

Analityczna i modelowa ocena bezpośredniego dopływu podziemnego do Bałtyku na terytorium Polski

**The analytic and model estimation of the direct
groundwater inflow to Baltic Sea on the territory
of Poland**

Józef Kryza, Halina Kryza

Uniwersytet Wrocławski, e-mail: jkryza@ing.uni.wroc.pl

Abstract: Estimation of direct inflow of groundwater to the Baltic Sea from the territory of Poland authors at cooperation with geologists' group executed by order of the Ministry of Environments. The geological construction and hydrogeological conditions were characterised on the basis of regional elaboration and numerous publications. A hydrogeological schema was prepared for area of water supply of the water-side zone of the sea. Four main aquifers were assigned and their parameters were characterized. Along cross-section above 500 km analytic counts of direct inflow of groundwater to the Baltic Sea were executed. Forming zons of groundwater direct inflow to the Baltic Sea numeric models for four representative areas ware constructed. Obtained effects of counts of direct inflow are two methods comparable. The total value of calculated direct inflow of groundwater was removed to the Baltic Sea around 398 000 m³/d. The individual equal module was average 793 m³/d. We propose that field and modeling reasearch direct inflow to the Baltic Sea should be continued.

Key words: direct groundwater inflow, regional hydrogeology, Baltic Sea

1. Wstęp

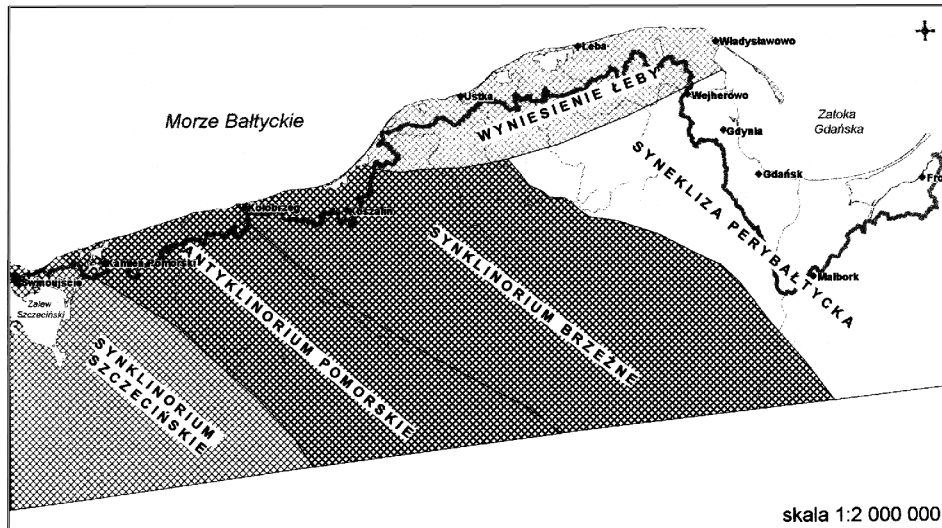
W ramach prac realizowanych na zlecenie Ministerstwa Środowiska konsorcjum IMS Wrocław i Aquator Wrocław wykonało dokumentację, której głównym zadaniem była ocena bezpośredniego dopływu wód podziemnych (SGD) do Bałtyku na terytorium Polski. Obliczenia wykonane zostały przez autorów artykułu w oparciu o obszerne studium geologiczne i hydrogeologiczne wybrzeża przygotowane przez wieloosobowy zespół hydrogeologów i projektantów. W skład tego zespołu wchodzili: M. Pruszkowska, J. Kryza, H. Kryza, B. Tomaszewski, W. Kleśta oraz A. Szlufik. Duży wkład w koncepcję i organizację prac dokumentacji wnieśli B. Kozerski i R. Koślacz.

2. Geologiczne i hydrogeologiczne uwarunkowania

Obszar objęty badaniami i dokumentowaniem znajduje się w polskiej części wybrzeża Bałtyku. Obejmuje on całe Pobrzeże Bałtyckie od wyspy Uznam po Zalew Wiślany, czyli od granicy z Niemcami po granicę z Rosją. Teren prac obejmuje nadmorskie części województw: zachodniopomorskiego, pomorskiego oraz warmińsko-mazurskiego. Obszar ten strukturalnie i hydrogeologicznie związany jest z utworami kenozoicznymi Pobrzeża Bałtyckiego oraz kredowymi i jurajskimi osadami podłoża. Wybrzeże polskiej części Bałtyku znajduje się w zasięgu kilku jednostek geologicznych zilustrowanych na rycinie 1.

Podstawowym czynnikiem różnicującym budowę geologiczną całego wybrzeża i wpływającym na warunki hydrogeologiczne bezpośredniego dopływu wód podziemnych do morza jest głębokość występowania podłoża kenozoiku. W zachodniej części jest ono położone najpłycej, na około 40–50 m, a na pozostałym obszarze leży znacznie głębiej, bo na ponad 100–300 m. Istotna dla kształtowania reżimu wód podziemnych jest bliskość morza, które stanowi obszar drenażu dla wszystkich pięter wodonośnych i systemów przepływu wód.

