

PORÓWNANIE METOD ODWZOROWANIA WIELOWARSTWOWEGO UKŁADU KRĄŻENIA WÓD SYSTEMU WODONOŚNEGO W REJONIE UJĘCIA LIS NA MODELACH LOKALNYCH I REGIONALNYCH

COMPARISON OF LOCAL AND REGIONAL GROUNDWATER FLOW MODELLING APPROACHES OF THE MULTILAYER GROUNDWATER SYSTEM IN THE VICINITY OF THE LIS GROUNDWATER INTAKE

MAGDALENA MATUSIAK¹, STANISŁAW DĄBROWSKI¹, WITOLD RYNARZEWSKI¹

Abstrakt. Analizie poddano obszar o pow. 27 km², który stanowi wycinek systemu wodonośnego doliny Prosny w rejonie Kalisza. Obszar ten wielokrotnie był przedmiotem badań modelowych, zarówno szczegółowych – w celu określenia zasobów i wyznaczenia strefy ochronnej ujęcia Lis dla Kalisza, jak i regionalnych – w celu udokumentowania zasobów dyspozycyjnych zlewni Prosny. Ponadto obszar objęto analizą modelową w celu określenia wielkości eksploatacji poziomu górnourajskiego, stanowiącego z pozoru odrębny system krążenia w stosunku do systemów czwartorzędowych. Sporządzone modele różniły się rozmiarem zastosowanej siatki dyskretyzacyjnej (100, 125, 250 i 500 m), schematyzacją układu krążenia (dwu-, trój- i siedmiowarstwowy), a także programami użytymi do ich konstrukcji (HYDRYLIB i MODFLOW). Przepływy wód podziemnych analizowano w badaniu filtracji ustalonej. Otrzymane wyniki wykazują zasadniczy wpływ na wyniki bilansu przepływu wód schematyzacji warstwowego układu krążenia oraz rozmiaru siatki dyskretyzacyjnej oraz konieczność uwzględniania drenażu regionalnego w głębszych poziomach wodonośnych w lokalnych modelach szczegółowych ujęć.

Słowa kluczowe: modele przepływu quasi 3-D i 3-D, model lokalny i regionalny, bilans przepływu systemu wodonośnego doliny Prosny.

Abstract. We analyzed 27 km² of the Prosna valley aquifer near Kalisz. The region was previously a subject of four model-based studies of local and regional range. Furthermore, additional modelling researches were conducted that aimed at evaluation of Upper Jurassic aquifer exploitation, which seems to be a separate groundwater circulation system. The models used in the analyses differed in terms of grid size (100, 125, 250 and 500 m), groundwater circulation scheme (two-, three- or seven-layered), and the software used (HYDRYLIB or MODFLOW). The results of groundwater steady-state flow indicate the essential influence of the groundwater circulation scheme and the mesh size on groundwater flow balance. It also emphasizes the importance of deep aquifers in the detailed model-based study in the case of groundwater intakes located within the river valleys of regional drainage range.

Key words: quasi 3-D and 3-D groundwater flow models, local and regional groundwater flow modelling, Prosna valley groundwater system balance.

WSTĘP

W pracy przedstawiono wyniki czterech modeli ustalonego przepływu wód w układach lokalnym i regionalnym, zróżnicowanych pod względem rozdzielczości i schematyzacji układu krążenia wód dla fragmentu doliny Prosny w rejonie Kalisza (fig. 1). Do konstrukcji modeli wykorzystano

programy HYDRYLIB oraz MODFLOW. Celem przeprowadzonych analiz była ocena wpływu zastosowanego sposobu odwzorowania (modele quasi 3-D vs 3-D), a także rozmiaru siatki dyskretyzacyjnej na składniki bilansu wodnego oraz układ krążenia wód doliny Prosny na obszarze zasilania ujęcia Lis dla Kalisza.

¹Hydroconsult Sp. z o.o., ul. Smardzewska 15, 60-161 Poznań; email: poznan@hydroconsult.pl.

Artykuł przedstawia różnice wynikające z przyjęcia dwu-, trój- i siedmiowarstwowego schematu krążenia wód, sposobu odwzorowania parametrów filtracyjnych poziomów wodonośnych (k , T) i osadów słabo przepuszczalnych (k' , k'/m'), a także ocenę rozbieżności wyników płynących z przyjęcia odmiennej schematyzacji poziomej (warstwy modelowe o ciągłym vs bloki nieaktywne) dla fragmentu struktury doliny głęboko wciętej w osady słabo przepuszczalne.

BUDOWA GEOLOGICZNA I WARUNKI HYDROGEOLOGICZNE

Badaniami objęto położony na południe od Kalisza odcinek doliny Proсны, pomiędzy dopływem Ołoboku – na południu, a ujściowym odcinkiem Pokrzywnicy – na północy. Szerokość doliny na wysokości ujęcia Lis dochodzi do ok. 2,5–4,0 km. Na obszarze zasilania ujęcia średni stan wód rzeki Proсны kształtuje się na rzędnej ok. 103,0–106,4 m n.p.m.

W wyniku wierceń na obszarze tym rozpoznano osady czwartorzędu, neogenu i paleogenu oraz jury górnej i środkowej. Budowę geologiczną oraz warunki hydrogeologiczne rejonu ujęcia przedstawiono na [figurze 2](#) (Dąbrowski i in., 2015). W układzie krążenia wód wyróżnia się porowe poziomy wodonośne kenozoiku oraz szczelinowe – mezozoiku. Struktury wodonośne piętra czwartorzędowego w rejonie Kalisza ograniczają się głównie do pasmowego przebiegu poligenetycznej doliny rzecznej Proсны o dużej zmienności litologicznej, której układ hydrostrukturalny cechuje dwudzielność. Osady holocenu i górnego plejstocenu tworzą przypowierzchniowy poziom wodonośny o miąższości 0,5–10 m i współczynnikach filtracji k w zakresie 0,3–0,7 m/h (piaski drobnoziarniste) do 2,0 m/h (żwiru i pospółki). Zasięg poziomu wyznacza granica współczesnej doliny Proсны.

Zalegające poniżej piaszczysto-żwirowe osady, wypełniające dolinę kopalną interglacjału wielkiego, tworzą główny poziom wodonośny eksploatowany studniami ujęcia Lis. Poziom ten osiąga miąższości 0,5–32,4 m, a jego parametry hydrogeologiczne określone na podstawie obserwacji filtracji nieustalanej z próbnych pompowań wynoszą od 0,04–0,8 m/h dla frakcji mułkowych do 1,2–1,5 m/h dla frakcji żwirowo-piaszczystej. Przewodności poziomu sięgają 0,3–60,5 m²/h, natomiast uzyskiwane wydajności jednostkowe ujęć 3,0–25,0 m³/h/m (Dąbrowski i in., 2008; Dąbrowski, Przybyłek, 2012).

