

Problem zasobów wód podziemnych

Andrzej Sadurski^{1,2}, Lech Śmietański¹

A problem of groundwater resources. Prz. Geol., 63: 1047–1052.

Abstract. The term of groundwater resources was introduced to hydrogeology from economic geology similarly to the resources of ore bodies almost hundred years ago. It results years ago from the needs of physical planning, investment in new water intakes and water management. Discussion on the groundwater resources was started in the past after new method of their evaluation, e.g. analytical approaches, physical and then numerical modeling techniques implementation. The ecological aspects of water demands obliges to introduce new idea of quantities of groundwater resources estimation. This idea is also presented in the Water Framework Directive and in the water management planes in the water catchment areas.

Keywords: groundwater resources, water resources estimation, groundwater flow modeling

Wody podziemne, będąc w ruchu, wyróżniają się cechą odnawialności. Do obliczania zasobów tych wód stosuje się przeważnie inne metody niż te, które znajdują zastosowanie w dokumentowaniu ilościowym nieodnawialnych zasobów kopalin stałych, ciekłych typu ropy naftowej lub gazowych – gaz ziemny.

Według słownika hydrogeologicznego (2002) termin „zasoby wód podziemnych” to ilość wód podziemnych traktowanych jako surowiec, wyrażana najczęściej w jednostkach objętościowych na jednostkę czasu, zawarta w zbiorniku wód podziemnych, zlewni podziemnej lub innej jednostce hydrogeologicznej. Ocena ilościowa i jakościowa tych zasobów jest dokonywana dla określonego czasu i na podstawie danych z okresu wieloletniego.

Ocena zasobów wód podziemnych jest tą częścią działalności praktycznej, z którą hydrogeolog spotyka się najczęściej i której dokonanie jest zwykle efektem przeprowadzonych badań i rozpoznania hydrogeologicznego.

W ustawie Prawo geologiczne i górnicze (2011, z późn. zm.) określono jako obowiązujące w kraju dwa rodzaje zasobów wód podziemnych: dyspozycyjne, ustalone dla danego obszaru, oraz eksploatacyjne, ustalone dla ujęć wód podziemnych. Zgodnie z tą ustawą zasoby dyspozycyjne wód podziemnych to ilość wody podziemnej możliwej do zagospodarowania w określonych warunkach środowiskowych i hydrogeologicznych, bez wskazywania lokalizacji i warunków techniczno-ekonomicznych ujęć, stanowiącej część dyspozycyjnych ogólnych zasobów wodnych obszaru.

Ramowa dyrektywa wodna UE, nazywana także polityką wspólnotową w zakresie gospodarki wodnej, której głównym celem jest utrzymanie i ewentualna poprawa stanu wód w jednolitych częściach wód podziemnych (JCWPd), zawiera termin „zasoby dostępne do zagospodarowania”. Odpowiadają one definicji zasobów dyspozycyjnych. W Ramowej dyrektywie wodnej przyjęto jako naczelną zasadę, że zarządzanie zasobami wodnymi jest realizowane w granicach obszarów hydrograficznych (dorzecza, zlewnie rzeczne). Rejony wyznaczonych w latach 2001–2004 zintegrowanych JCWPd pokrywają się ze zlewniami rzek. Można przyjąć założenie, że duża zlewnia

rzeczna jest w przybliżeniu zgodna ze zlewnią podziemną. Dla obszaru zlewni istnieją bowiem dane meteorologiczne i hydrologiczne z okresów wieloletnich, ponadto dla większości zlewni i rejonów wodno-gospodarczych istnieją dokumentacje hydrogeologiczne, zawierające oceny zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych. Ocena zasobów wód podziemnych w zlewni rzeki wymaga rozwiązania kilku podstawowych kwestii:

– w jaki sposób powiązać bezpośrednio na modelu matematycznym wartość odpływu podziemnego z rozkładem zasobów odnawialnych?

– jaką część zasobów odnawialnych zlewni rzeki przeznaczyć na zasoby dyspozycyjne?

– jak obliczyć rozkład zasobów dyspozycyjnych, żeby w wyniku ich poboru nie nastąpił spadek przepływu w rzece poniżej tzw. przepływu nienaruszalnego?

– jak w procesie generowania rozkładu zasobów dyspozycyjnych uwzględnić obszary perspektywiczne dla lokalizacji ujęć, takie jak główne zbiorniki wód podziemnych (GZWP), a jednocześnie wyeliminować na modelu pobór tych zasobów z terenów o niekorzystnych warunkach hydrogeologicznych?

Właściwe oszacowanie zasobów dyspozycyjnych jest punktem wyjścia dla pozostałych rodzajów hydrogeologicznych ocen zasobowych, nie tylko wód zwykłych lecz również zasobów odnawialnych wód leczniczych i termalnych.