Rozpoznanie warunków występowania, regionalizację i charakterystykę składu chemicznego wód podziemnych wybrzeża bałtyckiego zawdzięczamy licznym pracom Kozerskiego, Sadurskiego, Lidzbarskiego, Pruszkowskiej, Kwaterkiewicza, Dowgiałły i Frączka. Poglądy szeregu innych autorów są uwzględnione w szcze-



Objaśnienia:

- granica opracowania
- granice jednostek geologiczno-strukturalnych

Ryc. 1. Badany obszar na tle jednostek geologicznych (Kryza i in., 2005)

Fig. 1. The investigated area on the background of geological units (Kryza et al., 2005)

gółowym opisie budowy geologicznej i warunków występowania wód podziemnych prezentowanym przez Pruszkowską w dokumentacji (Kryza i in., 2005). Zwykle wody podziemne na wybrzeżu występują głównie w utworach czwartorzędu i trzeciorzędu, a w zachodniej części obszaru również w osadach jury i kredy. W regionie gdańskim zwykle wody występują też w utworach kredy. Liczne dyslokacje w podłożu kenozoiku, a także duża zmienność litologiczna i nieciągłości fałdalne w osadach kenozoiku, wpływają na system krążenia wód podziemnych i są przyczyną powszechnego łączenia się różnych poziomów wodonośnych. Połączenia takie występują w zachodniej części wybrzeża pomiędzy wodami w utworach jury lub kredy i czwartorzędu oraz na całym obszarze między warstwami trzeciorzędowymi i czwartorzędowymi (ryc. 2). Często wody w utworach miocenu i czwartorzędu stanowią wspólny trzeciorzędowo-czwartorzędowy poziom wodonośny. Jurajskie piętro wodonośne występuje tylko miejscami w zachodniej części wybrzeża na głębokości 33–94 m. Miąższość przewierconych osadów wynosi zazwyczaj około 20 m. W osadach jury występują artezyjskie lub subartezyjskie wody szczelinowe. Współczynnik filtracji typowych dla jury skał mieści się w granicach 0,26–2,0 m/h, a ich przewodnictwo wodne dochodzi do 4 m²/h.

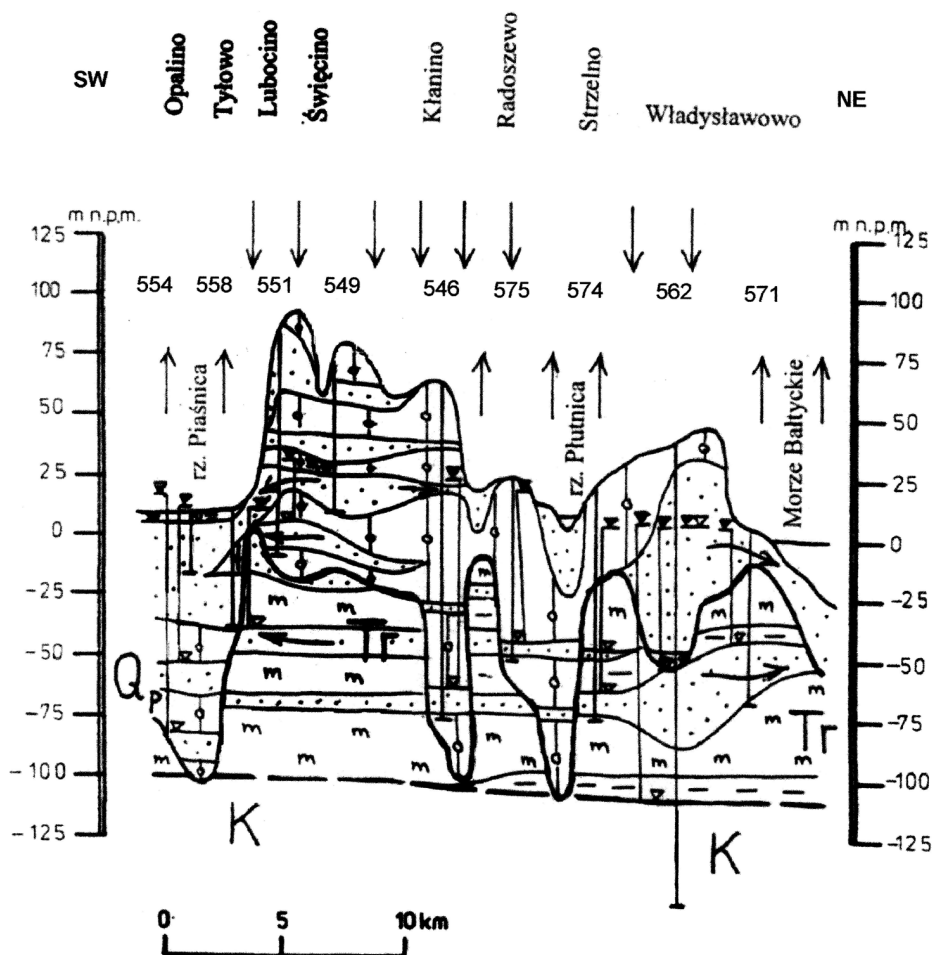
Kredowe piętro wodonośne rozciąga się od wyspy Uznam aż po rejon Gdańska, ale tylko lokalnie stwierdzono w nim występowanie zwykłych wód przydatnych do wykorzystania. Wody słodkie występują w gdańskim basenie artezyjskim będącym rozległą strukturą hydrogeologiczną obejmującą część Pojezierza Kaszubskiego i Pradoliny Kaszubskiej, Żuławy oraz Półwysep Helski. Główny poziom wodonośny kredy to drobnoziarniste piaski glaukonitowe santonu i koniaku. Strop kredy zalega przeważnie na głębokości około 180 m, a miąższość dochodzi do 100 m. Współczynnik filtracji notowany jest w przedziale 0,015–0,75 m/h, a przewodnictwo wodne nie przekracza najczęściej 25 m²/h. Podrzędnie występuje poziom wód szczelinowych w serii węglanowo-krzemionkowej kampanu i mastrychtu (głębokość 100–120 m, współczynnik filtracji 0,2–0,45 m/h).