W południowej części obszaru zasilania ciśnienie hydrostatyczne poziomu doliny kopalnej cechuje się swobodnym charakterem, natomiast w części północnej – poziomy ten rozdziela warstwa słabo przepuszczalnych osadów ilasto-mułkowych, torfowych i gliniastych, o miąższości 0,3–19,0 m. Obydwa poziomy wykazują zbliżone ciśnienia hydrostatyczne, co wskazuje na ich wzajemny kontakt hydrauliczny. Na obszarach przylegających do doliny Proсны czwartorzędowe poziomy wodonośne występują jedynie w formie lokalnych przewarstwień piaszczystych zalegających wśród glin zwałowych ([fig. 1](#)).

Zasilanie eksploatowanego poziomu wodonośnego zachodzi poprzez bezpośrednią infiltrację wód opadowych, dopływów bocznych oraz drenaż wgłębnych poziomów wodonośnych. W warunkach eksploatacji ujęcia Lis istotną rolę odgrywa zasilanie wodami powierzchniowymi rzeki Proсны (Pleczyński, Przybyłek, 1974; Dąbrowski i in., 2008; Matusiak i in., 2010; Dąbrowski, Przybyłek, 2012). W warunkach naturalnych i eksploatacyjnych poziomy wodonośny czwartorzędu wyróżnia silna więź hydrauliczna z wodami powierzchniowymi rzeki Proсны, która na przeważającym obszarze stanowi regionalną bazę drenażu wgłębnych poziomów wodonośnych – mioceńskiego i górnourajskiego (Dąbrowski i in., 2017; Matusiak, 2017).

Poziom mioceński tworzą piaski drobnoziarniste i mułkowate, o miąższości 5,0–15,0 m i przewodności w granicach 2,0–9,0 m²/h, natomiast poziom górnourajski – margle i wapień, intensywnie uszczelinowione na głęb. 60,0–350,0 m. Najkorzystniejszymi parametrami hydrogeologicznymi cechuje się silnie zaangażowany tektonicznie fragment masywu górnourajskiego w obrębie strefy dyslokacyjnej Poznań–Kalisz przebiegającej na osi doliny Proсны na północny zachód od obszaru zasilania ujęcia Lis (wydajności jednostkowe ujęć „q” 5,0–10,0 m³/h/1mS), na pozostałym obszarze parametry filtracyjne są niższe w zakresie „q” 0,8–3,5 m³/h/1mS (Matusiak, Przybyłek, 2017). Wgłębne poziomy wodonośne lokalnie rozdzielają słabo przepuszczalne mułki i ły. Z uwagi na nieznaczne miąższości oraz liczne nieciągłości osadów słabo przepuszczalnych, poziomy te bywają w schematyzacji hydrostrukturalnej traktowane jako wspólny kompleks wodonośny (Rynarzewski i in., 2016). Na obszarze zasilania ujęcia Lis ciśnienia piezometryczne poziomów mioceńskiego i górnourajskiego w 2008 r. kształtowały się w zakresie 102,5–112,3 m n.p.m. Północna część obszaru zasilania ujęcia Lis znajduje się w zasięgu oddziaływania leja depresji wywołanego pracą ujęć komunalnych z poziomu górnourajskiego, którego największy zasięg był datowany na lata 1970–1990 ([fig. 2](#)) (Matusiak, Przybyłek, 2017).

CHARAKTERYSTYKA UJĘCIA

Badania przeprowadzono dla obszaru zasilania ujęcia komunalnego Lis dla Kalisza, zbudowanego w formie liniowej bariery studni oddalonych ok. 100–150 m od prawego brzegu Proсны. Studnie ujmują osady czwartorzędowe poziomu wodonośnego doliny kopalnej z głęb. 11,0–30,0 m. W analizowanym 2008 r. ujęcie składało się z 35 czynnych studni, pracujących naprzemiennie z wydajnościami 7,8–40,8 m³/h. Średnia produkcja ujęcia Lis w tym okresie wynosiła 306,0 m³/h (Matusiak i in., 2010).

W 2008 r. przeprowadzono prace dokumentacyjne i badania modelowe mające na celu określenie przewidywanego zasięgu oddziaływania ujęcia w perspektywie jego rozbudowy w kierunku południowym oraz udokumentowanie granic terenu ochrony pośredniej (Dąbrowski i in., 2008). Dla prognozowanej wydajności $Q = 1000$ m³/h (uzyskanej z istniejących

