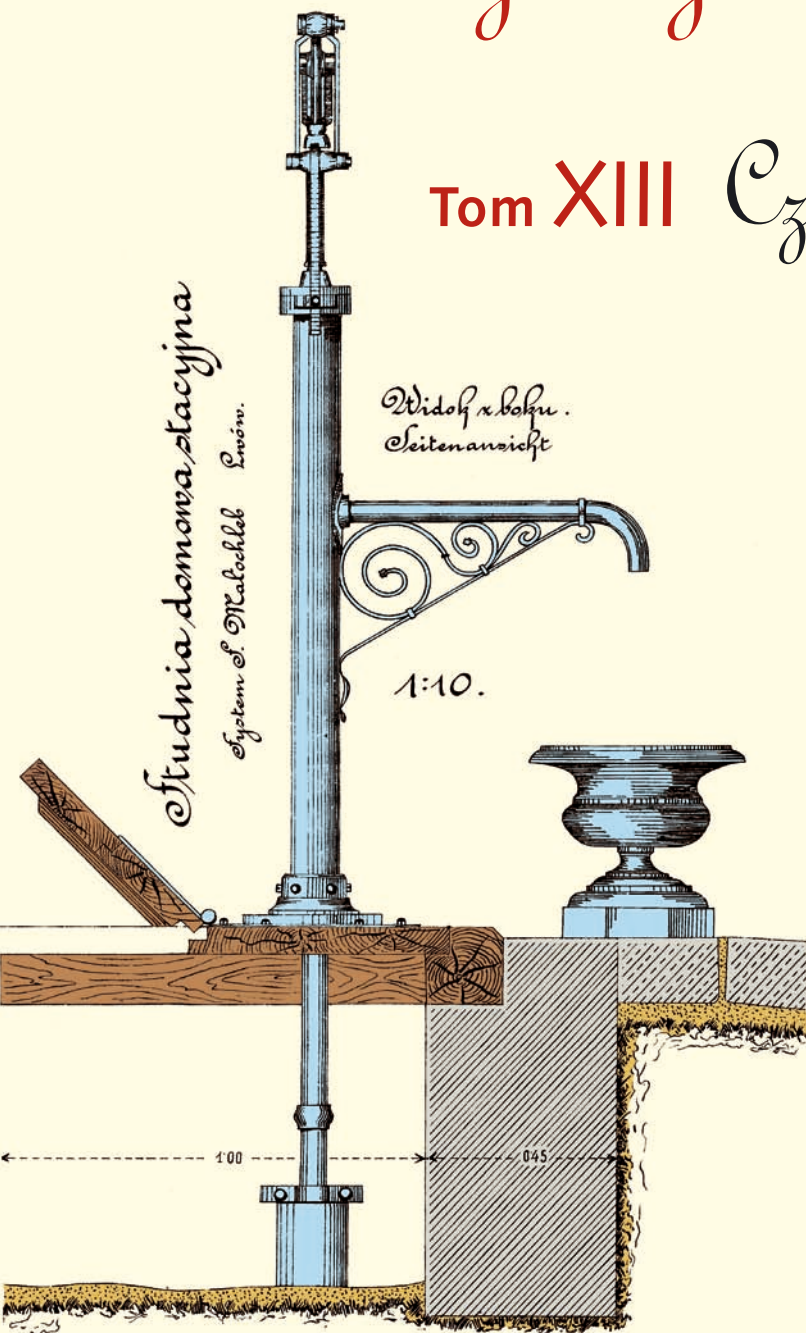


# Współczesne problemy hydrogeologii

Tom XIII Część 3.



Copyright © Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska AGH, Kraków 2007



Wydanie publikacji zostało sfinansowane przez  
Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska  
i Gospodarki Wodnej

Recenzenci:

Jadwiga Szczepańska  
Wojciech Ciężkowski  
Józef Górski  
Andrzej Kowalczyk  
Ewa Krogulec  
Grzegorz Malina  
Jerzy Małecki  
Marek Marciniak  
Jacek Motyka  
Marek Nawalany  
Jan Przybyłek  
Andrzej Rózkowski  
Andrzej Sadurski  
Andrzej Szczepański  
Stanisław Staško  
Stanisław Witczak  
Andrzej Zuber