Trzeciorzędowe piętro wodonośne reprezentowane jest przez dwa poziomy: oligoceński i mioceniński. Oligoceńskie piaski występują na głębokości 80–110 m. Charakteryzuje je miąższość 5–25 m oraz współczynnik filtracji 0,0054–0,72 m/h i przewodnictwo wodne 1–10 m²/h. Zwierciadło wody jest subartezyjskie lub artezyjskie. Dwie miocenijskie warstwy wodonośne związane są z piaskami o miąższości 10–20 m.

Warstwa dolna występuje wzdłuż wybrzeża na ogół w sposób ciągły na głębokości 70–100 m. Cechuje ją współczynnik filtracji 0,0083–2,02 m/h oraz przewodnictwo wodne 1,5–16 m²/h. Górna warstwa ma charakter nieciągły i pojawia się w elewacjach podłoża czwartorzędowego na głębokości 20–50 m. Współczynnik filtracji mieści się w przedziale 0,04–0,33 m/h, a przewodnictwo wodne dochodzi do około 40 m²/h.

Warunki występowania wód podziemnych w czwartorzędowym piętrze wodonośnym są złożone i wykazują związek z morfologią terenu. Warstwy wodonośne wykształcone są jako piaski tworzące przewarstwienia w kompleksie glin zwałowych lub piaski akumulacji rzecznej. W pasie wydym nadmorskich serie plejstocenijskie łączą się z piaskami akumulacji morskiej i eolicznej. Wydzielone zostały dwa

PRZEKRÓJ HYDROGEOLOGICZNY VI - VI'

**Objaśnienia**

	torfy	Qp - osady czwartorzędowe
	piaski i żwiry	Tr - osady trzeciorzędowe
	gliny	K - osady kredowe
	mulki	J - osady jury
	gliny	↓ rejonny zasilania
	mulki	↑ rejonny drenażu
	gliny	↪ kierunki sływu wód podziemnych
	gliny	

Ryc. 2. Przekrój geologiczny w rejonie wybrzeża Bałtyku (Kryza i in., 2005)
 Fig. 2. The Baltic coast area geological section (Kryza et al., 2005)

poziomy wodonośne: plejstocenijski oraz holocenijski. Na wysoczyznach zwierciadło wody dwóch warstw plejstocenijskich ma charakter subartycznyjski, stabilizuje się na rzędnych 40–60 do 160–180 m n.p.m. (Pojezierze Kaszubskie) i obniża się w kierunku nizin nadmorskich, gdzie jest swobodne lub lekko napięte i przyjmuje wartości rzędnych około 2 m n.p.m. Wody poziome holocenijskie mają swobodne zwierciadło układające się na rzędnej około 2 m n.p.m. na nizinach nadmorskich i 0,5–5 m n.p.m. na mierzejach.

Dolna warstwa w osadach plejstocenu występuje lokalnie, głównie w strukturach kopalnych na głębokości 30–50 m, a na wysoczyznach poniżej 100 m. Miąższość jej wynosi 15–30 m, a współczynnik filtracji 0,1–0,7 m/h oraz przewodnictwo wodne 0,5–7,1 m²/h. Górna plejstocenijska warstwa jest ciągła na prawie całym obszarze wybrzeża: głębokość 10–40 m na nizinach oraz do 50 m na wysoczyznach, miąższość 5–60 m, a współczynnik filtracji 0,04–8,3 m/h na wysoczyznach i 0,08–1,4 m/h na nizinach, przewodnictwo wodne 0,6–11,2 m²/h.

Lokalnie, na nizinach nadmorskich, górna warstwa plejstocenijska łączy się z wodonośnymi piaskami holocenu.

3. Zadania i podstawy metodyczne prac

Głównymi zadaniami dokumentacji hydrogeologicznej pasa przymorskiego było: wyznaczenie granic zbiorników wodnych, dla których akwen bałtycki jest bezpośrednią strefą drenażu; oszacowanie zasobów dynamicznych wód podziemnych bezpośrednio związanych z wodami Bałtyku oraz ustalenie warunków granicznych i zasad, które umożliwią optymalną eksploatację i ochronę wód strefy bezpośredniego spływu do Bałtyku. Wyniki studium i obliczenia bezpośrednich dopływów wód podziemnych do morza wykorzystane zostaną do: opracowania ogólnych zasad gospodarowania wodami strefy bezpośredniego spływu; opracowania wskazań co do ich monitorowania; przedstawienia wytycznych dla dalszych szczegółowych badań w aspekcie określenia warunków optymalnego korzystania z wód poszczególnych jednostek hydrogeologicznych w strefie bezpośredniego spływu oraz umożliwienia RZGW sporządzenia planów gospodarowania wodami podziemnymi w strefie przybrzeżnej Bałtyku.