Obowiązujące aktualnie dwa rodzaje zasobów wód podziemnych: dyspozycyjne, które ustala się w toku badań regionalnych, oraz eksploatacyjne, dokumentowane dla poszczególnych ujęć, zostały wprowadzone ustawą Prawo geologiczne i górnicze z dnia 9 czerwca 2011 r.

RODZAJE ZASOBÓW WÓD PODZIEMNYCH

Podobnie jak w innych dziedzinach naukowych, które systematyzują zbiór swoich podstawowych pojęć, również w hydrogeologii zaistniała potrzeba stworzenia, niezależnie od prawnych uregulowań, klasyfikacji zasobów wód podziemnych.

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; andrzej.sadurski@pgi.gov.pl, lech.smietański@pgi.gov.pl.

² Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Lwowska 1, 87-100 Toruń; andrzej.sadurski@umk.pl.

W ujęciu historycznym światowe klasyfikacje zasobów wód podziemnych są oparte na podziale trójdzielnym, który, jak zauważa Szymanko (1980), na ogół pokrywa się ze stosowanym w Polsce podziałem na zasoby: statyczne, dynamiczne i eksploatacyjne. Taki podział stosują np.: Tolman (1937), Todd (1959), Bindeman & Jazwin (1970), Castany (1972), Pleczyński & Przybyłek (1974), Szymanko (1980), Wiczysty (1982), Pazdro (1983), Pazdro & Kozerski (1990), Paczyński i in. (1996), a także Dąbrowski & Przybyłek (2012).

Trzy wymienione wyżej rodzaje zasobów nie wyczerpują inwentarza pojęciowego w zakresie hydrogeologicznej terminologii zasobowej. W ujęciu podręcznikowym – Pazdro (1964, 1983), Wiczysty (1982), Pazdro & Kozerski (1990), w Poradniku hydrogeologa (1971) i w Słowniku hydrogeologicznym (Dowgiałło i in., 2002) występują w odniesieniu do wód podziemnych także definicje zasobów: naturalnych, sztucznych, sprężystych, stałych, zmiennych, regionalnych i wzbudzonych. Są one powszechnie znane, dlatego nie będą cytowane w tym artykule.

W ostatnim okresie pojawiło się jeszcze dodatkowo pojęcie „perspektywicznych zasobów wód podziemnych”, rozumianych jako zasoby ustalane orientacyjnie dla danego obszaru, dla którego nie przeprowadzono jeszcze formalnej oceny zasobów dyspozycyjnych (Herbich, 2005).

Burzyński i Sadurski (1995) uważają, że istniejąca w kraju klasyfikacja zasobów wód podziemnych jest bardzo rozbudowana pod względem formalnym i jest mało precyzyjna. Termin „zasoby” obejmuje zarówno objętości wód naturalnie powstałych będących w spoczynku, jak i w stanie przepływu sztucznie zwiększonych, np. przez wymuszoną infiltrację, i dopływających do ujęć z obszarów zdepresjonowanych wskutek eksploatacji. Ci sami autorzy wyrażają pogląd, że do zasobów dyspozycyjnych, czyli wód tzw. strefy aktywnej wymiany, jest właściwe użycie nazw: zasoby przewidywane, szacunkowe i gwarantowane. Ostatni termin byłby zastrzeżony dla jednostek, w których rozpoznanie i bieżące obserwacje pozwalają zastosować modele symulacyjne, deterministyczne o stałym działaniu. Jeżeli parametry systemu wodonośnego są jedynie przybliżone lub znane tylko w części systemu, to obliczenia można uważać jedynie za szacunkowe. Zasoby przewidywane, pojęciowo odpowiadające perspektywnym zasobom wg Herbicha (2005), wynikałyby z przybliżonych obliczeń analitycznych, zakładających izotropowe ośrodki wodonośne o uśrednionych parametrach i średnie z wielolecia wskaźniki hydrologiczne.

Najważniejszą z punktu widzenia ocen zasobów dyspozycyjnych cechą zbiorników wód podziemnych jest odnawialność ich zasobów. W Słowniku hydrogeologicznym (Dowgiałło i in., 2002) wyjaśniono, że odnawialność to warunki uzupełniania zasobów wód podziemnych określonego zbiornika drogą naturalnej infiltracji w miejsce ich ubytku na skutek drenażu naturalnego i sztucznego. Naszym zdaniem odnawialność to raczej proces uzupełniania ubytków w zasobach danego zbiornika wód podziemnych. Z odnawialnością jest wprost związana wielkość zasobów odnawialnych, które można rozumieć jako odpływ ze stref drenażowych dla średniego stanu wód w systemie wodonośnym (Szymanko, 1980; Pleczyński, 1981). Termin „system wodonośny” jest tu synonimem terminu „zbiornik wód podziemnych”.

