

Problem zasobów odnawialnych wód podziemnych w wielowarstwowych systemach wodonośnych na przykładzie Regionu Gdańskiego

The problem of groundwater renewable resources evaluation in multi-aquifer systems base on the example of Gdansk Region

Beata Jaworska-Szulc

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska,
Katedra Geotechniki i Geologii Stosowanej, ul. Narutowicza 11/12,
80-952 Gdańsk, e-mail: bejaw@pg.gda.pl

Abstract: In multilayered aquifer systems establishing renewable resources for individual aquifers is a compound problem. The renewable-ness coming mainly from the effective infiltration is taking place directly in the first layer. However the part of these waters indirectly is powering deeper layers as a result of soaking through by semi permeable series dividing aquifers. In the article, on the basis of the regional model of the Gdańsk aquifer system, renewable resources for individual aquifer was analysed. In the Gdańsk region the groundwater appears in Cretaceous, Paleogene-Neogene and Quaternary formations. They create the multiaquifer system.

Key words: groundwater resources, numerical modeling, multi-aquifer system, groundwater flow

1. Wstęp

W wielowarstwowych systemach wodonośnych ustalenie zasobów odnawialnych dla poszczególnych poziomów jest problemem złożonym. Odnawialność pochodząca głównie z infiltracji opadów ma miejsce bezpośrednio w pierwszym poziomie wodonośnym. Jednak część tych wód pośrednio zasila poziomy głębsze wskutek przesiąkania przez słabo przepuszczalne serie rozdzielające poziomy wodonośne. W artykule na podstawie regionalnego modelu gdańskiego systemu wodonośnego przeanalizowano wielkość zasobów odnawialnych dla poszczególnych pięter wodonośnych.

2. Warunki hydrogeologiczne

Zwykle wody podziemne wstępują w gdańskim systemie wodonośnym w trzech piętrach: kredowym, paleogeńsko-neogeńskim i czwartorzędowym (ryc. 1). W spągu osadów kredy i jurze występują bardzo miąższe serie osadów słabo przepuszczalnych, oddzielające słodkie wody piętter wyżej ległych od silnie zmineralizowanych solanek mezozoiku (Kozerski, 1988).

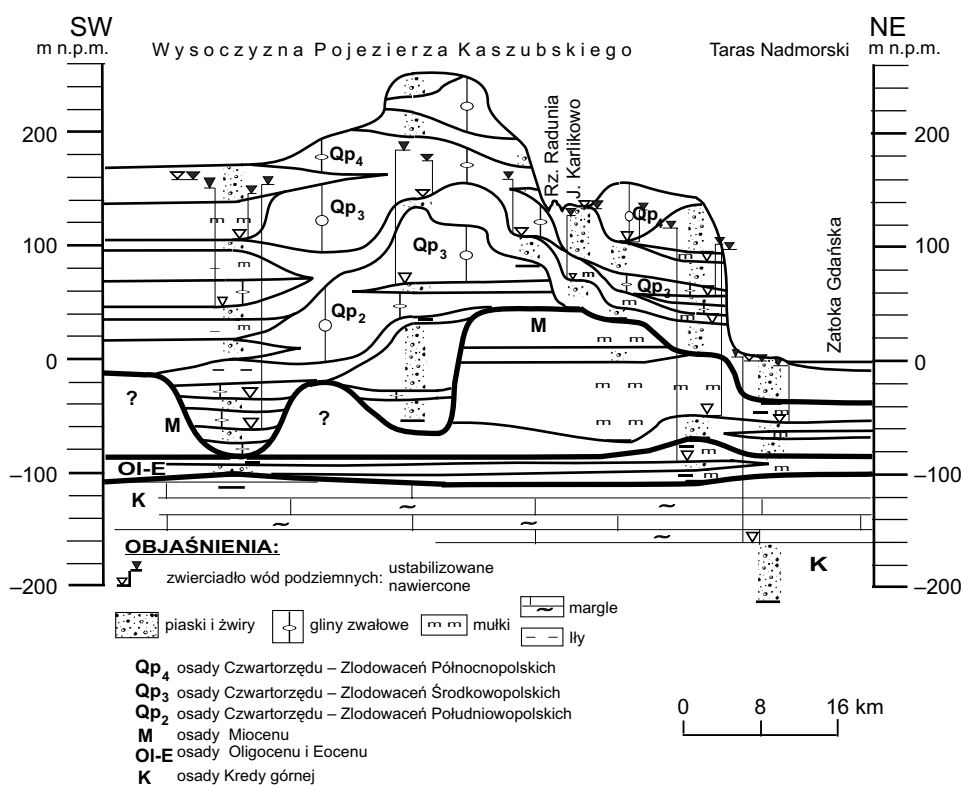
Górnokredowe piętro wodonośne, tworzące tzw. gdański zbiornik artezyjski, występuje w warstwie drobnoziarnistych piasków glaukonitowych. Strop warstwy piaszczystej nawiercono w Gdańsku na rzędnej -150 m n.p.m., na południe i południowy zachód obniża się on do -400 m n.p.m. Największa miąższość serii piaszczystej występuje w Sopocie, gdzie wynosi 150 m. W strefach brzeżnych warstwa ta osiąga miąższość zaledwie kilku metrów. Poziom piezometryczny wód piętra kredowego wahał się pierwotnie od 20 m n.p.m. na nizinach nadmorskich do ponad 140 m n.p.m. w centrum pojezierza (Sadurski, 1986). Wartości współczynnika filtracji wynoszą od $0,1$ do $0,25$ m/h.