W ostatnim dwudziestolecu na całym świecie zwrócono uwagę na istotne znaczenie odpływu wody podziemnej oraz zawartych w niej substancji i zanieczyszczeń bezpośrednio do wód powierzchniowych. W szeregu publikacji opisano przypadki, gdzie bezpośredni dopływ stanowił blisko 20% odpływu ogólnego i ponad 50% bilansu soli badanego akwenu. Badania strefy wymiany wód między morzem i lądem stały się ważnym elementem wielu międzynarodowych projektów (Zektser i in., 1973; Dzhamalov i in., 1977; Lee, Cherry, 1978; Woessner, Sullivan, 1984; Zektser i in., 1984). O naukowej i praktycznej potrzebie oraz perspektywach badań drenażu podmorskiego piszą szczegółowo w pracy o międzynarodowych perspektywach w sprawach podmorskiego drenażu wód podziemnych Paulsen, Smith, O'Rourke, Wong i Bokuniewicz. Drenaż wód podziemnych do przykrywających je wód powierzchniowych, określane ostatnio jako podwodny odpływ podziemny

(*Submarine Groundwater Discharge – SGD*) lub dopływ podziemny bezpośredni (*direct groundwater inflow*), stał się bardzo popularnym problemem badań hydrogeologicznych. W Internecie autorzy napotkali na kilkadziesiąt tysięcy projektów zajmujących się tą problematyką (patrz Kryza i in., 2005). Ostatnio wzmożono wysiłki nad metodycznym rozwiązaniem problemów pomiaru i oceny drenażu podwodnego (Buddemeier, 1996; Burnet i in., 2003; Working Group 112).

Osnowy badań odpływu bezpośredniego stworzył w latach 1972–73 Zektser z grupą współpracowników (Zektser i in., 1973). W latach 1978–81 Lee i Winter prowadzili pomiary i badania teoretyczne odpływu bezpośredniego. Podstawowe pojęcia i terminy z zakresu powiązań między wodami podziemnymi i wszelkimi typami wód powierzchniowych zawiera praca Schwartza i Zhanga (2002). Omówione w niej są definicje drenażu wód podziemnych przez rzeki, jeziora, błota, a zwłaszcza wybrzeża morskie. Rozwinięciem tych zagadnień jest wcześniejsza monograficzna praca Buddemeiera (1996). Wprowadzeniem terminologii do praktyki jest jej akceptacja w dziesiątkach opracowań, z których wzorcowy charakter mają publikacje nt. badań bezpośredniego drenażu z półwyspu Florydy do przybrzeżnych wód Atlantyku (USGS Raport 00–4251: Langevin, 2001, 2004; Langevin i in., 2003).

W polskiej literaturze bezpośredni dopływ podziemny do Bałtyku jest szeroko opisywany w pracach Sadurskiego (1989) i Piekarek-Jankowskiej (1994, 2003).

Głównym celem zrealizowanej dokumentacji hydrogeologicznej było oszacowanie bezpośredniego dopływu wód podziemnych z lądu do polskiej części akwenu. Obliczenia poprzedzone były identyfikacją hydrogeologicznych warunków występowania wód podziemnych i dynamiki krążenia wód podziemnych oraz stanu zagospodarowania, jakości i zagrożeń wód podziemnych w strefie przybrzeżnej. Przeprowadzono analizę przybrzeżnego systemu wodonośnego i pola hydrodynamicznego wód głębszych pobrzeża Bałtyku. Ustalono obszary podziemnych zlewni rzek uchodzących do Bałtyku oraz obszary spływu wód podziemnych do akwenu morskiego. Określono stopień wzajemnej izolacji poziomów wodonośnych przybrzeżnego systemu wodonośnego i przeprowadzono jego schematyzację hydrogeologiczną, identyfikację parametrów modelowych i odwzorowanie na modelu wybranych obszarów przybrzeżnego systemu wodonośnego. Oszacowano objętość wód podziemnych drenowanych przez akwen morski. Na podstawie analizy map geologicznych i przekrojów oraz map hydrogeologicznych w skali 1:50 000 zostały wyróżnione główne warstwy izolacyjne i okna hydrogeologiczne. Mapy i przekroje zawierają znane dotychczas i zweryfikowane na modelach parametry filtracyjne warstw wodonośnych i izolacyjnych. W oparciu o mapy i przekroje zaproponowano schematyzację hydrogeologiczną oraz identyfikację parametrów modelowych, odwzorowanie na modelach wybranych obszarów przybrzeżnego systemu wodonośnego i oszacowanie wód podziemnych drenowanych przez akwen morski. Modele numeryczne przygotowano dla czterech wybranych obszarów reprezentatywnych prezentujących charakterystyczne dla polskiej części wybrzeża Bałtyku układy drenażowe. Ostatecznie wyróżniono następujące strefy:

- obszar zatokowy – na przykładzie Zatoki Puckiej i Helu;
- wybrzeże klifowe rejonu Rozewie–Władysławowo;
- wybrzeże wydmowe z dominacją jezior i cieków przybrzeżnych (Łeba);

– wybrzeże wyspowe w rejonie Wolina.

