

Badania hydrogeologiczne wybrzeża Bałtyku Południowego

Kazimierz Burzyński¹, Andrzej Sadurski^{2,3}

Hydrogeological investigation of the Southern Baltic coast. Prz. Geol., 63: 622–627.

Abstract. The coastal area of the Southern Baltic is the limit of two different hydrogeochemical environments – fresh and brackish water of sea intrusion and salt ascending water from deep Mesozoic strata. Recognition of these waters occurrence and their origin started about hundred years ago in the Gdańsk region. The Vistula delta plane was the first area of the detailed studies. At that time two sources of the salt waters have been stated – salt water ascension from the Mesozoic strata in the central part of the delta and remaining sea water from the early stages of the delta evolution. The last mentioned belongs to the young relic sea water from the Littorina time. More detailed investigations along the Polish Baltic coast has been started in 70. of XX century. The new investigation methods were implemented during last 40 years, especially geoelectrical logging, remote sensing, isotopic and chemical composition examination of water samples, noble gas dissolved in groundwater. The numerical simulation models has been applied and also groundwater chemical modeling is adopted in hydrogeological practice.

Keywords: coastal groundwater, fresh/salt water balance, coastal hydrogeology

Pierwsze wyniki badań hydrogeologicznych wybrzeża Bałtyku Południowego opublikowane przez Jentscha (1911) i Schroedtera (1931) dotyczyły występowania i genezy wód słonych na Żuławach. Po drugiej wojnie światowej w Politechnice Gdańskiej powstała Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, której kierownikiem został profesor Pazdro. Jej pracownicy – oraz następnie absolwenci – podjęli systematyczne badania hydrogeologiczne. Bardziej intensywne prace rozpoczęto w latach 70. XX w., po reaktywacji katedry (pod zmienioną nazwą: Katedra Hydrogeologii i Zaopatrzenia w Wodę) pod kierunkiem profesora Kozerskiego. W tym czasie prowadzono już badania hydrogeologiczne na całym odcinku polskiego wybrzeża Bałtyku, często z udziałem przedstawicieli z innych ośrodków naukowych: poznańskiego, warszawskiego i toruńskiego.

Wyniki badań wód podziemnych morskiej strefy brzegowej są przedmiotem SWIMs – Salt Water Intrusion Meetings, cyklicznych spotkań specjalistów z licznych krajów. Tradycja ta sięga 1968 r., kiedy odbyło się pierwsze spotkanie, i zapoczątkowali ją profesorowie van Dam z TNO w Delft i de Breuck z Rijksuniversiteit Gent. Kolejna edycja SWIM odbędzie się w 2016 r. w Australii, a następna – w 2018 r. w Gdańsku.

OSOBLIWOŚCI HYDROGEOLOGICZNE MORSKIEJ STREFY BRZEGOWEJ

Na przełomie XIX i XX w. Ghyben i Herzberg niezależnie od siebie stwierdzili, że słodkie wody podziemne wysp i mierzei na południowym wybrzeżu Morza Północnego występują w postaci soczew podścielonych słonymi, morskimi wodami. Statyczna równowaga dwóch niemieszających się cieczy o różnym ciężarze właściwym została opisana równaniem znanym jako prawo Ghybena–Herzberga. Hubbert (1940) zwrócił uwagę na dynamiczną równowagę tych wód na powierzchni granicznej i uznał, że drenaż wód słodkich (podziemnych) musi zachodzić po stronie akwenu na jego dnie. Cooper (1959), Henry (1959) i Glover (1964) stwierdzili istnienie strefy przejściowej (*transition zone*) na granicy rozdziału faz, powstającej wskutek wahań pozio-

mu morza. Proces konwekcji na granicy faz również prowadzi do powstania strefy dyspersji, która jest największa na wybrzeżach oceanicznych, gdzie pływy dochodzą do 10 m, a strefa ta przekracza 100 m.

W przypadku obiegu wód podziemnych na wybrzeżach obszary zasilania znajdują się na wysoczyznach (kępach) nadmorskich, podczas gdy strefy drenażu, zależnie od typu wybrzeża, rozciągają się wzdłuż nizin nadmorskich, w dolinach ujściowych odcinków rzek i pod dnem morza (Burzyński & Sadurski 1990a, 1995a; Burzyński i in., 1999). Na wybrzeżu Bałtyku Południowego regionalna baza drenażu, jaką jest pas nadmorski, stanowi też miejsce ascencji wód słonych i solanek z podłoża mezozoicznego, zwłaszcza w miejscach występowania dyslokacji tektonicznych, które wywołały plejstocенską abrazję i erozję do głębokości ponad 300 m w tzw. rynnę żarnowieckiej. Wielowiekowa działalność człowieka związana z budową systemów melioracyjnych w celu osuszenia bagien nadmorskich oraz z budową miast i ujęć do zaopatrzenia w wodę przyczyniła się gdzieś do zapoczątkowania procesu ingresji – intruzji wód morskich do warstw wodonośnych (Walravens & Van Camp, 2004; Post, 2004). W wyniku ingresji trzeba było wyłączyć z eksploatacji kilka ujęć wody w polskiej strefie brzegowej, podobnie jak w przypadku wybrzeży innych krajów.