W paleogeńsko-neogeńskim piętrze wodonośnym wydziela się poziom oligoceński i mioceneński. Obecnie w oparciu o nowsze dane stratygraficzne poziom oligoceński nazywa się oligoceńsko-eoceńskim (Jaworska-Szulc, 2005). Warstwę wodonośną tego poziomu stanowią drobno- i średnioziarniste piaski glaukonitowe, ich miąższość waha się od 5 do 30 m. Strop warstwy wodonośnej wznosi się w kierunku wschodnim od rzędnych -90 m n.p.m. na obszarze wysoczyzny do -65 m n.p.m. w Gdańsku. Pierwotnie ciśnienia piezometryczne układały się od ponad 160 m n.p.m. na wysoczyźnie do około 10 m n.p.m. na Tarasie Nadmorskim. Wartości współczynnika filtracji są zmienne i wynoszą od $0,03$ do $0,6$ m/h. Mioceneński poziom wodonośny występuje w drobnoziarnistych piaskach, których strop układa się na wysoczyźnie na rzędnych $20-60$ m n.p.m., a na nizinach nadmorskich obniża się nawet do -40 m n.p.m. Miąższość osadów waha się od 20 do 40 m. Mioceneńska warstwa wodonośna ma lokalnie bezpośrednią więź hydrauliczną z dolną warstwą czwartorzędowego piętra wodonośnego (Bralczyk i in., 1997).