Zdaniem Szczepańskiego (2004) więź hydrauliczna wód podziemnych i powierzchniowych wskazuje na konieczność wprowadzenia „nienaruszalnych zasobów wód podziemnych” przez analogię do przepływu nienaruszalnego rzeki. W hydrogeologii oznacza to dopuszczalne zdepresjonowanie zwierciadła wód gruntowych, ograniczenia zmian dynamiki wód podziemnych i utrzymanie stałości chemizmu wód, w następstwie ascencji wód słonych z podłoża, a także ingresji wód na wybrzeżach morskich. Celem oszacowania zasobów nienaruszalnych jest zarówno ochrona ekosystemów wodnych i terenów podmokłych objętych ochroną prawną, jak i utrzymanie wielkości zasobów eksploatacyjnych ujęć (Dąbrowski & Przybyłek, 1981).

POGLĄDY NA TEMAT ZASOBÓW DYSPOZYCYJNYCH WÓD PODZIEMNYCH

W polskiej literaturze hydrogeologicznej termin „zasoby dyspozycyjne” został użyty po raz pierwszy przez Tuszkę, który już w 1967 r. określił je jako te ilości wody, które mogą być eksploatowane ze zbiorników podziemnych lub warstw wodonośnych przez nieograniczony czas bez naruszenia ich równowagi dynamicznej. Pod pojęciem równowagi dynamicznej Tuszko rozumiał zapewne stan ustalony, w którym eksploatacja wód podziemnych w obrębie danego zbiornika jest równoważona dopływem do tego zbiornika wód z jego otoczenia.

Castany (1972) odnosi się pośrednio do zasobów wód podziemnych w rozumieniu zasobów dyspozycyjnych, zwracając uwagę na ścisły związek hydrologiczny wód powierzchniowych i podziemnych. Stwierdza on, że celem każdego programu badań i zagospodarowania wód powinno być zharmonizowanie i skoordynowanie eksploatacji wód powierzchniowych i podziemnych.

W 1979 r. swoją definicję zasobów dyspozycyjnych opublikował Szczepański, rozumiejąc je jako ilości wody w skali lokalnej lub regionalnej, możliwe do wykorzystania w określonym czasie, a których pobór nie wpłynie ujemnie na ilość i jakość ogólnych, stałych zasobów wody podziemnej. Zdaniem tego autora wielkość zasobów dyspozycyjnych nie może być utożsamiana z zasobami eksploatacyjnymi, ponieważ eksploatacja powoduje zmiany w naturalnych warunkach hydrodynamicznych.

Szymanko w publikacjach z 1977 i 1980 r. oraz w pracy z Łódzińskim (1980) zastanawia się nad relacją pomiędzy zasobami dyspozycyjnymi a zasobami eksploatacyjnymi ujęć, widząc poważny problem w jej sprecyzowaniu. Traktuje ocenę zasobów eksploatacyjnych w skali regionalnej jako zadanie maksymalizacji regionalnego poboru wody, zakładając optymalne rozmieszczenie ujęć. Szymanko (1980) stwierdza, że po zdefiniowaniu rozkładu maksymalnej dopuszczalnej depresji, maksymalne pobory użyska się przy rozmieszczeniu ujęć w regularnej siatce, np. kwadratowej na całej powierzchni systemu wodonośnego. Według Krajewskiego (1980) przez zasoby dyspozycyjne poziomów wodonośnych znajdujących się w związku hydraulicznym z wodami powierzchniowymi należy rozumieć zasoby odnawialne pomniejszone o odpływ podziemny, zapewniający przepływ nienaruszalny rzeki, który zabezpiecza w niej życie biologiczne i inne walory środowiska. Autor ten dodaje, że powyższa definicja nie dotyczy

niecek artezyjskich i innych form głębokiego występowania wód podziemnych, gdzie nie ma ich związku z wodami powierzchniowymi. Taką samą definicję zasobów dyspozycyjnych podaje Bieniaszewska (1980).

Macioszczyk i Kazimierski (1990) widzą ocenę zasobów wód podziemnych jako proces optymalizacji bilansu wód podziemnych jednostki hydrogeologicznej z maksymalizacją poboru tych wód, z zachowaniem ograniczeń technicznych i przyrodniczo-ekologicznych. Gdy struktura poboru wód podziemnych nie jest rozpoznana, procedurę optymalizacyjną należy opierać według nich tylko na zaproponowanej wariantowo strukturze poboru, a zasoby tak określone traktować można jako zasoby dyspozycyjne regionalnego systemu wodonośnego.

Paczyński (1995) podkreśla ścisły związek pomiędzy zasobami odnawialnymi a zasobami dyspozycyjnymi wód podziemnych, uważając, że te pierwsze stanowią o wiarygodności oraz trwałości zasobów dyspozycyjnych, ich pozycji w bilansie wodnym, a pośrednio środowiskowych skutkach ich poboru. Ilościowa charakterystyka zasilania wód podziemnych integralnie wiąże się według niego z symulacją modelową zasobów dyspozycyjnych i eksploatacyjnych. Stwierdza także, że wiarygodność ocen wynika ze stopnia rozpoznania warunków hydrogeologicznych, metod interpretacji, prawidłowości przyjętych założeń i poprawności całego procesu obliczeniowego.

