

MODELOWANIE MATEMATYCZNE W OCENIE KSZTAŁTOWANIA SIĘ ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH W OBSZARACH WODODZIAŁOWYCH NA PRZYKŁADZIE GZWP 414 ZAGNAŃSK

MATHEMATICAL MODELLING APPLIED TO EVALUATE GROUNDWATER RESOURCES IN WATERSHED AREAS – EXAMPLE FROM THE GROUNDWATER AQUIFER MGWB 414 ZAGNAŃSK

TADEUSZ SZKLARCZYK¹, ANDRZEJ SZCZEPAŃSKI¹

Abstrakt. Trudności w ocenie wielkości zasobów dyspozycyjnych oraz możliwości eksploatacyjnych ujęć pracujących w zbiorniku wód podziemnych leżącym w obszarze wododziałowym (II rzędu) zlewni trzech rzek autorzy pokonali stosując modelowanie matematyczne. Przyjęcie właściwych warunków brzegowych oraz odwzorowanie zróżnicowanych warunków przepływu wód podziemnych od strefy zasilania po naturalne i antropogeniczne strefy drenażu pozwoliło na uzyskanie wiarygodnych wielkości zasobów odnawialnych modelowanego zbiornika GZWP 414 Zagnańsk, zasobów dyspozycyjnych wód zbiornika, modułu ich odnawialności oraz wypracowanie optymalnych lokalizacji ujęć i ich wydajności. Ocenione zostały także związki wód podziemnych modelowanego zbiornika z wodami powierzchniowymi i otaczającymi go warstwami skał o bardzo zróżnicowanej zasobności, przepuszczalności i zasilaniu.

Słowa kluczowe: zasoby wód podziemnych, obszary wododziałowe, model matematyczny.

Abstract. Mathematical modelling was applied to solve the difficulties arising when the safe yields are evaluated together with exploitation characteristics of groundwater intakes located in a II-order watershed area of three river catchments. Application of proper boundary conditions and reconstruction of diversified groundwater flow patterns from a recharge zone to natural and anthropogenic drainage zones enabled the authors to obtain credible renewable resources of the groundwater aquifer MGWB 414 Zagnańsk, its safe yield and groundwater renewal coefficient, and to propose the optimum locations of groundwater intakes and their discharges. Moreover, connections were evaluated between groundwaters in the aquifer and surface flows as well as surrounding rock formations of highly diversified capacity, permeability and recharge.

Key words: groundwater resources, watershed areas, mathematical model.

Stosowanie modelowania matematycznego do ustalania wielkości zasobów dyspozycyjnych zbiorników wód podziemnych stało się już powszechną praktyką, także w naszym kraju. Nie wszystkie jednak rozwiązania są realizowane poprawnie, głównie z uwagi na ograniczenie pola filtracji do granic strukturalnych zbiornika. W rzeczywistości strefy zasilania GZWP wykraczają poza granice modelowanej struktury, co dotyczy głównie zbiorników leżących w granicach zlewni, a wody podziemne użytkowego poziomu wodonośnego pozostają w kontakcie hydraulicznym z wodami

powierzchniowymi, które stanowią naturalne bazy drenażowe. Użytkowe zbiorniki wód podziemnych pozostają także w kontakcie lateralnym z wodami występującymi w skałach otaczających, które cechują się zróżnicowanymi parametrami hydrogeologicznymi oraz zasobnością i warunkami zasilania. Dotyczy to szczególnie zbiorników w strukturach dolinnych oraz występujących w strefach wododziałowych.

Nieuwzględnienie tych faktów w modelu koncepcyjnym i później matematycznym prowadzi do znaczących błędów w ocenie zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych zbiorni-

¹ Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

ka, proponowanej lokalizacji ujęć wód podziemnych oraz ustaleniu ich możliwości eksploatacyjnych.

Jednym z takich zbiorników jest GZWP 414 Zagnańsk, którego zasoby zostałyby ustalone niewłaściwie, gdyby model matematyczny został wykonany zgodnie z projektem badań. W zbiorniku tym niektóre ujęcia zlokalizowano w obszarach o niskiej odnawialności, a w kilku przypadkach zostały znacząco zawyżone wielkości zasobów eksploatacyjnych ujęć.

Modelowany zbiornik związany jest ze szczelinowymi i szczelinowo-porowymi skałami dolnego i środkowego triasu. Na obrzeżach występują szczelinowo-porowe twory kajpru oraz lokalnie twory dolnojurajskie, permskie, środkowodeńskie i górnokambryjskie (fig. 1). W dolinach rzecznych

występują czwartorzędowe lokalne zbiorniki wód podziemnych, nie stanowiące jednakże ciągłego poziomu wodonośnego.

Poziomy te są zasilane bezpośrednio z opadów atmosferycznych w obszarach ich wychodni lub pośrednio drogą przesączania z warstwy czwartorzędowej lub odsączania z przykrywających je skał słabo przepuszczalnych. Krążenie wód jest skomplikowane z uwagi na występowanie licznych stref uskokowych. Główną bazę drenażową stanowią rzeki, których niektóre odcinki mają jednak charakter zasilający wody podziemne. Dzieje się tak w obszarach intensywnej eksploatacji wód, szczególnie w środkowym biegu górnej Bobrzy.

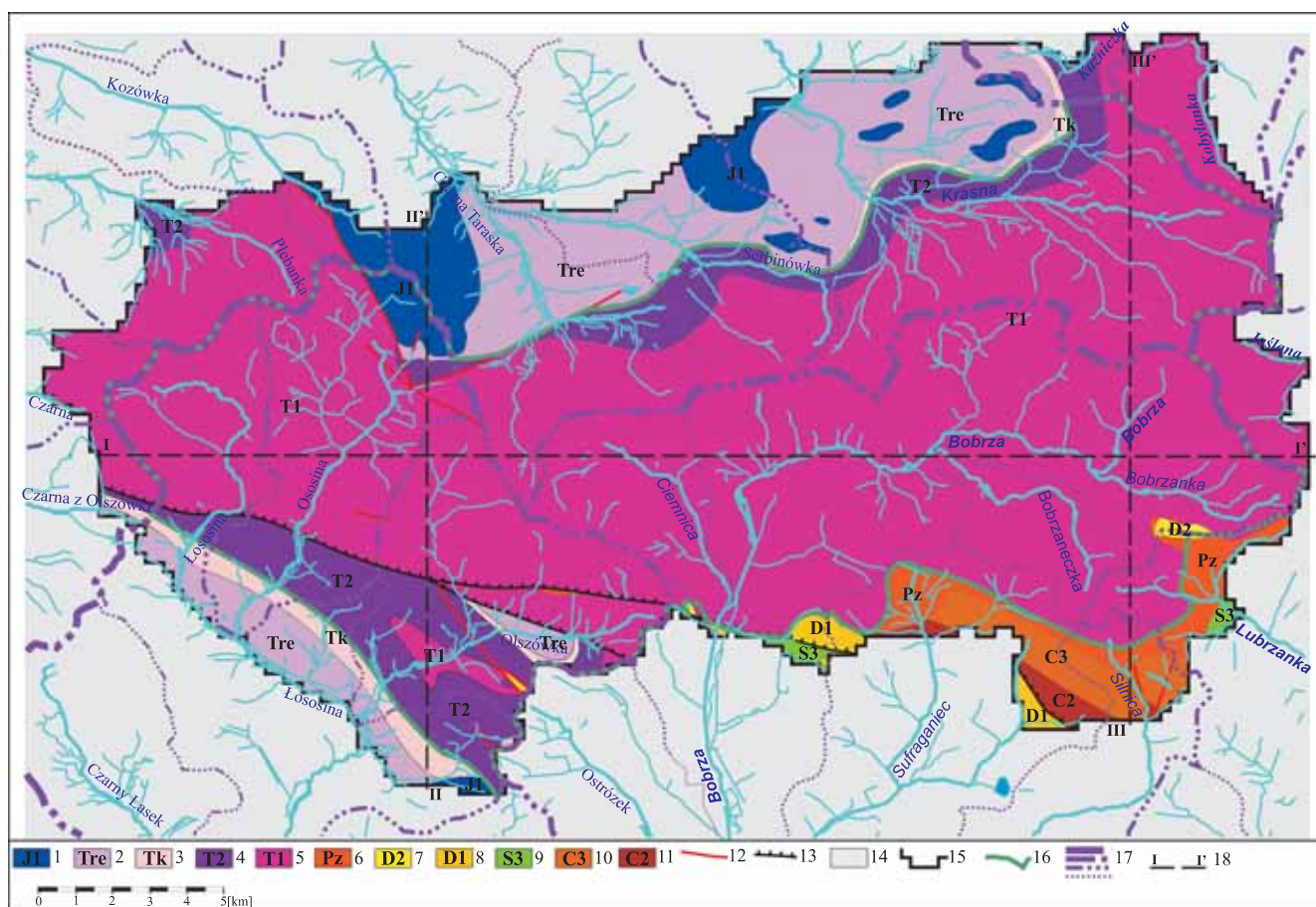


Fig. 1. Mapa schematyzacji budowy geologicznej modelowanego obszaru

1 – jura dolna (hettang, synemur) – piaskowce i mułowce; 2 – trias górny (retyk) – iłowce, mułowce; 3 – trias górny (kajper) – mułowce i piaskowce; 4 – trias środkowy – wapień i margle; 5 – trias dolny – piaskowce, mułowce i iłowce; 6 – perm (cechsztyn) – zlepienie, wapień, piaskowce, margle i dolomity; 7 – dewon środkowy (famen, fran) – dolomity, wapień i margle; 8 – dewon dolny (ems, żedyn) – piaskowce, mułowce i iłowce; 9 – sylur górny – mułowce, iłowce i szarogłazy; 10 – kambr górny – piaskowce i kwarcyty, mułowce i iłowce; 11 – kambr środkowy – piaskowce, iłowce i mułowce; 12 – uskoki; 13 – nasunięcia; 14 – bloki poza obszarem badań modelowych; 15 – granica modelowanego obszaru filtracji; 16 – granica GZWP 414 Zagnańsk; 17 – działy wód powierzchniowych od II do V rzędu; 18 – linie przekrojów ze schematyzacją budowy geologicznej na modelu