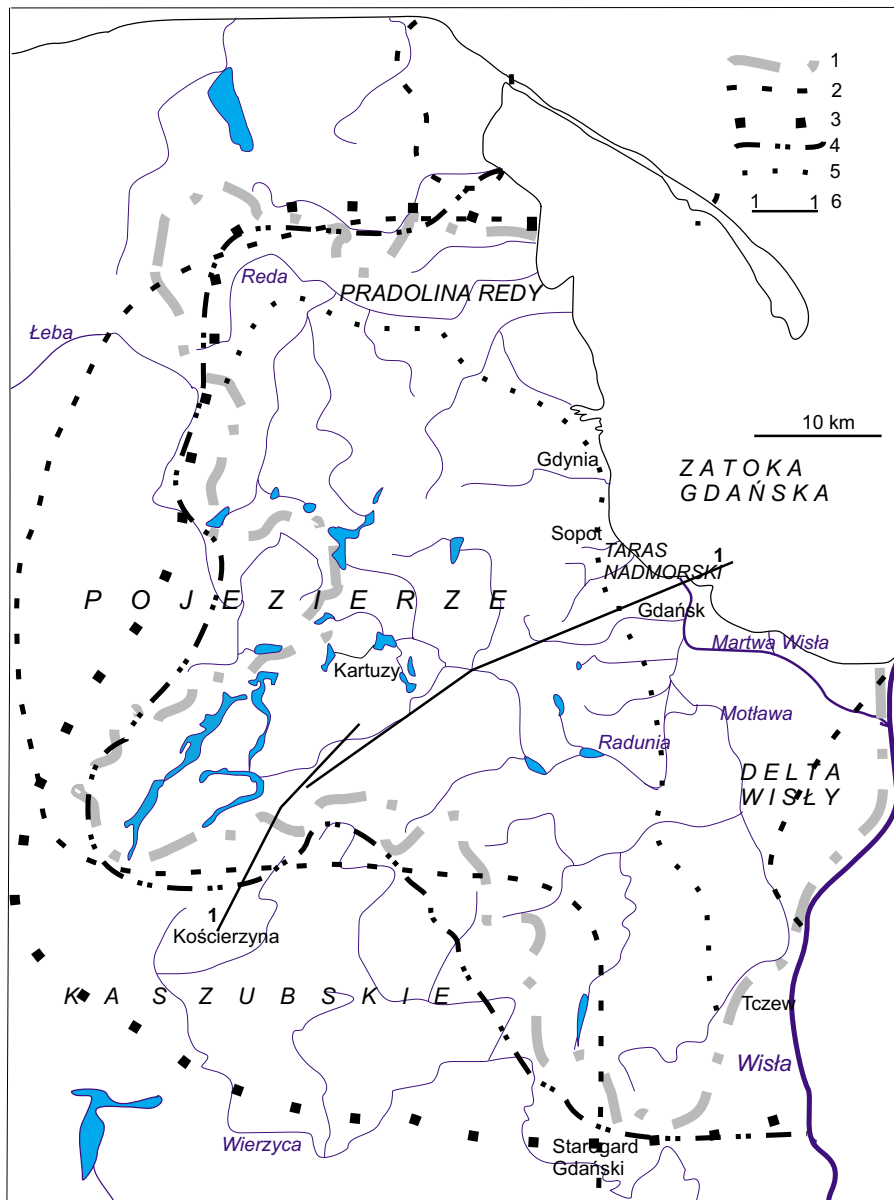
W czwartorzędowym piętrze wodonośnym wydziela się poziom górny i dolny. Dolny poziom wodonośny zbudowany jest z utworów piaszczystych zlodowaceń środkowopolskich i południowopolskich. Strop tych utworów występuje na wysoczyźnie na rzędnych od 60 do 40 m n.p.m., a na tarasie od 0 do -5 m n.p.m., ich miąższość wynosi od 20 m do około 50 m. Z uwagi na kontakt z poziomem mioceneńskim wraz z nim tworzy czwartorzędowo-mioceneński poziom wodonośny. Rozprze-strzenia się on na wysoczyźnie Pojezierza Kaszubskiego, Tarasie Nadmorskim, Pradolinie Redy oraz w delcie Wisły. Na Pojezierzu Kaszubskim jego miąższość waha się od kilkunastu do kilkudziesięciu metrów, a w pogrzebanych dolinach dochodzić może do 80 m, wartości współczynnika filtracji wynoszą od $0,5$ m/h do $1,5$ m/h. Zwierciadło wody w centralnej części pojezierza stabilizuje się na rzędnych około 170 m n.p.m., wzdłuż krawędzi wysoczyzny na rzędnych około 20 m n.p.m., natomiast na obszarze pradoliny od 0 do 10 m n.p.m., a w linii brzegowej układało się pierwotnie około 2 m n.p.m. (Kozerski, 1986). Wartości współczynnika filtracji na

tarasie i w delcie Wisły zwykle przekraczają 2 m/h, a w Pradolinie Redy wynoszą od 1 do 6 m/h. Górny czwartorzędowy poziom wodonośny występuje wyłącznie na wysoczyźnie. Nie ma on charakteru ciągłego, miąższość warstwy wodonośnej waha się od kilku do kilkunastu metrów, miejscami może sięgać 40 m. Zwierciadło wody występuje na rzędnych od około 160 m n.p.m. w zachodniej części wysoczyzny do około 80 m n.p.m. na wschodzie. Wartości współczynnika filtracji średnio wynoszą 0,5 m/h. Na niewielkich połaciach poziom ten pozostaje w więzi hydraulicznej z niżej ległym czwartorzędowo-miocenijskim poziomem wodonośnym.