Witczak i in. (2001) traktują zasoby dyspozycyjne wód podziemnych w zlewniach rzek o przepływie limitowanym przez odpływ podziemny jako część całkowitych zasobów dyspozycyjnych w obszarze bilansowym, tj. łącznych zasobów wód powierzchniowych i podziemnych. Dla takich zlewni podstawowym kryterium oceny zasobów wód podziemnych jest według nich kryterium hydrologiczne, zgodnie z którym dyspozycyjną część zasobów wód podziemnych w obszarze stanowi różnica pomiędzy ich zasobami odnawialnymi a przepływem nienaruszalnym rzeki w profilu kontrolnym oraz kryterium intensywności wymiany wód podziemnych. Ustalane zasoby dyspozycyjne wód podziemnych wymagają według nich okresowej weryfikacji.

Zdaniem Prażaka (2001) hydrogeologiczne uwarunkowania możliwości poboru wód podziemnych i zapotrzebowanie na wodę w obszarach bilansowych są najczęściej zróżnicowane. Obok terenów zasobnych w wodę mogą występować również rejony pozbawione jakichkolwiek użytkowych poziomów wodonośnych. Różna jest też jakość wody i stopień jej zagrożenia. W części obszarów występują ponadto tereny prawnie chronione przed zmianami warunków wodnych. To wszystko powoduje, że zasoby dyspozycyjne wód podziemnych są rozłożone najczęściej bardzo nierównomiernie. Zadaniem hydrogeologa jest więc wykazanie zróżnicowania w możliwości korzystania z nich w mniejszych rejonach, wydzielonych wewnątrz obszaru bilansowego.

Istotą zróżnicowania zasobów dyspozycyjnych w obszarach bilansowych powinna być szczegółowa analiza, najlepiej na modelu hydrogeologicznym, możliwości ich zagospodarowania, uwzględniająca zmienne warunki hydrodynamiczne oraz istniejący stan eksploatacji wód podziemnych, stan chemiczny i ilościowy wód oraz przewidywane zapotrzebowanie na wodę. Według Prażaka

(2001) wszelkie inne szacunki oderwane od potrzeb gospodarczych danego terenu mogą być jedynie wskaźnikiem określającym średnie rozłożenie omawianych zasobów w obszarze bilansowym.

Kleczkowski (2002) wyraża pogląd, że pojęcie zasobów dyspozycyjnych użytkowych wód powierzchniowych i podziemnych łączy się bezpośrednio z odpływem. Odpływ dzieli on na powierzchniowy i podpowierzchniowy, w którego obrębie wyróżnia jeszcze przypowierzchniowy i podziemny. Odpływ rzeczny, którego stabilność jest związana z odpływem podziemnym, to według niego wyznacznik tych zasobów.

Herbich (2002) proponuje ustalanie zasobów dyspozycyjnych gwarantowanych z uwzględnieniem zasilania średniego w sekwencji lat o przewadze warunków posusznych oraz zasobów dyspozycyjnych prognozowanych z uwzględnieniem zasilania średniego dla wielolecia hydrologicznie normalnego.

W hydrogeologicznej literaturze anglojęzycznej odpowiednikiem polskiego terminu „zasoby dyspozycyjne” jest termin *safe yield* lub *basin safe yield*, co oznacza bezpieczny wydatek z jednostki hydrogeologicznej lub zlewni, ale również może się odnosić do zasobów eksploatacyjnych ujęć. Zamieszczone niżej poglądy cytują Domenico i Schwartz (1997).

Termin *safe yield* został zdefiniowany w Stanach Zjednoczonych już w 1915 r. przez Lee jako „graniczna ilość wody, która może być eksploatowana jednostajnie i nieprzerwanie bez niebezpiecznego umniejszenia zgromadzonych rezerw”. Conkling (1946) próbował uczynić tę definicję bardziej jednoznaczna, wyznaczając warunki, jakie według niego powinien spełniać *safe yield*. Określił on ten termin jako roczny pobór wody podziemnej, który:

- nie przekracza średniego rocznego zasilania;
- nie obniża zwierciadła wody podziemnej do głębokości, przy której koszty pompowania są zbyt duże;
- nie obniża zwierciadła wody podziemnej do głębokości umożliwiającej intruzję wody o niepożądanym jakości.

Freeze (1971) przedstawił koncepcję maksymalnego stabilnego wydatku (*maximum stable basin yield*) z jednostki hydrogeologicznej lub zlewni, określonego na podstawie trójwymiarowego numerycznego modelu dla warunków o zmiennym nasyceniu, czyli z uwzględnieniem strefy aeracji. Domenico i Schwartz (1997), uważając tę koncepcję za dobrą, stwierdzili, że określenie na jej podstawie wielkości tego wydatku nie jest prostym zadaniem.

