

ZASOBY ODNAWIALNE WÓD PODZIEMNYCH RÓŻNYCH OŚRODKÓW HYDROGEOLOGICZNYCH NA PRZYKŁADZIE OBSZARU ZIEMI KŁODZKIEJ

RENEWABLE GROUNDWATER RESOURCES OF DIFFERENT GROUNDWATER MEDIA AN EXAMPLE FROM THE KŁODZKO LAND

TOMASZ OLICHWER¹

Abstrakt. Opisano kształtowanie się zasobów wód podziemnych w różnych ośrodkach hydrogeologicznych: porowym, szczelinowym, szczelinowo-porowym, szczelinowo-krasowym. Obszar badań jest zlokalizowany na obszarze Ziemi Kłodzkiej. W badaniach wykorzystano hydrologiczne metody wyznaczania zasobów wód podziemnych oraz modelowanie numeryczne. Rezultaty wskazują, że największe zasoby wodne znajdują się w ośrodkach porowych oraz szczelinowo-krasowych. Moduły zasobów dynamicznych z wielolecia kształtowały się w granicach 7–8 dm³/s·km². Relacja wielkości odpływu podziemnego źródłami w stosunku do całkowitego odpływu podziemnego wykazuje, że prawie 90% odpływu ma formy dokorytowe i zachodzi wzdłuż doliny rzecznej. Niższe zasoby wód podziemnych zanotowano w ośrodku szczelinowym, reprezentowanym przez skały krystaliczne. Obliczone wysokie zasoby dynamiczne nie oznaczają ich dyspozycyjności. Zachowanie przepływów nienaruszalnych oraz naturalnych warunków przyrodniczych wymusza przyjęcie zasobów dyspozycyjnych w granicach 50–60% zasobów dynamicznych oraz rozproszone ujmowanie wód podziemnych.

Słowa kluczowe: wody podziemne, zasoby odnawialne, ośrodek hydrogeologiczny, Ziemia Kłodzka.

Abstract. This article presents renewable groundwater resources in porous, fractured, fractured-porous and fractured-karst groundwater media. The study area is located in the Kłodzko Land. Groundwater resources were estimated using hydrological methods and modelling. The results indicate that the largest groundwater resources are located in the porous and fractured-karst media. The moduli of groundwater runoff are 7–8 dm³/s·km². The relation between the spring runoff and the total groundwater runoff proves that almost 90% of runoff is of river-bed origin and takes place along the river valley (lineal drainage). Lower values of groundwater runoff were noted in a fractured medium (hard rocks). In the study area, dynamic groundwater resources and allowed extraction level have been evaluated. The calculated values of groundwater resources do not indicate their disposable values. In order to protect environment, disposable resources should account for approximately 50–60% of groundwater resources.

Key words: groundwater, renewable resources, groundwater medium, Kłodzko Land.

WPROWADZENIE

Od wielu lat dyskutowane są wielkości zasobów wód podziemnych na obszarze Sudetów, zwłaszcza dotyczących ośrodka szczelinowego reprezentowanego przez skały krystaliczne. Wielu badaczy, m.in. Kolago (1970), Kleczkowski

(1979, 1990), zalicza obszar krystaliniku sudeckiego do obszarów o niskiej zasobności wodnej, wręcz do obszarów bezwodnych o niewielkim zasilaniu masywów krystalicznych. Pogląd ten zawierają również opracowania Malinow-

¹ Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. Maxa Borna 9, 50-204 Wrocław; e-mail: tomasz.olichwer@ing.uni.wroc.pl

skiego (1991), Paczyńskiego (1995). Podobnie niska ocena zasobów wód w Sudetach prezentowana jest w szeregu, mniej lub bardziej oficjalnych, dokumentów omawiających zagadnienia gospodarki wodnej kraju. Przykładem tego jest portal Aquadocinter (www.aquadocinter.pl). Z drugiej strony krystalinik sudecki postrzegany jest jako obszar obfitujący w wody podziemne (Staśko, 2002). Za administracji niemieckiej przewidywano budowę szeregu małych zbiorników wodnych w szczytowych zlewniach cieków sudeckich, zasilanych przez drenaż wód podziemnych i spływające wody powierzchniowe. Chodziło o stworzenie potencjalnych możliwości dla zaopatrzenia w wodę miejscowości niżej położonych (Walkowicz, 1989). Według Szkurłatowskiego (1987) jedynym praktycznym rozwiązaniem dla zaopatrzenia Wrocławia w wodę powinno być wykorzystanie wód z górnych odcinków zlewni Nysy Kłodzkiej. Wskazuje to na dużą zasobność wodną tych obszarów. Potwierdzeniem są prace stwierdzające, że masywy krystaliczne otaczające Ziemię Kłodzką oraz zlewnie w krystalicznych strukturach bloku karkonosko-izersko-łużyckiego cechują się wysokim odpływem podziemnym i najwolniejszym wyczerpywaniem ich zasobów wodnych (Kryza, Kryza, 1986; Jokiel, 1994; Tarka, 1997; Staśko, 1996, 2002; Staśko, Tarka, 2002; Olichwer, 2007). Według Gutry-Koryckiej (1978) odpływ podziemny na przeważającej powierzchni Sudetów wynosi w granicach $3,5\text{--}5,0\text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$, co stanowi w przeliczeniu na wysokość 100–150 mm. Jednocześnie zlewnie sudeckie cechują się dużą i bardzo dużą zdolnością retencyjną (Tarka, 1997). Jeszcze wyższe wartości odpływu podziemnego poda-

je Orszytnowicz (1988), gdzie Sudety znajdują się w przedziale odpływu podziemnego 90–160 oraz 160–270 mm.

O wiele mniej kontrowersji dotyczących zawodnienia wzbudzają pozostałe ośrodki hydrogeologiczne – szczelinowo-porowy, krasowo-szczelinowy oraz porowy, których znaczna zasobność wodna objawia się wyznaczeniem na obszarze występowania tych ośrodków użytkowych pięt wodonosnych.

Zgodnie z definicją, ośrodkiem hydrogeologicznym nazywamy utwory skalne wraz z pustakami, będącym stałym elementem środowiska hydrogeologicznego (Dowgiałło i in., 2002). Ośrodek hydrogeologiczny może się charakteryzować przestrzenią hydrogeologiczną prostą (np. ośrodek porowy) i złożoną (np. szczelinowo-porowy). W hydrogeologii wyróżnia się następujące ośrodki: porowy, szczelinowo-porowy, szczelinowy, szczelinowo-krasowy i szczelinowo-krasowo-porowy. „W praktyce, gdy chodzi o określenie zasobów wód podziemnych, w przypadku niektórych rodzajów skał można mówić o ośrodku czysto porowym (skały luźne) lub czysto szczelinowym (niektóre odmiany skał węglanowych lub skał magmowych i metamorficznych, w których w przestrzeni porowej praktycznie nie odbywa się przepływ wody)” (Dowgiałło i in., 2002). Ponadto ośrodek hydrogeologiczny, w zależności od właściwości fizycznych, może być ciągły i nieciągły oraz, analizując kierunkowość cech, izotropowy lub anizotropowy. Przykładem ośrodka hydrogeologicznego ciągłego, izotropowego jest np. ośrodek porowy. Pozostałe ośrodki posiadają cechy o właściwościach nieciągłych i anizotropowych.

WYNIKI BADAŃ

Do szczegółowszej charakterystyki i obliczeń zasobowych wybrano trzy poligony badawcze (fig. 1), w których mamy do czynienia z następującymi ośrodkami hydrogeologicznymi:

1) zlewnia rzeki Piotrówki – obszar występowania ośrodka szczelinowo-krasowego, reprezentowanego przez paleozoiczne wapienie krystaliczne (metamorfik Krowiarek),

2) zlewnia rzeki Mała Bystrzyca – obszar występowania ośrodka szczelinowego reprezentowanego przez paleozoiczne gnejsy i łupki łuszczkowe oraz szczelinowo-porowego reprezentowanego przez kredowe piaskowce, mułowce oraz margle,

3) obszar doliny rzeki Nysa Kłodzka – obszar występowania ośrodka porowego, związanego z czwartorzędowymi piaskami rynnami erozyjnej z okolic Kłodzka.

POLIGON 1

Poligonem badawczym do oceny zasobów wód podziemnych w ośrodku szczelinowo-krasowym została wytypowana zlewnia rzeki Piotrówki ($14,49\text{ km}^2$), położona na

obszarze metamorfiku Krowiarek (fig. 2). Obliczeniami zasobowymi objęto cały obszar wychodni wapieni krystalicznych (35 km^2), które wyznaczają zasięg stref zasilania wód podziemnych związanych z ośrodkiem krasowo-szczelinowym (Bocheńska i in., 2002). Teren ten charakteryzuje się występowaniem paleozoicznych wapieni krystalicznych (marmurów), występujących w łupkach łuszczkowych jako soczewy lub wkładki skalne. Rozciągłości pojedynczych soczew sięgają 1 km, przy miąższości do 150 m (Kuźniar, 1960). Wapienie tego obszaru charakteryzują się gęstą siecią połączonych spękań, o szerokości 30–50 cm, sięgających w głąb masywu krystalicznego, co w bardzo znacznym stopniu ułatwia krążenie wód podziemnych. Opisany obszar jest mocno zaangażowany tektonicznie (struktura fałdowa Romanowa), a występowanie uskoków dodatkowo wspomaga cyrkulację wód podziemnych. Cechy te sprawiają, że obszary występowania wapieni krystalicznych są miejscem ujawniania się wód pochodzących z regionalnego systemu krążenia, których bazą drenażową są rzeki Biała Łądecka i Nysa Kłodzka. Skały węglanowe są ośrodkiem szczelinowo-krasowym, natomiast w strefie uskoków wglębnych występuje dodatkowo przepływ porowy, jak i szczelinowy. W wyżej opisywanych