Schematic representation map of the geological structure of the modelled area

1 – Lower Jurassic (Hettangian, Sinemurian) – sandstones and mudstones; 2 – Upper Triassic (Rhaetian) – claystones, mudstones; 3 – Upper Triassic (Keuper) – mudstones and sandstones; 4 – Middle Triassic – limestones and marls; 5 – Lower Triassic – sandstones, mudstones and claystones; 6 – Permian (Zechstein) – conglomerates, limestones, sandstones, marls and dolomites; 7 – Middle Devonian (Famennian, Frasnian) – dolomites, limestones and marls; 8 – Lower Devonian (Emsian, Gedinnian) – sandstones, mudstones and claystones; 9 – Upper Silurian – mudstones, claystones and greywackes; 10 – Upper Cambrian – sandstones and quartzites, mudstones and claystones; 11 – Middle Cambrian – sandstones, claystones and mudstones; 12 – faults; 13 – thrusts; 14 – blocks outside modelled area; 15 – boundary of modelled filtration area; 16 – boundary of MGWB 414 Zagnańsk; 17 – surface water divide, 2nd to 5th order; 18 – cross-section line with discretization of geological structure of geological structure on the model

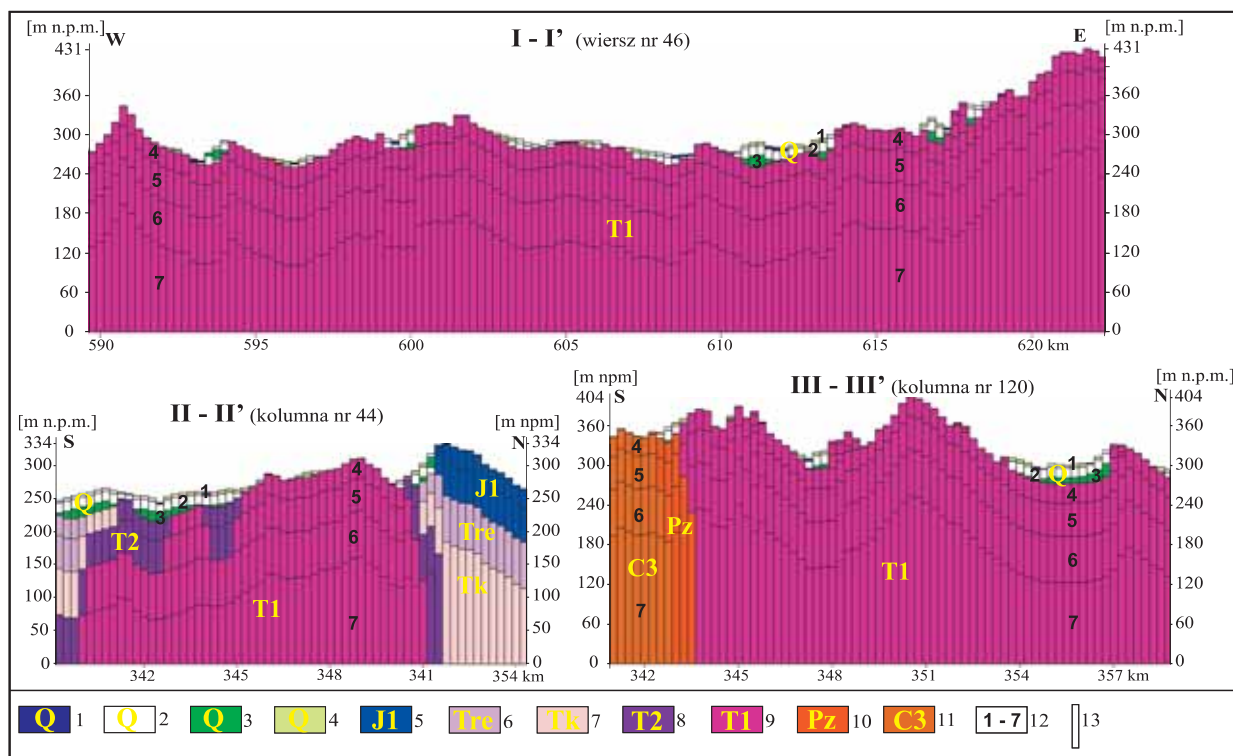


Fig. 2. Pionowa schematyzacja budowy geologicznej na modelu

1 – holocen – torfy, mady i muły rzeczne; 2 – plejstocen – piaski i żwiry wodnolodowcowe i rzeczne; 3 – plejstocen – gliny zwałowe; 4 – plejstocen – lessy; 5 – jura dolna (hettang, synemur) – piaskowce i mułowce; 6 – trias górny (retyk) – iłowce, mułowce; 7 – trias górny (kajper) – mułowce i piaskowce; 8 – trias środkowy – wapień i margle; 9 – trias dolny – piaskowce, mułowce i iłowce; 10 – perm (cechsztyn) – zlepieńce, wapień, piaskowce, margle i dolomity; 11 – kambr górny – piaskowce i kwarcyty, mułowce i iłowce; 12 – numery warstw na modelu; 13 – bloki modelu

Vertical discretization of the geological structure on the model

1 – Holocene – peats, fen soils and fluvial muds; 2 – glaciofluvial and fluvial sands and gravels; 3 – tills; 4 – loesses; 5 – Lower Jurassic (Hettangian, Sinemurian) – sandstones and mudstones; 6 – Upper Triassic (Rhaetian) – claystones, mudstones; 7 – Upper Triassic (Keuper) – mudstones and sandstones; 8 – Middle Triassic – limestones and marls; 9 – Lower Triassic – sandstones, mudstones and claystones; 10 – Permian (Zechstein) – conglomerates, limestones, sandstones, marls and dolomites; 11 – Upper Cambrian – sandstones and quartzites, mudstones and claystones; 12 – layer numbers on the model; 13 – model blocks

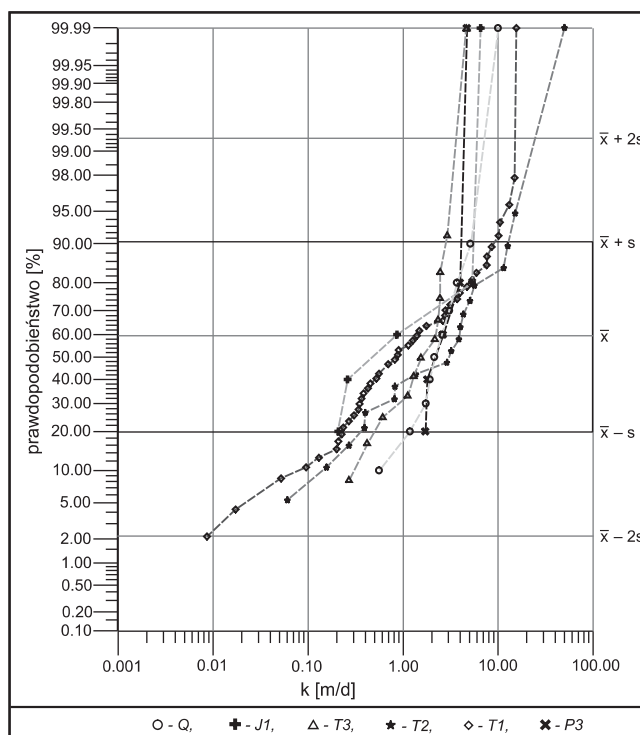
Przepływy wód podziemnych odbywają się od wododziałów ku dolinom rzecznych, zaburzone są pracą ujęć, która spowodowała wytworzenie lejów depresji, w centrum których położenie zwierciadła zostało obniżone o 5–25 m.

Skały zbiornikowe cechują się znacznym zróżnicowaniem przepuszczalności, stąd w modelu koncepcyjnym wydzielono nieciągłą warstwę utworów czwartorzędowych i cztery warstwy w zbiorniku triasowym (fig. 1, 2), rozdzielone skałami słabo przepuszczalnymi (dwie warstwy) i podścielone serią skał starszego podłoża, leżących poniżej strefy aktywnej wymiany wód. Łącznie zatem w profilu pionowym zostało wyróżnionych siedem warstw.

Wartości współczynnika filtracji zostały przyjęte na podstawie wyników próbnych pompowań wykonanych w ponad 100 studniach. Zmienność tego parametru zobrazowano na figurze 3.