Ramowa Dyrektywa Wodna Unii Europejskiej (2000) podaje ogólną definicję zasobów dyspozycyjnych jako różnicę pomiędzy zasobami odnawialnymi systemu wód podziemnych a wielkością nienaruszalnych przepływów rzecznych.

PRZEGLĄD METOD OCENY ZASOBÓW DYSPOZYCYJNYCH WÓD PODZIEMNYCH

Według poradnika metodycznego „Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych” (Mitręga, 1996) do metody przybliżonej, wskaźnikowej oceny zasobów wód podziemnych, będącej miarą wielkości zasobów dyspozycyjnych, należą:

1. Metoda oceny efektywnego zasilania infiltracyjnego wód podziemnych, polegająca na uzależnieniu tego zasilania od wskaźników opadu i infiltracji efektywnej. Sposób ten ma co najwyżej szacunkowy charakter, gdyż wskaźniki infiltracji są dobierane arbitralnie dla poszczególnych typów litologicznych utworów, z których jest zbudowana strefa przypowierzchniowa.

2. Metoda oceny odpływu podziemnego na podstawie genetycznego rozdziału hydrogramu przepływu w przekroju hydrometrycznym. Także i w tym przypadku ocena odpływu podziemnego stanowi tylko wskaźnikowe określenie wartości zasobów dyspozycyjnych, odnoszące się do powierzchni całej zlewni.

3. Metody wyznaczania wielkości zasilania wód podziemnych na podstawie analizy wahań zwierciadła wód podziemnych. Sposób ten, opierający się na pomiarach wahań zwierciadła wody w studniach reprezentatywnych, pozwala wyznaczyć jedynie wskaźnikowe wartości zasilania. Jedną z takich możliwości jest metoda Rosłowski (1948).

4. Metoda oceny odpływu podziemnego na podstawie analizy krzywych wysychania źródeł i cieków (Dębski, 1970; Wiczysty, 1982).

Inne sposoby, nie wymienione w poradniku, a również stosowane do wskaźnikowej oceny zasobów wód podziemnych, to metody analizy hydrodynamicznej i bilansu wodnego, np. metoda Wundta. W latach 70. XX w. do oceny regionalnych zasobów wód podziemnych stosowano w byłym ZSRR metodę Bindemana i Boczewiera (1964), a w Polsce Paczyńskiego (1974) i Malinowskiego (1976). W tej ostatniej istota schematu obliczeniowego sprowadzała się do rozmieszczenia na danym obszarze regularnej o kroku ΔX i ΔY , dowolnie gęstej sieci umownych (wirtualnych) studzien, włączonych równocześnie ze stałą wydajnością do eksploatacji prowadzonej w założonym okresie czasu $t = 25$ lat.

Formuła Bindemana i Boczewiera (1964) jest modelem szczyptywanym szczelnego zbiornika o powierzchni F_0 bez zasilania. Ponieważ model ten nie nadaje się do oceny regionalnych zasobów wód podziemnych w strefie ich aktywnej wymiany, formułę [1] zmodyfikowano (Paczyński, 1974; Malinowski, 1976), wprowadzając do niej moduł zasobów odnawialnych poziomu użytkowego. Wzór zastosowany do oceny regionalnych zasobów wód podziemnych dla obszaru całej Polski to:

$$Q_{eks,F} = F \cdot \left(\frac{\mu \cdot Sdop}{t} + Mz \right) \quad [1]$$

gdzie:

$Q_{eks,F}$ – zasoby danego poziomu użytkowego,
 F – powierzchnia danego poziomu użytkowego,
 $Sdop$ – depresja dopuszczalna,
 Mz – moduł zasobów odnawialnych danego poziomu użytkowego,
 μ – współczynnik odsączalności grawitacyjnej,
 t – czas eksploatacji (25 lat).

Model wyrażony tym wzorem nie uwzględnia zarówno przepływów wód w obrębie danego poziomu użytkowego, jak i pomiędzy poziomami użytkowymi w wielopoziomo-

wych strukturach hydrogeologicznych. Zakłada on bowiem, że poziomy użytkowe są od siebie w pełni odizolowane.

Żadna z wyżej przedstawionych metod, mimo iż daje wyobrażenie o odnawialności zasobów, nie stwarza podstaw do oceny zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych wprost, gdyż nie pozwala ocenić skutków hydrogeologiczno-środowiskowych poboru wody na poziomie właśnie zasobów dyspozycyjnych.

METODY MODELOWANIA PRZEPIYU WÓD PODZIEMNYCH

Możliwość oceny zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych, łącznie ze skutkami hydrogeologiczno-środowiskowymi ich poboru, daje wyłącznie zastosowanie metod modelowania matematycznego procesu filtracji wód podziemnych, co ze szczególnym natężeniem jest widoczne w Polsce w ostatnich latach. Najczęściej stosowanym na świecie narzędziem programowym do modelowania hydrogeologicznego jest amerykański program MODFLOW w licznych swoich odmianach, jak np. Visual Modflow, Groundwater Vistas, Processing Modflow czy Groundwater Modeling System.