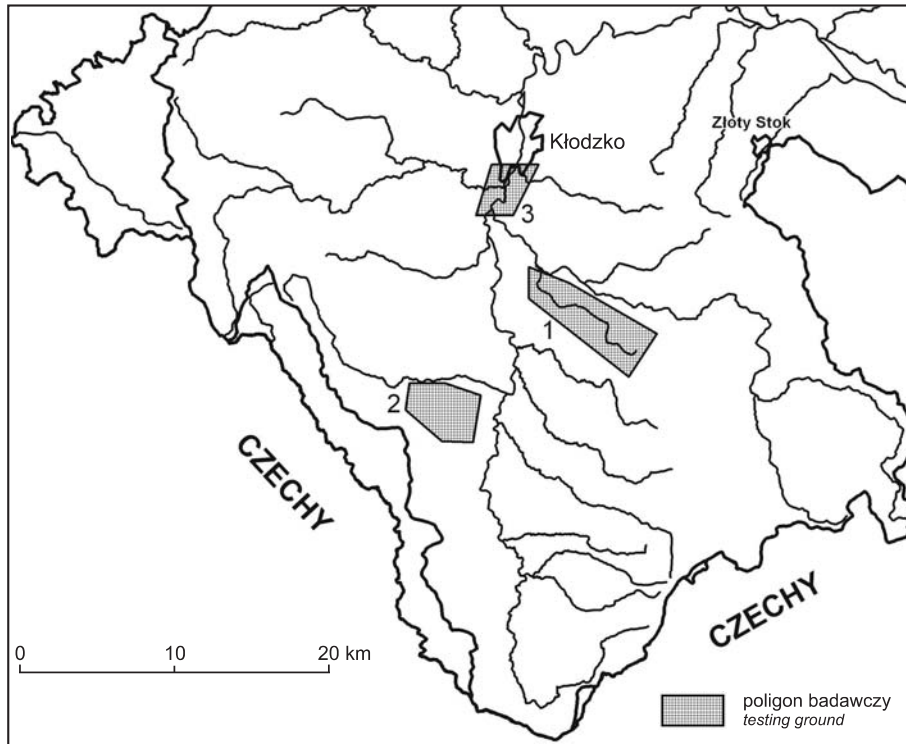


Fig. 1. Ziemia Kłodzka z zaznaczonymi poligonami badawczymi

Testing grounds in the Kłodzko Land

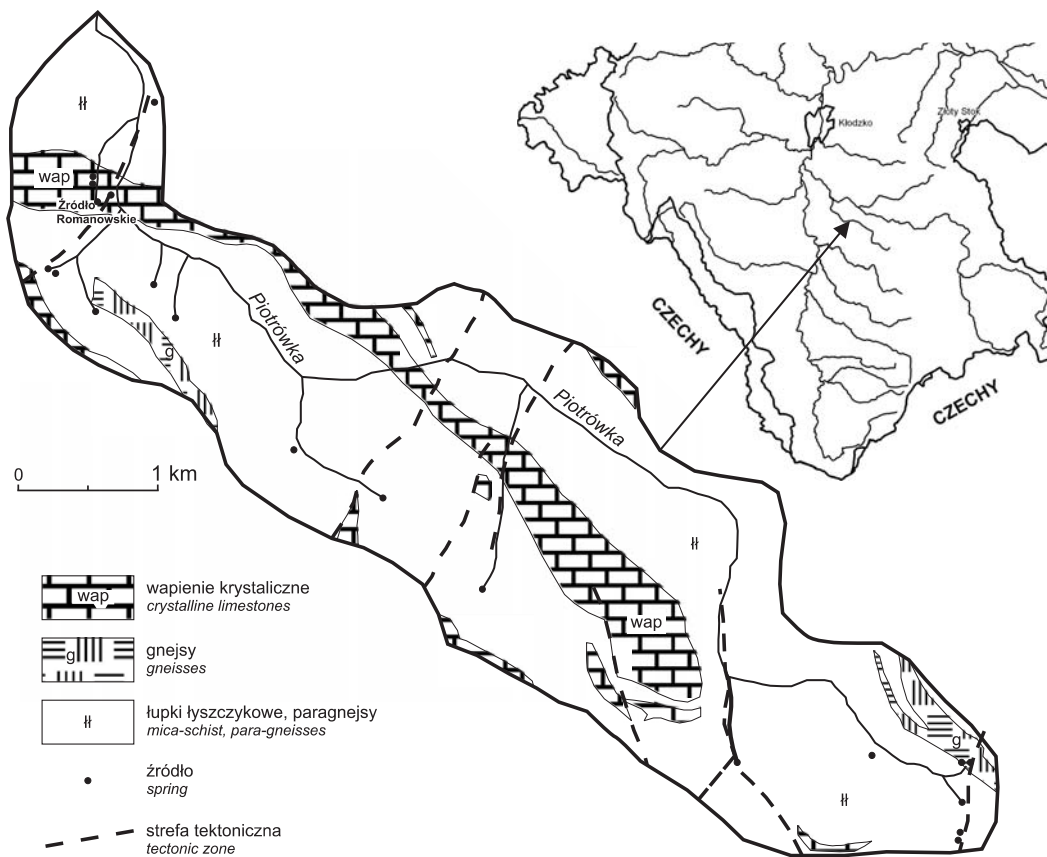


Fig. 2. Zlewnia rzeki Piotrówki

Piotrówka River catchment

skałach rozwinięte są również zjawiska krasowe, co przejawia się podwyższoną wodonością oraz zasobnością wodną. Ośrodek krasowy pod względem hydrogeologicznym jest dość specyficzny, co wiąże się z turbulentnym reżimem przepływu, skomplikowanymi drogami przepływu, dużą zmiennością natężenia przepływu, niewielką objętością pustek biorących udział w przepływie wody podziemnej kosztem szczelin, występowaniem powierzchniowych form krasowych zwiększających zasilanie masywu oraz znacznymi różnicowaniami prędkości przepływu w zależności od właściwości filtracyjnych masywu skalnego (Motyka, 1998).

Wapienie krystaliczne obszaru badań mają kilkukrotnie wyższe wartości współczynnika filtracji szczelinowej od współczynnika filtracji masy skalnej (Olichwer, 2002). Na podstawie badań Bocheńskiej i innych (2002), Kryzy (1988) oraz Olichwera (2002) średnia wartość współczynnika filtracji szczelinowej oscyluje w granicy 7–10 m/d, osiągając maksymalne wartości około 40 m/d. Do obliczeń stosowano zarówno pomiary parametrów szczelinowatości wykonane w kamieniołomach marmurów, jak i obserwacje zmienności wydajności źródeł krasowych drenujących krasowe zbiorniki wód podziemnych. Na podstawie zdolności filtracyjnych opisywane wapienie krystaliczne można zaliczyć do skał od pół- do średnioprzepuszczalnych (Pazdro, Kozerski, 1991).

O znacznej zasobności wodnej krasowo-szczelinowego ośrodka mówią nam bardzo wydajne wywierzyska. W obrębie zlewni Piotrówki występuje jedno z wydajniejszych źródeł sudeckich – źródło romanowskie, które wraz z czterema kolejnymi źródłami krasowymi, znajdującymi się w najbliższym otoczeniu, tworzą strefę źródłiskową (powierzchnia kilkuset metrów kwadratowych), o sumarycznej wydajności wahającej się w zależności od poru roku od 39,0 do 68,6 l/s. Wydajność największego z całej grupy źródła romanowskiego wahało się w granicach 13,3–29,0 l/s, co świadczy o małej zmienności. Wielkość odpływu podziemnego też jest jednym z elementów mówiących o zasobności wodnej zbiorników. Przyjmując do obliczeń zasobowych obszar zlewni hydrologicznej (Piotrówka), moduł odpływu podziemnego wyniósł 7,61 l/s·km². Do obliczeń wybrano wartości przepływów Piotrkówki w odcinku ujściowym w okresie niżówki hydrologicznej z listopada 1998 roku, określonej na podstawie obserwacji z wielolecia 1997–2001. Odpływ źródłany z obszaru badanej zlewni hydrologicznej wyniósł 2,83 l/s·km², co świadczy, że 62,8% wód podziemnych uczestniczy w dopływie dokorytowym. Wysoki, jak na warunki sudeckie, odpływ źródłany jest spowodowany występowaniem wydajnych wywierzysk w dolnej części zlewni Piotrówki. W środkowej i górnej części zlewni, gdzie dominują łupki łuszczycowe i gnejsy, moduły odpływu podziemnego i źródłanego są o wiele mniejsze i wynoszą odpowiednio 2,01 oraz 1,01 l/s·km².

POLIGON 2

Zlewnię rzeki Mała Bystrzyca o powierzchni 8,6 km² wytypowano do szczegółowej analizy zmienności zasobów dynamicznych w skałach krystalicznych (obszary górskie) oraz osadowych (obszary przedgórskie). Położona jest ona w zachodniej części Ziemi Kłodzkiej, w Górach Bystrzyckich. Prace badawcze w zlewni trwały w okresie 1999–2002, w którym prowadzone były kartowanie hydrogeologiczne oraz bezpośrednie pomiary terenowe (hydrogeologiczne i hydrologiczne).

Mała Bystrzyca uchodzi do Bystrzycy na wysokości miejscowości Nowa Bystrzyca. Wytypowana zlewnia w pełni oddaje warunki panujące w otoczeniu Kotliny Kłodzkiej. Analizowany teren budują w północnej i południowej części skały starszego paleozoiku. W centralnej części występują osady kredy (fig. 3). Utwory czwartorzędowe tworzą prawie ciągłą pokrywę zwietrzelinową oraz występują w dolinie rzeki Mała Bystrzyca, jako osady rzeczne.

Występują tu również skały karbońskie w pojedynczych odsłonięciach. Wody podziemne stwierdzono w utworach czwartorzędowych zarówno w pokrywie zwietrzelinowej, jak i w utworach rzecznych.

W skałach kredowych występują dwa poziomy wodo- nośne, głębszy naporowy oraz płytszy o zwierciadle swobodnym. Wody podziemne w skałach krystalicznych zlewni Małej Bystrzycy występują w trzech strefach: rumoszowo-zwietrzelinowej, spękanego masywu skalnego oraz uskoków wgłębnych, analogicznie jak w pozostałej części krystaliku na obszarze badań.

W zlewni Małej Bystrzycy (8,6 km²) zanotowano 21 naturalnych wypływów wody podziemnej, z czego 16 stałych i 5 okresowych (fig. 4). W tej liczbie występuje 19 źródeł i 2 młaki. Taka ilość wypływów daje niski współczynnik krenologiczny w zakresie 1,86–2,44. Na opisywanym terenie dominują źródła o wydajnościach nie przekraczających 0,5 l/s, z wyjątkiem źródeł 2a, 2b, 3 (tab. 1). Na podstawie wskaźnika zmienności $R = Q_{\max}/Q_{\min}$, źródła klasyfikują się do mało-zmiennych i stałych o wydajności klas VI i VII (tab. 1).

Dominują źródła zwietrzelinowo-rumoszowe i porowe, z wyjątkiem źródeł 2a i 2b o charakterze uskokowym, a których wydajność jest znacznie większa od wydajności pozostałych źródeł.