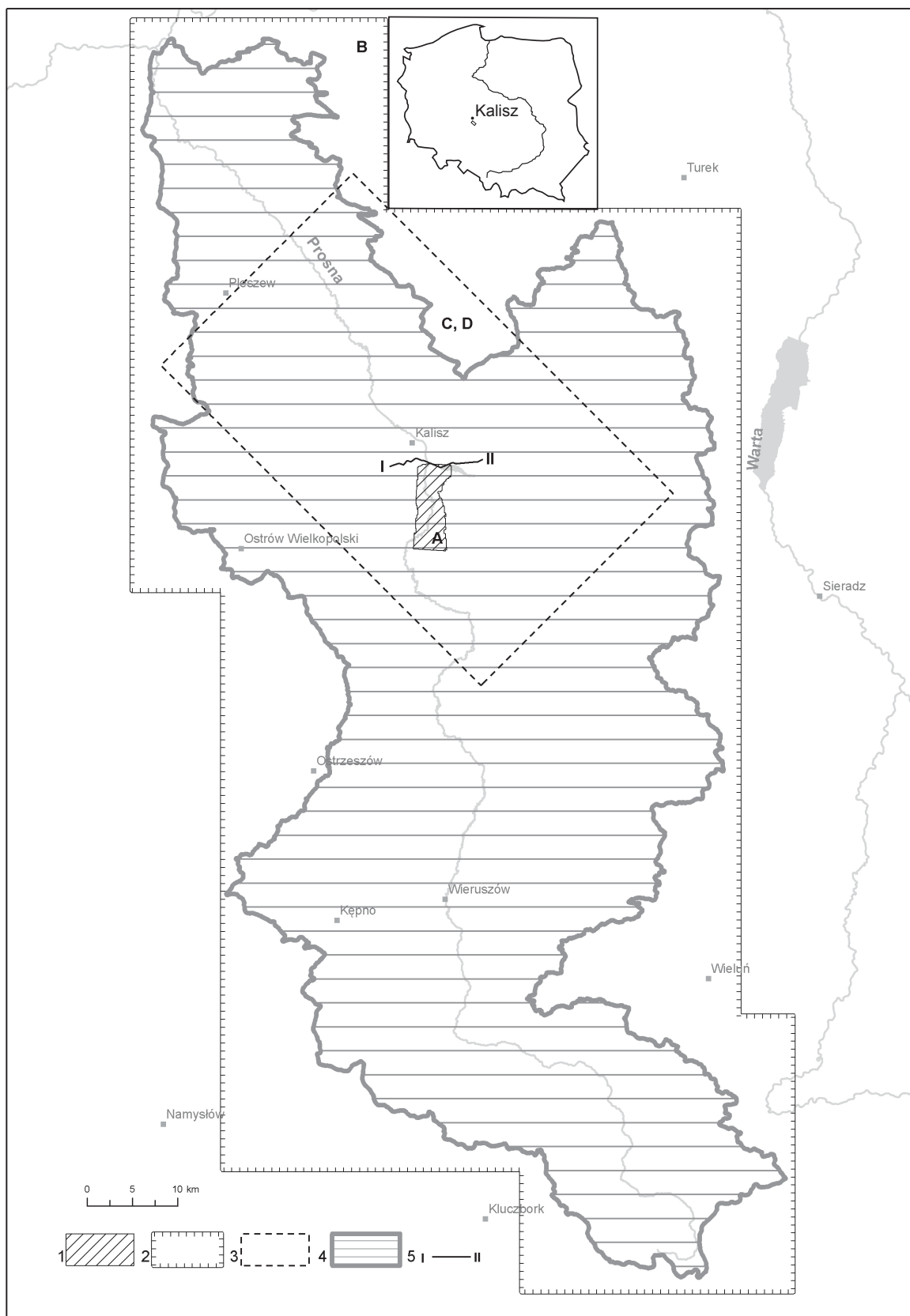


Fig. 1. Mapa dokumentacyjna zasięgu badań modelowych

1 – obszar modelu lokalnego A; 2 – granica modelu B; 3 – granica modeli C i D; 4 – obszar zlewni Proсны; 5 – linia przekroju hydrogeologicznego

Map of the study area

1 – local model A area; 2 – B model boundary; 3 – C and D models boundary; 4 – Prosna catchment area; 5 – hydrogeological cross-section line

PRZEKRÓJ HYDROGEOLOGICZNY I-II

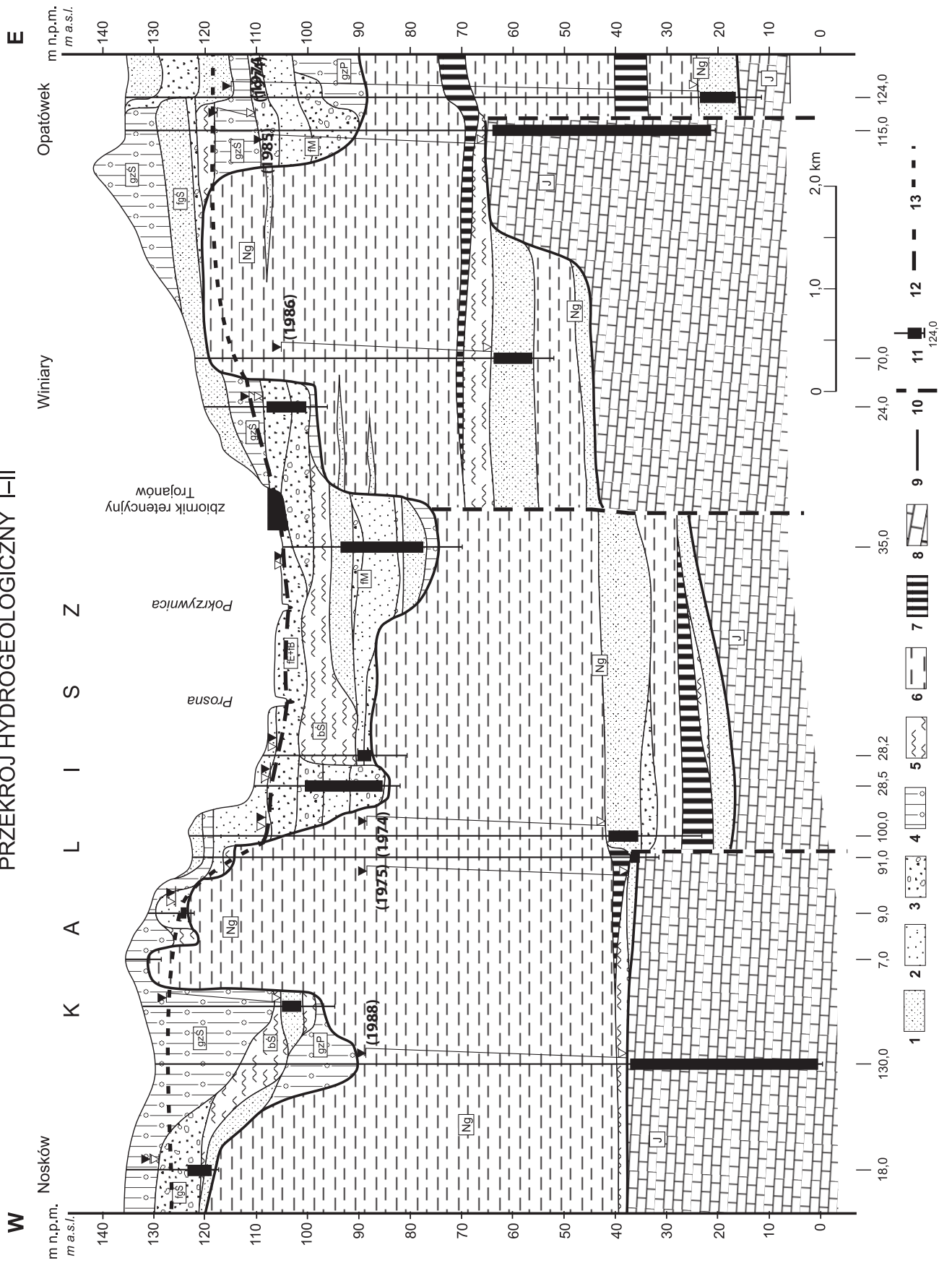


Fig. 2. Przekrój hydrogeologiczny w rejonie Kalisza
Przekrój sporządzony na podstawie materiałów
archiwalnych (Dąbrowski i in., 2015)

1 – piaski drobnoziarniste; 2 – piaski średnioziarniste; 3 – piaski i żwiry; 4 – gliny; 5 – mułki; 6 – iły; 7 – węgiel brunatny; 8 – wapień; 9 – granice stratygraficzne; 10 – uskoki; 11 – otwory hydrogeologiczne i ich głębokość; 12 – zwierciadło poziomu doliny kopalnej; 13 – ciśnienie piezometryczne III warstwy modelowej poza doliną kopalną (interpretacja wg modeli C i D). Stratygrafia: Q – czwartorzęd; Ng – neogen (miocen); J – jura

Hydrogeological cross-section
 The cross-section based on archival documentation
 (Dąbrowski *et al.*, 2015)

1 – fine sands; 2 – medium sands; 3 – sand and gravel mix; 4 – tills; 5 – muds; 6 – clays; 7 – lignite; 8 – limestones; 9 – stratigraphic boundaries; 10 – faults; 11 – boreholes and their depths; 12 – piezometric surface of buried valley aquifer; 13 – piezometric pressure of layer III outside the buried valley aquifer (according to C and D models). Stratigraphy: Q – Quaternary; Ng – Neogene (Miocene); J – Jurassic



i projektowanych studni) określono obszar zasilania ujęcia, który przyjęto w badaniach jako podstawowy obszar bilansowy. Udokumentowany obszar zasilania ujęcia Lis składa się z dwóch podobszarów: zasadniczego – o pow. 13,44 km² (przekraczającego rzekę Prosnę na zachód) oraz odizolowanego fragmentu – o pow. 0,31 km², znajdującego się w zasięgu wysuniętej najdalej na południe projektowanej studni (fig. 3).