Na Wydziale Geologii Uniwersytetu Warszawskiego zostały opracowane w latach 70. i 80. XX w. pakiety programów ANPLA i HYDRYLIB do modelowania regionalnych systemów hydrogeologicznych.

Programy wyżej wymienione, stosowane z powodzeniem do budowy modeli systemów krążenia wód podziemnych i oceny zasobów eksploatacyjnych, nie zostały wyposażone w procedury do obliczania wielkości i rozkładu zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych.

Pierwszą próbę opracowania metodyki oceny zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych podjął Michalak (2002). Przygotowana przez tego autora metodyka PDE (Prze-strzeń Dopuszczalnych Eksploatacji), zrealizowana w napisanym przez niego obiektowym systemie ASPAR (Michalak, 1984), przeznaczonym do budowy modeli hydrodynamicznych w hydrogeologii, została oparta na procedurze optymalizacyjnej. Dawała ona dla modelu jednowarstwowego wielkość i rozkład zasobów dyspozycyjnych na podstawie zdefiniowanego, dopuszczalnego obniżenia zwierciadła wody podziemnej. W metodyce PDE zasoby odnawialne nie są punktem wyjścia do oceny zasobów dyspozycyjnych. Ocena zasobów odnawialnych ma tu znaczenie podstawowe i na niej powinny się opierać wszelkie szacunki zasobów dyspozycyjnych.

Bezpośrednie powiązanie w procesie obliczeniowym oceny zasobów dyspozycyjnych z zasobami odnawialnymi przedstawia metoda przekształcenia stałoobjętościowego (Śmietański, 2006, 2014).

W sensie matematycznym przekształcenie stałoobjętościowe zmienia kształt danej powierzchni, będącej na przykład geometrycznym obrazem rozkładu określonej wielkości fizycznej, nie zmieniając objętości bryły ograniczonej tą powierzchnią. Objętość jest niezmiennikiem tego przekształcenia. Sterowanie modyfikacją kształtu tej powierzchni jest realizowane z użyciem czynników wagowych. Ogólna postać przekształcenia stałoobjętościowego wyraża formuła [2]:

$$H(x, y) = \frac{\left(\prod_{i=1}^N W_i(x, y) \right) \cdot \int_{\Omega} M(x, y)}{\int_{\Omega} \left(\left(\prod_{i=1}^N W_i(x, y) \right) \cdot M(x, y) \right)} \quad [2]$$

gdzie:

$H(x, y)$ – powierzchnia przekształcona,
 $M(x, y)$ – powierzchnia do przekształcenia,
 $W_i(x, y)$ – i-ty czynnik wagowy,
 N – liczba czynników wagowych,
 Ω – obszar przekształcenia,
 (x, y) – współrzędne punktu, należącego do Ω , w którym jest obliczane przekształcenie.

Pierwszym etapem procesu ustalania zasobów dyspozycyjnych w obszarze bilansowym przy użyciu tej metody jest ocena odnawialności zasobów wód podziemnych. Wielkość tej odnawialności jest określona wartością średniego z wielolecia odpływu podziemnego do rzek, który jest przyjmowany jako równy średniemu z wielolecia przepływowi niskiemu (SNQ) w rzekach (Jokiel, 1994). Wartość SNQ, będąca wynikiem pomiarów hydrologicznych, jest punktem wyjściowym w procesie oceny zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych z zastosowaniem tej metody. Utożsamiając odnawialność z efektywnym zasilaniem infiltracyjnym, sposób przekształcenia stałoobjętościowego pozwala oszacować rozkład tego zasilania w granicach danego obszaru bilansowego. Czynniki wagowymi sterującymi rozkładem zasilania są tu głównie litologia utworów powierzchniowych i rozkład średniej z wielolecia wysokości opadów.

Drugim etapem ustalania zasobów dyspozycyjnych jest budowa modelu matematycznego przepływu wód podziemnych, w którym oszacowany rozkład zasilania, równy odpływowi podziemnemu do rzek, jest warunkiem brzegowym. Na tym etapie są definiowane kryteria oceny zasobów dyspozycyjnych oraz czynniki wagowe sterujące ich rozkładem. Takimi czynnikami wagowymi są na przykład obszary Natura 2000 czy rejon o korzystnych warunkach do budowy nowych ujęć. Metodą kolejnych przybliżeń ustala się, jaką część zasobów odnawialnych stanowią zasoby dyspozycyjne oraz w jakiej proporcji te ostatnie są rozdzielone pomiędzy modelowane warstwy wodonośne. Rozkład zasobów dyspozycyjnych w poszczególnych warstwach wodonośnych modelu jest obliczany algorytmem przekształcenia stałoobjętościowego.

