

ANALIZA PRACY UJĘCIA INFILTRACYJNEGO W WARUNKACH SUSZY HYDROLOGICZNEJ

INFILTRATION INTAKE WORK ANALYSIS UNDER HYDROLOGICAL DROUGHT

KAZIMIERZ BURZYŃSKI¹, WOJCIECH SZPAKOWSKI¹

Abstrakt. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych przepływu wody w warstwie wodonośnej ujęcia infiltracyjnego. Do rozwiązania problemu wykorzystano równanie filtracji wody ze swobodnym zwierciadłem wody. W obliczeniach w warunkach niestabilnych warunków początkowy obliczono przy założeniu dopuszczalnej wydajności ujęcia (100 000 m³/d). Jako warunek brzegowy przyjęto funkcję wahań poziomu zwierciadła wody w stawach infiltracyjnych w czasie. Obliczenia wykonano dla okresu 10 dni od momentu odcięcia zasilania ujęcia z Brdy, wynikającego z okresu suszy albo skażenia wody płynącej. W artykule przedstawiono rozwiązanie dla 7 dni, ponieważ dla dłuższego okresu należy wykonać nowy model pracy ujęcia infiltracyjnego.

Słowa kluczowe: modelowanie matematyczne, ujęcie infiltracyjne, wody podziemne.

Abstract. This paper presents a numerical simulation of groundwater flow in an infiltration intake. Calculations were made in transient conditions using the Modflow program (included in GMS ver. 3.1). The initial conditions of simulation were computed in the steady-state conditions for the admissible exploitation (100 000 m³/day). The boundary conditions were calculated as a time-dependant function of the water level in infiltration basins. As a result, flow balance during hydrological drought is calculated. Numerical calculations were made for a period of 10 days, but only a seven-day period is presented. For a longer period, the numerical model of infiltration intake should be reanalysed

Key words: groundwater flow modelling, infiltration intake, groundwater.

WSTĘP

Projektowane, nowe ujęcie infiltracyjne ma zapewnić stabilność zaopatrzenia w wodę pitną rejonu Bydgoszczy. Ujęcie zlokalizowane jest w bezpośredniej zlewni Brdy. Obszar ujęcia (ok. 1,5 km²) składa się z systemu rowów i basenów nawadniających o powierzchni 27 ha oraz ośmiu barier pobierających wodę przefiltrowaną (fig. 1). W zależności od zmian warunków hydrogeologicznych obszaru ujęcia zaproponowano wykorzystanie studni głębinowych, lewarowych oraz sieci drenów rozmieszczonych w ośmiu barierach pobierających wodę przefiltrowaną (L1–L8). Wyniki symula-

cji w warunkach dopuszczalnej eksploatacji przedstawiono we wcześniejszej publikacji (Burzyński, Szpakowski, 2007). W przeciwieństwie do innych istniejących ujęć infiltracyjnych, praktycznie całe możliwości eksploatacyjne ujęcia związane są ze sztucznym zasilaniem stawów i rowów infiltracyjnych. Interesującym zagadnieniem jest oszacowanie warunków pracy ujęcia w sytuacji wystąpienia suszy hydrologicznej na obszarze zlewni Brdy, która może skutkować czasowym odcięciem zasilania sieci powierzchniowej samego ujęcia.

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Narutowicza 11/12 80-952 Gdańsk