MODELE MATEMATYCZNE

Do badań wykorzystano cztery modele matematyczne oznaczone symbolami A–D. Model A, o charakterze lokalnym, obejmuje fragment doliny Proсны w najbliższym otoczeniu ujęcia Lis, natomiast modele B–D, o charakterze regionalnym, wykraczają znacznie poza poligon badawczy wytypowany do szczegółowych analiz, charakteryzując systemy wodonośne i ich dynamikę, zarówno w rejonie Kalisza, jak i na terenach przyległych (fig. 1).

Model A skonstruowano w 2008 r. w układzie dwuwarstwowym, w celu udokumentowania zasobów i zasięgu terenu ochrony pośredniej ujęcia Lis przy użyciu programu HYDRYLIB (Dąbrowski i in., 2008). Obszar o pow. 35,15 km² zdyskretyzowano siatką kwadratową o wymiarach 100 × 100 m, składającą się z 95 wierszy i 37 kolumn. Granice modelowanych warstw ustanowiono na strumieniach wód (warunki I rodzaju) lub na granicach strukturalnych występowania poziomów wodonośnych, traktując je jako szczelne. Aktywna powierzchnia modelu wyniosła 30,36 km². Badaniami objęto użytkowe poziomy wodonośne w utworach czwartorzęd do głęb. 35 m, przyjmując schematyzację dwuwarstwową. Warstwa I obejmowała poziom przypowierzchniowy w dolinach rzecznych i lokalnie międzyglinowy górny na obszarach przyległych. Zasadniczą strukturą wodonośną, odzwierciedloną w II warstwie, był poziom doliny kopalnej rzeki Proсны. Modelowe warstwy przepuszczalne, I i II, powiązane poprzez zastosowanie oporów międzywarstwowych k'/m'. Zakres wytarowanych parametrów hydraulicznych

poszczególnych warstw przepuszczalnych I i II na obszarze zasilania ujęcia wynosił: K_I 0,3–2,0 m/h, T_{II} 0,1–60,0 m²/h (w 95% mieścił się w granicach 1,5–30 m²/h).

Model B wykonano w środowisku graficznym Groundwater Vistas (Environmental Simulations, Inc., 2008) w celu ilościowej oceny zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych zlewni Proсны (Rynarzewski i in., 2016). Do symulacji wykorzystano wersję pakietu MODFLOW Original (88/96). Powierzchnię 7557,0 km² zdyskretyzowano siatką kwadratową o wymiarach 500 × 500 m. W procesie schematyzacji struktur wodonośnych wydzielono trzy przepuszczalne warstwy modelowe: warstwę I – reprezentującą poziom przypowierzchniowy czwartorzęd, warstwę II – doliny kopalne oraz poziomy międzyglinowe czwartorzęd i warstwę III – odzwierciedlającą łącznie piętra wodonośne: neogenu, kredy i jury. Parametry filtracyjne poziomów wodonośnych sprowadzono do schematu typu T, czyli parametru wodoprzewodności, natomiast związki hydrauliczne pomiędzy wydzielonymi warstwami przepuszczalnymi odwzorowano za pomocą parametru przesiąkania k'/m' (międzywarstwowego oporu hydraulicznego) odwzorowującego rozdzielające serie osadów słabo przepuszczalnych. Podobnie jak w modelu A lateralny zasięg występowania struktur wodonośnych ograniczono obecnością bloków nieaktywnych typu NOFLOW (Q=0). Zakres wytarowanych parametrów filtracyjnych warstw I, II i III na obszarze bilansowym zawierał się w przedziale: T_I 3,2–11,9 m²/h (najczęściej < 3,8 m²/h), T_{II} 0,4–13,0 m²/h, T_{III} – 3,0–9,6 m²/h, a międzywarstwowe opory hydrauliczne k'/m'_{I/II} 0,01–0,003 1/h, k'/m'_{II/III} 9,6·10⁻⁶ 1/h.

W modelu C konstrukcję stacjonarnego przepływu wód oparto na zakresie parametrów filtracyjnych zweryfikowanym w trakcie symulacji niestacjonarnego przepływu wód podziemnych skonstruowanym w 2017 r. w celu oceny odnawialności zasobów wód z utworów górnokredowych w rejonie Kalisza (Matusiak, 2017). Do symulacji przebiegu eksploatacji wykorzystano program numeryczny MODFLOW 2000 z pakietu Groundwater Vistas, dzieląc obszar rozpoznania o pow. 1500 km², siatką kwadratową 250 × 250 m, składającą się z 200 wierszy i 120 kolumn. Powierzchnia aktywna utożsamiana z całkowitą powierzchnią modelu jest jednakowa dla wszystkich warstw. Schematyzacji hydrostrukturalnej dokonano, kreśląc mapy stropów, spągów oraz współczynnika filtracji wszystkich wydzielonych warstw (zarówno w obrębie poziomów wodonośnych, jak i słabo przepuszczalnego otoczenia). Układ hydrostrukturalny sprowadzono do 7 warstw modelowych odzwierciedlających następujące poziomy wodonośne: przypowierzchniowy (W_I), doliny kopalne i poziomy międzyglinowe czwartorzęd (W_{III}), mioceni (W_V), górnokredowy i kredowy (W_{VII}). Pozostałe warstwy odwzorowywały parametry osadów słabo przepuszczalnych zbudowanych w przewodzie z glin zwałowych (W_{II}), ilów (W_{IV}), ilów i mułków (W_{VI}) oraz zasięg okien hydrogeologicznych ułatwiających kontakty hydrauliczne pomiędzy wydzielonymi poziomami. Na obszarze zasilania ujęcia wytarowana wielkość współczynników filtracji poszczególnych warstw mieści się w 95% w granicach:

- k_I 0,4–2,5 m/h (przy przewodności T_I 3,0–12,5 m²/h);
- k_{II}^2 $7 \cdot 10^{-4}$ –0,1 m/h;
- k_{III} 0,2–2,0 m/h (T_{III} 0,1–30,0 m²/h);
- k_{IV}^2 $3 \cdot 10^{-6}$ – $6 \cdot 10^{-5}$ m/h;
- k_V 0,25–0,6 m/h (T_V 2,7–3,3 m²/h);
- k_{VI}^2 $6 \cdot 10^{-5}$ m/h;
- k_{VII} 0,05–0,1 m/h (T_{VII} 1,6–6,0 m²/h).

Model D skonstruowano w celu zweryfikowania wpływu rozmiaru siatki dyskretyzacyjnej na przebieg i wyniki symulacji. Aby zrealizować cel badawczy, model C przekształcono w model D poprzez zagęszczenie kroku siatki dyskretyzacyjnej w rejonie obszaru zasilania ujęcia Lis do 125 m oraz uszczegółowienie granic struktur i obszaru bilansowego, warunków brzegowych symulujących ciek i eksploatację studni. Zasadniczą korektą objęto warunki brzegowe III rodzaju typu RIV, generując dodatkowe bloki odwzorowujące przepływ w bezimiennych ciekach oraz rowach melioracji szczegółowych funkcjonujących na obszarze zasilania ujęcia. Granica powstałego modelu D, jego struktura, warunki brzegowe oraz parametry poza analizowanym obszarem zasilania pozostały tożsame z modelem C.