Fig. 3. Zmienność współczynnika filtracji na wykresie prawdopodobieństwa dla poziomów wodonośnych modelowanego obszaru

Variability of hydraulic conductivity on the probability plot for the aquifers of the modelled area



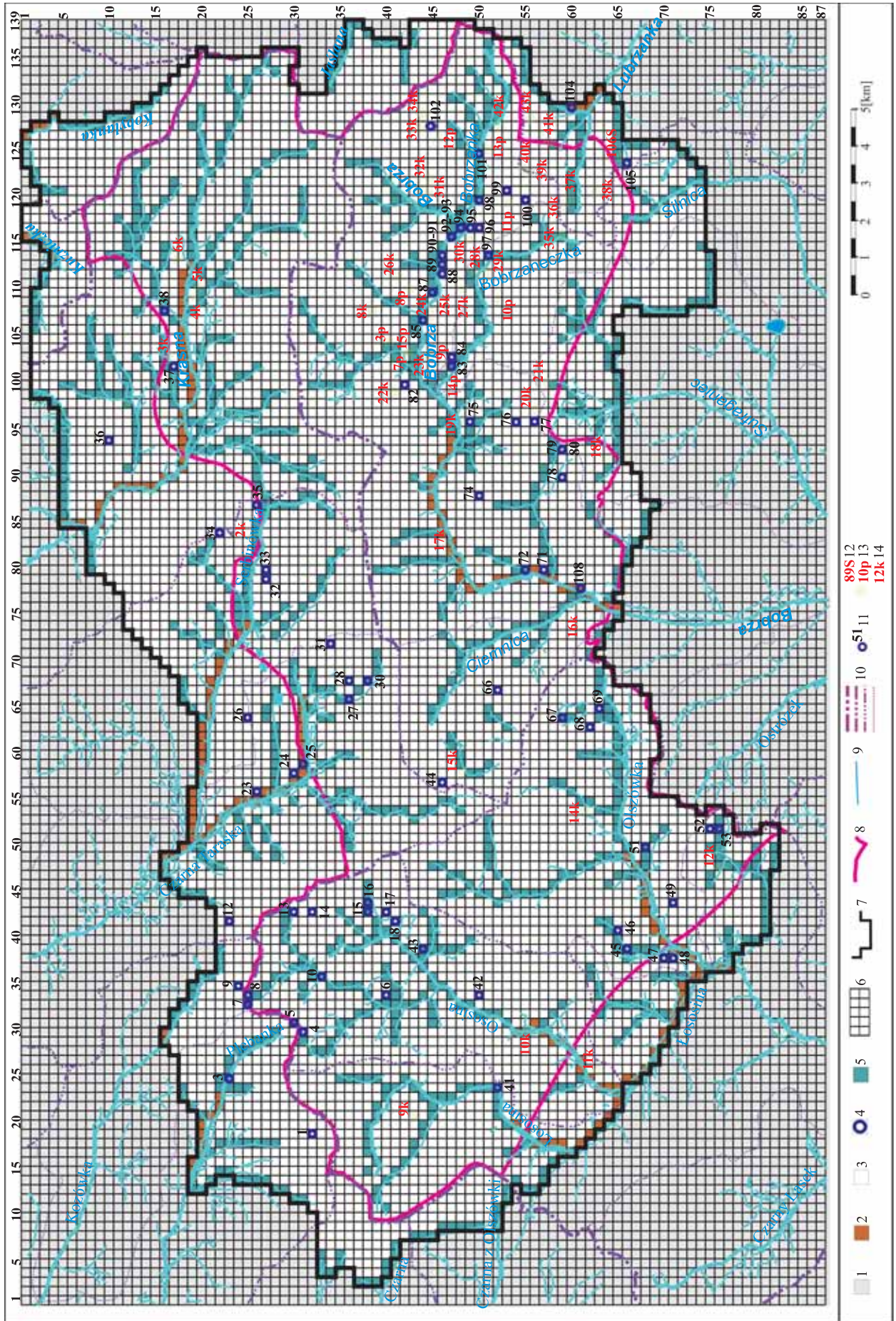


Fig. 4. Mapa dokumentacyjna badań modelowych GZWP 414 Zagnańsk

1 – bloki zerowe – poza obszarem badań modelowych; 2 – warunki I rodzaju ($H = \text{const}$); 3 – warunki II rodzaju ($Q_{\text{infiltracji}} = \text{const}$); 4 – warunki II rodzaju ($Q_{\text{studni}} = \text{const}$); 5 – warunki III rodzaju ($H_{\text{rzeki}} = \text{const}$); 6 – siatka modelu matematycznego; 7 – granica modelowanego obszaru filtracji; 8 – granica GZWP 414 Zagnańsk; 9 – ciekі powierzchniowe; 10 – działę wód powierzchniowych od II do V rzędu; 11 – ujęcia wód symulowane na modelu; punkty pomiaru zwierciadła wód podziemnych: 12 – studnie wiercone; 13 – piezometry; 14 – studnie kopane

Documentation map of the model research of MGWB 414 Zagnańsk

1 – blocks with zero value – outside modelled area; 2 – constant-head boundary conditions ($H = \text{const}$); 3 – constant flux boundary conditions ($Q_{\text{infiltration}} = \text{const}$); 4 – constant flux boundary conditions ($Q_{\text{well}} = \text{const}$); 5 – mixed boundary conditions ($H_{\text{rive}} = \text{const}$); 6 – mathematical model grid; 7 – boundary of modelled filtration area; 8 – boundary of MGWB 414 Zagnańsk; 9 – rivers; 10 – surface water divide, 2nd to 5th order; 11 – groundwater intakes simulated on the model; points with groundwater table measurements: 12 – bored wells; 13 – piezometers; 14 – dug wells



Do obliczeń modelowych zastosowano pakiet programowy Visual MODFLOW v. 4.2 (Nilson, Thomas, 1998–2006). Obszar badań pokrywa się siatką obliczeniową prostokątną, a średnie wartości przewodności pomiędzy blokami obliczane są za pomocą średniej harmonicznej, która umożliwia stosunkowo najlepsze odwzorowanie przepływu wód podziemnych. Ma to szczególne znaczenie dla omawianego modelu, gdzie w wielu rejonach występują nagłe zmiany przewodności hydraulicznej.

Program Visual MODFLOW bazuje na metodzie różnic skończonych (FDM). Do obliczeń wykorzystuje metody iteracyjne: SSOR, SIP i PCG. Algorytm oparty jest na numerycznym, przybliżonym rozwiązaniu układu równań równowagi przepływów wynikających z ogólnego równania różniczkowego, opisującego ruch wód podziemnych w przestrzeni trójwymiarowej w środowisku porowym. Służy on do modelowania stacjonarnych i niestacjonarnych procesów filtracji wód podziemnych, w powiązaniu z wodami powierzchniowymi, zachodzących w kompleksach składających się z wielu poziomów wodonośnych (max 60) połączonych hydraulicznie za pomocą kontaktów bezpośrednich lub pośrednich poprzez warstwy słabo przepuszczalne. Poziomy mogą być symulowane jako naporowe, swobodne lub mieszane (swobodno-naporowe). Warstwy o charakterze mieszanym można symulować ze zmienną lub stałą wartością wodoprzewodności T .

Przebieg procesu filtracji jest wymuszony przez zadanie na konturach i w obszarze badań modelowych warunków brzegowych w postaci stałych lub zmiennych w czasie wysokości położenia zwierciadła wody H lub wydatków Q albo jako funkcja $Q = f(H)$, gdzie H jest wielkością wyjściową zdjętą z terenu (warunki brzegowe I, II i III rodzaju).

Modelem objęto obszar o powierzchni ok. 454,2 km², który pokryto siatką o kroku $\Delta x = \Delta y = 250$ m. Obszar ten został zdefiniowany przebiegiem dolin rzecznych leżących poza liniami wododziałowymi II rzędu oraz granicami GZWP 414 (fig. 4). Na mapie pokazano także lokalizację ujęć wód podziemnych oraz punkty pomiaru zwierciadła wody. Przebieg linii wododziałowych oraz zeschematyzowany rozkład zmienności zasilania infiltracyjnego z opadów atmosferycznych przedstawiono na figurze 5.

Według danych z sierpnia 2005 r. całkowity pobór wód z ujęć leżących w modelowanym obszarze wyniósł 13 257,9 m³/d (27 czynnych studni), z czego 10 502,2 m³/d eksploatowano z ujęcia komunalnego Zagnańsk (19 studni).

Tak przygotowane modele (konceptyjny i matematyczny) poddano weryfikacji i kalibracji na stan z sierpnia 2005 r., rekonstruując położenie zwierciadła wody przy przyjętym poborze wody z ujęć, utrzymaniu średnich stanów wody w ciekach oraz zasilaniu infiltracyjnym z sumy opadów atmosferycznych 629 mm (rok hydrologiczny 2005). Bazę weryfikacji i kalibracji stanowiły dane z 95 punktów reperowych; proces realizowany był metodą kolejnych przybliżeń. Skorygowane zostały warunki brzegowe, przewodność, zasilanie infiltracyjne oraz charakter kontaktów hydraulicznych z wodami powierzchniowymi oraz przepływy międzywarstwowe i międzystrukturalne (lateralne). Łącznie wydzielono 151 obszarów (w 7 warstwach), ustalono zróżnicowanie infiltracji opadowej – średni moduł zasilania z 3,5 zmniejszył się do 3,05 l/s km².

Zwierciadło wody odwzorowano na modelu z dokładnością 0,0 do 0,5 m w rejonach ujęć i od 0,0 do 1,5 m w obszarach peryferyjnych. Mapę zwierciadła wód podstawowego, triasowego poziomu wodonośnego przedstawiono na figurze 6.

W modelowanym obszarze wododziałowym trzech rzek: Nidy, Pilicy i Kamiennej wydzielono 10 zlewni cząstkowych (fig. 7), a dla średnich niskich opadów z wielolecia 1955–2005 oraz stanu z 2005 r. obliczono moduły odpływu podziemnego (tab. 1) i sporządzono pełny bilans wodny (tab. 2). Podobne bilanse zostały sporządzone dla zlewni cząstkowych.