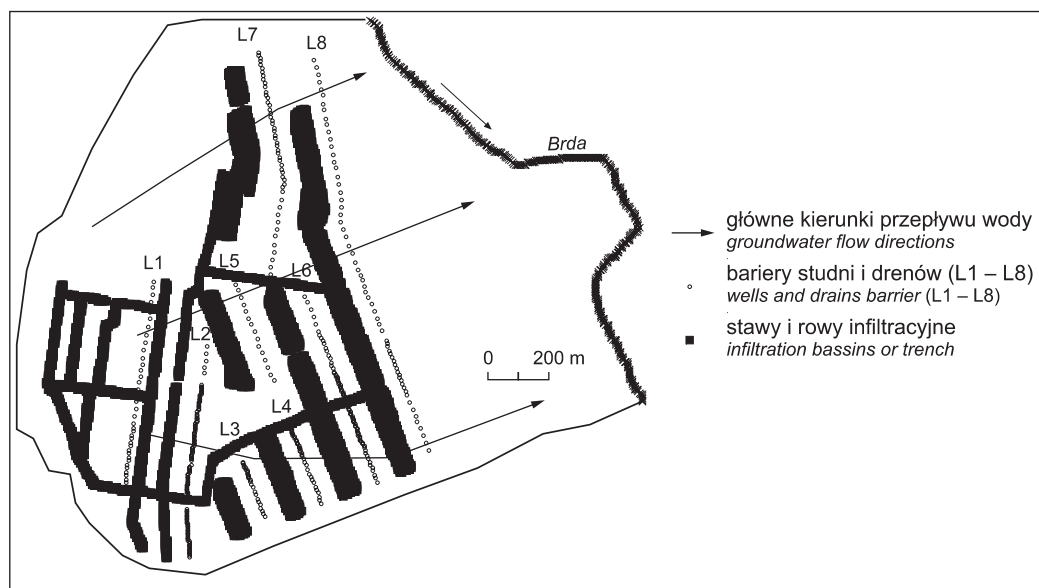


Fig. 1. Schemat obszaru badań

Scheme of investigation area

CHARAKTERYSTYKA HYDROLOGICZNA REJONU BADAŃ

Okresy suszy mogące mieć wpływ na zasilanie obszaru sztucznej infiltracji występują głównie w miesiącach letnich, od czerwca do sierpnia. Średnia roczna temperatura powietrza w zlewni Brdy z lat 1971–2000 zawiera się w granicach 7,5–8°C, przy czym w ostatnim badanym dziesięcioleciu (1991–2000) jest o około 0,5°C wyższa od średniej. Średnie temperatury powietrza w miesiącach letnich zawierają się pomiędzy 17°C (odcinek źródłowy) a 18°C (ujście Brdy). Średni czas trwania lata ($T_{dob} > 15^{\circ}\text{C}$) dla odcinka źródłowego wynosi 70 dni, zaś w rejonie ujścia Brdy przekracza 90 dni. W rejonie ujęcia średnia wilgotność względna jest niska w porównaniu z innymi rejonami Polski (80%), zaś sumy roczne opadów atmosferycznych dla środkowego i dolnego odcinka Brdy nie przekraczają 550 mm (Lorenc, 2005).

W ostatnich dwudziestu pięciu latach występowanie zjawisk ekstremalnych zwiększyło się. Susze w Polsce, obejmujące co najmniej 75% powierzchni kraju, wystąpiły w okresie 1981–2006 aż 13 razy, podczas gdy w latach 1951–1980 tylko 6 razy. W rejonie dolnej Brdy sumy miesięczne opadów w latach 2003 i 2006 nie przekraczały 50% miesięcznych sum opadów. Według skali natężenia suszy w 2006 roku praktycznie cała zlewnia Brdy była w zasięgu suszy gruntowej III (susza silna) i IV stopnia (susza głęboka) (Sasim, Mierkiewicz, 2003; Lorenc i in., 2006).

Brda ma długość 238 km. Całkowita powierzchnia jej zlewni przekracza 4660 km² i leży na obszarze województw pomorskiego i kujawsko-pomorskiego. Średni spadek wynosi prawie 7‰. Ujście Brdy do Wisły znajduje się na wysokości 28,8 m n.p.m. Dla części ujściowej Brdy (Bydgoszcz) roczne przepływy charakterystyczne wynoszą: SNQ – 12,75 m³/s, SSQ – 28,40 m³/s, SWQ – 48,53 m³/s. Z kolei letnie przepływy nienaruszalne wyznaczone dla różnych kryteriów wynoszą od 7,65 m³/s (kryterium wędrówek tarlowych ryb) do 23,522 m³/s (metoda przepływów najdłuższej trwających – Q_{NT}), przy czym na podstawie kryterium hydrobiologicznego przepływ nienaruszalny wynosi 12,95 m³/s (www.rzgw.gda.pl). Oznacza to, że w niektórych okresach pracy ujęcia niskie przepływy mogą uniemożliwić pobór wody z rzeki na potrzeby zasilania stawów infiltracyjnych. Dodatkowo pobór wody mogą uniemożliwiać potencjalne skażenia wody oraz obniżenie jej jakości.

Z uwagi na regulację przepływu wody powyżej ujęcia (zapory Smukała, Tryszczyn, Zbiornik Koronowski) w rejonie badań rzędne zwierciadła Brdy są przez większą część roku ustabilizowane na poziomie 37,0–40,0 m n.p.m. W okresie suszy stany wody osiągają wartości stanów minimalnych z wielolecia (SNW) i na podstawie informacji z profilu wodowskazowego Bydgoszcz (Brda, km 11,7) można wnioskować, że są o 20 cm niższe.