Strop wszystkich modeli stanowi powierzchnia terenu. W modelach A i B pionowe granice pozostałych warstw wyznaczają powierzchnie płaskie (modele quasi 3-D), zaś w modelach C i D – rzeczywiste położenie stropu i spągu poziomów wodonośnych (modele 3-D).

METODA BADAŃ

Do realizacji celu badawczego na wszystkich modelach A, B, C i D odtworzono warunki zasilania atmosferycznego i eksploatacji ujęcia Lis dla Kalisza wynoszącej w 2008 r. 306 m³/h. Rozkładowi eksploatacji pomiędzy poszczególne bloki symulacyjne przyświecało dążenie do jak najwierniejszego odzwierciedlenia ówczesnego poboru wód. W zależności od rozmiaru siatki dyskretyzacyjnej w jednym bloku modelowym odzwierciedlono pracę od 1 do 3 studni ujęcia. W modelach A–D utworzono obszary bilansowe odpowiadające obszarowi zasilania ujęcia, które składały się z następującej ilości bloków: model A_{dx,y=100} – 1375, model B_{dx,y=500} – 55, model C_{dx,y=250} – 220, D_{dx,y=125} – 880. Powierzchnia wszystkich obszarów bilansowych była równa i wynosiła 13,75 km² (fig. 3). W procesie kalibracji zweryfikowano wielkość infiltracji efektywnej, rozkład i parametry warunków brzegowych symulujących wody powierzchniowe oraz czynne studnie ujęcia Lis. W modelu A łączną eksploatację ujęcia w wysokości 306 m³/h odtworzono warunkami II rodzaju o wydatkach 9,0–48,0 m³/h, rozdysponowanymi w II warstwie modelowej pomiędzy 26 bloków obliczeniowych. Na obszarze bilansowym znalazło się 115 bloków symulujących rzekę Prosnę oraz rowy melioracyjne. Moduł infiltracji opadów wyniósł 17,3 m³/h/km².

W II warstwie modelu B czynne studnie były reprezentowane przez 13 bloków obliczeniowych, symulowanych w postaci warunku o stałej wydajności w granicach 9–63 m³/h. Warunkami III rodzaju odwzorowano koryto rzeki Proсны

(13 bloków). Moduł zasilania z infiltracji opadów atmosferycznych był niższy niż w modelu A i wynosił 15,0 m³/h/km². Na obszarze bilansowym modelu C eksploatację ujęcia Lis symulowało 19 bloków obliczeniowych (Q 9–45 m³/h) rozmieszczonych w warstwie III, a koryto rzeki Proсны – 22 bloki. Wielkość infiltracji była zbliżona do modelu B i wyniosła 15,0 m³/h/km². Z kolei zagęszczenie siatki w modelu D umożliwiło uszczegółowienie rozkładu eksploatacji (25 bloków) i przebiegu cieków znajdujących się w zasięgu obszaru zasilania ujęcia, pozwalając na odwzorowanie zarówno rzeki Proсны, jak i sąsiednich rowów melioracyjnych w stopniu zbliżonym do modelu A (93 bloki).

Infiltrację efektywną opadów we wszystkich modelach przypisano do pierwszej aktywnej komórki, stąd w modelach A i B, o ograniczonych zasięgach warstw, infiltracja efektywna była zadawana do I, jak również do II warstwy modelowej. W efekcie przeprowadzonej kalibracji na wszystkich modelach uzyskano rozkład obliczonych wysokości hydraulicznych bliskich stanom wód wynikającym z pomiarów terenowych. Dokładność odwzorowania układu krążenia wynosiła na obszarze zasilania ujęcia ±0,3 m. Rozkład warunków brzegowych oraz wysokości hydrauliczne obliczone przez skalibrowane modele A–D w granicach poszczególnych obszarów bilansowych przedstawia figura 3.

WYNIKI BADAŃ

Bilans przepływu wód na obszarze zasilania ujęcia Lis wg modeli A–D dla eksploatacji ujęcia w wielkości 306 m³/h przedstawiono w tabeli 1. Z bilansu tego wynika, że na modelu lokalnym A infiltracja efektywna, niezbędna do wytarowania ciśnień piezometrycznych, okazała się być o 15% wyższa niż na pozostałych modelach o charakterze regionalnym. Zawyżenie infiltracji w modelu A zostało podyktowane koniecznością skompensowania braku zasilania z podłoża neogeńsko-mezozoicznego. Pominięcie zasilania z podległych poziomów wodonośnych w tym modelu przyczyniło się również do znacznego zaniżenia wielkości odpływu do rzek.

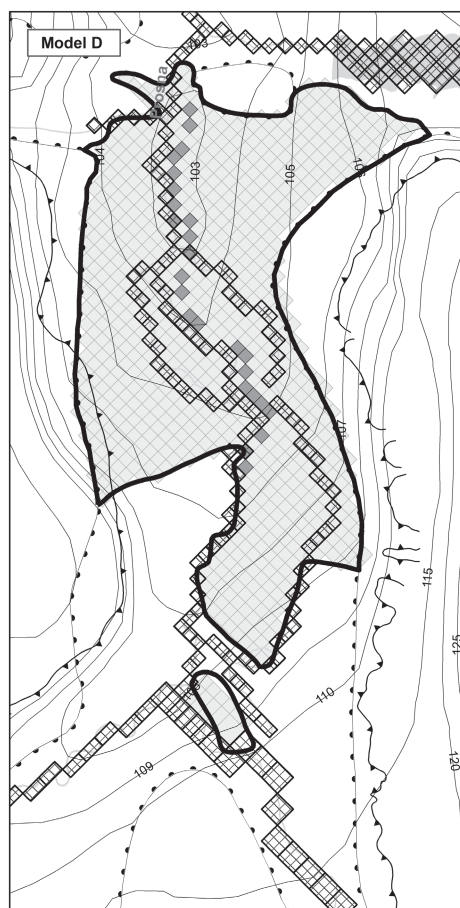
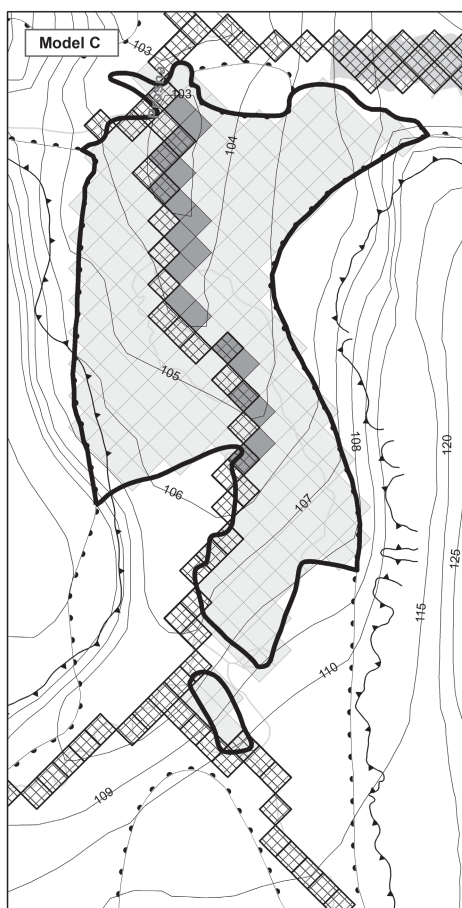
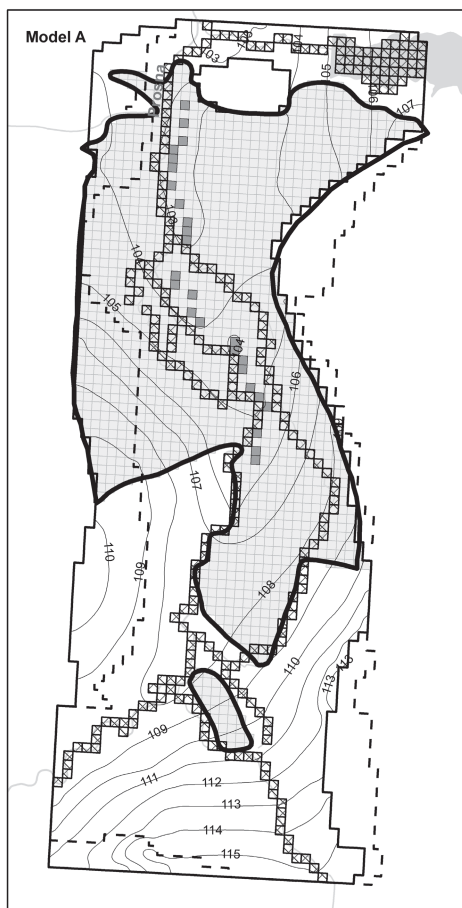
W pozostałych modelach B, C i D obserwowano zbliżone wartości przepływów pionowych w obrębie poszcze-