Na tak zbudowanym modelu matematycznym wykonano obliczenia w czterech wariantach, symulując:

- 1) pseudonaturalne warunki przepływu z wyłączeniem pracy ujęć;
- 2) zmiany w modelowanym obszarze przy poborze wód z ujęć według ustalonych wielkości zasobów eksploatacyjnych;
- 3) pracę ujęć z wydajnościami określonymi w pozwoleniach wodnoprawnych;
- 4) układ zwierciadła wód w warunkach pracy ujęć zlokalizowanych w GZWP 414 (w tym fikcyjnych 20 ujęć z war-

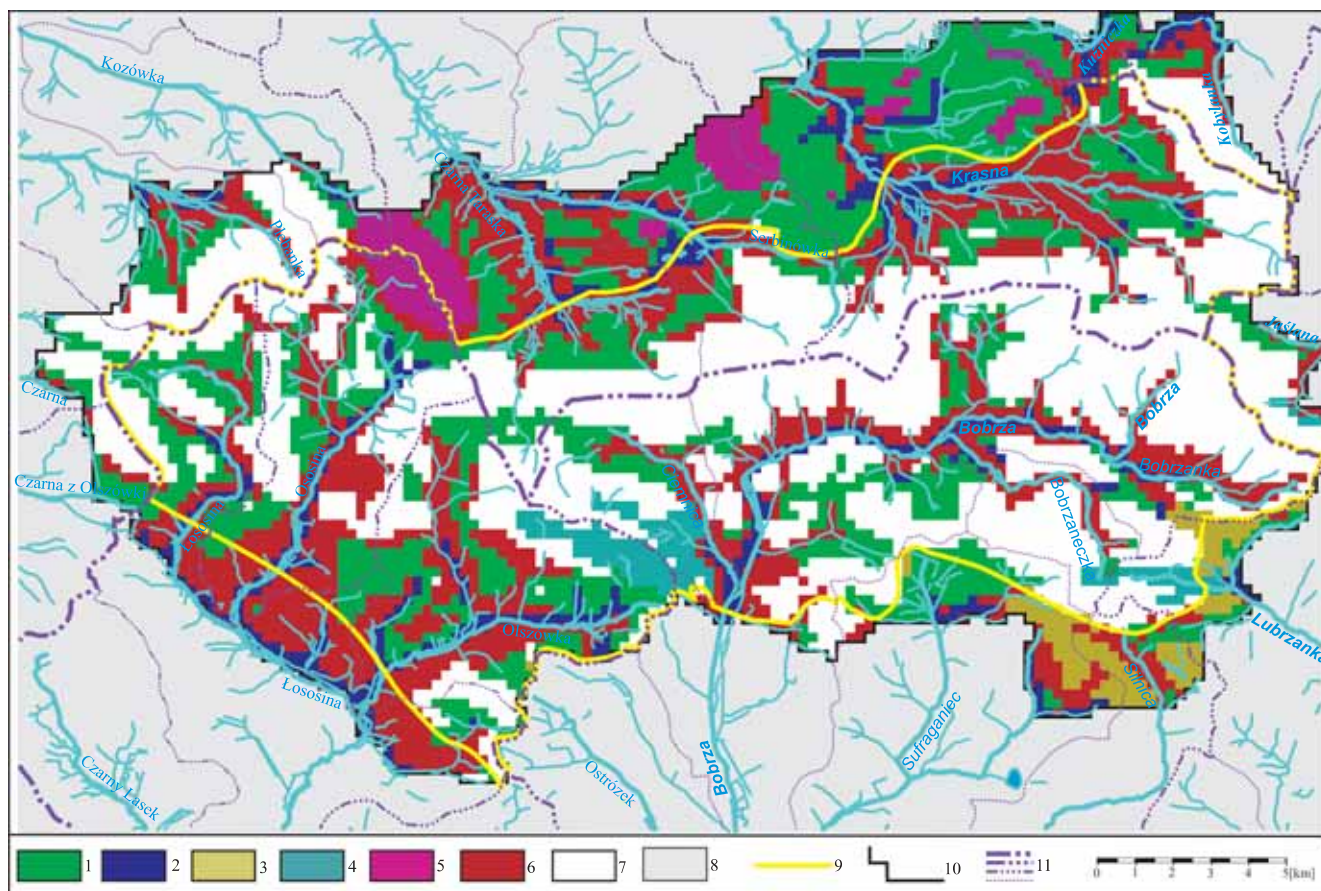


Fig. 5. Mapa schematyzacji warunków infiltracji wód opadowych w obszarze badań modelowych

Wskaźnik infiltracji: 1–0,03 – gliny Q oraz ropy i ropy T₃, 2–0,07 – mady, torfy i ropy rzeczne Q, 3–0,09 – utwory słabo przepuszczalne S, D, C, P, 4–0,12 – lessy Q, 5–0,14 – piaskowce, ropy J₁, 6–0,21 – piaski Q, 7–0,22 – utwory T₁ oraz wapienie T₂; 8 – bloki zerowe – poza obszarem badań modelowych; 9 – granica GZWP 414 Zagnańsk; 10 – granica modelowanego obszaru filtracji; 11 – działy wód powierzchniowych od II do V rzędu

Schematic representation map of recharge conditions in the modelled area

Effective infiltration coefficient: 1–0.03 – Q tills and T₃ clays, claystones, 2–0.07 – Q fen soils, peats and fluvial clays, 3–0.09 – S, D, C, P semi-permeable deposits, 4–0.12 – Q loesses, 5–0.14 – J₁ sandstones, claystones, 6–0.21 – Q sands, 7–0.22 – T₁ formations and T₂ limestones; 8 – blocks with zero value – outside modelled area; 9 – boundary of MGWB 414 Zagnańsk; 10 – boundary of modelled filtration area; 11 – surface water divide, 2nd to 5th order

stwy dolnotriasowej) z łączną wydajnością równą zasobom dyspozycyjnym zbiornika.

Wszystkie warianty realizowano przy założeniu średnich stanów wody w ciekach powierzchniowych oraz średniej niskiej sumy opadów atmosferycznych z wielolecia 1955–2005 (581 mm/rok).

Wyniki obliczeń modelowych w postaci bilansu wód dla całego modelu, czwartorzędowego poziomu wodonośnego (znaczenie lokalne) oraz użytkowego, triasowego poziomu GZWP 414 przedstawiono w tabeli 2. Podobne bilanse wykonano dla wydzielonych zlewni cząstkowych. Obraz pola hydrodynamicznego przedstawiono na figurach 8 (wariant 1 – stan pseudonaturalny) i 9 (wariant 2).

Obliczenia modelowe umożliwiły zestawienie szczegółowego bilansu wodnego badanego zbiornika, co spełnia wymogi procedury oceny zasobów dyspozycyjnych określone przez Paczyńskiego i in. (1996). Zaprezentowany w tabeli 3 bilans wodny poziomów triasowego (głównego) i czwartorzędowego (lokalnie użytkowego, a generalnie zasilającego poziom triasowy) sporządzono zgodnie z układem równań bilansowych przedstawionych w pracach Macioszczyka i Kazimierskiego (1990) oraz Kazimierskiego (1995). Przedstawiono w nim wyniki rozwiązań w założeniach wariantów 1 i 4. Dopływ w praktyce oznacza wielkość zasobów odnawialnych symulowanych poziomów wodonośnych, a wielkości określone jako odpływ obejmują:

- w czwartorzędowym poziomie wodonośnym – drenaż przez cieki powierzchniowe i zasilanie piętra triasowego,
- w poziomie triasowym – przesączanie do warstwy czwartorzędowej, odpływ lateralny i drenaż przez cieki powierzchniowe.

Składniki i wielkości bilansu wodnego dla warunków naturalnych (wariant 1) przedstawiono na figurze 10.

Wielkość zasobów dyspozycyjnych GZWP 414 obliczono z uwzględnieniem kryteriów hydrologicznych (zachowanie przepływów nienaruszalnych w ciekach) oraz hydrogeologicznych (działy wodne jako obszary zasilania oraz zmienność parametrów filtracyjnych i pojemnościowych skał zbiornika).

Przepływ średni niski górnej Bobrzy w warunkach naturalnych (z wielolecia) wynosi $0,37 \text{ dm}^3/\text{s}$, a przepływ nienaruszalny $0,11 \text{ dm}^3/\text{s}$ (IMGW). Oznacza to, że zasoby dyspozycyjne zlewni górnej Bobrzy nie mogą przekraczać 70% wielkości jej zasobów odnawialnych. Ogromna zmienność parametrów skał zbiornikowych oraz lokalizacja (zbiornika) w obszarze wododziałowym wskazują na konieczność przyjęcia współczynnika bezpieczeństwa mniejszego o dalsze 10%. W efekcie zasoby dyspozycyjne dla GZWP 414 o powierzchni $304,05 \text{ km}^2$ ustalono na $57\,050 \text{ m}^3/\text{d}$. Moduł zasobów dyspozycyjnych wynosi zatem (w warunkach naturalnych) $2,17 \text{ l/s km}^2$ i jest mniejszy o $1,45 \text{ l/s km}^2$ od modułu zasobów odnawialnych ($3,62 \text{ l/s km}^2$). Wielkość ta jest zbliżona do modułu odpływu długookresowego ze zlewni górnej Nidy, który wynosi $2,48 \text{ l/s km}^2$ (Jokiel, 1994). Oczywiście w zlewniach cząstkowych (obszarach bilansowych) wielkości modułu i zasobów dyspozycyjnych są bardzo zróżnicowane (tab. 4).

Po tych ustaleniach można było przystąpić do określenia bilansu wodnego w warunkach ich pełnego rozdysponowania (wariant 4). Rezultaty tych obliczeń przedstawiono na figurze 11.