ZAŁOŻENIA MODELU NUMERYCZNEGO

Obliczenia przepływu w systemie wodonośnym ujęcia infiltracyjnego wykonano wykorzystując program MODFLOW (pakiet GMS ver. 3.1), który rozwiązuje równanie filtracji warstwy wodonośnej ze swobodnym zwierciadłem wody w postaci:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_X (h - \sigma) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_Y (h - \sigma) \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \omega_d \frac{\partial h}{\partial t} + w_p \quad [1]$$

gdzie:

- K_X, K_Y – współczynniki filtracji w kierunkach x i y ;
dla warstwy izotropowej $K_X = K_Y = K$
- $(h - \sigma)$ – miąższość warstwy saturacji wyrażona jako różnica pomiędzy swobodnym zwierciadłem a spągami warstwy,
- ω_d – współczynnik porowatości efektywnej często w obliczeniach inżynierskich zastępowany współczynnikiem odsączalności,
- w_p – człon źródłowy.

Obszar modelowania o rzeczywistej powierzchni 2,753 km² tworzy 110 120 elementarnych komórek obliczeniowych, każda o boku 5 m i miąższości uzależnionej od położenia spągu warstwy wodonośnej oraz rzędnych terenu. W obliczeniach przyjęto brak przepływu przez północno-zachodnią i południowo-zachodnią granicę obszaru. W warunkach naturalnych przepływ przez te granice nie przekracza 3500 m³/d. Wzdłuż południowo-wschodniej granicy wstępnie zaprojektowano ściankę szczelną na całej miąższości warstwy wodonośnej – tu również przyjęto warunek braku przepływu. Na naturalnej granicy modelu w części północno-wschodniej i wschodniej (rzeka Brda) przyjęto warunek brzegowy I rodzaju w postaci stałej wartości położenia zwierciadła wody. Do obliczeń przyjęto uśrednione parametry hydrauliczne warstwy filtracyjnej: współczynnik filtracji $k = 50$ m/d, współczynnik odsączalności $\mu = 0,23$. Dla ustalonych warunków filtracji wykonano symulacje numeryczne pracy ujęcia w warunkach maksymalnej wydajności ujęcia (Burzyński, Szpaczyński, 2007).

GRANICZNE WARUNKI PRZEPIYU

W modelowanym ujęciu infiltracyjnym należy odtworzyć skomplikowany układ wzajemnie powiązanych zależności pomiędzy zasilaniem i poborem wód infiltracyjnych. Zasilanie warstwy wodonośnej odbywa się przez układ stawów i rowów zasilających. Uwzględniono to w modelu jako warunek brzegowy III rodzaju. Dla chwili początkowej zadano maksymalne rzędne zwierciadła wody H_{riv} w stawach i rowach doprowadzających wodę. W warunkach suszy założono brak zasilania stawów infiltracyjnych z Brdy. Uwzględniając naturalne przesączanie wody oraz szacunkowe wartości parowania w okresie suszy (Szpakowski, 2001), głębokość wody w stawach i rowach zasilających zmniejsza się wg określonej postaci funkcji wielomianowej, gdzie czas t wyrażony jest w dobach:

$$h = -0,0025 \cdot t^3 + 0,0545 \cdot t^2 - 0,4581 \cdot t \quad [2]$$

Do obliczeń przyjęto uśredniony współczynnik przepuszczalności utworów dennych w wysokości $C_d = 8$ m²/d. Uwzględnia on współczynnik filtracji i miąższość utworów dennych oraz powierzchnię elementarnej komórki obliczeniowej.

Odbiór wody z warstwy wodonośnej uzależniony jest od miąższości warstwy, która wpływa bezpośrednio na dobór urządzeń. W obliczeniach przeprowadzonych w warunkach ustalonych określono rejony wykorzystania studni głębinowych (wyposażonych w pompe), studni lewarowych oraz systemu drenów. Pierwotnie studnie głębinowe uwzględniono w modelu w postaci elementarnej obszaru poboru wody z warstwy ($Q = \text{const}$), zaś studnie lewarowe uwzględniono

w modelu jako punkty, w których zadany jest stan wody w studni ($H = \text{const}$). Dla systemu drenów wykorzystano moduł służący do obliczania udziału drenów w systemie przepływu wód. Rzędne kanałów drenarskich przyjęto w przedziale 43,0–45,5 m n.p.m., zaś opory oszacowano w wysokości $C_{DRN} = 250$ m²/d, co wynika z wartości średniego współczynnika filtracji $k = 50$ m/d oraz elementarnej długości obliczeniowej równej 5 m.