Redakcja: Andrzej Szczepański, Ewa Kmiecik, Anna Żurek

Teksty artykułów w częściach 2. i 3. zostały wydrukowane z wersji elektronicznej dostarczonej przez Autorów, metodą bezpośredniej reprodukcji (*camera ready*)

Projekt okładki i stron tytułowych: Andrzej Tomaszewski

Na okładce: fragment projektu studni miejskiej we Lwowie z 1906 roku  
— ze zbiorów prof. **Antoniego S. Kleczkowskiego** (1922–2006)

Korekta: Zespół

Skład komputerowy systemem  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ : pre $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ t, [www.pretext.com.pl](http://www.pretext.com.pl)

Druk: ROMA-POL, [www.romapol.pl](http://www.romapol.pl)

ISBN-13 978-83-88927-16-4

Kazimierz Burzyński, Wojciech Szpakowski

**Symulacja pracy komunalnego  
ujęcia infiltracyjnego  
w warunkach dopuszczalnej eksploatacji**

**Municipal Infiltration Intake Work Simulation Under  
the Admissible Exploitation**

**Słowa kluczowe** wody podziemne, modelowanie matematyczne, ujęcie infiltracyjne

**Key words** groundwater, groundwater flow modelling, infiltration intake

**Abstract** The infiltration intake Bydgoszcz-Czyżkówko is under construction. This paper present a numerical simulation of groundwater flow under the admissible exploitation (100 000 m<sup>3</sup>/day). The calculation are made in steady state conditions using Modflow program (included in GMS ver. 3.1). In the result a water-table surface of groundwater flow is shown and flow balance is calculated.

## Warunki naturalne obszaru ujęcia

Rejon badań ujęcia infiltracyjnego zlokalizowany jest w północno-zachodniej części Bydgoszczy. Pod względem fizyczno-geograficznym obejmuje pogranicze Kotliny Toruńskiej oraz dolnego odcinka Doliny Brdy. Samo ujęcie obejmując prawobrzeżne, plejstoceńskie tarasy Brdy znajduje się w jej bezpośredniej zlewni, ponieważ infiltrujące wody opadowe tego obszaru zasilają wody Brdy. Z uwagi na regulację przepływu wody powyżej ujęcia (zapory Smukała, Tryszczyn, Zbiornik Koronowski), w rejonie badań rzędne zwierciadła Brdy są ustabilizowane na poziomie 37,0 - 40,0 m. n.p.m.

## Założenia konstrukcyjne i eksploatacyjne ujęcia

Ujęcie infiltracyjne Bydgoszcz-Czyżkowo położone jest na obszarze około 1,5 km<sup>2</sup>. Jego usytuowanie zaznaczono na schemacie ujęcia (rys. 1). Woda surowa pobierana jest z rzeki Brdy, a następnie poprzez układ hydrauliczny oraz system sieci rowów i basenów nawadniających o całkowitej powierzchni 27 hektarów zasila warstwę wodonośną. Woda podziemna pobierana jest poprzez ciągi ośmiu barier studziennych (L1-L8). Układ zasilający wodonosiec zaprojektowany jest tak, by zachować naturalny kierunek przepływu wód w kierunku rzeki Brdy. W rowach zlokalizowanych w części zachodniej ujęcia rzędne zwierciadła wody są najwyższe, najniższe zaś występują w basenach nawadniających usytuowanych w południowo-wschodnim krańcu ujęcia.

Wymaganą produkcję wody ujęcia infiltracyjnego oszacowano na 100 000 m<sup>3</sup>/d. Ze względu na złożony sposób poboru i zasilania warstwy wodonośnej, analiza opisanego zagadnienia wymaga zastosowania aparatu modelowania matematycznego.

## Model numeryczny – założenia i ograniczenia

Obliczenia przepływu w systemie wodonośnym ujęcia infiltracyjnego wykonano, wykorzystując program MODFLOW (zawarty w pakiecie GMS ver. 3.1), który rozwiązuje ogólne równanie filtracji. Symulacje numeryczne wykonano dla ustalonych warunków filtracji przyjmując, że krążenie wody odbywa się w obszarze jednej warstwy wodonośnej, dla której przyjęto zgeneralizowane parametry filtracyjne. Obszar modelowania o rzeczywistej powierzchni 2,753 km<sup>2</sup> tworzy 110 120 elementarnych komórek obliczeniowych, każda o powierzchni kwadratu o boku 5 metrów i miąższości uzależnionej od położenia spągu warstwy wodonośnej oraz rzędnych terenu.