Odpływ źródłany wykazuje niską wartość 0,66 l/s·km². Prawie 20% źródeł jest okresowych, w których wypływ pojawia się dopiero po dłuższym okresie deszczowym. Świadczy to, że są zasilane z płytkich, mało zasobnych zbiorników o charakterze zwietrzelinowym z dominującym lokalnym systemem krążenia wód podziemnych.

Z badań terenowych w latach 1999–2002 wynika, że największe wydajności posiadają uskokowe źródła 2a i 2b, gdzie maksymalny wydatek wyniósł ponad 1 l/s (tab. 1). Na tak znaczne wartości wpływa lokalizacja źródła w strefie

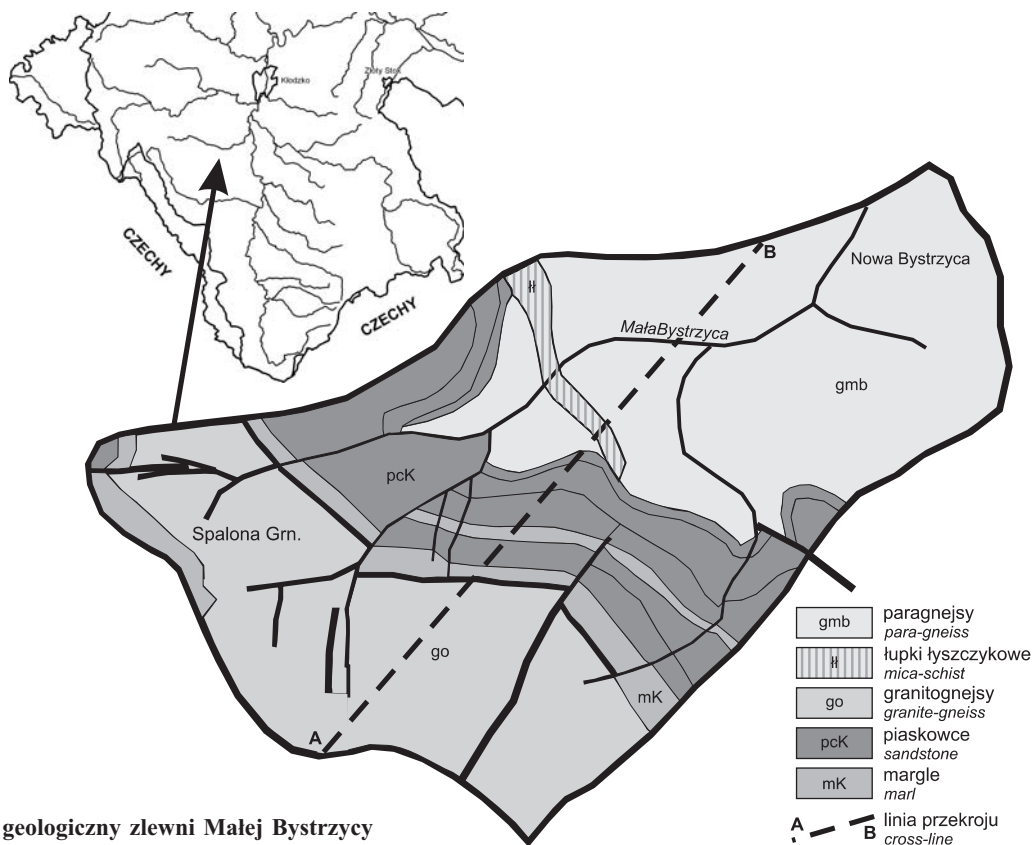


Fig. 3. Szkic geologiczny zlewni Małej Bystrzycy

Geological sketch of the Mała Bystrzyca River catchment

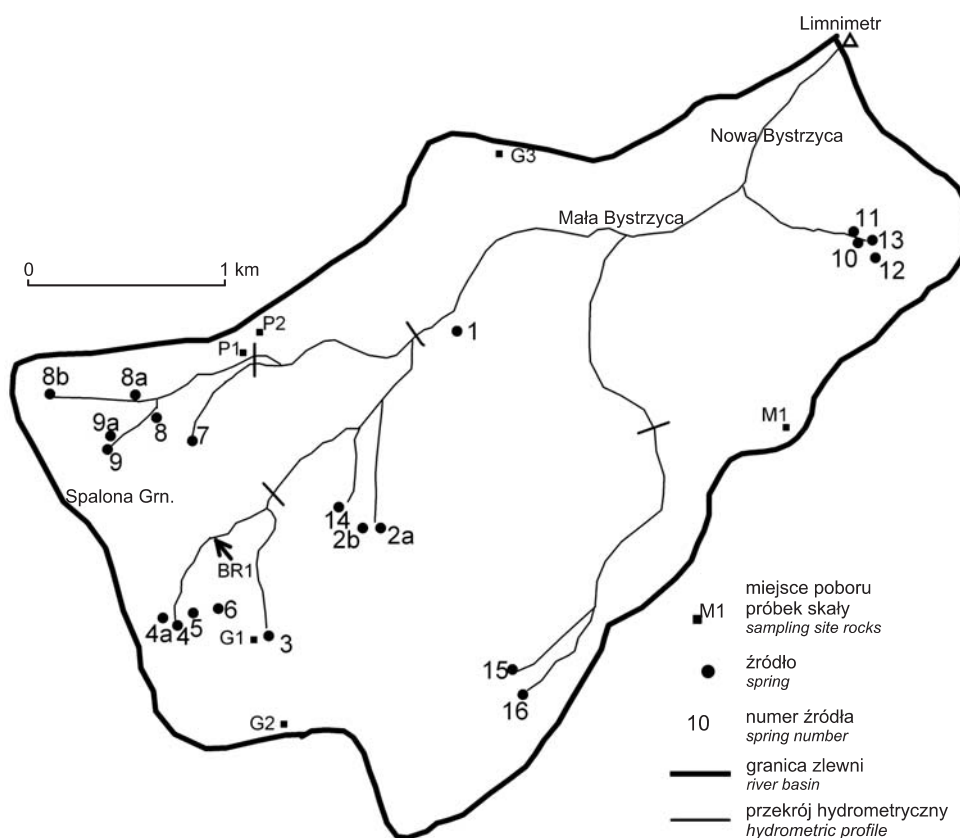


Fig. 4. Mapa dokumentacyjna zlewni Małej Bystrzycy

Documentation map of the Mała Bystrzyca River catchment

uskokowej, na granicy skał krystalicznych i kredowych, drenujące granitognejsy. Pozostałe wartości wydajności są o rząd wielkości mniejsze i wynoszą 0,1–0,2 l/s, co świadczy o istnieniu niewielkich, przypowierzchniowych zbiorników wód podziemnych.

Mniejsze wartości wydajności wykazują zbiorniki drenowane przez źródła zwietrzelinowe. Obserwowane różnice wydatków źródeł związane są z różną pojemnością wodonośców, zróżnicowaną głębokością zalegania wód podziemnych, odmienną więzią hydrauliczną na granicy spękanego masywu skalnego i zwietrzałego środowiska skalnego, a w mniejszym stopniu z wielkością zasilania i jego rozkładem w czasie (Olichwer, 2007).

Widoczne jest zróżnicowanie wartości wydajności źródeł zwietrzelinowych. Jest to spowodowane tym, iż zwietrzelina oraz rumosz skalny powstały z dezintegracji metamorficznych skał masywnych typu gnejsów czy amfibolitów wykazuje nieznacznie wyższą i dość stałą wartość współczynnika filtracji oraz odsączalności, w porównaniu do zwietrzelin powstałych z dezintegracji skał metamorficznej o teksturze łupkowej, w których współczynnik filtracji i odsączalności grawitacyjnej są zróżnicowane (Kryza, 1988).

Zasoby dynamiczne na obszarze eksperymentalnej zlewni zostały obliczone na podstawie wielkości przepływu

Małej Bystrzycy w punkcie ujścia do Bystrzycy. Przepływy notowane były przez limnimetr cztery razy w ciągu doby, przez okres roku hydrologicznego 2002, czego efektem jest wykres zmian wielkości przepływu wody (fig. 5).

Wyliczona wartość odpływu podziemnego na podstawie metody genetycznego podziału hydrogramu wyniosła 4665 m³/d, co daje wartość modułu odpływu podziemnego 6,27 l/s·km², przy 10-krotnie niższym odpływie źródlanym równym 0,66 l/s·km².

Na obszarze zlewni Małej Bystrzycy można zauważyć strefową zmianę modułu odpływu podziemnego (fig. 6). Wartości te zostały obliczone na podstawie danych z pomiarów

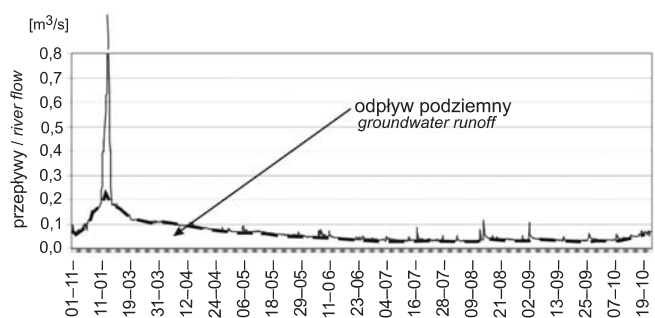


Fig. 5. Zmiany wielkości przepływu wody w Małej Bystrzycy w roku hydrologicznym 2002 – przekrój wodowskazowy Bystrzyca (ujście Małej Bystrzycy)

River flow of the Mała Bystrzyca River in hydrological year 2002 – Bystrzyca gauging station (Mała Bystrzyca River mouth)

Tabela 1

Zestawienie źródeł zlewni Małej Bystrzycy

Springs in the Mała Bystrzyca River catchment

Nr źródła	Zakres Q źródła [l/s]	Wskaźnik zmienności R	Wskaźnik zmienności wieloletniej	Klasa wydajności
1	0,1–0,22	2,20	mało zmienne	VI
2a	0,79–1,71	2,16	mało zmienne	V–VI
2b	0,43–1,07	2,48	mało zmienne	V–VI
3	0,1–1,29	12,90	zmiennie	V–VI
4	0,06–0,43	7,16	mało zmienne	VI–VII
5	0,1–0,29	2,90	mało zmienne	VI
6	0,08–0,25	3,12	mało zmienne	VI–VII
7	0,2–0,62	3,10	mało zmienne	VI
8	0,05–0,1	2,00	mało zmienne	VI–VII
8a	0,1–0,13	1,30	stałe	VI
8b	0,1–0,12	1,20	stałe	VI
9	0,15–0,17	1,13	stałe	VI
9a	0,1–0,3	3,00	mało zmienne	VI
10	0,08–0,19	2,37	mało zmienne	VI–VII
11	0,48–0,95	1,98	stałe	VI
12	0,07–0,15	2,14	mało zmienne	VI–VII
13	0,1–0,55	5,50	mało zmienne	VI
14	0,3–0,8	2,66	mało zmienne	VI
15	0,15–0,35	2,13	mało zmienne	VI
16	0,14–0,39	2,78	mało zmienne	VI