Eksploatacja wód podziemnych z poziomu triasowego w wysokości nie przekraczającej wielkości zasobów dyspozycyjnych zbiornika spowoduje znaczące zmiany w bilansie wodnym czwartorzędowego poziomu wodonośnego (tab. 4):

- wzrost o 193% ilości wód infiltrujących z cieków do poziomu czwartorzędowego,
- wzrost o 60,5% przesączania się wód z utworów czwartorzędowych do zbiornika triasowego,
- spadek o 70,1% przesączania się wód w kierunku przeciwnym,
- spadek o 68,3% drenażu wód przez cieki powierzchniowe, przy zachowaniu w nich przepływów nienaruszalnych,
- zmniejszenie się zasobów odnawialnych poziomu czwartorzędowego o 14,9% w porównaniu do warunków naturalnych.

W dalszej kolejności można było podjąć próbę optymalizacji wielkości poborów (zasobów eksploatacyjnych) ujęć wód podziemnych w wybranych obszarach zasobowych GZWP 414. Z przeprowadzonej analizy rezultatów obliczeń wynika konieczność zmian w redystrybucji wielkości zasobów dyspozycyjnych GZWP 414. Dotyczy to zwłaszcza ujęcia komunalnego Zagnańsk.

Określenie wielkości zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych GZWP 414, leżącego w obszarze wododziałowym, jest możliwe jedynie na podstawie symulacji numerycznych. Obszar modelu powinien znacznie przekraczać granice zbiornika, głównie z uwagi na przepływy lateralne do sąsiednich poziomów oraz związki wód podziemnych z wodami powierzchniowymi. Warunki brzegowe zewnętrzne modelu powinny zatem być postawione na ciekach powierzchniowych o rozpoznanej więzi hydraulicznej, a symulowane warunki brzegowe wewnętrzne i zewnętrzne utrzymywane na poziomie zapewniającym przepływy nienaruszalne w ciekach. Zawiężenie obszaru modelu do granic strukturalnych zbiornika w zatwierdzonym przez KDH projekcie badań, niewłaściwe określenie granic zewnętrznych oraz uwzględnienie w modelu koncepcyjnym i modelu matematycznym stanów wód powierzchniowych na poziomie średnim z wielolecia (a nie średnim niskim) prowadzą do znacznego zawyżenia wielkości zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych zbiornika, a w konsekwencji do błędów w wyborze lokalizacji ujęć i wielkości ich zasobów eksploatacyjnych.

Zaprezentowany model GZWP 414 Zagnańsk stanowi klasyczny przykład przyjęcia w projekcie prac geologicznych niewłaściwego modelu koncepcyjnego, szczególnie w zakresie ustalenia warunków granicznych i charakteru związków wód podziemnych i powierzchniowych. Na błędy popełnione w fazie projektowej miało wpływ także niepełne rozpoznanie zmienności przestrzennej parametrów filtracyjnych i pojemnościowych (zasobnościowych) skał zbiornikowych i związków wód w nim występujących z wyżej zalegającą warstwą wodonośną o określonych zasobach.

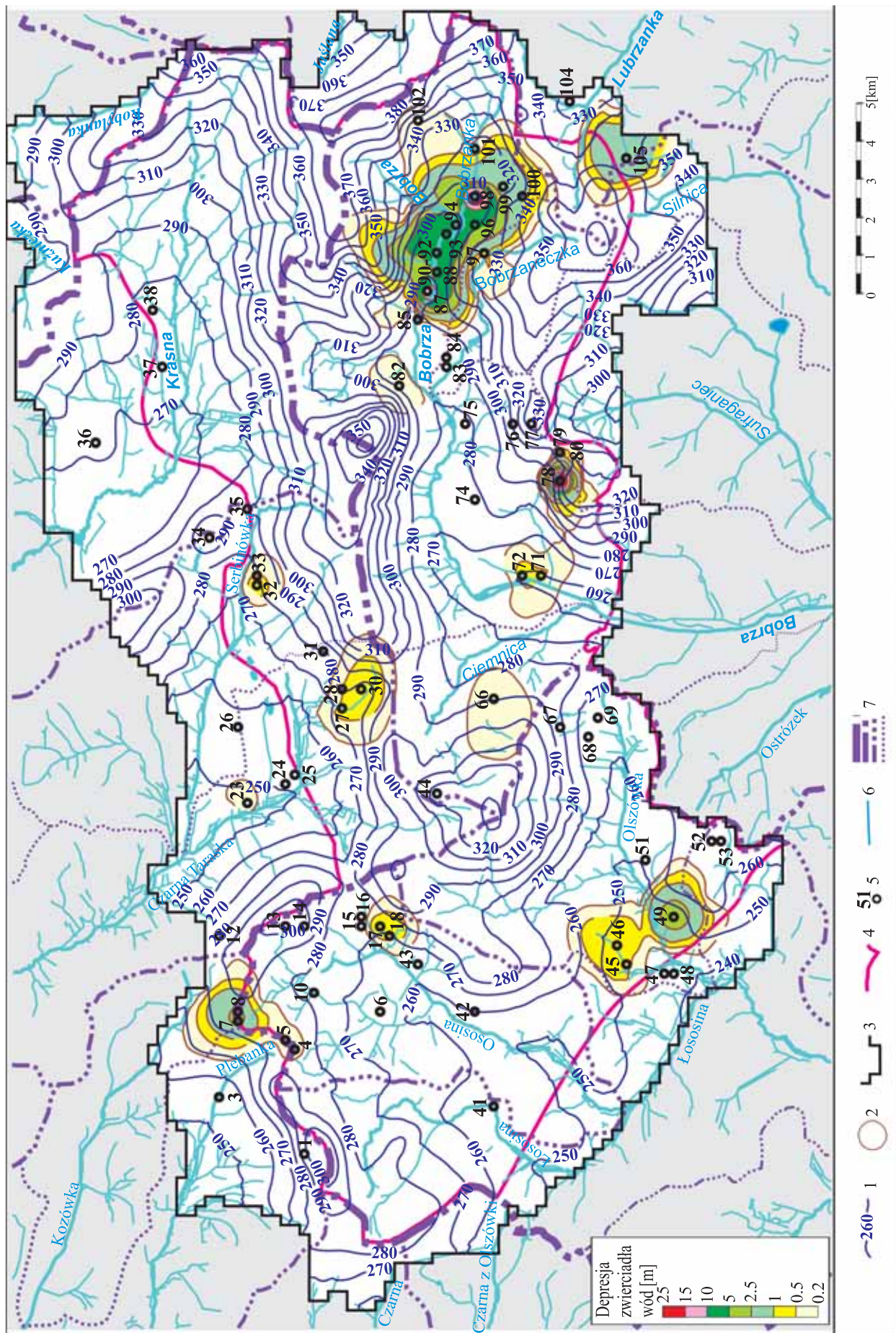


Fig. 6. Mapa zwierciadła wód triasowego poziomu wodonośnego odtworzona na modelu – stan na sierpień 2005

1 – hydroizohipsy [m n.p.m.]; 2 – izolinie depresji zwierciadła wód triasowego poziomu wodonośnego [m]; 3 – granica modelowanego obszaru filtracji; 4 – granica GZWP 414 Zagnańsk; 5 – ujęcia wód symulowane na modelu; 6 – cieki powierzchniowe; 7 – działy wód powierzchniowych od II do V rzędu

Water table contours of the Triassic aquifer simulated on the model – data as of August 2005

1 – water table contours [m a.s.l.]; 2 – drawdown of Triassic aquifer [m]; 3 – boundary of modelled filtration area; 4 – boundary of MGWB 414 Zagnańsk; 5 – groundwater intakes simulated on the model; 6 – rivers; 7 – surface water divide, 2nd to 5th order

←

Tabela 1**Zestawienie modułów odpływu podziemnego dla zlewni cząstkowych, obliczonych na podstawie badań modelowych**

Modulus of underground runoff for catchment parts calculated from modelling research

Zlewnia cząstkowa (symbol wg fig. 7)	Powierzchnia obszaru badań modelowych [km ²]	Infiltracja efektywna opadów		Moduł odpływu podziemnego	
		stan na 2005 r.	stan dla średnich niskich opadów z wielolecia 1955–2005	stan na 2005 r.	stan dla średnich niskich opadów z wielolecia 1955–2005
		[m ³ /d]		[dm ³ /s km ²]	
A – Lubrzanki	9,315	1988,9	1833,5	2,47	2,28
B1 – Bobrzy górnej	110,125	34583,5	31880,0	3,63	3,35
B2 – Bobrzy środkowej	24,0	5315,2	4901,2	2,56	2,36
C – Łososiny	117,375	30084,9	27724,9	2,97	2,73
D – Czarnej Taraski	63,625	15108,1	1 916,5	2,75	2,53
E – Krasnej	81,125	19096,2	17586,7	2,72	2,51
F – Dopływy Czarnej Włoszczowskiej	9,375	2292,3	2110,6	2,83	2,61
G – Kozówki	19,6875	5624,7	5183,8	3,31	3,05
H – Kobylanki	13,0625	3059,0	2818,8	2,71	2,50
I – Jaślanej	7,5	2427,9	2237,3	3,75	3,45
Obszar badań modelowych	454,1875	119 580,7	110 193,3	3,05	2,81

Tabela 2

Bilans wód podziemnych dla obszaru badań modelowych
Groundwater budget for the modelled area