Pozostawienie elementów systemu odbioru wód z warstwy filtracyjnej w postaci warunków $H = \text{const}$ oraz $Q = \text{const}$ powodowało konieczność początkowego przewidzenia potencjalnego wydatku ujęcia w kolejnych krokach czasowych obliczeń. Jednakże z punktu widzenia rozpoznania reakcji systemu filtracyjnego na warunki ograniczonego zasilania takie podejście okazało się nieefektywne. Dlatego też przed przystąpieniem do właściwych obliczeń studnie głębinowe oraz lewarowe zdefiniowano warunkiem III rodzaju, wykorzystując równanie dla ciągów drenarskich. Rzędne studni głębinowych przyjęto w wysokości obliczonej w warunkach ustalonych i powiększono o 20–30 cm, co wynika z zastosowania równania Dupuita w sąsiedztwie samych studni. Rzędne studni lewarowych określono wcześniej, analizując pracę ujęcia w warunkach dopuszczalnej eksploatacji (Burzyński, Szpakowski, 2007), zaś współczynnik oporów założono w wysokości $C_{DRN} = 1000$ m²/d. Przyjęcie tak dużej wartości ma na celu obniżenie zwierciadła wody w studniach w każdym warunkach do poziomu rzędnej sztucznie zadanego ciągu drenarskiego. W tabeli 1 przedstawiono bilansowe zestawienie poboru wód dla poszczególnych barier

Tabela 1

Bilans wodny ujęcia Bydgoszcz–Czyżkówko dla różnie zdefiniowanych granicznych warunków przepływu
Water balance of the Bydgoszcz–Czyżkówko intake for different types of boundary conditions

Bariera	Pobór dla warunku brzegowego I, II i III rodzaju [m ³ /d]				Pobór dla warunku brzegowego III rodzaju [m ³ /d]				Różnica względna [%]			
	studnie głębinowe	studnie lewarowe	dreny	suma	studnie głębinowe	studnie lewarowe	dreny	suma	studnie głębinowe	studnie lewarowe	dreny	suma
L1	14020	3768		17788	12960	3895		16855	7,56	-3,37		5,25
L2	5900		8856	14756	5356		9595	14951	9,22		-8,34	-1,32
L3		2528	1790	4318		2492	1980	4472		1,42	-10,61	-3,57
L4		3870	3137	7007		3799	3383	7182		1,83	-7,84	-2,50
L5	7200			7200	6466			6466	10,19			10,19
L6	3000	7172	7385	17557	2511	6992	7974	17477	16,30	2,51	-7,98	0,46
L7	8800	10245		19045	7655	10539		18194	13,01	-2,87		4,47
L8	17530			17530	16639			16639	5,08			5,08
Suma	56450	27583	21168	105201	51587	27717	22932	102236				
Całość									8,61	-0,49	-8,33	2,82

ujęcia infiltracyjnego w warunkach różnego zdefiniowania granicznych warunków przepływu.

Jako warunek początkowy przyjęto układ zwierciadła wody dla ustalonych warunków krążenia wody w warstwie wodonośnej w warunkach dopuszczalnej pracy ujęcia. Prze-

prowadzono symulację czasu 10 dni od momentu przerwania zasilania z Brdy. W obliczeniach określono warunki przepływu dla 40 kroków czasowych, każdy o długości 6 godzin.

ANALIZA PRACY UJĘCIA INFILTRACYJNEGO W WARUNKACH BRAKU ZASILANIA

Obliczenia modelowe wskazują, że w początkowym okresie 24 godzin udział infiltracji z układu stawów infiltracyjnych maleje o około 20% względem wartości początkowej. W kolejnych dwóch dniach dynamika obniżania się udziału wód infiltracyjnych w krążeniu wód warstwy wodonośnej jeszcze się zwiększa. Taki proces wynika z początkowego kontaktu hydraulicznego warstwy wodonośnej i sieci wód powierzchniowych. Głębokość wody w stawach i rowach infiltracyjnych przez 7 dni od wyłączenia zasilania opada od

150 do 8 cm. Przy tak niewielkich wartościach zasilanie warstwy filtracyjnej jest minimalne i wynosi niecałe 9000 m³/d, co stanowi ok. 10% wartości początkowej (tab. 2). Dla tak sformułowanego zadania obliczeniowego okres ten stanowi granicę obliczeń. Zmiany bilansu krążenia wody przedstawiono tylko dla okresu początkowych 7 dni opróżniania systemu wodonośnego, gdyż dalsze obliczenia wymagają powtórnego przeanalizowania warunku brzegowego (fig. 2).