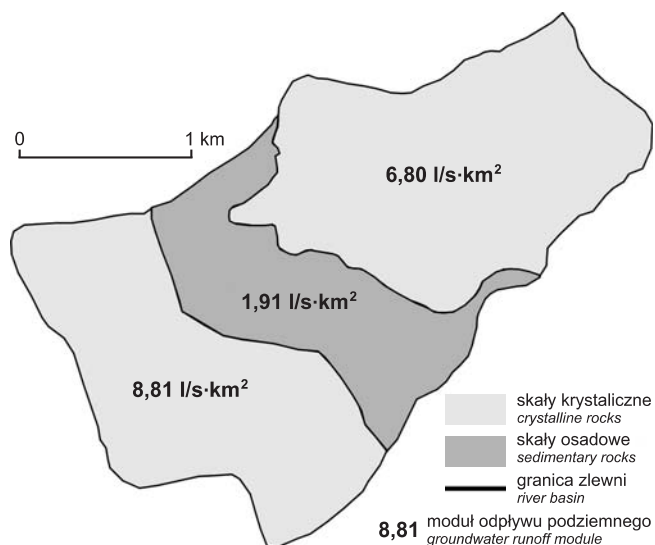


Fig. 6. Zmienność modułu odpływu podziemnego w zlewni Małej Bystrzycy

Variability of groundwater runoff modulus in the Mała Bystrzyca River catchment

hydrometrycznych na cieku głównym i jego dopływach w okresie przepływów niżówkowych z wielolecia 1999–2002. W południowej oraz południowo-zachodniej części zlewni, gdzie dominują granitognejsy wczesnopaleozoiczne, odnotowano najwyższą wartość modułu wynoszącą $8,81 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$. W północnej części zlewni, gdzie dominują paragnejsy dwułyżczykowe oraz łupki łyżczykowe wartość ta wyniosła $6,80 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$.

W centralnej części zlewni, w której występują margle oraz piaskowce kredowe, moduł odpływu podziemnego wynosi zaledwie $1,91 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$. Odnotowana wartość jest około o połowę mniejsza niż wyniki prezentowane przez Tarkę (inf. ustna), który wyliczył moduł zasobów odnawialnych dla obszarów występowania skał kredowych niecki wewnątrzsudeckiej – Kudowa–Bystrzyca na $3,5 \text{ dm}^3/\text{s}\cdot\text{km}^2$. Zaniżone wartości otrzymane przez autora wynikają z tego, że drenowana warstwa skał kredowych ma niewielkie rozprzestrzenienie i charakteryzuje się bardzo niskimi parametrami hydrogeologicznymi (tab. 2), stosunkowo niewielką miąższością (fig. 7) oraz brakiem rozwiniętej tektoniki wspomagającej krążenie wód podziemnych.

Te zmienne wartości modułów zasobów odnawialnych mogą sugerować, iż Mała Bystrzyca jest elementem drenującym płytkie zbiorniki wód podziemnych stref zwietrzelinowych. Natomiast głębsze krążenie wód podziemnych (system przejściowy) uwidacznia się dopiero w dolinie Bystrzycy.

Tabela 2

Parametry hydrogeologiczne skał zbiornikowych zlewni Małej Bystrzycy (Olichwer, 2007)

Hydrogeological parameters of reservoir rocks in the Mała Bystrzyca River catchment (Olichwer, 2007)

Nr próbki	Porowatość [%]	Odsączalność	Wsp. filtracji [m/s]
Piaskowiec 1	13,8	7,4	$6,1\cdot 10^{-7}$
Piaskowiec 2	14,9	7,9	$7,3\cdot 10^{-7}$
Margiel	7,3	3,3	$2,1\cdot 10^{-9}$
Gnejs 1	1,6	0,18	$1,3\cdot 10^{-10}$
Gnejs 2	1,65	0,26	
Gnejs 3	1,9	0,36	

Relacja wielkości odpływu podziemnego źródłami ($0,66 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$) w stosunku do całkowitego odpływu podziemnego ($6,27 \text{ l/s}\cdot\text{km}^2$) wykazuje, że 89% odpływu ma formy dokorytowe i zachodzi wzdłuż doliny rzecznej. Jednocześnie wysokie ilości wód wypływających w górnych częściach zlewni ze skał krystalicznych sugerują, że nie tworzą one tak głębokiego systemu przepływu jak w przypadku skał kredowych. Z obliczeń wynika, że głębokość aktywnej wymiany w skałach krystalicznych sięga do 100 m w głąb (Staśko, Tarka, 2002).

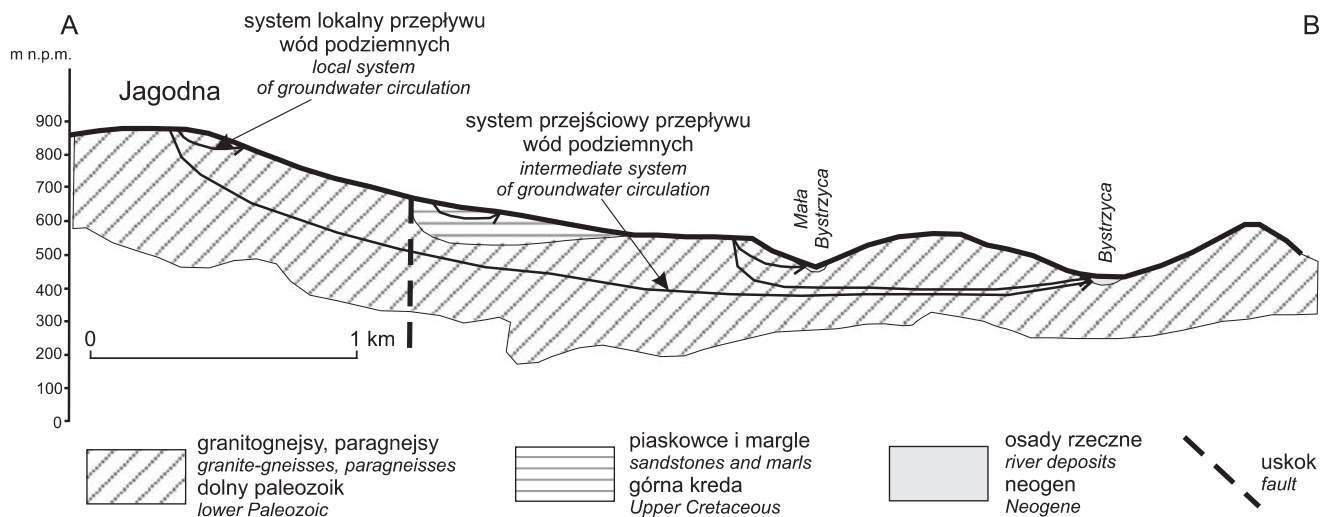


Fig. 7. Schemat krążenia wód podziemnych na terenie zlewni Małej Bystrzycy

Scheme of groundwaters circulation in the Mała Bystrzyca River catchment

POLIGON 3

Do badań nad kształtowaniem się zasobów wód podziemnych w dolinach dużych rzek sudeckich, o miększych warstwach wodonośnych, wybrany został czwartorzędowy zbiornik wód podziemnych w rejonie Kłodzka w dolinie Nysy Kłodzkiej reprezentujący ośrodek porowy przepływu.

Czwartorzędowy poziom wodonośny charakteryzuje się w tym miejscu bardzo dobrymi parametrami hydrogeologicznymi. Warstwy wodonośne o średniej miąższości 20,6 m występują na głębokości 1–4 m. Charakteryzują się one wydajnością potencjalną z otworu od 9 do 120 m³/d, przy małych depresjach, maksymalnie 13,4 m i współczynnikiem filtracji do 79,5 m/d. Wodoprzewodność warstw waha się od 50 do 2000 m²/d (Mroczkowska, Michniewicz, 1997). Zbiornik ten jest wykształcony w postaci żwirów i piasków rzecznych, wykazujących więź hydrauliczną z warstwami paleozoicznymi. W dotychczasowych rozważaniach przyjmowano, że jednostka ta zasilana jest z infiltracji wód opadowych oraz z prześiakanie wód powierzchniowych. Pomijano możliwość zasilania ascenzyjnego. Opisująca jednostka ma rangę Głównego Poziomu Użytkowego na Mapie hydrogeologicznej Polski, arkusz Kłodzko. Wydzielony zbiornik o nazwie 4aQ-Pz III posiada powierzchnię 3,4 km² (fig. 8). Moduł zasobów odnawialnych równy zasobom dyspozycyjnym obliczono na 2,39 dm³/s·km² (Mroczkowska, Michniewicz, 1997). W obrębie opisywanego zbiornika znajduje się ujęcie wód podziemnych dla miasta Kłodzka o zasobach eksploatacyjnych, wyznaczonych na podstawie prac dokumentacyjnych, wynoszących 30 240 m³/d (Malinowska-Pisz, 1999). Znaczne różnice w otrzymanych wielkościach zasobów eksploatacyjnych do wcześniej wyliczonych zasobów dyspozycyjnych skłoniły autora artykułu do ponownego określenia zasobów dyspozycyjnych opisywanej jednostki hydrogeologicznej z zastosowaniem modelowania numerycznego.

Do obliczeń wykorzystano program Visual Modflow wersja 3.1.0.84, opracowany przez firmę Waterloo Hydrogeologic Inc. Model ten, stworzony przez autora, nie był wykonywany na potrzeby udokumentowania zasobów eksploatacyjnych ujęcia wód podziemnych.

Obszar modelowania obejmował powierzchnię 3 112 km². Kształty granic modelu zostały zmodyfikowane, poprzez przyjęcie jako granicy zbiornika warunku miąższości warstwy wodonośnej równej 5 m, dlatego modelowana powierzchnia jest niewiele mniejsza od po-

wierzchni struktury umieszczonej na MhP 1:50 000. Do modelu zostały zaimportowane mapy morfologii terenu i spągu dna doliny. W schematyzacji przyjęto dwie warstwy w warunkach ustalonych z otworami eksploatacyjnymi. Warstwa pierwsza to osady czwartorzędowe, głównie żwirowo-piaszczyste wypełniające dolinę Nysy Kłodzkiej. Warstwa druga przedstawia podłoże krystaliczne (fig. 9 i 10). Podstawą wydzielenia obszaru modelu były granice czwartorzędowego zbiornika Q-Pz wyznaczonego w trakcie tworzenia mapy hydrogeologicznej 1:50 000, arkusz Kłodzko (Mroczkowska, Michniewicz, 1997).