Rejon Żuław Wiślanych wyróżnia się obecnością morskich młodych wód reliktowych w warstwach wodonośnych w środkowej partii serii deltowej. Pochodzą one z okresu transgresji litorynowej, gdy obszar Żuław był zatoką morską, i jako wody porowe przetrwały w strefie pozbawionej dopływu wód z wysoczyzn pojeziernych.

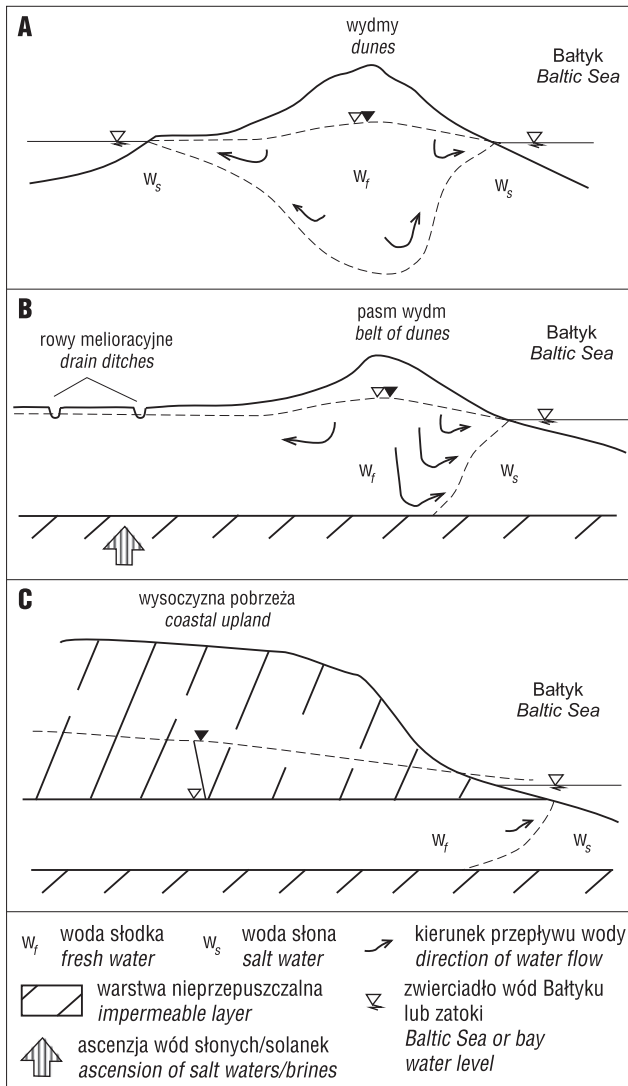
BUDOWA GEOLOGICZNA POLSKIEGO WYBRZEŻA BAŁTYKU

Najmłodsze główne jednostki geologiczne na polskim wybrzeżu Bałtyku zostały uformowane u schyłku ostatniego zlodowacenia. Regularny, pasmowy układ form geomorfologicznych zaczyna się w strefie Pomorza od kulminacji wzniesień moren czołowych, które stanowią regionalne

¹ Politechnika Gdańska, ul. Narutowicza 11/12, 80-952 Gdańsk; kburz@pg.edu.pl.

² Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; andrzej.sadurski@pgi.gov.pl.

³ Uniwersytet Mikołaja Kopernika, ul. Lwowska 1, 87-100 Toruń; andrzej.sadurski@umk.pl.



Ryc. 1. Podstawowe typy równowagi wód słonych i słodkich na wybrzeżu Bałtyku Południowego (wg Sadurskiego & Krawca, 1998). **A** – mierzeje; **B** – niziny nadmorskie; **C** – klify (wybrzeża erozyjne)

Fig. 1. The basic types of fresh and salt water balance along the Southern Baltic coast (after Sadurski & Krawiec, 1998). **A** – sand spits; **B** – coastal lowlands; **C** – cliffs (erosion coast)

działy wód między zlewniami Odry, Wisły i rzek Przymorza. Wysoczyzny morenowe pobraży przecinają głębokie doliny i pradoliny, w tym: Pradolina Redy-Leby, pradolina pomorska, doliny Piaśnicy, Słupi, Wieprzy, Parsęty, Regi i wielu mniejszych cieków. Wzdłuż brzegu Bałtyku ciągną się formy geomorfologiczne powstałe w wyniku działalności morza w holocenie, których początki są związane z transgresją Morza Litorynowego (Tomczak, 1995). Prąd litoralny (rumowiska) transportujący piasek wzdłuż wybrzeża doprowadził do odcięcia pasami mierzei szeregu zatok morskich – dzisiejszych jezior: Jamno, Wicko, Sarbinowo, Kopań, Łebsko i Gardno.