Te cztery strefy reprezentatywne obejmują 29% linii przekrojowej wybrzeża Bałtyku w Polsce. Modele numeryczne oparte na bazie topograficznej map w skali 1:50 000 i 1:100 000 (układ wsp. 1942) zrealizowano za pomocą oprogramowania Visual MODFLOW Pro jako odwzorowania układu wielowarstwowego, quasi-przestrzennego i stacjonarnego. Na czterech wykalibrowanych modelach stref reprezentatywnych oceniono odpływ drenowany do wód powierzchniowych w rejonie wybrzeża. Dla nieobjętej modelami części wybrzeża, w oparciu o specjalnie przygotowane mapy hydrogeologiczne i przez analogię do wyników modelowania numerycznego, obliczono zasoby wodne drenowane bezpośrednio przez Bałtyk.

Na polskim wybrzeżu Bałtyku warunki występowania wód podziemnych w kenozoiku zależą oprócz budowy geologicznej także w znacznym stopniu od geomorfologii i nawiązują do trzech głównych typów wybrzeża (Burzyński i in., 1999): klifowo-wysoczyznowego (wybrzeże erozyjne); mierzei, wysp i półwyspów (wybrzeże akumulacyjne); nizin nadmorskich z terenem Żuław Wiślanych i ujściowych fragmentów dolin rzecznych (wybrzeże akumulacyjno-erozyjne). W obszarach tych odmiennie formowane są: rozkłady ciśnień piezometrycznych, zasilanie, czas przebiewania wody w ośrodku skalnym oraz systemy obiegu wód podziemnych.

4. Rezultaty obliczeń

Dla oceny metodą analityczną dopływu podziemnego do Bałtyku podzielono polskie wybrzeże na 22 strefy obliczeniowe o różnej długości, od 3,25 km do 45,0 km. Strefy zostały ponumerowane kolejno od strony wschodniej w kierunku zachodnim. Obliczeń analitycznych dokonano, wykorzystując formułę Darcy'ego dla oceny przepływu w strefie brzegowej.

Dla każdego poziomu wodonośnego (czwartorzęd, trzeciorzęd, kreda + jura) ustalono odrębnie parametry obliczeniowe, wykorzystując informacje z setek otworów położonych wzdłuż liczącego ponad 500 km przekroju hydrogeologicznego linii brzegowej. Sumaryczny dopływ podziemny do morza wg tej oceny równy jest 398 000 m³/d, z czego 69% pochodzi z poziomu czwartorzędowego, 18% z trzeciorzędu, a 13% z podłoża kredowo-jurajskiego (tab. 2). Dopływy jednostkowe wynoszą odpowiednio: 592, 471 i 220 m³/d na 1 km linii brzegowej liczonej wzdłuż przekroju.

W wyniku modelowania ustalono, że wielkość bezpośredniego dopływu do modelowanych fragmentów polskiego wybrzeża Bałtyku wynosi:

- model nr P1 – rejon Pucka – $Q = 35\,651 \text{ m}^3/\text{d}$,
- model nr P2 – rejon Władysławowa – $Q = 6\,691 \text{ m}^3/\text{d}$,
- model nr P3 – rejon Łeby – $Q = 29\,330 \text{ m}^3/\text{d}$,
- model nr P4 – rejon Wolina – $Q = 23\,072 \text{ m}^3/\text{d}$.

Łącznie z modelowanego odcinka wybrzeża (114 km) dopływa 94 744 m³/d, czyli 831 m³/d/km lub 9,6 l/s/km. W oparciu o wyniki badań modelowych dla obszarów reprezentatywnych ustalono, że wskaźniki odpływu bezpośredniego z poszczególnych stref są następujące (tab. 1–3): strefa Zatoki Puckiej – 1064 m³/d/km;

strefa klifu Władysławowa – 567 m³/d/km; strefa wydmo-wo-jeziorna Łeby – 762 m³/d/km oraz strefa wyspy Wolin – 764 m³/d/km. Wykorzystując powyższe wskaźniki, wykonano ocenę wartości bezpośredniego dopływu wód podziemnych do Morza Bałtyckiego z obszaru Polski w oparciu o moduły obliczone metodą numeryczną dla głównych typów wybrzeży (tab. 3).

Tabela 1. Bezpośredni dopływ wód podziemnych do Bałtyku z obszaru Polski obliczony na podstawie prawa Darcy'ego $Q = TIB$. Fragment jednej z wersji obliczeniowych

Table 1. Direct groundwater inflow calculated from the area of Poland to the Baltic Sea on the basis of Darcy Law $Q = TIB$. Fragment of one of computing versions

Strefa	Długość strefy brzegowej [m]	Poziom wodonośny	Szerokość strefy dopływu do morza B [m]	Przewodność hydrauliczna T [m ² /d]	Spadek hydrauliczny I	Dopływ do morza Q [m ³ /d]	Dopływ jednostkowy (na 1 km szerokości dopływu) [m ³ /d/km]	Dopływ jednostkowy (na 1 km długości brzegu w strefie) [m ³ /d/km]
S-1	30 000	czwartorzęd	17 500	179,1	0,0038	11 910	680,6	397,0
S-2	15 000	-	-	-	-	-	-	-
S-3	30 000	czwartorzęd	30 000	146,9	0,00105	8 862	295,4	295,4
S-4	40 000	czwartorzęd kreda	18 750 5 000	427,5 244,8	0,0012 0,00072	9 618 881	512,9 176,2	240,4 22,0
S-5	17 500	czwartorzęd trzeciorzęd kreda	8 000 15 000 15 000	1000,0 307,9 231,2	0,00082 0,0101 0,004	6 560 46 646 13 872	820,0 3109,7 924,8	374,8 2665,5 792,7
S-6	30 000	czwartorzęd trzeciorzęd	13 750 27 500	1498,5 113,3	0,0044 0,0028	73 763 8 724	5364,6 317,2	2458,7 290,8
S-7	32 500	czwartorzęd	32 500	431,0	0,001	14 007	431,0	431,0