Dla wydzielonego obszaru modelowania przyjęto warunki brzegowe I i III rodzaju. Wzdłuż północnej i południowej granicy przyjęto warunki brzegowe I rodzaju ($H = \text{const}$). Warunki brzegowe III rodzaju, zwane warunkami Cauchy'ego zastosowano na wschodniej i zachodniej granicy. Oznaczają wymianę wody między otoczeniem a systemem, z uwzględnieniem właściwości systemu w strefie przy jego granicy. Ponadto wewnątrz modelu zastosowano warunki brzegowe III rodzaju, symulując Nysę Kłodzką i jej dopływy (fig. 11).

Do modelu wprowadzono 13 studni, które pracują z wydajnością sumaryczną 7296 m³/d (tab. 3). Wydajności eksploatacyjne poszczególnych studni wahają się od 288 do 1392 m³/d.

Do modelu wprowadzono wartość zasilania efektywnego 125 mm/rok, przy opadzie średnim rocznym, z wielolecia z posterunku opadowego Kłodzko, 599 mm.

Założono anizotropowość ośrodka filtracyjnego, a geofiltracyjne cechy ośrodka skalnego przedstawiono poprzez zmienne wartości współczynnika filtracji, odsączalności oraz porowatości całkowitej i efektywnej. Wartości tych pa-

Tabela 3

Zestawienie czynnych otworów studziennych ujęcia wód podziemnych w Kłodzku

Active wells of the Kłodzko groundwater intake

Nr	Współrzędne		Rzędna terenu [m n.p.m.]	Wydajność eksploatacyjna studni [m ³ /d]	Zw. wód podziemnych		Współczynnik filtracji [m/d]
	x	y			statyczne [m n.p.m.]	dynamiczne [m n.p.m.]	
S1	3701428	5488437	290,3	288	b.d.	283,9	43,2
S2	3701369	5488375	290,6	312	b.d.	284,2	35,9
S3	3701349	5488622	289,8	240	286,8	b.d.	3,6
S4	3701309	5488622	289,9	288	286,9	b.d.	4,5
S5	3701408	5488529	289,7	384	b.d.	283,5	14,6
S6	3701625	5488560	288,7	696	287,0	b.d.	19,5
S7	3701447	5487664	292,5	1392	289,8	281,4	29,6
S8	3701665	5488653	289,6	384	287,6	b.d.	9,5
S9	3701369	5488282	290,9	1008	286,8	281,2	13,4
S10	3701290	5488190	291,2	816	288,6	b.d.	11,4
S11	3701270	5487664	292,0	720	289,2	281,5	b.d.
S12	3701270	5487603	292,0	336	287,6	283,4	79,5
S13	3701171	5487510	297,7	432	288,0	278,3	14,6

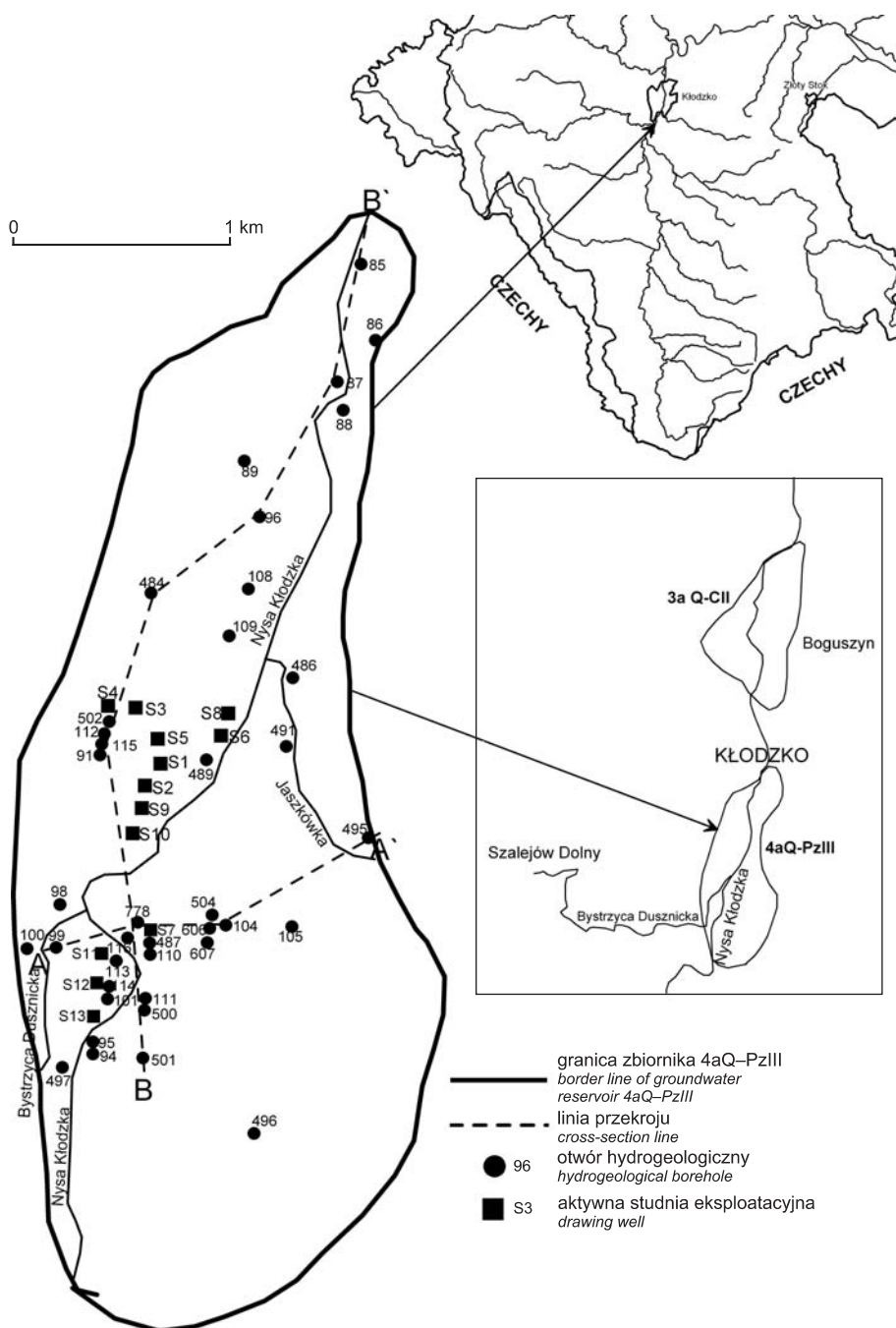


Fig. 8. Mapa dokumentacyjna jednostki 4aQ-Pz III wybranej do określenia zasobów dyspozycyjnych metodą modelowania numerycznego

Documentation map of hydrogeological unit 4aQ-Pz III, chosen to determine disposable groundwater resources by numerical modelling

rametrów zostały wyznaczone na podstawie danych Banku Hydro oraz danych archiwalnych ujęcia, a także dzięki badaniom terenowym i laboratoryjnym.

Różnice w wartościach zwierciadła wody podziemnej w piezometrach pomierzone w terenie a wartościami z modelu wahają się od 0,2 m do 1,2 m (tab. 4). Można uznać to za wynik dobry, biorąc pod uwagę schematyzację danych hydro-

geologicznych wprowadzonych do modelu oraz uproszczenie warunków filtracyjnych panujących na obszarze modelowanym (fig. 11). Należy też uwzględnić pewną niedokładność obliczeniową programów Surfer i Visual Modflow.

Bilans przychodów i rozchodów wód dopływających do obszaru modelowego ilustruje tabela 5.

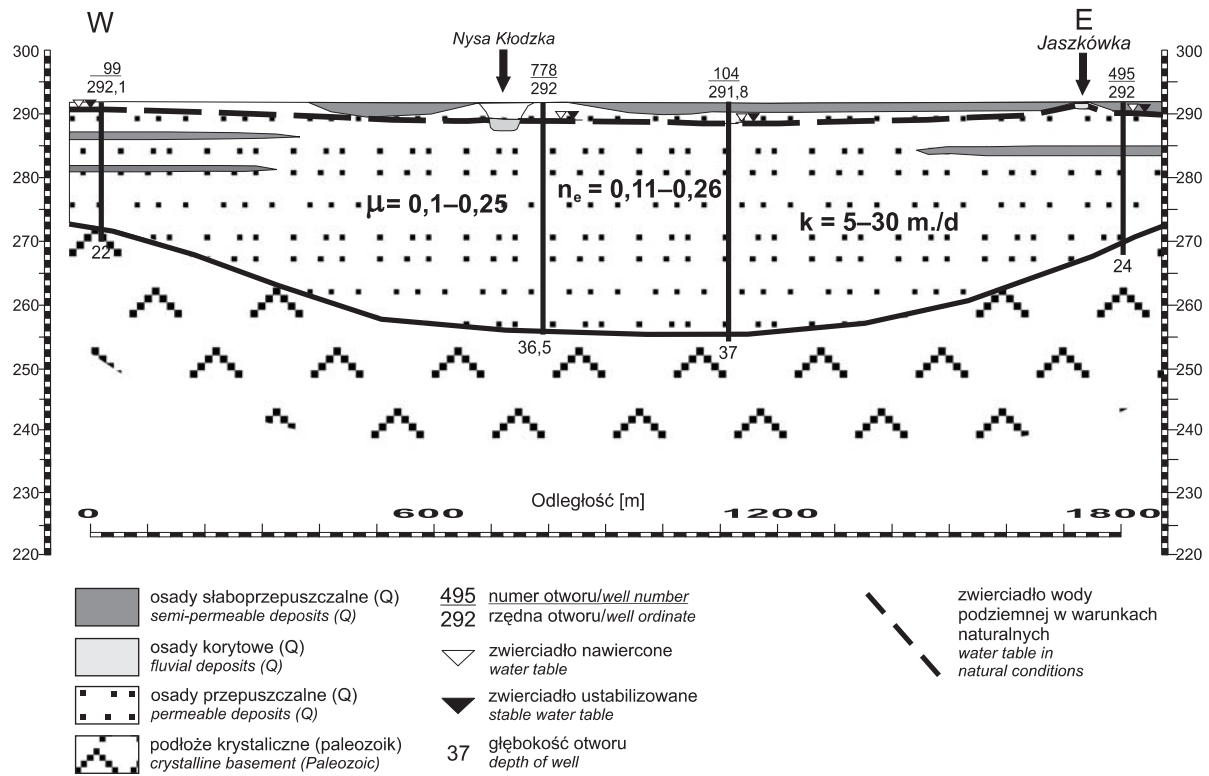


Fig. 9. Przekrój hydrogeologiczny A-A' przez jednostkę hydrogeologiczną 4aQ-Pz III