W tak wyodrębnionym systemie wodonośnym przepływ wód podziemnych odbywa się z obszaru zasilania, jakim jest wysoczyzna Pojezierza Kaszubskiego, do obszaru drenażu na nizinach nadmorskich i pod dnem Zatoki Gdańskiej (ryc. 2). Na wysoczyźnie głębsze piętra zasilane są przez przesiąkanie z piętra czwartorzędowego, a na obszarze drenażu występuje ascenzja z piętra oligocenijsko-eocenijskiego i kredowego do czwartorzędowego.



Ryc. 1. Schematyczny przekrój hydrogeologiczny
 Fig. 1. The hydrogeological cross section



Ryc. 2 Zasięg gdańskiego systemu wodonośnego

1 – wododział wód powierzchniowych I rzędu; 2 – zasięg występowania wód podziemnych w utworach kredy górnej; 3 – przybliżony wododział wód podziemnych w utworach paleogenu i neogenu; 4 – przybliżony wododział wód podziemnych w utworach czwartorzędu (wg Paczyński, 1993); 5 – linia krawędzi wysoczyzny Pojezierza Kaszubskiego; 6 – linia przekroju hydrogeologicznego (ryc. 1)

Fig. 2. Reach of the Gdansk aquifer system

1 – watershed of surface waters; 2 – reach of the Cretaceous aquifer; 3 – watershed of Paleogene-Neogene aquifer; 4 – watershed of Quaternary aquifer; 5 – the edge of Kashubian Lake District; 6 – cross-section line (Fig. 1)

3. Badania modelowe

Model numeryczny oparto na koncepcji modelu hydrogeologicznego przedstawionej powyżej. Zasięg systemu wyznacza wododział I rzędu zlewni Morza Bałtyckiego oraz wododziały pomiędzy rzekami Radunią i Redą a Łebą i Wierzycą. Tak przyjęta granica jest bardzo zbliżona do wododziału wód podziemnych w piętrze czwartorzędowym oraz nawiązuje do wododziału w piętrze paleogeńsko-neogeńskim i zasięgu występowania piętra kredowego (ryc. 2). Potwierdza to, że wody tych pięter na Wysoczyźnie Pojezierza Kaszubskiego i nizinach nadmorskich stanowią jeden system wodonośny. Łącznie badaniami objęto obszar o powierzchni 2800 km². Model ma zatem charakter regionalny, wykonano go w skali 1:50 000.

Dyskretyzacji obszaru dokonano siatką kwadratową o długości boku 200 m. W każdej warstwie jest 70 tysięcy komórek obliczeniowych. Schematyzacji warunków hydrogeologicznych dokonano w oparciu o dane z 1712 uznanych za reprezentatywne otworów bazy „Hydro”. Łącznie w modelu gdańskiego systemu wodonośnego uwzględniono 4 poziomy wodonośne: górny czwartorzędowy, czwartorzędowo-miocencki, oligocencko-eocencki oraz kredowy, a także 4 słabo przepuszczalne warstwy je rozdzielające.

System zasilany jest głównie na drodze infiltracji opadów. Średnie roczne wysokości opadu są bardzo zróżnicowane i wynoszą od ponad 830 mm/rok do 530 mm/rok. Wartości współczynnika infiltracji efektywnej zadano w oparciu o wytyczne Kozerskiego i Pazdro (1990), uwzględniając wysokość opadu, przepuszczalność utworów powierzchniowych oraz zagospodarowanie terenu. Przyjęte wstępnie wartości współczynnika infiltracji kalibrowano w procesie identyfikacji modelu. Ostatecznie przyjęto wielkości przedstawione w tabeli 1.

W procesie identyfikacji modelu kalibrowano również wartości współczynników filtracji poziomej warstw wodonośnych oraz filtracji pionowej warstw słabo przepuszczalnych. Ostatecznie uzyskano rozwiązanie, w którym wartości błędu średniego absolutnego zwierciadła wody wynoszą w poszczególnych poziomach: Q₁ – 1,87 m, Q₂-M – 0,91 m, Ol-E – 1,16 m, K – 0,81 m. Wiarygodność modelu zo-