Tabela 2

Bilans wodny ujęcia Bydgoszcz–Czyżkówko dla początkowych 7 dni od momentu odcięcia zasilania ujęcia
Water balance of the Bydgoszcz–Czyżkówko intake for the beginning week of intake cutting-off

Czas w dobach		0	1	2	3	4	5	6	7
Infiltracja ze stawów i rowów nawadniających	m ³ /d	108 129	85 985	62 963	45 074	31 481	21 550	14 110	8 912
Ubytek zasobności warstwy		0	21 206	39 030	48 767	53 035	53 583	52 224	49 477
Pobór ujęcia		-102 237	-101 300	-96 100	-87 947	-78 622	-69 243	-60 444	-52 501
Odpływ do Brdy		-5 892	-5 892	-5 892	-5 892	-5 892	-5 891	-5 890	-5 887

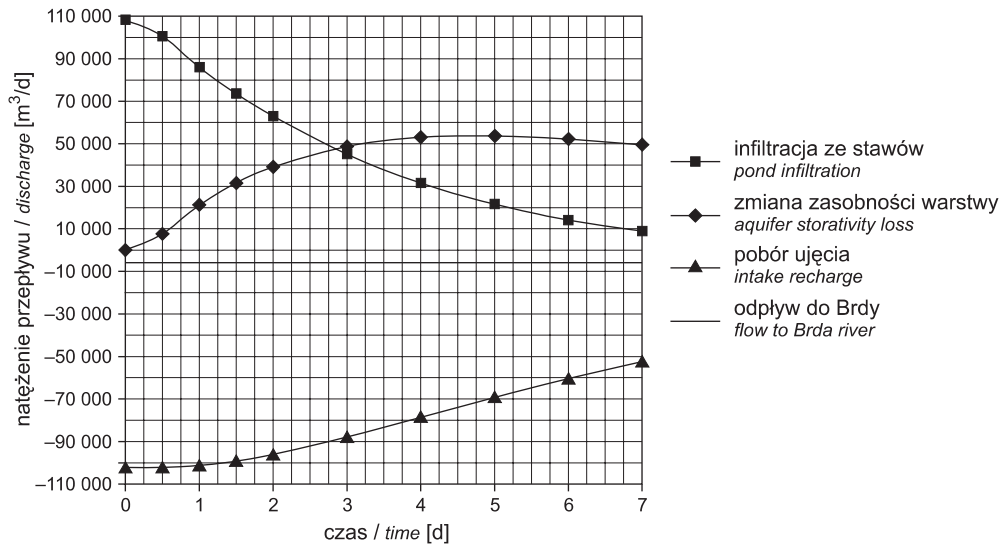


Fig. 2. Bilans przepływu wody w ujęciu infiltracyjnym

Flow balance in infiltration intake

Pomimo zdecydowanego obniżenia infiltracji po upływie tygodnia, pobór ujęcia zmalał tylko o połowę i wyniósł ponad 52 000 m³/d. Jest to efekt obniżania się zasobności warstwy wodonośnej. W wyniku wyzwolenia się retencjonowanej wody w samym materiale filtracyjnym zasilanie warstwy

wodonośnej było największe pomiędzy 4 a 6 dniem obliczeń (ponad 53 000 m³/d). Obliczenia udowodniły, że w analizowanym okresie wartość odpływu wody z warstwy wodonośnej do Brdy nie uległa zmianie i wynosi prawie 6000 m³/d.

PODSUMOWANIE

Projektowane ujęcie w Bydgoszczy jest w całości uzależnione od wymuszonego powierzchniowego dopływu wody z Brdy. Przedstawione obliczenia pokazują pracę warstwy wodonośnej w warunkach braku zasilania stawów ujęcia, które jest prawdopodobne w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Wyniki symulacji numerycznych dowodzą, że po 7 dniach od momentu odłączenia zasilania stawów i rowów infiltracyjnych wydajność ujęcia zmniejsza się o 50% i w najlepszym wypadku osiągnie 50 000 m³/d. Najprawdopodobniej w rzeczywistości wydajność będzie jeszcze mniejsza,

gdyż założone w obliczeniach największe projektowane napełnienie stawów będzie realizowane incydentalnie.