Hydrogeological cross-section A-A' across hydrogeological unit 4aQ-Pz III

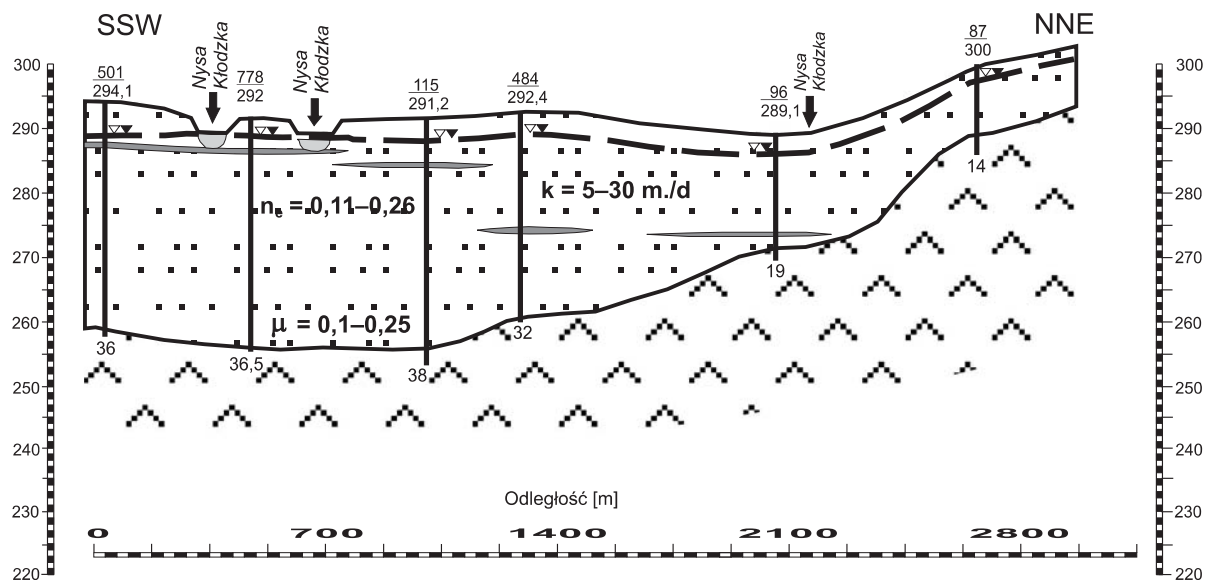


Fig. 10. Przekrój hydrogeologiczny B-B' przez jednostkę hydrogeologiczną 4aQ-Pz III

Objaśnienia na figurze 9

Hydrogeological cross-section B-B' across hydrogeological unit 4aQ-Pz III

For explanations see Figure 9

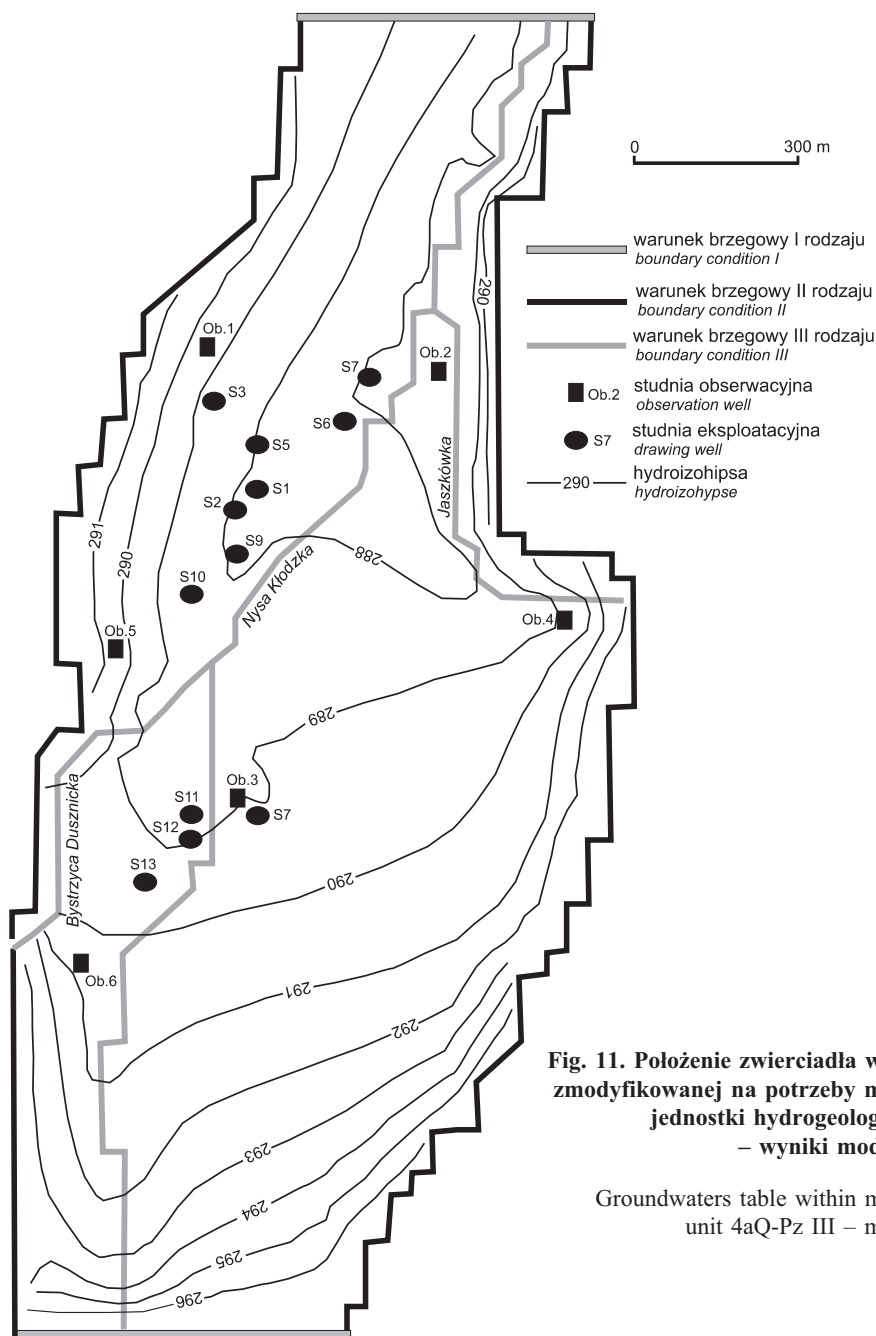


Fig. 11. Położenie zwierciadła wód podziemnych w obrębie zmodyfikowanej na potrzeby modelowania numerycznego jednostki hydrogeologicznej 4aQ-Pz III – wyniki modelowania

Groundwaters table within modified hydrogeological unit 4aQ-Pz III – modeling results

Tabela 4

Zestawienie wybranych otworów obserwacyjnych z obszaru ujęcia

Observation wells of the intake area

Nr piezometru	Współrzędne		Z. w. p. w terenie [m n.p.m.]	Z. w. p. na podstawie modelowania [m n.p.m.]	Różnica [m]
	X	Y			
Ob.1	3701382	5488737	289,4	289,6	0,2
Ob.2	3701836	5488675	287,5	286,3	1,2
Ob.3	3701381	5487717	290,4	289,2	1,2
Ob.4	3702112	5488119	289,5	289,1	0,4
Ob.5	3701105	5488057	289,3	290,3	1,0
Ob.6	3701026	5487347	292,1	290,9	1,2

Z.w.p. – zwierciadło wód podziemnych
Z.w.p. – groundwaters table

Tabela 5

Bilans wodny na podstawie modelu hydrogeologicznego z pracującym ujęciem wód podziemnych

Water balance based on numerical modelling with active groundwater intake

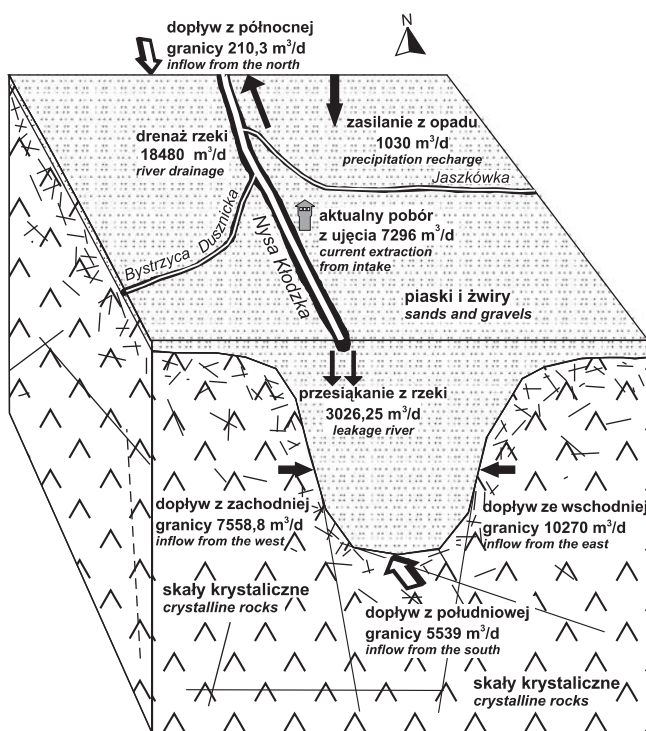
Przychody [m ³ /d]	Rozchody [m ³ /d]
Dopływy z granic = 23546,5 (85,3%) zachodnia granica = 7558,8 wschodnia granica = 10270,0 południowa granica = 5539,0 północna granica = 210,31	Odptyw do granic = 1830 (6,63%)
Zasilanie = 1030,65 (3,74%)	Zasilanie = 0
Studnie = 0	Studnie = 7296 (26,43%)
Prześiäkkanie z rzeki = 3026,25 (10,96%)	Drenaż rzeki = 18480,09 (66,94%)
Suma = 27603,39	Suma = 27606,08
Różnica między przychodami a rozchodami = -2,69 m ³ /d	