Tabela 2. Zestawienie wielkości bezpośrednich dopływów podziemnych do strefy brzegowej Bałtyku z poszczególnych pięter wodonośnych. Długość polskiej strefy brzegowej Bałtyku (wraz z Mierzeją Wiślaną i Półwyspem Helskim) – 501 500 m

Table 2. Comparison of direct groundwater inflow from each water-bearing aquifer to the waterside zone of the Baltic Sea. Length of the Polish coast zone of the Baltic Sea (with the Wiśłana Bay and with the Hel Peninsula) – 501 500 m

Piętro wodonośne	Dopływ całkowity Q [m ³ /d]	Udział w dopływie [%]	Szerokość strefy dopływu do Bałtyku [m]	Dopływ jednostkowy (na 1 km strefy dopływu) q [m ³ /d/km]	Dopływ jednostkowy (na 1 km długości wybrzeża) q [m ³ /d/km]
Czwartorzęd	273 873	68,9	462 250	592	546
Trzeciorzęd	70 584	17,8	149 750	471	141
Kreda	24 445	6,1	107 500	227	49
Kreda + jura	28 730	7,2	135 000	213	57
Suma	397 632	100,0			793

Tabela 3. Prognoza wartości bezpośredniego dopływu wód podziemnych do Morza Bałtyckiego z obszaru Polski w oparciu o moduły obliczone metodą numeryczną dla głównych typów wybrzeży

Table 3. Forecast of the value of direct inflow of groundwater to the Baltic Sea calculated from the area of Poland on the basis of modules with numeric method for main types of coasts

Metoda oceny	Wybrzeże zatokowe		Wybrzeże klifowe		Wybrzeże nizinne		Wybrzeże wyspowe	
	Dopływ [tys. m ³ /d]	Moduł [m ³ /d /km]	Dopływ [tys. m ³ /d]	Moduł [m ³ /d /km]	Dopływ [tys. m ³ /d]	Moduł [m ³ /d /km]	Dopływ [tys. m ³ /d]	Moduł [m ³ /d /km]
Ocena analityczna	127,1	1 255	66,7	721	186,7	518	19,2	491
Ocena modelowa	35,7	1 064	6,7	567	29,3	762	23,1	764
Długość wybrzeża [km]	101,2		92,5		360,3		39,0	
Prognoza modelowa	107,7	1 064	52,4	567	274,5	762	29,8	764
Procent prognozowanego dopływu	32		16		47		5	

Tabela 4. Porównanie bezpośredniego dopływu wód podziemnych do Morza Bałtyckiego z poszczególnych stref obszaru Polski oszacowanego różnymi metodami (m³/d)

Table 4. Comparing direct groundwater inflow estimated from each zones of the area of Poland to the Baltic Sea to various methods (m³/d)

Metody oceny Nr strefy/nr modelu	Obliczenia analityczne	Modelowanie numeryczne	Uwagi
S1-S5	70 694	-	
S6/M1	72 400	35 651	
S7	13 975	-	
S8/M2	30 562	6 691	S8 > M2
S9	40 519	-	
S10-S13/M3	32 985	29 330	
S14-S19	118 858	-	
S20-S22/M4	17 639	23 072	
Razem	397 632	94 744	
Długość brzegu dla danej oceny [km]	501,5	114	
Moduł na 1 km wybrzeża	793	831	