Przyjęte warunki przepływu w warstwie wodonośnej wynikały z pewnych ograniczeń. Jednym z nich było pominięcie udziału krążenia wody w warunkach naturalnych. Oszacowano (Matuszak i in., 2003), że w warunkach naturalnych wielkość przepływu nie przekracza 3500 m<sup>3</sup>/d, co, jak się okazało stanowi nie więcej niż 3% całkowitej wartości bilansu krążenia wód w warunkach dopuszczalnej pracy ujęcia. Konsekwencją uproszczenia było przyjęcie braku przepływu przez północno-zachodnią i południowo-zachodnią granicę obszaru. Na południowo-wschodniej granicy przyjęto również warunek braku przepływu przez ten brzeg, ponieważ projektowo przewidziano tu ściankę szczelną na całej miąższości warstwy wodonośnej. Naturalną granicą modelu w części północno-

wschodniej i wschodniej jest rzeka Brda. Na granicy tej przyjęto warunek stałej wartości położenia zwierciadła wody odpowiadający stanom średnim rzeki.

Położenie spągu warstwy wodonośnej zadano w oparciu o kompleksowe badania geologiczne w projektowanych barierach studziennych oraz hydrowęzłach. Wyniki badań terenowych pozwoliły na określenie współczynnika filtracji poziomej w każdym wykonanym i opróbowanym otworze badawczym. Wyliczony wzorem Hazena współczynnik filtracji zawiera się w granicach 20,17 – 200,27 m/d, zaś średnia wartość ze wszystkich otworów wynosi  $k_H = 75$  m/d (Dąbrowski i in., 2001). Natomiast obliczone współczynniki filtracji na podstawie wzoru amerykańskiego (USBSC) zawierają się w przedziale 5,99 – 79,80 m/d, zaś średnia wartość  $k_{US} = 28$  m/d. Jak widać, występują tu znaczące różnice wartości współczynnika filtracji.

W symulacjach numerycznych przyjęto uśrednioną wartość współczynnika filtracji dla całego obszaru. Powszechnie uważa się, iż wzór Hazena daje optymistyczne oszacowanie warunków filtracyjnych. Wzór amerykański daje natomiast wartości znacząco niższe, lecz zdaniem wielu badaczy są one bliższe warunkom rzeczywistym. W obliczeniach przyjęto średnią wartość współczynnika filtracji w wielkości  $k = 50$  m/d. Zaznaczyć należy, że w miesiącach zimowych współczynnik filtracji będzie mniejszy, co wynika z obniżenia temperatury wody krążącej w podziemnym systemie wodonośnym. W obliczeniach pominięto również wielkości naturalnej infiltracji efektywnej, istotnie zależnej od warunków hydrologiczno-meteorologicznych.

## Uwzględnienie zasilania i odbioru wody z obszaru ujęcia w symulacjach numerycznych

Modelowane ujęcie infiltracyjne tworzy skomplikowany układ wzajemnie powiązanych ze sobą zależności pomiędzy zasilaniem i poborem wód infiltracyjnych Przybyłek 1995). Woda zasila warstwę wodonośną przez układ stawów i rowów zasilających. W założeniu woda powierzchniowa i warstwa wodonośna nie będą tworzyć bezpośredniego układu hydraulicznego. Ponieważ Modflow nie uwzględnia obecności warstwy nienasyconej w układzie wodonośnym, na etapie obliczeń wstępnych zdecydowano się określić wielkość zasilania warstwy wodonośnej i zadać ją bezpośrednio jako wielkość infiltracji powierzchniowej. Wobec kłopotów ze zbilansowaniem przepływu, ostatecznie stawy i rowy zasilające warstwę wodonośną uwzględniono w modelu jako człon źródłowy. Do rozwiązania zadano maksymalne rzędne zwierciadła wody  $H_{riv}$  w stawach i rowach doprowadzających wodę. Prędkość infiltracji wód powierzchniowych będzie uzależniona od procesów powstawania i usuwania warstwy kolmatującej dno stawów nawadniających. W przedstawionych wynikach badań, na podstawie oszacowanej eksploatacji ujęcia i powierzchni całkowitej systemu nawadniającego, wyznaczono i przyjęto uśredniony współczynnik przepuszczalności utworów dennych w wysokości  $C_d = 8$  m<sup>2</sup>/d. Uwzględnia on współczynnik filtracji i miąższość utworów dennych oraz powierzchnię elementarnej komórki obliczeniowej.

