model – are discussed. Both allow estimating a pair of transmissivity values (one value for each subdomain). Several examples of interpreting slug tests are presented. RMSE and NRMSE values were calculated to measure the difference between the bi-exponential rate-of-rise curve recorded in the field and the adjusted exponential curves obtained from both models. In all cases, relatively small errors are obtained.