Fig. 3. Mapa ciśnień użytkowego poziomu wodonośnego przy eksploatacji ujęcia Lis w wysokości 306 m³/h – odwzorowanie modelowe

1 – warunki brzegowe (a – rzeki, b – studnie); 2 – granice modelowanych warstw przepuszczalnych w modelach A i B (a – warstwa I, b – warstwa II); 3 – zasięg obszarów bilansowych; 4 – granice struktur wodonośnych czwartorzędowej (a – poziomu przypowierzchniowego, b – doliny kopalnej); 5 – hydroizohipsy [m n.p.m.]; 6 – granica obszaru zasilania ujęcia Lis

Hydraulic pressure map of the usable aquifer of the Lis groundwater intake in the amount of 306 m³/h – model results

1 – boundary conditions (a – rivers, b – wells); 2 – range of permeable layers of model A and B (a – layer I, b – layer II); 3 – groundwater flow balance zone; 4 – range of Quaternary aquifers (a – first, b – buried valley); 5 – hydroisohypses [m a.s.l.]; 6 – Lis groundwater intake's recharge zone



- 1a -
- 1b -
- 2a -
- 2b -
- 3 -
- 4a -
- 4b -
- 5 -
- 6 -

0 0.5 1 km

gólnych warstw czwartorzędowego systemu wodonośnego doliny Proсны. Pomimo przyjęcia odmiennej schematyzacji pionowych i poziomych granic poziomów wodonośnych (quasi 3-D \neq 3-D) oraz osadów słabo przepuszczalnych ($k^3 \neq k^2/m^3$, warstwy o nieograniczonym zasięgu \neq poziomy wodonośne ograniczone blokami nieaktywnymi) najmniejsze różnice stwierdzono pomiędzy bilansami uzyskanymi na modelach B i C opracowanymi odpowiednio w skali 1 : 50 000 i 1 : 25 000. Zróżnicowanie obliczonych przez te modele pionowych przepływów (pomiędzy warstwą I i ciekim oraz pomiędzy poszczególnymi warstwami) nie przekroczyło 6%, zaś rozbieżność całkowitego bilansu poszczególnych warstw systemu czwartorzędowego sięgała 10%. Jak pokazują modele B i C przyjęcie odmiennej schematyzacji quasi 3-D bądź 3-D w największym stopniu objawiło się zróżnicowaniem dopływów i odpływów lateralnych do i z obszaru bilansowego. W odniesieniu do zasilania pionowego wydzielonych poziomów wodonośnych czwartorzędu w poszczególnych obszarach bilansowych dopływy boczne różnicowały się w zakresie: 34–40% (poziom przypowierzchniowy) i 28–47% (dolina kopalna) zasilania pionowego, kształtującego się jako suma dopływów pionowych (infiltracja, zasilanie z cieków, dopływ z nad i podległych warstw), zaś odpływu bocznego: 3–12% (poziom przypowierzchniowy) i 4–14% (dolina kopalna) poszczególnych składników drenażu poziomów wodonośnych (eksploatacja, drenaż przez ciek, odpływ do nad i podległych warstw wodonośnych).

Na podstawie modelu B podjęto próbę oszacowania wielkości dopływu i odpływu lateralnego w kierunkach zachodnim i wschodnim przez osady słabo przepuszczalne. Obliczone rozbieżności pomiędzy zastosowaniem schematyzacji lateralnej polegającej na okonturowaniu poziomów wodonośnych blokami typu NOFLOW (model B) oraz schematyzacji typu 3-D (modele C i D) utożsamiane z różnicą dopływów lateralnych do poszczególnych poziomów wodonośnych obliczonych przez modele 3-D (modele C i D), a dopływów lateralnych uzyskanych z modelu quasi 3-D (model B) wykazują, że różnica dopływów i odpływów lateralnych przez gliny zwałowe do pierwszego poziomu wodonośnego w wysokości: dopływy $_{C-B} = 21 \text{ m}^3/\text{h}$, dopływy $_{D-B} = 16,1 \text{ m}^3/\text{h}$ i odpływy $_{C-B} = 41,0 \text{ m}^3/\text{h}$, odpływy $_{D-B} = 35,3 \text{ m}^3/\text{h}$, będą stanowiły poniżej 10% dopływów i odpływów pionowych tego poziomu, zaś w warstwach odzwierciedlających poziom doliny kopalnej będą stanowiły 9–18% zasilania pionowego bądź drenażu pionowego. Wzrost dopływów lateralnych w modelach C i D względem modelu B do obszaru bilansowego warstwy III (poziom doliny kopalnej) wiąże się z uwzględnieniem drobnych przewarstwień piaszczystych w obrębie iłów poznańskich (w modelach C i D) i ich pominięciem w modelu B, a więc w dużej mierze jest pochodną odmiennej koncepcji schematyzacji hydrogeologicznej parametrów.