Elementy bilansu	Stan na VIII.2005 r. [m ³ /d]				Warianty symulacyjne [m ³ /d]							
	dopływ (+)		odpływ (-)		1 (pseudonaturalny)		2 (zasoby eksploatacyjne)		3 (pozwolenia wodnoprawne)		4 (zasoby dyspozycyjne)	
	dopływ (+)	odpływ (-)	dopływ (+)	odpływ (-)	dopływ (+)	odpływ (-)	dopływ (+)	odpływ (-)	dopływ (+)	odpływ (-)	dopływ (+)	odpływ (-)
Cały model												
1. Infiltracja efektywna opadów	119580,7	0,0	110193,3	0,0	110193,3	0,0	110193,3	0,0	110193,3	0,0	110193,3	0,0
2. Zasilanie i drenaż przez rzeki w tym:	23979,2	130303,5	21509,1	131707,3	34994,9	104824,5	31671,0	111129,7	40137,7	92656,6		
Lubrzanka z dopływami	2701,7	4419,2	2605,2	4475,7	2856,3	3316,2	2711,9	4223,1	2837,0	3419,6		
Bobrza z dopływami	9610,9	33166,6	6445,6	38661,3	16143,6	22208,4	15279,8	23132,9	14297,8	24010,6		
Sufraganiec i Siłnica z dopływami	1587,5	6738,9	1643,5	6402,4	1786,9	6158,8	1670,0	6339,9	1779,1	6207,2		
Łososina z dopływami	3219,8	31746,5	3510,0	30646,1	6183,8	24942,6	4530,6	27305,2	8572,9	20622,2		
dopływy Czamej Włoszczowskiej	552,2	2995,5	591,1	2874,4	591,9	2870,1	591,1	2874,0	593,6	2859,0		
Kozówka z dopływami	660,3	6468,9	691,2	6160,6	808,7	5851,0	734,9	6050,1	809,1	5850,6		
Czarna Taraska z dopływami	2144,2	17080,9	2313,8	16406,9	2691,6	13767,2	2354,8	15391,8	4352,1	10827,5		
Krasna z dopływami	3354,5	22474,4	3509,9	21237,2	3717,0	20898,5	3585,8	20996,4	6696,3	14041,7		
Kobyłka z dopływami	17,9	2869,1	21,1	2644,9	21,1	2644,9	21,1	2644,9	21,2	2635,4		
Jaślana z dopływem	130,2	2343,5	177,7	2196,9	194,3	2166,4	191,0	2172,5	178,6	2185,8		
3. Eksploatacja ujęć wód podziemnych	0,0	13257,9	0,0	0,0	0,0	40368,1	0,0	30738,9	0,0	57674,4		
Razem	143559,9	143561,4	131702,4	131707,3	145188,2	145192,6	141864,3	141868,6	150331,0	150331,0	0,00%	0,00%
Rozbieżność bilansu		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		0,00%		
Czwartorzędowy poziom wodonośny „Q” (warstwa nr 1, 2 i 3)												
1. Infiltracja efektywna opadów	49790,3	0,0	45862,0	0,0	45862,0	0,0	45862,0	0,0	45862,0	0,0	45862,0	0,0
2. Zasilanie i drenaż przez rzeki	16490,2	117760,5	13956,4	120342,0	25363,3	95735,3	22688,0	101467,3	30801,6	84272,7		
3. Eksploatacja ujęć wód podziemnych	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	10,0	0,0	0,0		
4. Wymiana wód* między „Q” i „T”	105190,5	53717,6	108718,7	48206,8	85963,4	61463,4	91102,3	58182,1	75449,8	67840,7		
Suma	171471,0	171478,1	168537,1	168548,8	157188,7	157198,7	159652,3	159659,4	152113,4	152113,4		
Triasowy poziom wodonośny „T” (warstwa nr 4, 5, 6, 7)												
1. Infiltracja efektywna opadów	69790,4	0,0	64331,3	0,0	64331,3	0,0	64331,3	0,0	64331,3	0,0	64331,3	0,0
2. Zasilanie i drenaż przez rzeki	7489,0	12543,0	7552,7	11365,3	9631,6	9089,2	8983,0	9662,4	9336,1	8383,9		
3. Eksploatacja ujęć wód podziemnych	0,0	13257,9	0,0	0,0	0,0	40368,1	0,0	30728,9	0,0	57674,4		
4. Wymiana wód* między „T” i „Q”	53717,6	105190,5	48206,8	108718,7	61463,4	85963,4	58182,1	91102,3	67840,7	75449,8		
Suma	130997,0	130991,4	120090,8	120084,0	135426,3	135420,7	131496,4	131493,6	141508,1	141508,1		

* - ilość wody przepływającej przez okna hydrogeologiczne oraz przesączającej się przez warstwę słabo przepuszczalną do wydzielenych na modelu poziomów wodonośnych

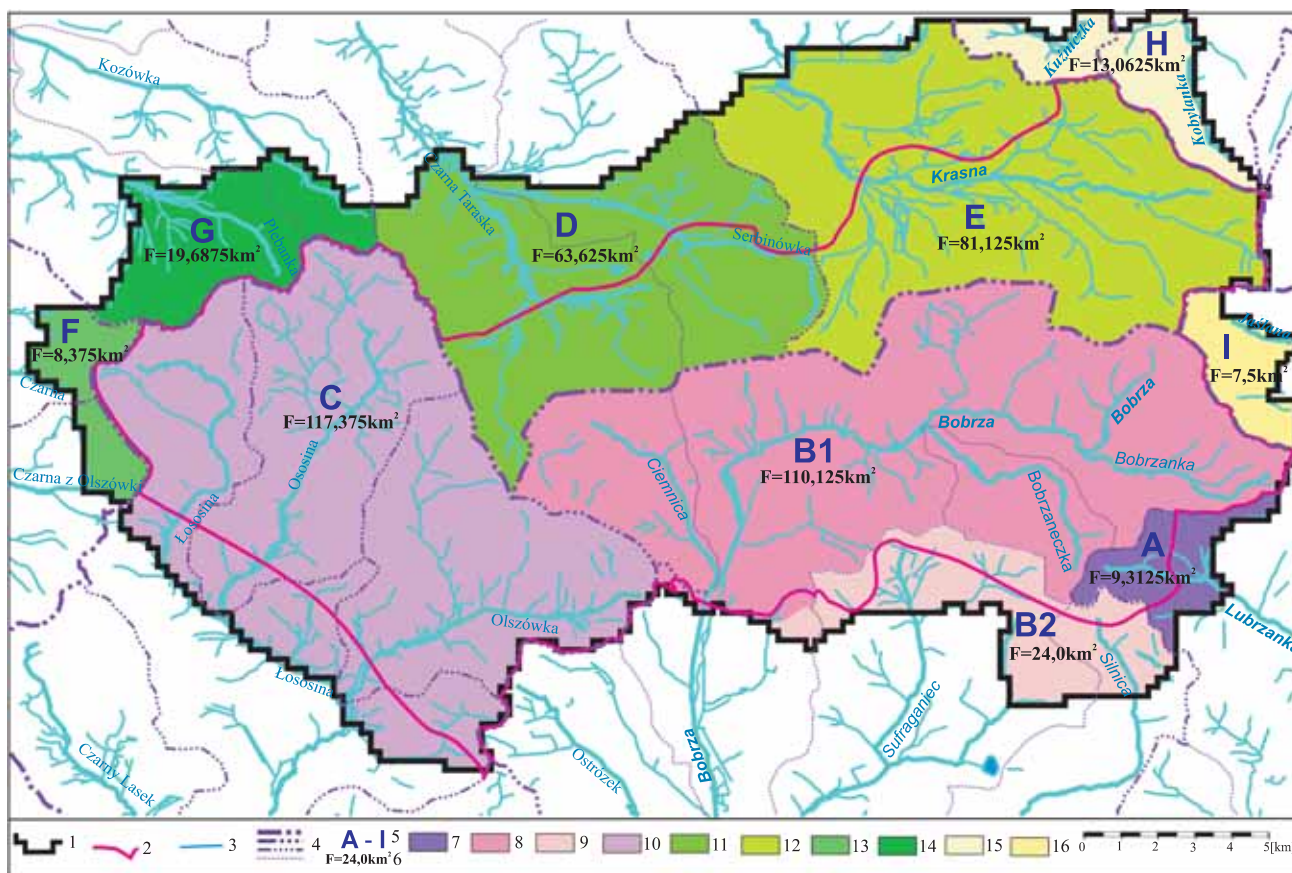


Fig. 7. Podział obszaru badań na zlewnie cząstkowe

1 – granica modelowanego obszaru filtracji; 2 – granica GZWP 414 Zagnańsk; 3 – cieki powierzchniowe; 4 – działy wód powierzchniowych od II do V rzędu; 5 – przyjęte symbole zlewni cząstkowych; 6 – powierzchnie zlewni cząstkowych [km²]; zlewnia Nidy (zlewnie cząstkowe): 7 – A – Lubrzanka, 8 – B1 – Bobrza górnej, 9 – B2 – Bobrzy środkowej, 10 – C – Łososina (Wierniej Rzeki); zlewnia Pilicy (zlewnie cząstkowe): 11 – D – Czarnej Taraski, 12 – E – Krasnej, 13 – F – Czarnej Włoszczowskiej, 14 – G – Kozówki; zlewnia Kamiennej (zlewnie cząstkowe): 15 – H – Kobyłanki, 16 – I – Jaślanej