Tabela 1. Przyjęte do modelu wartości współczynnika infiltracji efektywnej

Table 1. Values of effective infiltration coefficient assumed for modeling

Utwory przypowierzchniowe	Zagospodarowanie terenu	Wskaźnik infiltracji efektywnej
przepuszczalne	obszary rolnicze, łąki	0,32
	lasy	0,27
	obszary zabudowane	0,24
półprzepuszczalne	obszary rolnicze, łąki	0,20
	lasy	0,15
	obszary zabudowane	0,11
nieprzepuszczalne	obszary rolnicze, łąki	0,05
	lasy	0,04
	obszary zabudowane	0,03

stała potwierdzona w wyniku weryfikacji na nim wyników próbnych pompowań na wszystkich większych ujęciach, uzyskano tu rozbieżności pomiędzy depresją pomierzoną i obliczoną średnio od 0,2 do 0,5 m. Również przeprowadzona analiza czułości modelu wykazała stabilność uzyskanego rozwiązania.

Do modelowania numerycznego wykorzystano program MODFLOW (McDonald, Harbaugh, 1988) wersję MODFLOW 2000 w pakiecie programów GMS 5.0 (Groundwater Modelling System).

4. Bilans przepływu oraz zasoby wód podziemnych

Gdański system wodonośny zasilany jest w 66% na drodze infiltracji opadów. Średni moduł zasilania infiltracyjnego wynosi $15,5 \text{ m}^3/\text{h km}^2$, tj. 135,8 mm/rok, co stanowi około 19,8% średniego opadu na obszarze badań. Zasoby odnawialne utożsamiane z zasilaniem infiltracyjnym (Pleczyński, 1981) wynoszą zatem dla całej analizowanej struktury hydrogeologicznej blisko 43,5 tys. m^3/h (tab. 2). Infiltracja z rzek wynosi 1,8%, a z jezior 3,7% zasilania. Dopływ lateralny wód spoza obszaru systemu stanowi blisko 29% dopływu całkowitego. Odpływ wód z systemu wodonośnego to w przeważającej mierze drenaż rzek, stanowi on 57% całkowitego odpływu. Drenaż jezior wynosi 5%, a odpływ lateralny 38%, z czego 13,5% drenowana jest pod dnem Zatoki Gdańskiej. Znaczna wymiana lateralna wód podziemnych pomiędzy gdańskim systemem wodonośnym a obszarami sąsiednimi wynika

Tabela 2. Bilans przepływu wód podziemnych w gdańskim systemie wodonośnym
Table 2. Groundwater budget of Gdansk aquifer system

Przepływy m^3/h	Poziom wodonośny				Razem
	Q_1	Q_2-M	Ol-E	K	
Infiltracja opadów	32682,4	10745,3			43427,7
Infiltracja jezior	2425,0				2425,0
Infiltracja rzek	641,9	545,2			1187,1
Dopływ lateralny	8900,1	8099,5	1284,5	874,2	19158,3
			Razem dopływ (zasilanie):		66198,1
Drenaż rzek	4077,6	33878			37955,6
Drenaż jezior	3150,6	302,1			3452,7
Odpływ do Zat. Gdańskiej i Puckiej		6765	382,4	1594,3	8741,7
Odpływ lateralny	579,4	7069,7	6384,3	2015,3	16048,7
			Razem odpływ:		66198,7
Przepływy między poziomami:					
Descenzja		37092 ⇔ 16894,5 ⇔ 6478,6			60465,1
Ascenzja		250 ⇔ 8676,5 ⇔ 3743,3			12669,8
Razem:					
Dopływ do poziomu wodonośnego	44899,4	65158,5	21922,3	7352,8	139333,0
Odpływ z poziomu wodonośnego	44899,6	65159,3	21921,8	7352,9	139333,6

z tego, że wododział wód podziemnych nie pokrywa się w poszczególnych poziomach wodonośnych (ryc. 2). Granice systemu wyznaczono w oparciu o wododział powierzchniowy, który jest najbardziej zbliżony do wododziału wód w piętrze czwartorzędowym.

Oprócz opisanych powyżej składników zewnętrznego zasilania systemu wodonośnego i jego drenażu, istotną rolę odgrywają przepływy pionowe pomiędzy warstwami wodonośnymi. Są to przepływy wewnętrzne, nie mające wpływu na zasoby całej struktury, ale mające decydujące znaczenie dla zasobów danego piętra wodonośnego. Przepływy descenzyjne dominują w wysocynowej części systemu, a ascenzyjne na nizinach nadmorskich. Cyrkulacja pionowa została omówiona poniżej w kontekście bilansu kolejnych poziomów wodonośnych.