PODSUMOWANIE

W podsumowaniu można wyrazić przekonanie, że jedynie metoda numerycznego modelowania przepływu wód podziemnych pozwala na ocenę wielkości i rozkładu zasobów dyspozycyjnych wielowarstwowych systemów wodonośnych, na podstawie znajomości ich zasobów odnawialnych. Jest metodyką, która umożliwia dokonywanie wiarygodnych ocen zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w zlewniach rzecznych. Osadzona jest na fundamencie kryterium hydrologicznego w sensie powiązania zasobów odnawialnych i dyspozycyjnych z odpływem podziemnym oraz kryterium hydrogeologicznego,

rozumianego za Witczakiem i in. (2001) jako całokształt warunków hydrogeologicznych z uwzględnieniem zróżnicowania zagospodarowania wód podziemnych i zapotrzebowania na te wody.

Metoda przekształcenia stałoobjętościowego (Śmietański, 2006, 2010) wiąże bezpośrednio w procesie obliczeniowym zasoby dyspozycyjne z odpływem podziemnym do rzek, który jest określany na drodze pomiarów hydrologicznych.

LITERATURA

- BIENIASZEWSKA H. 1980 – Ocena zasobów dyspozycyjnych metodą hydrodynamiczną w wielopoziomowych seriach czwartorzędowych. Symposium Współczesne Problemy Hydrogeologii Regionalnej, Jachranka.
- BINDEMAN N.N. & BOCZEWER F.M. 1964 – Regionalna ocena eksploatacyjnych zasobów presnych podziemnych wód. *Sov. Geol.*, No 1.
- BINDEMAN N.N. & JAZWIN. L.S. 1970 – Ocena eksploatacyjnych zasobów podziemnych wód. *Izd. Niedra. Moskwa.*
- BURZYŃSKI K. & SADURSKI A. 1995 – Problem zasobów wód podziemnych na przykładzie Półwyspu Helskiego. *Prz. Geol.*, 43 (3): 198–202.
- CASTANY G. 1972 – Poszukiwanie i eksploatacja wód podziemnych. *Wyd. Geol., Warszawa.*
- CONKLING H. 1946 – Utilization of groundwater storage in stream system development. *Trans. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 111: 275–305.
- DĄBROWSKI B. & PRZYBYŁEK J. 2012 – Ocena prognoz zasobów eksploatacyjnych poprzez porównanie szacunków zasobowych z wynikami długotrwałej eksploatacji ujęć wód podziemnych (stadium metodyczne). *Rozdz. 4 – Rozwój metodyki obliczania i prognozowania zasobów wód podziemnych. Bogucki Wyd. Nauk., Poznań: 32–45.*
- DĘBSKI K. 1970 – Hydrologia. *Wyd. Arkady, Warszawa.*
- DOMENICO P.A. & SCHWARTZ F.W. 1997 – Physical and Chemical Hydrogeology. *John Wiley & Sons, Inc.*
- DOWGIAŁO J., KLECZKOWSKI A.S., MACIOSZCZYK T. & RÓŻKOWSKI A. (red.) – 2002 – Słownik hydrogeologiczny. *Wyd. II. Min. Środ. Państw. Inst. Geol., Warszawa*
- FREEZE R.A. 1971 – Three-dimensional, transient, saturated-unsaturated flow in a groundwater basin. *Water Resources Res.*, 7: 347–366.
- HERBICH P. 2002 – Dokumentowanie i bilansowanie zasobów wód podziemnych w gospodarowaniu wodami. XIV Konferencja: Problemy wykorzystywania wód podziemnych w gospodarce komunalnej – gospodarowanie zasobami wód podziemnych. *Wyd. PZITS, Częstochowa: 58–67.*
- HERBICH P. 2005 – Zasoby perspektywiczne wód podziemnych – cel ustalania i metodyka obliczeń dla zlewniowych systemów wodonośnych. *Współczesne problemy hydrogeologii. Wyd. UMK, Toruń: 261–268.*
- JOKIEL P. 1994 – Zasoby, odnawialność i odpływ wód podziemnych strefy aktywnej wymiany w Polsce. *Acta Geogr. Lodz.*, 66–67.
- KLECZKOWSKI A.S. 2002 – Zasoby wód podziemnych w systemie obiegu hydrologicznego. XIV Konferencja: Problemy wykorzystywania wód podziemnych w gospodarce komunalnej – gospodarowanie zasobami wód podziemnych, Częstochowa: 1–7.
- KRAJEWSKI S. 1980 – Odnawialność a dyspozycyjność zasobów wód podziemnych kredy lubelskiej. *Mat. Symp. Współcz. Probl. Hydrogeol. Region. Jachranka.*
- LEE C.H. 1915 – The determination of safe field of underground reservoirs of the closed basin type. *Trans. Amer. Soc. Civil Engrs.*, 78: 148–151.
- MACIOSZCZYK T. & KAZIMIERSKI B. 1990 – Zasady budowy modeli systemów hydrogeologicznych dla oceny zasobów dyspozycyjnych i symulacji regionalnego ich zagospodarowania. *SGGW-AR, Warszawa.*
- MALINOWSKI J. (red). 1976 – Atlas zasobów zwykłych wód podziemnych Polski, 1 : 500 000. *Cz. I. Wyd. Inst. Geol. Warszawa.*
- MICHALAK J. 1984 – Pakiet programowy ANPLA – Przeznaczenie i ogólna organizacja. *Mat. V Konf. Modelowanie zagadnień brzegowych. Prace Inst. Biocyber. i Inż., Warszawa.*
- MICHALAK J. 1997 – Obiektowe modele w hydrogeologii, system ASPAR. *Wyd. UW Warszawa.*