Tabela 6

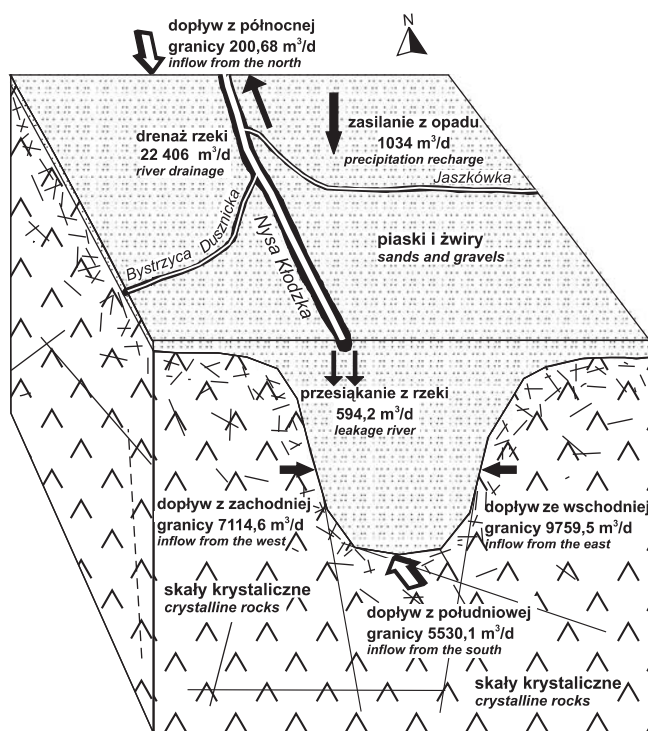
Bilans wodny na podstawie modelu hydrogeologicznego w warunkach quasi-naturalnych

Water balance based on numerical modelling in quasi-natural conditions

Przychody [m ³ /d]	Rozchody [m ³ /d]
Dopływy z granic = 22604,78 (93,28%) zachodnia granica = 7114,63 wschodnia granica = 9759,5 południowa granica = 5530,1 północna granica = 200,68	Odptyw do granic = 1831,1 (7,55%)
Zasilanie = 1034,92 (4,27%)	Zasilanie = 0
Studnie = 0	Studnie = 0
Prześiäkkanie z rzeki = 594,2 (2,45%)	Drenaż rzeki = 22406,11 (92,45%)
Suma = 24234,07	Suma = 24237,47
Różnica między przychodami a rozchodami = -3,4 m ³ /d	


Fig. 12. Schemat kształtowania się zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych obszaru badań w trakcie eksploatacji z wydajnością 7296 m³/d

Scheme of the formation of disposable resources of the study area with active groundwater intake


Fig. 13. Schemat kształtowania się zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych obszaru badań w warunkach naturalnych

Scheme of the formation of disposable resources of the study area in quasi-natural conditions

Na podstawie modelu hydrogeologicznego dla jednostki 4aQ-Pz III obliczono zasoby dynamiczne wód podziemnych na ogólną wartość 27 606 m³/d. Otrzymane wyniki wskazują, że zasoby wód podziemnych kształtują wody dopływające z południa (20,3%) w osadach rzecznych oraz ze wschodu (37%) i zachodu (27,3%) z otaczających wyniesień skał związanych (tab. 5).

W mniejszym stopniu zasoby dynamiczne są kształtowane przez przesiąkanie z rzeki (11%) oraz infiltrację opadów atmosferycznych (3,7%) oraz dopływ z północnej granicy modelu (0,7%) (fig. 12).

Natomiast po stronie rozchodów dominuje dopływ do Nysy Kłodzkiej, a w mniejszej skali do Bystrzycy Dusznickiej i Jaskówki (66,94%). Studnie pobierają około 26,5% zasobów wód podziemnych, a odpływ poza granice obszaru modelowego kształtuje się w granicach 6,63% ogólnej sumy rozchodów.

Zestawione powyżej wyniki bilansu zasobowego odnoszą się do modelu, na którym uwzględniono eksploatację wody podziemnej z wielkością 7926 m³/d. Ujęcie to wymusza więk-

sze przesiąkanie z rzeki, dlatego zastosowano drugi wariant modelu z wyłączeniem studni (quasi-naturalny). W wyniku tego zabiegu przesiąkanie z rzeki wyraźnie się zmniejszyło i wyniosło 594,2 m³/d (tab. 6), co jest wartością kilkukrotnie mniejszą, w porównaniu z opcją z pracującym ujęciem wody (fig. 13). Pozostałe wartości elementów kształtujących bilans wodny terenu badań zostały zmienione w niewielkim stopniu, co obrazuje tabela 6. Jedynie po stronie rozchodów zwiększył się udział drenażu Nysy Kłodzkiej, Bystrzycy Dusznickiej oraz Jaskówki do ponad 90%.

Niewielka powierzchnia modelowanej jednostki tłumaczy niskie zasilanie infiltracyjne. Z kolei drenujący charakter Nysy Kłodzkiej (66,94%) nie pozwala na większą ucieczkę wód rzecznych. Zmienia to dotychczasowe poglądy na pochodzenie wód podziemnych w rynnę erozyjnej okolic Kłodzka, które wysuwały na plan pierwszy dominującą rolę infiltracji opadów atmosferycznych i pomijały rolę dopływów wód z podłoża krystalicznego i otoczenia doliny na kształtowanie się zasobów wód podziemnych tej jednostki.

PODSUMOWANIE

W sposób przeglądowy przedstawiano wielkości zasobów wód podziemnych kształtujących się w czterech ośrodkach skalnych: porowym, szczelinowym, szczelinowo-porowym i szczelinowo-krasowym występujących na obszarze Ziemi Kłodzkiej. Na podstawie kilkuletnich badań metodami hydrologicznymi oraz hydrogeologicznymi określono moduły odpływu podziemnego dla zlewni cząstkowych, w których drenowane są wody podziemne pochodzące z różnych ośrodków skalnych. Dodatkowo do określenia zasobów wodnych ośrodka porowego zastosowano metodę modelowania numerycznego. Od wielu lat dyskutowane są wielkości zasobów wód podziemnych na obszarze Sudetów, zwłaszcza dotyczące ośrodka szczelinowego reprezentowanego przez skały krystaliczne. O wiele mniej kontrowersji dotyczących zawodnienia wzbudzają pozostałe ośrodki hydrogeologiczne, jakimi są szczelinowo-porowy, krasowo-szczelinowy oraz porowy, których znaczna zasobność wodna objawia się wyznaczeniem na obszarze występowania tych ośrodków użytkowych pięter wodonośnych. Wyniki świadczą o tym, że skały krystaliczne są zasobnym zbiornikiem wód podziemnych, zwłaszcza ośrodek szczelinowo-krasowy reprezentowany przez wapienie krystaliczne. O wodonośności skał w obszarach występowania skał krystalicznych nie można wnioskować tylko na podstawie wydajności studni. Należy uwzględnić ilość źródeł, ich wydajność i zmienność, wielkość odpływu podziemnego rejestrowanego podczas okresów niżówkowych, wydajności ujęć poziomych i drenażowych. Inną przyczyną uzyskiwania tak niskich wartości zasobów dynamicznych dla Sudetów,

w wielu wypadkach, związana jest z przypisywaniem dużym obszarom terenu zasobów dynamicznych wyznaczonych dla całych zlewni (np. zlewnia Nysy Kłodzkiej) obejmujących zarówno obszary górskie, jak i przedgórskie. Powoduje to znaczne zaniżanie zasobów na obszarach górskich reprezentowanych przez ośrodek szczelinowy.

Do szczegółowszej charakterystyki i obliczeń zasobowych wybrano trzy poligony badawcze:

- zlewnia rzeki Piotrówki – obszar występowania ośrodka szczelinowo-krasowego,
- zlewnia rzeki Mała Bystrzyca – obszar występowania ośrodka szczelinowego oraz szczelinowo-porowego,
- obszar doliny rzeki Nysa Kłodzka – obszar występowania ośrodka porowego.

Największe zasoby odnawialne wód podziemnych zanotowano na obszarze występowania ośrodka porowego oraz szczelinowo-krasowego (7 dm³/s·km²), nie wiele mniejsze moduły otrzymano w pozostałych ośrodkach hydrogeologicznych.

Główną formą odpływu podziemnego jest liniowy drenaż do koryt rzek będących bazą drenażu (Olichwer, 2007; Rysiukiewicz, 2010).

Badania modelowe, wykonane przez autora, rynnę erozyjnej Nysy Kłodzkiej (4aQ-Pz III) w rejonie Kłodzka wykazały, że zasoby wód podziemnych kształtują wody dopływające z otoczenia i podłoża doliny (85%). W mniejszym stopniu zasoby dynamiczne są kształtowane przez przesiąkanie z rzeki (11%) oraz infiltrację opadów atmosferycznych (3,7%) oraz dopływ z północnej granicy modelu (0,7%).

Szczegółowe badania z lat 1999–2002 w zlewni eksperymentalnej Małej Bystrzycy o powierzchni 8,6 km² wykazały, że zasoby dynamiczne wyniosły 4665 m³/d, przy module odpływu podziemnego 6,27 dm³/s·km². Największe wartości zanotowano na obszarze występowania granitognejsów (8,81 dm³/s·km²), najmniejsze na obszarze kredowych margli i piaskowców. Pomierzone źródła (80% wypływów) są mało zmienne i stałe. Wśród skał zlewni Małej Bystrzycy największą przepuszczalnością charakteryzują się piaskowce, natomiast margle i gnejsy są bardzo słabo przepuszczalne. Sieć spekań podnosi wartość parametrów i sprawia, że skały te są dobrym kolektorem wód podziemnych.

Obliczone wysokie zasoby dynamiczne nie oznaczają ich dyspozycyjności. Zachowanie przepływów nienaruszalnych oraz naturalnych warunków przyrodniczych wymusza przy-

jęcie zasobów dyspozycyjnych w granicach 50–60% zasobów dynamicznych oraz rozproszone ujmowanie wód podziemnych.

Niska ocena zasobności Sudetów dokonywana przez wielu hydrogeologów wynika z trudności ujęcia na tym obszarze wód podziemnych tradycyjnymi metodami otworowymi. Wiele klasyfikacji zasobności przyjmuje za główne kryterium właśnie wydajność studni pionowej. Już w 1976 roku Różycki (*W*: Staško, 2002) wykazał, na podstawie analizy 52 studni, że połowa z nich charakteryzuje się wydajnością od 1 do 5 m³/h. Wydajności powyżej 20 m³/h uzyskano w około 30% analizowanej studni. Ujęcia drenażowe czy poziome (sztolnie), szeroko rozbudowywane na obszarze Sudetów już za czasów niemieckich, przeczą poglądom o braku wód podziemnych na tym obszarze.