Pierwszy czwartorzędowy poziom wodonośny zasilany jest głównie poprzez infiltrację opadu, która stanowi tu prawie 73% dopływu całkowitego do tej warstwy. Średni moduł zasilania infiltracyjnego wynosi $19,4 \text{ m}^3/\text{h km}^2$, tj. 170 mm/rok, zasoby odnawialne wynoszą zatem 32,7 tys. m^3/h . Dopływ lateralny stanowi 19,5%, a infiltracja jezior to 5,5% zasilania. Wody górnego czwartorzędowego poziomu wodonośnego intensywnie zasilają niżej legły czwartorzędowo-mioceniński poziom wodonośny. Przepływ descenzyjny stanowi aż 82,5% odpływu z warstwy górnej. Odbywa się on na drodze przesiąkania poprzez słabo przepuszczalne warstwy glin zwałowych lub w strefach bezpośredniego kontaktu tych poziomów poprzez okna hydrogeologiczne. Rzeki drenują opisywany poziom wodonośny w 9%, a jeziora w 7%. Niespełna 1,5 % wód odpływa lateralnie w kierunku zachodniej części Pojezierza Kaszubskiego.

Czwartorzędowo-mioceniński poziom wodonośny zasilany jest głównie (57%) poprzez przesiąkanie descenzyjne z poziomu górnego. Zasilanie infiltracyjne wynosi 16,5%, ma ono miejsce na obszarach, gdzie nie występuje górny poziom wodonośny, czyli w Pradolinie Redy i na nizinach nadmorskich. Moduł zasilania infiltracyjnego wynosi tu $9,7 \text{ m}^3/\text{h km}^2$, tj. 85 mm/rok. Zakładając, że przesiąkanie z poziomu górnego to pośrednie zasilanie infiltracyjne, łącznie można wówczas przyjąć, że odnawialność warstwy wynosi $17,1 \text{ m}^3/\text{h km}^2$, tj. 150 mm/rok, odpowiada to zasobom w ilości 48 tys. m^3/h . Istotną rolę w zasilaniu tego poziomu pełni również ascenja wód z niżej ległych pięter wodonośnych, wynosi ona 13% dopływu. Czwartorzędowo-mioceniński poziom wodonośny drenowany jest w 52% przez rzeki. Najważniejszą rolę pełnią tu rzeki Reda i Radunia, Motława oraz Wisła. Przepływy descenzyjne do poziomu oligoceniśko-eoceńskiego to około 26% odpływu z omawianej warstwy. Wody tego poziomu drenowane są pod dnem Zatoki Gdańskiej w 10,5%, a odpływ boczny w kierunku sąsiednich obszarów pojeziernych to łącznie 10%.

Zasilanie oligoceniśko-eoceńskiego poziomu wodonośnego to w głównej mierze przepływy pionowe z sąsiednich pięter. Ponad 77% dopływu stanowi przesiąkanie descenzyjne z poziomu czwartorzędowo-miocenińskiego, a 17% to przepływ ascenzyjny z piętra kredowego. Dopływ descenzyjny można uznać za część odnawialną zasobów tego poziomu, pochodzącą z pośredniej infiltracji opadów, wynosi on $6,6 \text{ m}^3/\text{h km}^2$, tj. 57,8 mm/rok, jest to blisko 17 tys. m^3/h . Według innych obliczeń modelowych wielkość zasilania infiltracyjnego do poziomu oligoceniś-

skiego wynosi około 50 mm/rok (Lidzbarski, Kordalski, 2001). Również w bilansie odpływów przeważają przepływy pionowe. Aż 39,5% wód tego poziomu zasila ascenzyjnie poziom czwartorzędowo-mioceni, a 29,5% przesiąka descenzyjnie do poziomu kredowego. Około 2% wód drenowanych jest pod dnem Zatoki Gdańskiej. Odpływ lateralny stanowi 29% całkowitego odpływu z omawianego poziomu. Wyraźna dysproporcja między dopływem i odpływem bocznym wynika z tego, że wododział wód podziemnych piętra oligoceni-eoceni wykracza poza obszar badań.