5. Wnioski

Obliczenia metodą analityczną i numeryczne modelowanie pozwoliły wyznaczyć rejony występowania SGD oraz strefy jego braku lub podrzędnego znaczenia. Uzyskane metodą analityczną i modelową moduły są porównywalne, a oszacowane sumaryczne wartości są tego samego rzędu. Najwięcej wody podziemnej dopływa do Bałtyku z wybrzeża nizinnego ($186\,700\text{ m}^3/\text{d}$), choć moduł jednostkowego dopływu jest niski ($518\text{ m}^3/\text{d}/\text{km}$). Łączny dopływ według prognozy wynosi $464\,470\text{ m}^3/\text{d}$. Jest on w znacznym stopniu zbieżny z wartością obliczoną metodą analityczną. Ocenę analityczną uznano za metodę szacunkową, gdyż zarówno schematyzacja, jak i regionalizacja (uśrednianie) parametrów mogą być przyczyną szeregu błędów. Model numeryczny jest więc obecnie w opinii autorów najlepszym sposobem oceny wartości SGD i powinien być w przyszłości wykorzystany do oceny SGD do Bałtyku i innych ciał wodnych w Polsce. W pracach prowadzonych na kilkuset obszarach w różnych częściach świata, oprócz pomiarów terenowych (Woessner, Sullivan, 1984) i ocen wykorzystujących bilanse elementów składu chemicznego wód lub pierwiastki radioaktywne (Moore, 1996), stosuje się także szeroko modelowanie numeryczne (Langevin, 2003). Doskonalenie metodyki, a w dużym stopniu adaptowanie rozwiązań i osiągnięć innych państw powinno być uwzględnione w programach badań środowiska wodnego kraju. O silnej światowej presji na rozwój tych badań świadczy bardzo obszerny spis metodycznej literatury tego problemu prezentowany w dokumentacji (Kryza i in., 2005). Zastosowanie w Polsce tych metod i studia porównawcze na wybranym obszarze pilotowym wybrzeża wydają się w pełni uzasadnione, a w szczególności – przygotowanie numerycznego modelu całej strefy brzegowej. Model taki powinien być wykonany przy zastosowaniu oprogramowania uwzględniającego modelowanie cieczy o różnej gęstości. Baza danych modelu musi być poszerzona o tereny nie objęte dotąd modelem, a zwłaszcza przybrzeżną strefę morza, gdzie brakuje podstawowych danych. W jej obrębie wykonać należy specjalne badania hydrogeologiczne i hydrochemiczne, w tym szczególnie pomiary terenowe SGD do akwenu.

Wymienione metody oceny SGD wymagają realizacji specjalnych prac i badań, między innymi wierceń, budowy sieci monitoringu, wieloletnich obserwacji zmian poziomów wody, oceny parametrów hydrogeologicznych. Środowisko wód podziemnych przybrzeżnej strefy Bałtyku powinno być badane i monitorowane ze względu na jego ogromnie ważne buforowe znaczenie dla ochrony zasobów wodnych położonych w głębi lądu.

Proces dokumentowania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w pasie przybrzeżnym Bałtyku od wyspy Wolin po Mierzeję Wiślaną został zakończony w roku 2004, tworząc w ten sposób solidną podstawę racjonalnej gospodarki wodami podziemnymi w tej strefie.

Stopień wykorzystania zasobów dyspozycyjnych w pasie przybrzeżnym jest zmienny i waha się od 8% w zlewni Wieprzy (Przymorze) do 73% w zlewni Redy (Dolna Reda), średnio 43%. Suma ustalonych zasobów eksploatacyjnych ujęć jest generalnie większa od zasobów dyspozycyjnych, dlatego też właściwe organy (sta-

rostwa powiatowe) winny jak najszybciej dokonać ich weryfikacji i ograniczyć wielkość dopuszczalnego poboru poprzez aktualizację pozwoleń wodnoprawnych.

Dla usprawnienia zarządzania zasobami wód w pasie przymorskim Bałtyku autorzy opracowania proponują zbudowanie Systemu Informacji Przestrzennej Pasa Przymorskiego Bałtyku stanowiącego integralną część Katastrów Wodnych Dolnej Odry i Dolnej Wisły. System ten wraz z siecią monitoringu JCWP (CWD) oraz stacjonarnym modelem całego wybrzeża może być doskonałym narzędziem zarządzania wodami podziemnymi tego obszaru.

Literatura

- Buddemeier R.W., 1996. Groundwater flux to the Ocean: Definitions, data, applications, uncertainties. W: Buddemeier R.W. (red.), *Groundwater Discharge in Coastal Zone: Proceedings of an International Symposium*. LOICZ Reports and Studies No. 8, LOICZ, Texel, The Netherlands, s. 16–21.
- Burzyński K., Sadurski A., Krawiec A., 2004. The Origin of Groundwater in the Light of Circulation Systems at the Polish W. Coast of the Baltic Sea. W: 18th SWIM, Cartagena.
- Burzyński K., Kozerski B., Sadurski A., 1999. Procesy ingresji i ascencji wód na polskim wybrzeżu bałtyckim. *Biul. PIG* 388, Warszawa.
- Direct groundwater inflow to the Baltic Sea. 2002. NORDIC. [showpub.asp?pubnr= 2002: 503](#).
- Dowgiałło J., Kozerski B., 1975. Wody wgłębne podłoża Bałtyku. *Studia i Materiały Oceanograficzne* 11: 55–66.
- Dowgiałło J., Sadurski A., 1988. Wstępne wyniki badań chloru-36 w wodach podziemnych kredy w rejonie Gdańska. W: IV Symp. „Aktualne problemy hydrogeologii”, cz. II, s. 32–42.
- Dowgiałło J., Frączek E., 1990. An attempt at the interpretation of new data on the Hel Spit hydrogeology (Poland). W: *Proceed. of 11th SWIM*. Gdańsk, s. 5–14.
- Dzhamalov R.G., Zektser I.S., Meskheteli A.V., 1977. *Groundwater discharge into the Sea and World Ocean*. Nauka, Moscow.
- Kozerski B., 1983. Problemy hydrogeologiczne regionu gdańskiego. W: *Mat. Symp. „Rozwój Regionalnych Badań Hydrogeologicznych w Polsce”*. Polit. Gdańska, Warszawa, s. 131–152.
- Kozerski B., Sadurski A., 1983. Klasyfikacja hydrogeologiczna strefy brzegowej południowego Bałtyku. *Peribalticum III*. Ossolineum, Gdańsk.
- Kozerski B., Pruszkowska M., 1996. O pochodzeniu zasolenia wód podziemnych polskiego wybrzeża Bałtyku. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 1.
- Krawiec A., Rubel A., Sadurski A., Weise S.M., Zuber A., 2000. Preliminary hydrochemical, isotope and noble gas investigations on the origin of salinity aquifers of Western Pomerania, Poland. W: *Proc. of 16 Salt Water Intrusion Meet, Międzyzdroje–Wolin*, 80: 87–94.
- Kryza J., Kryza H., Pruszkowska M., Szczepiński J., Szlufik A., Tomaszewski B., Kleśta W., 2005. Dokumentacja hydrogeologiczna określająca warunki bezpośredniego odpływu podziemnego do akwenu bałtyckiego wraz z analizą możliwości zagospodarowania i ochrony wód podziemnych. *IMS Sp.z o.o., Aquator Sp. z o.o., Wrocław*.
- Kwaterkiewicz A., Sadurski A., Zuber A., 2000. Origin of salinity in coastal aquifers of the Łeba region as indicated by environmental isotopes. W: *Proc. of 16 Salt Water Intrusion Meet., Międzyzdroje–Wolin*, 80: 169–174.