Współczynnik przepuszczalności utworów dennych w początkowym okresie limituje wymagane kryterium prędkości przesączania przez utwory denne równe  $v_{max} = 1,36$  m/d (Wieczysty 1982). Przy bardzo wysokich wartościach współczynnika filtracji warstwy rodzimej, napełnienie stawów do rzędnych projektowych może być niewykonalne. Aby

można było stawy napelnić (zalać), w początkowym etapie eksploatacji należałoby przewidzieć dodatkowe opory przepływu na powierzchni infiltracji. Efekt ten można uzyskać poprzez wytworzenie uzupełniającej warstwy materiału filtracyjnego o gorszych własnościach filtracyjnych niż grunt macierzysty. Do czasu pojawienia się warstwy kolmatycznej warstwa taka będzie stanowić wymagany opór filtracyjny. Kryterium zapewnienia prędkości mniejszej od maksymalnej spełnia warstwa piasku średnio i różnoziarnistego o grubości 0,5m i współczynniku filtracji  $k_d = 22$  m/d (co odpowiada  $k_d = 2 \cdot 10^{-4}$  m/s) (Kozerski, Pazdro, 1990).

Odbiór wody z warstwy wodonośnej uzależniony jest od miąższości warstwy, która wpływa w sposób bezpośredni na dobór urządzeń. W 8 barierach studziennych określonych w koncepcji ujęcia infiltracyjnego wykorzystano studnie głębinowe (wyposażone w pompę), studnie lewarowe oraz system drenów. Studnie głębinowe uwzględniono w modelu w postaci elementarnego obszaru poboru wody z warstwy, w którym w sposób bezpośredni zadawano wydatek każdej studni. Studnie lewarowe uwzględniono w modelu jako punkty, w których zadany jest stan wody w studni, co odpowiada wewnętrznemu warunkowi brzegowemu typu Dirichleta ( $H = \text{const}$ ).

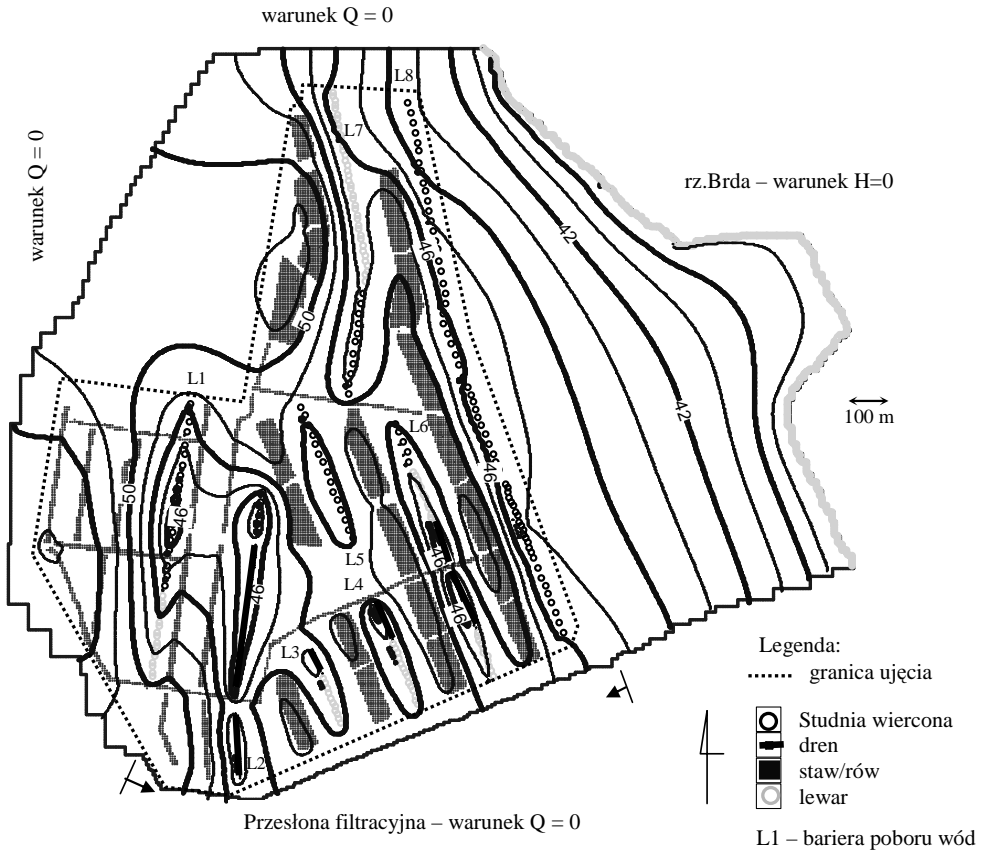
W rejonach gdzie konieczne (możliwe) jest zastosowanie systemu drenów, wykorzystano moduł służący do obliczania udziału drenów w systemie przepływu wód. Sieć drenów została zaprojektowana tak, aby możliwe było odebranie wody głównym kolektorem zbiorczym. Przyjęto drenaże ciągłe ułożone na rzędnych 1-2 poniżej naturalnego stanu zwierciadła wód w badanym rejonie. Rzędne przyjętych drenów zawierają się w przedziale 43,0 - 45,5 m. n.p.m. Współczynniki przepuszczalności drenów określono tak aby nie stwarzały dodatkowego oporu przepływu w warstwie wodonośnej. Opory oszacowano w wysokości  $C_{DRN} = 250$  m<sup>2</sup>/d, co wynika z wartości średniego współczynnika filtracji  $k = 50$  m/d oraz elementarnej długości obliczeniowej równej 5 metrów.