Partition of the modelled area into catchments parts

1 – boundary of modelled filtration area; 2 – boundary of MGWB 414 Zagnańsk; 3 – rivers; 4 – surface water divide, 2nd to 5th order; 5 – symbols accepted for catchment parts; 6 – catchment parts area [km²]; Nida river basin (catchment parts): 7 – A – Lubrzanka, 8 – B1 – Bobrza górna, 9 – B2 – Bobrza środkowa, 10 – C – Łososina (Wierna river); Pilica river basin (catchment parts): 11 – D – Czarnej Taraski, 12 – E – Krasna, 13 – F – Czarnej Włoszczowska, 14 – G – Kozówka; Kamienna river basin (catchment parts): 15 – H – Kobyłanka, 16 – I – Jaślana

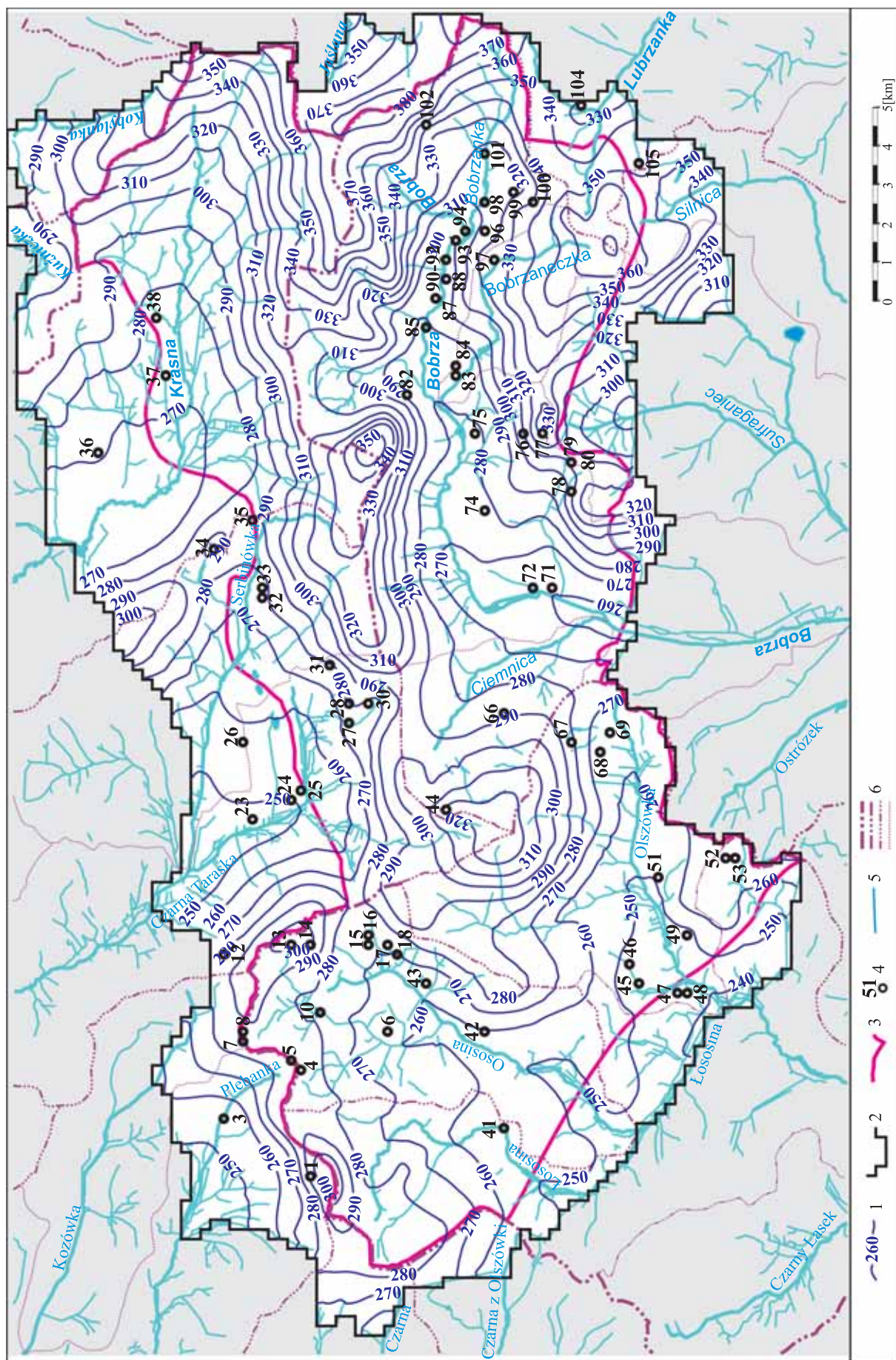


Fig. 8. Mapa zwierciadła wód triasowego poziomu wodonośnego odtworzona na modelu. Wariant 1 – stan pseudonaturalny

1 – hydroizohipsy [m n.p.m.]; 2 – granica modelowanego obszaru filtracji; 3 – granica GZWP 414 Zagnańsk; 4 – ujęcia wód symulowane na modelu; 5 – ciekły powierzchniowe; 6 – działła wód powierzchniowych od II do V rzędu

Water table map of the Triassic aquifer simulated on the model. Variant 1 – pseudo-natural state

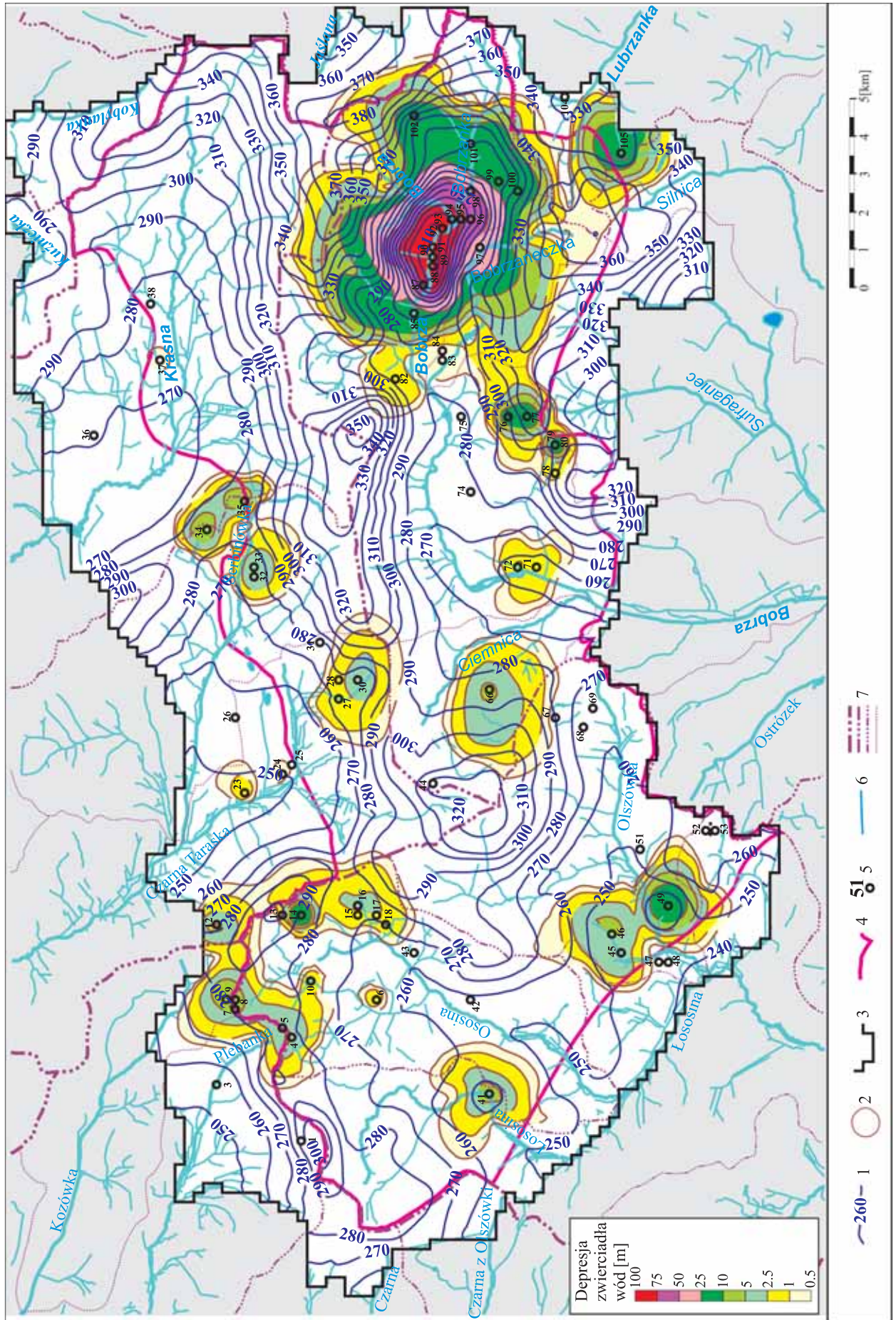
1 – water table contours [m a.s.l.]; 2 – boundary of modelled filtration area; 3 – boundary of MGWB 414 Zagnańsk; 4 – groundwater intakes simulated on the model; 5 – rivers; 6 – surface water divide, 2nd to 5th order