- Lee D.R., Cherry J.A., 1978. A field exercise on groundwater flow using seepage meters and mini-piezometers. *Journal of Geological Education* 27: 6–10.
- Langevin C.D., 2003. Simulation of submarine ground water discharge to a marine estuary: Biscayne Bay, Florida. *Ground Water* 41 (6): 758–771.
- Lidzbarski M., Kordalski Z., 2003. Występowanie i dynamika trzeciorzędowego piętra wodonośnego w regionie gdańskim. W: *Współczesne problemy hydrogeologii*. T. XI, cz. 1, s. 121–128.
- Moore W.S., 1996. Large groundwater inputs to coastal waters revealed by ^{226}Ra enrichments. *Nature* 380: 612–614.
- Paulsen R.J., Smith C.F., O'Rourke D., Wong T., Bokuniewicz H. An international perspective on submarine groundwater discharge. Paulsen-abst-word.htm.
- Piekarek-Jankowska H., 1994. Zatoka Pucka jako obszar drenażu wód podziemnych. Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk.
- Piekarek-Jankowska H., 2003. Przejawy podmorskiego drenażu wód podziemnych w Zatoce Gdańskiej. W: *Współczesne problemy hydrogeologii*. T. XI, cz. 1, s. 153–163.
- Pietrucień C., 1969. Dynamika wód gruntowych w strefie brzegowej morza na przykładzie wybranych odcinków polskiego wybrzeża. *Studia Societat. Scientiarum Torunensis, Scatio C*, t. VII, nr 1, Toruń.
- Pietrucień C., 1983. Regionalne zróżnicowanie warunków dynamicznych i hydrochemicznych wód podziemnych w strefie brzegowej południowego i wschodniego Bałtyku. W. UMK, Toruń.
- Pruszkowska M., 1999. Tło i anomalie hydrogeochemiczne wód podziemnych z utworów czwartorzędu Pojezierza Kaszubskiego. Rozprawa doktorska. Politechnika Gdańska, Wydz. Bud. Wodnego i Inżynierii Środowiska, s. 112.
- Sadurski A., 1989. Górnokredowy system wód podziemnych Pomorza Wschodniego. *Zesz. Nauk. AGH* 46. Kraków, s. 140.
- Schwartz F., Zhang H., 2002. *Fundamentals of Ground Water*. John Wiley & Sons, New York.
- Taniguchi M., Cable J.E., Burnett W.C., 1999. Compilation of worldwide submarine groundwater discharge estimates. *Suppl. to Eos, Trans.* 80(46).
- Taniguchi M., Tomotoshi I., Ken-Ichi S., 2005. Evaluation of time-space distribution of submarine ground water discharge. *Ground Water* V, 43(3) <http://www.blackwell-synergy.com/doi/abs/10.1111/j.1745-6584.2005.0027.x>.
- Winter T.C., La Baugh L.W., Rosenberry D.O., 1988. The design and use of a hydraulic potentiometer for direct measurement of differences in hydraulic head between groundwater and surface water. *Limnol. Ocean.* 33(5): 1209–1214.
- Woessner W.W., Sullivan K.E., 1984. Results of seepage meter and mini-piezometer study, Lake Mead, Nevada. *Ground Water* 22(5): 561–568.
- Working Group 112 – “Magnitude of submarine groundwater discharge and its influence on coastal oceanographic processes” – Co-chairs: W.C. Burnett and E.A. Kontar, SCOR and LOICZ programme element of the IGBP. <http://www.jhu.edu/~scor/wg112.htm>.
- Zektser I.S., Dzamalov R.G., Meskheteli A.V., 1984. Groundwater Exchange of the Land and Sea. *Gidrometeoizdat*, Leningrad.
- Zektser I.S., Ivanov V.A., Meskheteli A.V., 1973. The problem of direct groundwater discharge to the seas. *Journal of Hydrology* 20: 1–36.
- Zuber A., Sadurski A., Weise S.M., Rubel A., Osenbruck K., Grabczak J., 2001. Badania izotopowe gazów szlachetnych kredy gdańskiej. W: *Współczesne problemy hydrogeologii*. T. X (1), s. 115–123.