## **Analiza przyjętego wariantu poboru wód**

W celu określenia pożądanego rozdziału poboru wody z warstwy wodonośnej do poszczególnych systemów (studnie, drenaże) wielokrotnie powtarzano obliczenia numeryczne dla różnego udziału poszczególnych barier w całkowitym poborze wody. Pod uwagę brano takie dopasowanie poboru wody studniami zlokalizowanymi w części południowej ujęcia, aby nie dopuścić do zalania przyległych terenów mieszkalnych.

Po otrzymaniu z obliczeń rzędnych powierzchni swobodnego zwierciadła wody, sprawdzono wielkość strefy saturacji w każdym otworze studziennym. Ponieważ obliczone rzędne zwierciadła wody zależą od ogólnych równań przepływu wody, dla otworów studziennych obliczono również poprawki wyznaczonych wartości wynikające z rzeczywistych średnic projektowanych studni. Dla średnicy 300 mm wynoszą one średnio -35 cm, zaś dla średnic studni 500 mm i 1000 mm odpowiednio -25 cm i -15 cm.

W studniach, gdzie obliczone wysokości strefy saturacji są mniejsze niż 4,5m, zaplanowano studnie lewarowe oraz ciągi drenarskie. Wyjątkiem jest bariera L8 (rys. 1), w której pozostawiono tylko studnie głębinowe. Ma to na celu ograniczenie dopływu wód z warstwy wodonośnej do rzeki Brdy oraz zwiększenie efektywności sterowania całym ujęciem.



**Rysunek 1.** Hydrozohipsy poziomu wodonośnego dla wersji dopuszczalnego przebiegu eksploatacji w granicach modelowania.

**Figure 1.** Water table contours under the admissible exploitation in model boundaries

Ostatecznie sposób ujmowania wód zaplanowano następująco:

119 studnie głębinowe (wydatek łączny 56 450 m<sup>3</sup>/d),

104 studnie lewarowe (wydatek łączny 27 582 m<sup>3</sup>/d),

970 metrów sieci drenów (wydatek łączny 21 169 m<sup>3</sup>/d).

Ogólny bilans krążenia wód w systemie wodonośnym zestawiony jest w tabeli 1. Obraz hydrozohips swobodnego zwierciadła wody poziomu wodonośnego przedstawiony jest na rysunku 1.