Warstwa III w modelu B i warstwy V i VII w modelu C i D odzwierciedlające poziomy miocenu, jury górnej i kredy są zasadniczo warstwami przepływowymi, w których dopływ boczny stanowi niemal 100% całkowitych dopływów a odpływ boczny zawiera się w granicach 70–80% całkowitego

bilansu danej warstwy. Rozbieżność wyników bilansu jest w dużej mierze wywołana odmienną agregacją kompleksu mioceńsko-mezozoicznego, traktowanego jako jedna warstwa w modelu B oraz oddzielne warstwy w modelach C i D oraz zróżnicowaną przewodnością tych warstw. Choć w skali regionalnej poziomy te stanowią jeden neogeńsko-mezozoiczny system wodonośny (model B) to w ujęciu lokalnym na modelach C i D zauważa się obecność wewnętrznych odpływów z poziomu mioceńskiego do poziomu górnourajskiego. Wypadkowe zasilanie czwartorzędowego systemu wodonośnego doliny Proсны ze strony systemu neogeńsko-mezozoicznego w modelach B, C i D wykazuje zbliżone wartości w granicach 18,1–18,4 m^3/h , zaś przesiąkanie do podległego systemu wodonośnego obserwowane w północnym fragmencie obszaru zasilania, tj. obrębie leja depresji ujęć komunalnych z utworów górnourajskich wynosi 0,2–0,5 m^3/h .

Poza różnicami wynikającymi z przyjęcia odmiennej koncepcji poziomej i pionowej schematyzacji warunków występowania poziomów wodonośnych obserwuje się również zmiany bilansu postępujące wraz z zagęszczeniem bloku siatki. Uszczegółowienie modelu C ze skali 1 : 25 000 do skali 1 : 12 500 wywołało spadek zasilania i drenażu modelu D, objawiając się 10–15% różnicami poszczególnych elementów bilansu oraz rozbieżnością w skali bilansu całkowitego poszczególnych poziomów wodonośnych na poziomie 5%.

PODSUMOWANIE

Głównym celem przedstawionych obliczeń jest ocena wpływu zastosowanych narzędzi oraz koncepcji schematyzacji hydrogeologicznej na wyniki bilansu przepływu wód na przykładzie doliny Proсны w rejonie Kalisza. Uzyskane wyniki jednoznacznie potwierdzają konieczność uwzględnienia regionalnego drenażu w modelach dolin rzecznych, potwierdzając wnioski spotykane w literaturze (Staško, 2004; Przybyłek, Dąbrowski, 2013). Reakcja lokalnego modelu A na obszarze zasilania ujęcia Lis wyraźnie różni się od reakcji modelu pozostałych modeli regionalnych. Największe różnice objawiają się zmniejszeniem drenażu o ok. 30–33% w stosunku do modeli regionalnych B–D uwzględniających wpływ mioceńskiego i górnourajskiego poziomu wodonośnego oraz koniecznością skompensowania tego niedoboru wielkością zasilania atmosferycznego.

Na wielkość drenażu wpływa nie tylko schematyzacja strukturalna (liczba warstw) lecz także rozmiar bloków obliczeniowych. Zagęszczenie siatki dyskretyzacyjnej i uszczegółowienie przebiegu cieków i ich rzędnych oraz odległości pomiędzy rzeką a studnią (do wielkości bliższych odległościom terenowym) spowodowało zmiany w bilansie. Nastąpił spadek drenażu i zasilania wód powierzchniowych, słabsza wymiana między poziomami przypowierzchniowym i doliny kopalnej (warstwa I i III). Uszczegółowienie modelu ze skali 1 : 25 000 do 1 : 12 500 wprowadziło zmiany w bilansie sięgające 15% (najczęściej poniżej 10%) w zakresie poszczególnych składników bilansu i 5% całkowitego bilansu po-

Tabela 1

Bilans przepływu wód podziemnych w obszarze zasilania ujęcia Lis

Groundwater flow balance in the Lis groundwater intake's recharge zone

Składnik bilansu [m ³ /h]	Model A dx = dy = 100 m	Model B dx = dy = 500 m	Model C dx = dy = 250 m	Model D dx,dy = 125/250 m
Nr warstwy wodonośnej	warstwa wodonośna nr I			
Wiek i rodzaj poziomu/ powierzchnia F [km ²]	przypowierzchniowy czwartorzędu F = 12,5		przypowierzchniowy czwartorzędu F = 13,75	
Infiltracja	221,6	195,3	206,4	206,4
Zasilanie z wód powierzchniowych	41,2	48,7	49,6	43,3
Odpływ do wód powierzchniowych	95,7	137,4	135,0	124,6
Dopływ z warstwy II	79,2	72,9	77,3	69,7
Odpływ do warstwy II	298,8	280,6	279,4	276,7
Dopływ boczny	52,6	111,5	132,5	127,6
Odpływ boczny	0,1	10,4	51,4	45,7
Dopływ całkowity	394,6	428,4	465,8	447,0
Odpływ całkowity	394,6	428,4	465,8	447,0
Nr warstwy wodonośnej	warstwa wodonośna nr II			
Wiek i rodzaj poziomu/ powierzchnia F [km ²]	międzyglinowe czwartorzędu F = 13,75			
Eksplotacja ujęcia Lis	306,0	306,0	306,0	306,0
Infiltracja	20,7	10,3	0,0	0,0
Dopływ z warstwy I	298,8	280,6	279,4	276,7
Odpływ do warstwy I	79,2	72,9	77,3	69,7
Dopływ z warstwy III	–	18,4	18,4	18,1
Odpływ do warstwy III	–	0,2	0,5	0,4
Dopływ boczny	65,8	85,1	139,3	130,1
Odpływ boczny	0,1	15,2	53,3	48,8
Dopływ całkowity	385,3	394,3	437,1	424,9
Odpływ całkowity	385,3	394,3	437,1	424,9
Nr warstwy wodonośnej	warstwa wodonośna nr III			
Wiek i rodzaj poziomu/ powierzchnia F [km ²]	–	miocenijsko- górnourajsko-kredowy F = 13,75	miocenijski F = 13,75	
Dopływ z warstwy II	–	0,2	0,5	0,4
Odpływ do warstwy II	–	18,4	18,4	18,1
Odpływ z warstwy IV	–	–	0,0	0,0
Odpływ do warstwy IV	–	–	11,6	11,3
Dopływ boczny	–	90,1	99,9	104,7
Odpływ boczny	–	71,9	70,4	75,7
Dopływ całkowity	–	90,3	100,4	105,1
Odpływ całkowity	–	90,3	100,4	105,1
Nr warstwy wodonośnej	warstwa wodonośna nr IV			
Wiek i rodzaj poziomu/ powierzchnia F [km ²]	–	–	górnourajsko-kredowy F = 2,84	
Dopływ z warstwy III	–	–	11,6	11,3
Odpływ do warstwy III	–	–	0,0	0,0
Dopływ boczny	–	–	7,9	7,6
Odpływ boczny	–	–	19,5	18,9
Dopływ całkowity	–	–	19,5	18,9
Odpływ całkowity	–	–	19,5	18,9

szczególnej warstw, potwierdzając konieczność stosowania siatek o wyższej rozdzielczości przy konstrukcji modeli matematycznych dolin rzecznych i pradolin oraz ujęć (Michalak, 2007; Przybyłek, Dąbrowski, 2013).