Tabela 3**Bilans wód podziemnych dla obszaru GZWP nr 414 Zagnańsk**

Groundwater budget in the area of MGWB 414 Zagnańsk

Elementy bilansu	Warianty symulacyjne [m ³ /d]			
	1 (pseudonaturalny)		4 (zasoby dyspozycyjne)	
	dopływ (+)	odpływ (-)	dopływ (+)	odpływ (-)
Cały GZWP 414 – F = 304,05 km²				
1. Infiltracja efektywna opadów	80 989,9	0,0	80 989,9	0,0
2. Zasilanie i drenaż przez rzeki w tym:	14 284,0	91 993,0	32 028,3	55 766,0
Lubrzanka z dopływami	200,0	1 052,9	200,0	456,7
Bobrza górna z dopływami	6 384,6	38 052,2	14 236,0	23 406,5
Sufraganiec i Silnica z dopływami	634,7	826,3	646,3	810,4
Łososina z dopływami	3 140,8	24 288,2	8 157,3	14 770,3
Czarna Taraska z dopływami	1 515,0	9 592,8	3 224,9	5 309,2
Krasna z dopływami	2 408,9	18 180,6	5 563,8	11 012,9
3. Eksploatacja ujęć wód podziemnych	0,0	0,0	0,0	54 000,0
4. Dopływ, odpływ boczny do i z GZWP	7 524,7	10 805,6	3 952,6	7 204,8
Razem	102 798,6	102 798,6	116 970,8	116 970,8
Rozbieżność bilansu	0,00%		0,00%	
Czwartorzędowy poziom wodonośny „Q” (warstwa nr 1, 2 i 3)				
1. Infiltracja efektywna opadów	30 129,8	0,0	30 129,8	0,0
2. Zasilanie i drenaż przez rzeki	8 355,8	82 265,1	24 481,1	48 877,2
3. Eksploatacja ujęć wód podziemnych	0,0	0,0	0,0	0,0
4. Dopływ, odpływ boczny do i z GZWP	128,8	260,0	134,5	241,7
5. Wymiana wód* między „Q” i „T”	74 811,5	30 900,8	43 971,4	49 597,9
Suma	113 425,9	113 425,9	98 716,8	98 716,8
Triasowy poziom wodonośny „T” (warstwa nr 4, 5, 6, 7)				
1. Infiltracja efektywna opadów	50 860,1	0,0	50 860,1	0,0
2. Zasilanie i drenaż przez rzeki	5 928,2	9 727,9	7 547,2	6 888,8
3. Eksploatacja ujęć wód podziemnych	0,0	0,0	0,0	54 000,0
4. Dopływ, odpływ boczny do i z GZWP	7 395,9	10 545,6	3 818,1	6 963,1
5. Wymiana wód* między „T” i „Q”	30 900,8	74 811,5	49 597,9	43 971,4
Suma	95 085,0	95 085,0	111 823,3	111 823,3

* – ilość wody przepływającej przez okna hydrogeologiczne oraz przesączającej się przez warstwy słabo przepuszczalne do wydzielonych na modelu poziomów wodonośnych



**Fig. 9. Mapa zwierciadła wód triasowego poziomu wodonośnego odtworzona na modelu.
Wariant 2 – eksploatacja z wielkością skorygowanych zasobów eksploatacyjnych ujęć**

1 – hydroizohipsy [m n.p.m.]; 2 – izolinie depresji zwierciadła wód triasowego poziomu wodonośnego [m]; 3 – granica modelowanego obszaru filtracji;
4 – granica GZWP 414 Zagnańsk; 5 – ujęcia wód symulowane na modelu; 6 – ciekły powierzchniowe; 7 – działki wód powierzchniowych od II do V rzędu

Water table map of the Triassic aquifer reconstructed on the model.
Variant 2 – exploitation with the corrected value of exploitation resources

1 – water table contours [m a.s.l.]; 2 – drawdown of Triassic aquifer [m]; 3 – boundary of modelled filtration area; 4 – boundary of MGWB 414 Zagnańsk; 5 – groundwater intakes simulated on the model; 6 – rivers; 7 – surface water divide, 2nd to 5th order



Fig. 10. Schemat blokowy bilansu wodnego GZWP 414 Zagnańsk [1000 m³/d]. Wariant 1 – stan pseudonaturalny

IE – infiltracja efektywna opadów atmosferycznych; DR – drenaż wód przez ciekły powierzchniowe; IR – infiltracja wód z cieków powierzchniowych; PR – wymiana wód między poziomami wodonośnymi; DB – dopływ boczny wód; OB – odpływ boczny wód

Water budget of MGWB 414 Zagnańsk [1000 m³/d].
Variant 1 – pseudo-natural state

IE – recharging infiltration; DR – groundwater discharge by rivers; IR – water infiltration from rivers; PR – water conversion between aquifers; DB – lateral water inflow; OB – lateral water runoff

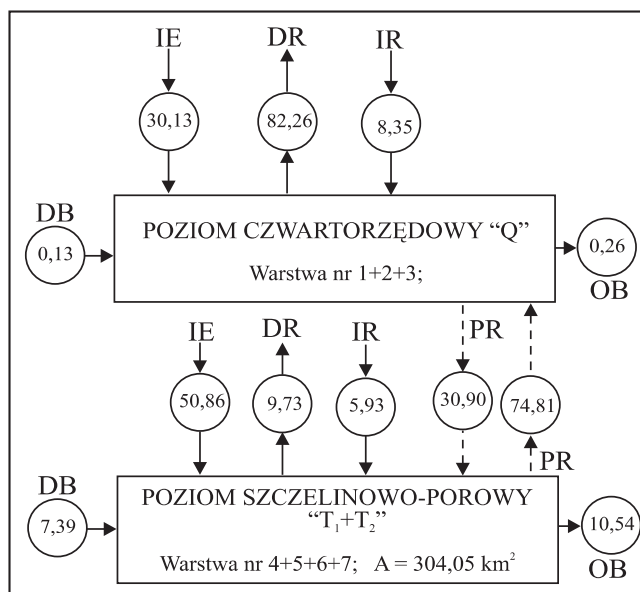


Fig. 11. Schemat blokowy bilansu wodnego GZWP 414 Zagnańsk [1000 m³/d]. Wariant 4 – stan dla wnioskowanych zasobów dyspozycyjnych

IE – infiltracja efektywna opadów atmosferycznych; DR – drenaż wód przez ciekły powierzchniowe; IR – infiltracja wód z cieków powierzchniowych; QST – drenaż wód przez studnie; PR – wymiana wód między poziomami wodonośnymi; DB – dopływ boczny wód; OB – odpływ boczny wód

Water budget of MGWB 414 Zagnańsk [1000 m³/d].
Variant 4 – disposable resources state

IE – recharging infiltration; DR – groundwater discharge by rivers; IR – water infiltration from rivers; QST – groundwater discharge by wells; PR – water conversion between aquifers; DB – lateral water inflow; OB – lateral water runoff

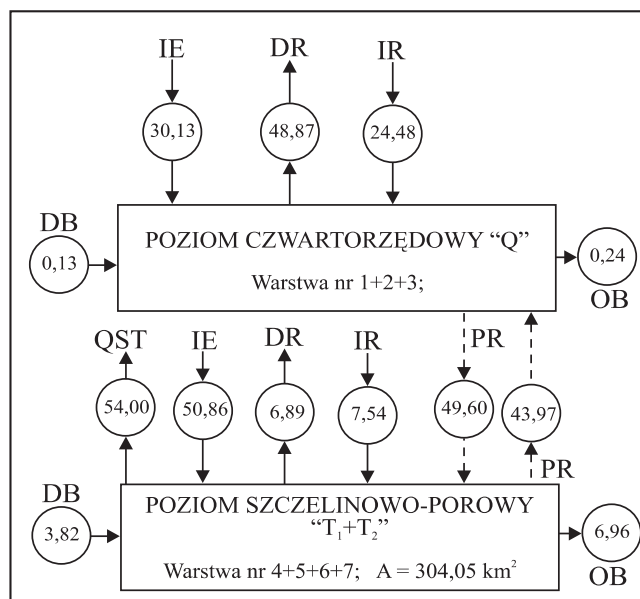


Tabela 4

Bilans wód podziemnych dla obszaru GZWP nr 414 Zagnańsk
Groundwater budget in the area of MGWB 414 Zagnańsk

Zlewnia cząstkowa – podobszar zasobowy	Powierzchnia podobszaru zasobowego [km ²]	Zasoby odnawialne		Zasoby dyspozycyjne	
		[m ³ /d]	moduł [dm ³ /s km ²]	[m ³ /d]	moduł [dm ³ /s km ²]
A – górnej Lubrzanki	4,42	1980,0	5,18	0,0	–
B1 – górnej Bobrzy	108,30	37510,0	4,01	22505,0	2,41
B2 – środkowej Bobrzy	6,90	3110,0	5,22	0,0	–
C – Łososiny	100,03	25390,0	2,94	15235,0	1,76
D – Czarnej Taraski	31,00	10065,0	3,76	6040,0	2,26
E – Krasnej	53,40	17030,0	3,69	10220,0	2,22
Razem GZWP 414	304,05	95085,0	3,62	54000,0	2,14

LITERATURA

- JOKIEL P., 1994 – Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany w Polsce. *Acta Geogr. Lodz*, 66–67.
- KAZIMIERSKI B., 1995 – Struktura bilansu wód podziemnych i wynikające z jej znajomości możliwości interpretacyjne. *W: Współczesne problemy hydrogeologii*, t. 7, cz. 1: 195–201. Wyd. Profil, Kraków.
- MACIOSZCZYK T., KAZIMIERSKI B., 1990 – Zasady budowy modeli systemów hydrogeologicznych dla oceny zasobów dyspozycyjnych i symulacji regionalnego ich zagospodarowania. Publikacje CPBP 04.10, z. 53. Wyd. SGGW AR, Warszawa.
- NILSON G., THOMAS F., 1998–2006 – Visual MODFLOW for Windows v. 4.2. Waterloo Hydrogeologic Software.
- PACZYŃSKI B., MACIOSZCZYK T., KAZIMIERSKI B., MITRĘGA J., 1996 – Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych. MOSZNiL, Warszawa.