W celu odtworzenia sytuacji w krytycznym okresie czasowym konieczne jest ponowne określenie warunku brzegowego na zachodniej granicy obszaru modelowania i stworzenie nowego modelu pracy ujęcia. W warunkach naturalnych przez tę granicę przepływa około 3500 m³/d, co wobec zmniejszającego się zasilania ze stawów infiltracyjnych staje się wartością znaczącą dla dalszych obliczeń.

LITERATURA

- BURZYŃSKI K., SZPAKOWSKI W., 2007 – Symulacja pracy komunalnego ujęcia infiltracyjnego w warunkach dopuszczalnej eksploatacji. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 13, cz. 3: 637–644. AGH, Kraków.
- LORENC H., 2005 – Atlas klimatu Polski. IMGW, Warszawa.
- LORENC H., CERAN M., MIERKIEWICZ M., SASIM M., WITA A., 2006 – Susza w Polsce 2006 rok. Raport IMGW, Warszawa.

- SASIM M., MIERKIEWICZ M., 2005 – Susza w 2003 roku. *Gazeta obserwatora IMGW*, 1.
- SZPAKOWSKI W., 2001 – Bilans hydrologiczny południowej części strefy krawędziowej Pojezierza Kaszubskiego. *W: XXI Ogólnopolska Szkoła Hydrauliki* (red. W. Majewski): 97–101. IBW PAN, Gdańsk.

SUMMARY

In many region of Poland, municipal water intakes have a serious problem with fresh water delivery. That is why intakes with artificial infiltration areas have recently been more often taken into account. A new infiltration intake is currently designed for Bydgoszcz agglomeration in the Brda valley. The intake area exceeds 1.5 km² and the area of infiltration basins is 27 ha (Fig. 1). Filtrated water is captured by eight barriers (L1–L8) composed of bore-wells, siphon wells and a drainage net. The problem of analysis is serious because droughts happened 14 times during the last 25 years. Therefore, the water quality or quantity in the Brda River is sometimes insufficient to recharge the infiltration intake.

Three-dimensional movement of groundwater of constant density for a free table aquifer is described by the partial – differential equation valid for a general groundwater flow:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[K_X (h - \sigma) \frac{\partial h}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_Y (h - \sigma) \frac{\partial h}{\partial y} \right] = \omega_d \frac{\partial h}{\partial t} + w_p \quad [1]$$

where: K_X, K_Y – are principal values of the hydraulic conductivity tensor [m/h], $(h - \sigma)$ – aquifer thickness [m], ω_d – dimensionless effective porosity coefficient, w_p – represents sources and sink of water [m³/h·m³]. Expression $\frac{\partial h}{\partial t}$ is approximated by backward finite – difference. The numerical solution of groundwater flow in the artificial aquifer consists of over 100 000 elements. Each block represents an area surface of 25 m² and of variable thickness depending on the average layer thickness. Values of filtration parameters are constant in every cell. Constant head is declared on the east mo-

del boundary (Brda River) and no flow conditions are declared in the addition boundary.

During the drought period, the Brda River flow is assumed to be severed. Evaporation and infiltration processes have a dominant influence on the water level of infiltration basins. Water depth changes with time according to the approximated function:

$$h = -0.0025 \cdot t^3 + 0.0545 \cdot t^2 - 0.4581 \cdot t \quad [2]$$

Outflow from the aquifer is considered as a drainage boundary condition. Wells and siphons have been recalculated to avoid the flow level as a boundary condition. The resistance coefficient of drains is defined in such a way that the total balance of intake remains equal to the initial state calculated in steady-state conditions. The initial condition is given by the results of flow calculation under admissible exploitation (100 000 m³/day). The calculation were made in steady state conditions using the Modflow program (included in GMS ver. 3.1). As a result, a water-table surface of groundwater flow was calculated. Calculations in the transient state were done for the first 10 days (40 stress period, 6 hours long).

When analysing the calculation results after 7 days, it can be seen that the inflow to aquifer is reduced to 10% of the initial value. The infiltration intake reduces by half the capability of aquifer retention. Flow calculations are possible in the presented numerical model only for a seven day period. For a longer time, the natural filtration, estimated at 3500 m³/d, should be taken into account. For the admissible exploitation of infiltration intake (100 000 m³/d), the natural filtration was omitted. The natural groundwater flow requires reanalysing the boundary conditions.