- MICHALAK J. 2002 – Wyznaczanie zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych oparte na metodyce PDE. *Prz. Geol.*, 50 (10): 846–851.
- PACZYŃSKI B. 1974 – Zasoby użytkowych wód podziemnych na obszarze Polski. *Arch. Geol. Inst. Geol.*, Warszawa.
- PACZYŃSKI B. (red.) 1995 – Atlas hydrogeologiczny Polski, 1 : 500 000. Cz. II, Zasoby, jakość i ochrona zwykłych wód podziemnych. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PACZYŃSKI B., MACIOSZCZYK T., KAZIMIERSKI B. & MITRĘGA J. 1996 – Ustalanie dyspozycyjnych zasobów wód podziemnych – poradnik metodyczny. *Wyd. Geol. Państw. Inst. Geol.*, Warszawa.
- PAZDRO Z. 1964, 1983 – Hydrogeologia ogólna. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- PAZDRO Z. & KOZERSKI B. 1990 – Hydrogeologia ogólna. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- PLECZYŃSKI J. & PRZYBYŁEK J. 1974 – Problematyka dokumentowania zasobów wód podziemnych w dolinach rzek. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- PLECZYŃSKI J. 1981 – Odnawialność zasobów wód podziemnych. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- PRAWO geologiczne i górnicze, Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. *Dz. U. Nr 163, poz. 981.*
- PRAWO wodne, Ustawa z dnia 2001 r. Jednolity tekst w *Dz. U. z dnia 9 lutego 2012, poz. 145.*
- PRAŻAK J. 2001 – Uwagi w sprawie zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych. *Prz. Geol.*, 49: 219.
- RAMOWA dyrektywa wodna – Dyrektywa 2000/60/EC Parlamentu Europejskiego i Rady Wspólnoty Europejskiej z dnia 23 października 2000 r.
- ROŚLŃSKI R. 1948 – Kurs hydrogeologii. *Wyd. AGH, Kraków.*
- SZCZEPAŃSKI A. 1979 – Eksploatacyjne zasoby złóż wód podziemnych na tle schematyzacji warunków obliczeń. *Zesz. Nauk. AGH, seria Geologia*, 5 (1): 5–69.
- SZCZEPAŃSKI A., (red.), DĄBROWSKI S., GÓRSKI J., KAPUŚCIŃSKI J. & PRZYBYŁEK J. 2004 – Metodyka określania zasobów eksploatacyjnych ujęć zwykłych wód podziemnych. *Poradnik metodyczny. Wyd. Borgis, Warszawa.*
- SZYMANO J. 1980 – Koncepcje systemu wodonośnego i metod jego modelowania. *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- SZYMANO J. & ŁODZIŃSKI S. 1980 – Hydrogeologiczne problemy projektowania systemów wodno-gospodarczych. *Prz. Geol.* 28 (9): 501–511.
- ŚMIETAŃSKI L. 2006 – Studium zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych zlewni Leby w świetle badań modelowych. *Praca Dokt. Niepubl. Centr. Arch. Geol. PiG, Warszawa.*
- ŚMIETAŃSKI L. 2010 – The quantitative evaluation of the catchment available groundwater resources – the case study. *Biul. Państw. Inst. Geol.*, 441: 183–192.
- TODD D.K. 1959 – *Ground Water Hydrology.* John Wiley & Sons, New York.
- TOLMAN C.F. 1937 – *Ground Water.* New York.
- TUREK S. (red.) 1971 – *Poradnik hydrogeologa.* *Wyd. Geol.*, Warszawa.
- TUSZKO A. 1967 – *Gospodarka wodna,* *Wyd. Arkady, Warszawa.*
- WIECZYŃSKI A. 1982 – *Hydrogeologia inżynierska.* *Wyd. II. PWN. Warszawa-Kraków.*
- WITCZAK S., PRAŻAK J. & ŻUREK A. 2001 – Problemy związane z oceną zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w zlewniach rzek o przepływie limitowanym przez odpływ podziemny. *Współczesne problemy hydrogeologii.* *Wyd. WIND, Wrocław.*