**Tabela 1.** Bilans wodny ujęcia Bydgoszcz-Czyżkówko dla dopuszczalnych warunków eksploatacji**Table 1.** Water balance of Bydgoszcz-Czyżkowko intake for the admissible exploitation

<b>BILANS MODELU m<sup>3</sup>/d</b>						
zasilanie	stawy	110 352	pobór	lewary	27 582	Wydatek ujęcia <b>105 202</b>
				dreny	21 169	
				st.wiercone	56 450	
	rz.Brda	78	Odpływ do rzeki Brdy		5 227	
	suma	<b>110 430</b>		suma	<b>110 429</b>	

Obliczenia przepływu wody ze stawów infiltracyjnych do barier studziennych wykazały, iż nadwyżka wody, która nie została ujęta na obszarze ujęcia, s pływa w kierunku rzeki. Najwyższe rzędne zwierciadła wody na terenie ujęcia zaobserwować można w jego części zachodniej, Tam też największe rzędne mają rowy doprowadzające wodę powierzchniową do warstwy wodonośnej (52,0 – 53,0m.n.p.m.). Najniższe rzędne na terenie ujęcia zostały obliczone na barierach L1, L2, L6 i L8 (42,9-45,0 m. n.p.m.). O ile w barierach L1 i L2 w warunkach normalnej eksploatacji dynamiczne zwierciadło wody może znajdować się wyżej, szczególną ostrożność należy zachować przy kontroli pracy barier L6 i L8. Podwyższone rzędne zwierciadła wody mogą bowiem wpływać niekorzystnie w rejonach barier na zabudowane niżej tereny. Poniżej przedstawiono zestawienie poboru wód z warstwy wodonośnej z uwzględnieniem wszystkich barier studziennych i rodzajów ujmowania wody (Tab. 2).

Studnie wiercono zaplanowano w rejonach największych miąższości warstwy wodonośnej. Szacuje się, iż dla założonych średnic studni zupełnych część nawodniona studni musi być większa niż 4,5m. W przedstawionej symulacji w studniach bariery L1 miąższość strefy saturacji przekracza 6 metrów, a w barierze L5 dochodzi nawet do 13 metrów. Z obliczeń wynikają, iż istnieją możliwości zwiększenia całkowitego poboru wód. Pamiętać jednak należy, iż wraz ze zwiększeniem wydobywania wody studniami wierconymi rośnie prędkość filtracji a tym samym maleje czas przebywania wody w warstwie wodonośnej. W niektórych studniach bariery L8 przy założonych poborach wody strefa saturacji może się obniżyć do 3,5 metra w rejonie wypiętrzenia utworów słaboprzepuszczalnych. Jest to rejon, w którym w poprzedniej analizie zaplanowano sieć drenów, jednakże studnie głębinowe mają korzystniejszą możliwość sterowania co może zapobiec nadmiernym ucieczkom wody do rzeki Brdy.

Analizując rozwiązanie numeryczne dostrzec można powiązanie hydrauliczne sąsiadujących ze sobą drenów i studni lewarowych. Dla zbliżonych wartości rzędnych posadowienia rur drenarskich i czerpni studni lewarowych, niejednokrotnie zauważa się bardzo niewielkie otrzymane wydatki. Nie jest to groźne dla ciągu drenów. Zmniejszony wydatek w studni lewarowej może okazać się niekorzystny, gdyż w pewnych warunkach może skutkować przerwaniem poboru wody.



**Tabela 2.** Bilans poboru wód z warstwy wodonośnej  
**Table 2.** Water withdrawal balance

Bariera	ilość/długość			wydatek			średni wydatek pojedynczej studni/wydatek 1mb drenu			rzędne zw. wody	miąższość warstwy saturacji
	st.głębinowe	st.lewarowe	dreny	st.głębinowe	st.lewarowe	dreny	st.głębinowe	st.lewarowe	dreny		
			m	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d	m <sup>3</sup> /d 1st	m <sup>3</sup> /d 1st	m <sup>3</sup> /d mb	m. n.p.m	m
L1	19	17		14020	3768		738	222		44,7-49,5	6,0-10,5
L2	5		550	5900		8856	1180		16	43,0-46,4	0,7-7,7
L3		11	80		2528	1790		230	22	46,1-47,4	2,8-8,5
L4		14	100		3870	3137		276	31	45,8-47,5	2,5-11,1
L5	15			7200			480			46,8-47,8	7,7-13,0
L6	5	23	240	3000	7172	7385	600	312	31	45,0-47,3	2,3-12,0
L7	11	39		8800	10245		800	263		45,3-47,0	5,3-13,0
L8	64			17530			274			42,9-46,0	3,2-13,0
SUMA	119	104	970	56450	27583	21168	474	265	22	42,9-49,5	0,7-13,0
				105201							