Kredowy poziom wodonośny zasilany jest w sposób pośredni. W 88% jest to przesiąkanie descenzyjne z wyżej leżących poziomów wodonośnych. Jeżeli przyjąć, że jest to odnawialna część zasobów tego piętra, to wynosi ona 2,6 m³/h km², czyli 22,6 mm/rok, co daje 6,5 tys. m³/h. Według Sadurskiego (1986) zasilanie poziomu kredowego wynosi od 10 mm/rok do 25 mm/rok. Na nizinach nadmorskich poziom ten w znacznym stopniu zasila młodsze warstwy wodonośne. Odpływ ascenzyjny stanowi tu około 51% odpływu. Około 22% wód drenowanych jest w Zatoce Gdańskiej i Puckiej. Odpływ boczny w kierunku sąsiednich terenów stanowi 27% odpływu.

5. Podsumowanie

Zasoby odnawialne systemu wodonośnego należy traktować jako całość. Szczególne znaczenie ma to w wielopoziomowych systemach wodonośnych, w których z bezpośredniej infiltracji należy kolejno wyodrębnić wielkości zasilania pośredniego poziomów niżej występujących. Konieczna jest tu analiza rozkładu ciśnień i określenie ascenzyjnego bądź descenzyjnego charakteru przesiąkania wód podziemnych. Przyjmowanie za część odnawialną zasobów pochodzących z zasilania infiltracyjnego w poziomach płytkich oraz pochodzących z przesiąkania descenzyjnego w poziomach głębszych powoduje uznanie tego samego zasobu dla kolejnych pięter za jego zasób odnawialny. W analizowanym przypadku zasoby odnawialne całego systemu są ponad dwukrotnie mniejsze niż zsumowane zasoby poszczególnych pięter wodonośnych. Należałoby więc w skali regionalnej ustalać zasoby odnawialne dla całych struktur hydrogeologicznych, po czym wydzielać z nich część przypadającą na poszczególne piętra wodonośne. Dodatkowo trzeba uwzględnić dynamikę całego systemu, zwłaszcza jej zmiany wywołane eksploatacją. W gdańskim systemie wodonośnym na wielkość zasobów pięter paleoceni-neoceni i kredowego ma bowiem wpływ eksploatacja poziomu czwartorzędowego, bo jej efektem jest zmniejszenie przepływu descenzyjnego do pięter głębszych.

Literatura

Bralczyk M., Jankowski M., Kwaterkiewicz A., 1997. Dokumentacja Hydrogeologiczna zasobów wód podziemnych z utworów czwartorzędowych i mioceni strefy krawędzio-

- wej Pojezierza Kaszubskiego. Przedsiębiorstwo Geologiczne POLGEOL, Zakład w Gdańsku, s. 135.
- Jaworska-Szulc B., 2005. Trzeciorzędowe poziomy wodonośne Pomorza Gdańskiego w świetle nowych poglądów na stratyografię. *Inżynieria Morska i Geotechnika R.* 26, 4/2005.
- Kozerski B., 1986. Problemy hydrogeologiczne regionu gdańskiego. W: *Rozwój regionalnych badań hydrogeologicznych w Polsce*. Wydawnictwo AGH, Kraków, s. 131–151.
- Kozerski B., 1988. Warunki występowania i eksploatacja wód podziemnych w gdańskim systemie wodonośnym. W: *Aktualne problemy hydrogeologii. Cz. I: Hydrogeologia Pobrzeża i Pomorza*. Wydawnictwo Instytutu Morskiego, Gdańsk, s. 1–20.
- McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey Open-File Report, Washington, s. 489.
- Lidzbarski M., Kordalski Z., 2001. Studium warunków zasilania i drenażu wód podziemnych na obszarze zlewni Redy i Zagórskiej Strugi. Państwowy Instytut Geologiczny, Gdańsk.
- Paczyński B. (red.), 1993. *Atlas Hydrogeologiczny Polski. Cz. I. Systemy zwykłych wód podziemnych*. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa.
- Pleczyński J., 1981. *Odnawialność wód podziemnych*. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Sadurski A., 1986. Warunki hydrogeologiczne górnokredowego basenu artezyjskiego w regionie Gdańska. W: *Rozwój regionalnych badań hydrogeologicznych w Polsce*. Wydawnictwo AGH, Kraków, s. 197–206.