Różnice wynikające z przyjęcia odmiennej schematyzacji quasi 3-D (typu T) i 3-D objawiają zasadniczo w wielkościach dopływów bocznych przy zbliżonych wartościach przepływów pionowych – poniżej 6%. Zastosowanie schematyzacji 3-D (modele C i D) umożliwia pełniejsze odwzorowanie licznych drobnych przewarstwień piaszczystych w obrębie glin zwałowych i ilów poznańskich stanowiących słabo przepuszczalne otoczenie struktury dolinnej Proсны. Odzwierciedlenie lokalnych spiazszeń przejawiało się wzrostem dopływów lateralnych oraz całkowitej ilości wód biorącej udział w bilansie poszczególnych warstw modeli C i D w stosunku do modelu B (bazującego na szczelnym okonturowaniu poziomów wodonośnych blokami typu NOFLOW).

LITERATURA

- DĄBROWSKI S., PRZYBYŁEK J., 2012 – Ocena prognoz zasobów eksploatacyjnych poprzez porównanie szacunków zasobowych z wynikami długotrwałej eksploatacji ujęć wód podziemnych (studium metodyczne). Bogucki Wydaw. Nauk., Poznań.
- DĄBROWSKI S., MATUSIAK M., OLEJNIK Z., DĄBROWSKA M., FLIEGER M., PAWLAK A., 2008 – Dodatek do „Dokumentacji hydrogeologicznej zasobów wód podziemnych w kat. „B” na ujęcie wody podziemnej z utworów czwartorzędowych – rejon Lis – Zadowice k. Kalisza” opracowanej w K.G. ZACHÓD we Wrocławiu w 1978 r., zawierający propozycję strefy ochronnej ujęcia komunalnego Lis w Kaliszu [niepubl.]. Arch. Hydroconsult Sp. z o.o., Poznań.
- DĄBROWSKI S., RYNARZEWSKI W., ZACHAŚ-JANECKA J., WESOŁOWSKI K., MATUSIAK M., KRYSZCZYŃSKA I., KOTLICKI A., PAWLAK A., 2015 – Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki hydrogeologiczne w związku z ustanawianiem obszarów ochronnych Głównego Zbiornika Wód Podziemnych nr 311 Zbiornik rzeki Proсна [niepubl.]. Arch. Hydroconsult Sp. z o.o., Poznań.
- DĄBROWSKI S., RYNARZEWSKI W., ŚLIWKA S., 2017 – Odnawialność systemu wodonośnego zlewni Proсны według badań modelowych i oceny odpływu podziemnego metodami hydrologicznymi. *Prz. Geol.*, **65**, 11/2: 1189–1196.
- MATUSIAK M., 2017 – Kształtowanie się zasobów wód podziemnych i warunki ich eksploatacji w utworach jury i kredy rejonu Kalisza w świetle badań modelowych [rozpr. doktor.; niepubl.]. Arch. UAM, Poznań.
- MATUSIAK M., PRZYBYŁEK J., 2017 – Wykorzystanie niestacjonarnego modelu przepływu do oceny rzeczywistej wielkości eksploatacji wód podziemnych z piętra jurajsko-kredowego w obszarze intensywnych nawodnień rolniczych w rejonie Kalisza. *Prz. Geol.*, **65**, 11/2: 1218–1224.
- MATUSIAK M., OLEJNIK Z., DĄBROWSKA M., FLIEGER-SZYMAŃSKA M., 2010 – Badania modelowe dla potrzeb ustanowienia strefy ochronnej ujęcia Lis w dolinie Proсны. *W: Materiały na XVIII sympozjum naukowo-techniczne pt. „Dokumentowanie i eksploatacja małych i średnich ujęć wód podziemnych”*. PZITS, Częstochowa.
- MICHALAK J., 2007 – Wysokorozdzielcze hydrogeologiczne modele przepływu. *W: XIII Sympozjum „Współczesne problemy hydrogeologii”*, Kraków-Krynica 21–23 czerwca 2007: 707–714.
- PLECZYŃSKI J., PRZYBYŁEK J., 1974 – Problematyka dokumentowania zasobów wód podziemnych w dolinach rzecznych. Wydaw. Geol., Warszawa.
- PRZYBYŁEK J., DĄBROWSKI S., 2013 – Doliny rzeczne i pradoliny jako odrębne systemy wodonośne w badaniach i dokumentowaniu hydrogeologicznym. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **456**: 471–478.
- RYNARZEWSKI W., DĄBROWSKI S., ZACHAŚ-JANECKA J., FILIPIAK P., FLIEGER-SZYMAŃSKA M., WESOŁOWSKI K., JANISZEWSKA B., MATUSIAK M., KRYSZCZYŃSKA I., OLEJNIK Z., STRABURZYŃSKA-JANISZEWSKA R., DĄBROWSKA M., PAWLAK A., KOTLICKI A., ŚLIWKA R., JEDYNAK A., OLEJNICZAK J., RYBAK P., SOB CZAK A., NOWAK R., PIOTROWSK A., MIKOŁAJCZYK M., GAWRON M., PATEREK A., TYRALSKI M., DĘBICKA K., 2016 – Dokumentacja hydrogeologiczna ustalająca zasoby dyspozycyjne wód podziemnych zlewni Proсны. Niepubl. Arch. Hydroconsult Sp. z o.o., Poznań.
- STAŚKO S., 2004 – Modele wielowarstwowe czy zespolone. Doświadczenia w trakcie modelowania zlewni Łupawy i obszaru oleśnicko-nieściszowskiego. *W: Modelowanie przepływu wód podziemnych* (red. J. Gurwin, S. Staśko), *Acta Univ. Wratisl., Hydrogeol.*, **2729**: 225–237.

SUMMARY

The main goal of calculations was to assess the impact of the software used and the influence of hydrogeological schematization concept on the results of groundwater flow balance in the Proсна valley near Kalisz. The results clearly confirm that the regional drainage is necessary to be taken into consideration in the local models of river valleys confirming conclusions found in the literature (Przybyłek, Dąbrowski, 2013). The reaction of local model A, in the groundwater Lis intake recharge zone, clearly differs from the other regional models results. The greatest differences are manifested by decrease of drainage

by about 30–33% in relation to the B–D regional models in which the influence of Miocene and Upper Jurassic aquifer are analyzed, and its need for compensation with recharge.

The range of the drainage is influenced not only by structural schematization (number of layers) but also by the size of the cells. The densification of discretization grid and the specification of river and its ordinates and the distance between the river and the well resulted in balance changes. It appears as noticeable decrease in both the river inflow and outflow and weaker interlayer exchange as well. The 1 : 25 0000 to

1 : 12 500 scale refining resulted in the balance adjustment up to 15% (most often below 10%) in terms of vertical components and up to 5% in reference to the total balance, confirming the need for higher resolution of river and glacial valleys and groundwater intakes mathematical model grids (Michalak, 2007; Przybyłek, Dąbrowski, 2013).

The differences resulting from different T-type or 3-D model application are generally manifested in lateral inflow

discrepancy, accompanied by vertical flows convergence below the 6%. The use of 3-D schematisation (models C and D) enables a more complete projection of the inflow of numerous sandy interbeddings within the tills and Poznań clays surrounding the Prosna valley aquifer, manifesting itself by an increase in lateral inflows and the total balance calculated by C and D models with respect to model B (based on impermeable NOFLOW blocks contouring the Prosna valley aquifer).