LITERATURA

- BOCHEŃSKA T., MARSZAŁEK H., WĄSIK M., 2002 — Zbiorniki wód podziemnych w obszarach krasowych krystaliniku sudeckiego. *Acta Univ. Wratisl. Hydrogeol.*, **2460**.
- GUTRY-KORYCKA M., 1978 — Zasilanie podziemne rzek polskich. *Prz. Geof.*, **23(31)**, 2.
- DOWGIAŁŁO J., KLECZKOWSKI A.S., MACIOSZCZYK T., RÓŻKOWSKI A. (red.), 2002 — Słownik hydrogeologiczny, Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- JOKIEL P., 1994 — Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany w Polsce, *Acta Geogr. Lodz.*, **66/67**.
- KLECZKOWSKI A.S., 1979 — Hydrogeologia ziem wokół Polski, Wyd. Geol., Warszawa.
- KLECZKOWSKI A.S. (red.), 1990 — Mapa głównych zbiorników wód podziemnych wymagających szczególnej ochrony. Wyd. Geol., Warszawa.
- KOLAGO C., 1970 — Mapa hydrogeologiczna Polski 1:1 000 000, Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KRYZA H., 1988 — Formowanie się odpływu podziemnego w zlewniach górskich Masywu Śnieżnika. *Acta Univ. Wratisl.*, **964**, *Pr. Geol.-Miner.*, **11**, 2: 65–97.
- KRYZA H., KRYZA J., 1986 — Odpływ podziemny i zasoby odnawialne Sudetów i ich przedpola jako kryterium regionalizacji hydrogeologicznej. *Pr. Nauk. Inst. Geotech. PWroc.*, **49**, *Konferencje*, **21**: 109–119.
- KUŹNIAR J., 1960 — O warunkach występowania marmurów w północno-zachodniej części Krowiarek. *Kwart. Geol.*, **4**, 1: 217–262.
- MALINOWSKA-PISZ A., 1999 — Dokumentacja hydrogeologiczna ujęcia wód podziemnych z utworów czwartorzędowych (ujęcie wody dla miasta Kłodzka). Centr. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MALINOWSKI J., (red.), 1991 — Budowa Geologiczna Polski. Tom VII Hydrogeologia. Wyd. Geol., Warszawa.
- MOTYKA J., 1998 — A conceptual model of hydraulic networks in carbonate rocks illustrated by examples from Poland. *Hydrogeol. J.*, **6**: 469–482.
- MROCZKOWSKA B., MICHNIEWICZ M., 1997 — Mapa hydrogeologiczna Polski 1:50000, arkusz Kłodzko. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- OLICHWER T., 2002 — Zarys warunków hydrogeologicznych ze szczególnym uwzględnieniem odpływu podziemnego w metamorfiku Krowiarek (Masyw Łądka-Śnieżnika). *Acta Univ. Wratisl.*, **2460**, *Pr. Geol.-Miner.*, **72**: 51–61.
- OLICHWER T., 2007 — Groundwater renewable resources of Kłodzko region. Selected hydrogeologic problems of the Bohemian Massif and of other hard rock terrains in Europe. *Acta Univ. Wratisl. Hydrogeol.*, **3041**: 247–258.
- ORSZTYNOWICZ J., 1988 — Studium naukowo-badawcze do Atlasu hydrologicznego Polski. Średnie roczne i wieloletnie odpływy podziemne na obszarze Polski w okresie 1951–1980. IMGW, Zakład Dynamiki Wód Podziemnych, Warszawa.
- PACZYŃSKI B. (red.), 1995 — Atlas hydrogeologiczny Polski 1:500 000., cz.II – Zasoby, jakość i ochrona zwykłych wód podziemnych. Państw. Inst. Geol., PAE S.A., Warszawa.
- PAZDRO Z., KOZERSKI P., 1991 – Hydrogeologia ogólna. Wyd. Geol., Warszawa.
- RYSIUKIEWICZ M., 2010 — Odpływ podziemny w zlewni Bystrzycy (Góry Bystrzyckie). *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **440**: 127–134.
- STAŠKO S., 1996 — Wody podziemne w skałach krystalicznych na podstawie badań wybranych obszarów Sudetów Polskich. *Acta Univ. Wratisl. Pr. Geol.-Miner.*, **53**.
- STAŠKO S., 2002 — Zawodnienie szczelinowych skał krystalicznych w Sudetach. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, **404**: 249–261.
- STAŠKO S., TARKA R., 2002 — Zasilanie i drenaż wód podziemnych w obszarach górskich na podstawie badań w Masywie Śnieżnika. *Acta Univ. Wratisl.*, **2528**, *Hydrogeol.*, 1–86.
- SZKURŁATOWSKI Z., 1987 — Stan ekologiczny wód na Dolnym Śląsku. Mat. Sesji Popularno-Nauk., Dolnośląskie Towarzystwo Społeczno-Kulturalne, Wrocław.
- TARKA R., 1997 — Zasilanie wód podziemnych w górskich masywach krystalicznych na przykładzie Masywu Śnieżnika w Sudetach. *Acta Univ. Wratisl.*, *Pr. Geol.-Miner.*, **56**.
- WALKOWICZ J., 1989 — Podstawy hydrologiczne ujęcia wody ze szczytowych zlewni w Sudetach dla Wrocławia. Konf. Alternatywne źródła zaopatrzenia Wrocławia w wodę. Inst. Nauk Geol. UWroc., Wrocław.

SUMMARY

This article presents renewable groundwater resources in porous, fractured, fractured-porous and fractured-karst groundwater media. The study area is located in the Kłodzko Land. Three areas were selected for detailed analyses.

1. The Piotrówka River catchment. Fractured-karst medium represented by Paleozoic crystalline limestones (Krowiarki metamorphic unit).

2. The Mała Bystrzyca River catchment. Paleozoic gneisses and mica-schists representing fractured medium. Fractured-porous medium represented by Cretaceous sandstones, marles and mudstones.

3. The Nysa Kłodzka River valley, erosion structure located near Kłodzko town. Quaternary sands and gravels representing porous medium.

In order to check the calculations and assumptions detailed analyses were carried out in an experimental river catchment of the Mała Bystrzyca River. The basin was selected for the detailed analysis of changeability of renewable groundwater resources in crystalline (mountainous area) and sedimentary rocks (intra-mountain depression). The Mała Bystrzyca River catchment (8.6 km²) is situated in the western part of the Kłodzko Land in the Bystrzyckie Mountains. Research works were conducted in the period 1999–2002. A zonal variability of groundwater runoff module is observed in the Mała Bystrzyca River catchment. In the southern and southwest part of the basin where early Paleozoic gneiss is predominant, the highest value of the module is 8.81 dm³/s·km². In the northern part of the basin, where paragneisses and mica-schists predominate the value is 6.80 dm³/s·km². In the central part of the basin, where Cretaceous marls and sandstones are dominant, the groundwater runoff is 1.91 dm³/s·km². The variable module values may suggest that the Mała Bystrzyca River is an element draining shallow groundwaters basins of weathering covers. The relation between the spring runoff (0.66 dm³/s·km²) and the total groundwater runoff (6.27 dm³/s·km²) proves that 89% of runoff is of riverbed origin and takes place along the river valley (lineal drainage). Calculations show that the depth of an active interchange in crystalline rock goes down to 100 m.

One of the methods used to estimate of groundwater resources is numerical modelling. The groundwater reservoir (erosive structure) located near Kłodzko in the Nysa Kłodzka valley was selected for the calculation of groundwater resources by hydrogeological modelling. The study area was 3.11 km². A model with two layers in steady state conditions with production wells was applied. The first layer is composed of Quaternary deposits (sands and gravels) filling the Nysa Kłodzka valley. The second layer is the crystalline basement. Based on numerical modelling, groundwater resources in this aquifer were estimated as 27.606 m³/d. The values show, that groundwater resources are formed by groundwaters that originated from south (20.3%) in river deposits and from the east (37%)

and west (27.3%) from surrounding bedrocks. A minor proportion of groundwater resources is formed by river leakage (11%) and precipitation recharge. Outflow is dominated by drainage to the Nysa Kłodzka, Bystrzyca Dusznicka and Jaskówka rivers (66.94%). Extraction by wells covers 26.5% of groundwater resources and the inflow into the model area is 6.63%.

The Piotrówka River catchment (14,49 km²), situated in the Krowiarki metamorphic unit of, was selected for groundwater resources estimation in the fractured-karst medium. This area is characterized by the occurrence of Paleozoic crystalline limestones (marbles), appearing in mica-schists. Marbles of this area are characterized by a thick net of connected fractures, about 30–50 cm in width, reaching far inside the crystalline massif. The area is strongly tectonized (Romanow fold structure). As a result of these features cause the crystalline limestones areas are the areas of exposure of waters originating from the regional circulation system whose drainage base is the Biała Łądecka and Nysa Kłodzka rivers. Carbonate rocks of the area represent a fractured-karst medium, however porous and fractured flows are additionally observed in a zone of deep-faults. Karst phenomena also developed in these rocks, as evidenced by the increased water-bearing potential.

The values of the fissure hydraulic conductivity of crystalline limestones of the study area are several times higher than the hydraulic conductivity of the rocky mass. Researches of Bocheńska *et al.*, (2002), H. Kryza (1988) and of the author show that the average value of the fissure hydraulic conductivity oscillates within the range of 7–10 m/d, attaining the maximum values of about 40 m/d.

The presence of productive karst springs is proved by the occurrence of large groundwater resources of the fractured-karst medium. Within the Piotrówka River catchment, there is one of the most efficient Sudetic springs, the “Romanowskie Spring”, which, together with nearby located four karst springs, creates a spring zone of the total spring discharge from 39 to 68.6 dm³/s, depending on the season. When taking the area of the Piotrówka River catchment for the calculations, the module of groundwater runoff is 7.61 dm³/s·km². Spring runoff from the Piotrówka River catchment is 2.83 dm³/s·km², indicating that 62.8% of groundwater participate in the riverbed flow.

A low assessment of the Sudetic groundwater resources by many hydrogeologists is due to the difficulty of groundwater exploitation in this area by the traditional hydrogeological drilling method. Many classifications of groundwater resources assume the discharge of the vertical well as the main criterion. Analysing 52 wells in 1976, Różycki (after Staško, 2002) proved that half of them were characterized by discharge rates from 1 to 5 m³/h. Discharge rates above

20 m³/h were found only in about 30% of the analyzed population.

Dynamic groundwater resources and allowed exploitation level have been evaluated in the study area. The calcula-

ted values of groundwater resources do not indicate their disposable values. In order to protect environment, disposable resources should account for approximately 50–60% of groundwater resources.