## Podsumowanie i wnioski

Omówione powyżej wyniki symulacji numerycznych dotyczą dopuszczalnej oszacowanej eksploatacji ujęcia infiltracyjnego dla uśrednionych warunków hydrogeologicznych i hydraulicznych. Należy przypuszczać, iż mogą wystąpić niekorzystne warunki zewnętrzne, w których przyjęty schemat pracy nie pozwoli na osiągnięcie zakładanej eksploatacji. Do takich niekorzystnych elementów należą przede wszystkim niskie temperatury powodujące ograniczenie możliwości filtracyjnych w warstwie wodonośnej oraz kolmatacja dna systemu powierzchniowego. Należy wspomnieć również o możliwości czasowego odłączenia zasilania układu ujęcia wodami rzeki Brdy, spowodowane ekstremalnymi stanami niskimi lub też katastrofalnym skażeniem jej wód. Aby doraźnie zapobiec takim

sytuacjom, istnieje możliwość okresowego obniżania zwierciadła dynamicznego warstwy wodonośnej, co pozwoli uzupełnić okresowe niedobory zasilania systemu powierzchniowego.

Przedstawione powyżej numeryczne symulacje krążenia wody w ujęciu infiltracyjnym dotyczyły określenia wstępnych zależności pomiędzy zasilaniem i poborem wody z warstwy wodonośnej i zostały wykonane w warunkach ustalonych. Analiza pracy ujęcia w warunkach rzeczywistych wymagać będzie rozwiązania szeregu dylematów, zarówno na etapie rozruchu, jak i eksploatacji ujęcia, uwzględniających również możliwe sytuacje awaryjne.

Określenie zasilania w modelu wymagać będzie analizy procesów filtracji zarówno w samych stawach i rowach infiltracyjnych, jak i w warstwie nienasyconej. Sposób uwzględnienia tych elementów w modelu numerycznym wymaga głębszego rozpoznania składowych elementów układu hydrogeologicznego. Uwzględnienie zasilania warstwy przy zmieniających się warunkach powinno być poprzedzone analizą wpływu skarp zbiorników wodnych oraz kanałów na zasilanie warstwy wodonośnej. Możliwe jest iż w toku obliczeń okaże się, że wyznaczają one uprzywilejowane strefy filtracji.

Szczegółowego rozpoznania wymagać będzie również praca ciągów studni lewarowych i rurociągów drenarskich. Z uwagi na niewielkie możliwości sterowania tych systemów poboru wód, optymalizacja pracy ujęcia w warunkach eksploatacyjnych opierać się głównie będzie na sterowaniu wydatkiem pomp głębinowych oraz utrzymywaniu określonych rzędnych wody w systemie powierzchniowym wód.

## Literatura

- Dąbrowski S., Górski J., Rynarzewski W., 2001: *Dokumentacja geologiczna określająca warunki hydrogeologiczne do budowy infiltracyjnego ujęcia wody ze stawów w rejonie Czyżkówka dla m. Bydgoszczy*, Hydroconsult Sp. z o.o., Poznań.
- Kozerski B., Pazdro, Z., 1990: *Hydrogeologia ogólna*, WG Warszawa.
- Matuszak W., Nowak R., Pilarski P., Zaborowski K., 2003 *Projekt prac geologicznych dla otworów studziennych – bariery studni projektowanego infiltracyjnego ujęcia wody dla zaopatrzenia miasta Bydgoszczy*, Przedsiębiorstwo Geologiczne we Wrocławiu PROXIMA S.A. oddział w Poznaniu, Poznań.
- Przybyłek J., 1995: *Eksploatacja i zagrożenia ujęcia wody w poznańskiej Dębinie*, Mat. Konf. Nauk. Pt.: „Wody powierzchniowe Poznania”, Poznań.
- Wieczysty A., 1982: *Hydrogeologia Inżynierska*, PWN Warszawa, wydanie 2.