Od czasu transgresji litorynowej wzdłuż brzegu Bałtyku Południowego powstały niziny nadmorskie – zwane lokalnie bagnami lub błotami od nazw miejscowości, np. Karwieńskie Błota, Bielawskie Błota, Wierzchucińskie Bagna – które od północy zostały oddzielone od morza pasem wydym, miejscami utrwalonych przez roślinność. Na odcin-

kach bezpośredniego kontaktu wysoczyzn morenowych pobraży z linią brzegową powstały w tym czasie klify, stanowiące specyficzne wybrzeża typu erozyjnego.

Strop skał zwięzłych mezozoiku na wybrzeżu wschodnim Bałtyku Południowego znajduje się na rzędnej ok. 100 m p.p.m., a na wybrzeżu zachodnim – na poziomie morza. Strop obniża się do 140–160 m p.p.m. w rynnach erozyjnych, a najgłębiej schodzi do 320 m p.p.m. w rejonie rynny żarnowieckiej. Takie rynnne struktury pochodzenia erozyjnego i egzaracyjnego powstały w plejstocenie i w większości są to tzw. pogrzebane doliny. Ich dna sięgają utworów mezozoiku, maksymalnie triasu. Rynny wypełnione warstwami piaszczystymi o miąższości lokalnie przekraczającej 100 m są strefami o dużym przewodnictwie hydraulicznym (przewodnictwo wodne $T > 100 \text{ m}^2/\text{h}$). Spełniają one rolę „drenów poziomych” dla wód podziemnych wybrzeża w pasie nadmorskich nizin, które znajdują się na obszarach regionalnego drenażu.

W skali całego polskiego wybrzeża można wydzielić rejon o podobnej budowie geologicznej, odznaczające się analogiczną sytuacją geomorfologiczną i zblizonymi warunkami hydrogeologicznymi. Wynika to z ewolucji geologicznej wybrzeża oraz z genezy form geomorfologicznych, związanych głównie z procesami akumulacji w czasie ostatniego zlodowacenia, jak również z procesami rozwoju sieci rzecznej oraz z akumulacją morską zachodzącą od czasów transgresji Morza Litorynowego. Propozycje klasyfikacji wybrzeża pod względem budowy geologicznej i hydrogeologicznej przedstawili Kozerski i Sadurski (1985) oraz Burzyński (1987, 1990a).

Na obszarach odpowiadających poszczególnym typom wybrzeża przedstawionym na rycinie 1 odmiennie są kształtowane systemy obiegu wód podziemnych, różna jest także podatność warstw wodonośnych na ingresję bądź ascenzję wód słonych.

BADANIA HYDROGEOCHEMICZNE I IZOTOPOWE

Badania hydrogeochemiczne wybrzeży, w tym wybrzeża Bałtyku Południowego, mają długą historię. Rozkład stężenia jonu chlorkowego na obszarze delty Wisły i próby wyjaśnienia jego genezy przedstawili już w pierwszej połowie XX w. Ostendorf (1930) i Schroedter (1931).

Zauważono, że podczas ingresji wód morskich następuje zmiana typu chemicznego wody w warstwach wodonośnych – z $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ przez Cl-Ca na Cl-Na (Kleczkowski & Nguyen-Manh-Ha, 1977; Beekman & Appelo, 1990). Do oceny procesu ingresji wykorzystywano wskaźniki hydrochemiczne, jak np. wskaźnik Na^+/Cl^- oraz $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$, a także badania zmian składu chemicznego wód w następstwie wymiany jonowej podczas interakcji osrodek skalny-woda. Ten proces stał się podstawą do klasyfikacji hydrogeochemicznej wód w morskiej strefie brzegowej (Stuyfzand, 1993; Walraevens & Van Camp, 2004). Wymywanie wód morskich z warstw wodonośnych w trakcie ewolucji geologicznej mierzei i różnicowanie natężenia migracji wybranych jonów opisali Sadurski i in. (1987). Skład chemiczny wód porowych i jego różnicowanie w profilu pionowym w osadach z rdzeni wiertniczych pobranych z Zatoki Puckiej były przedmiotem badań Piekarek-Jankowskiej (1994, 1996). Zmianami chemizmu wód podziemnych pod wpływem antropopresji w strefie brzegowej zajmowała się

Pruszkowska-Caceres (2009); ta sama autorka podała najnowsze wyniki badań terenowych prowadzonych w rejonie Ustki i Władysławowa w pracy z 2012 r., w której zamieściła również wyniki modelowania hydrogeochemicznego z wykorzystaniem standardowego programu SHEMAT (*Simulator for HEat and MAss Transport*). Program ten służy do oceny wpływu gradientu gęstościowego na przepływ wody zmineralizowanej, dyfuzję substancji rozpuszczonej, rozpuszczanie ośrodka skalnego oraz nukleację substancji z roztworów nasyconych względem faz mineralnych ośrodka. Wykorzystanie modeli termodynamicznych w ocenie zmian chemizmu wód podczas transgresji i regresji morskich w rejonie Zatoki Gdańskiej opisał wcześniej Sadurski (1989).

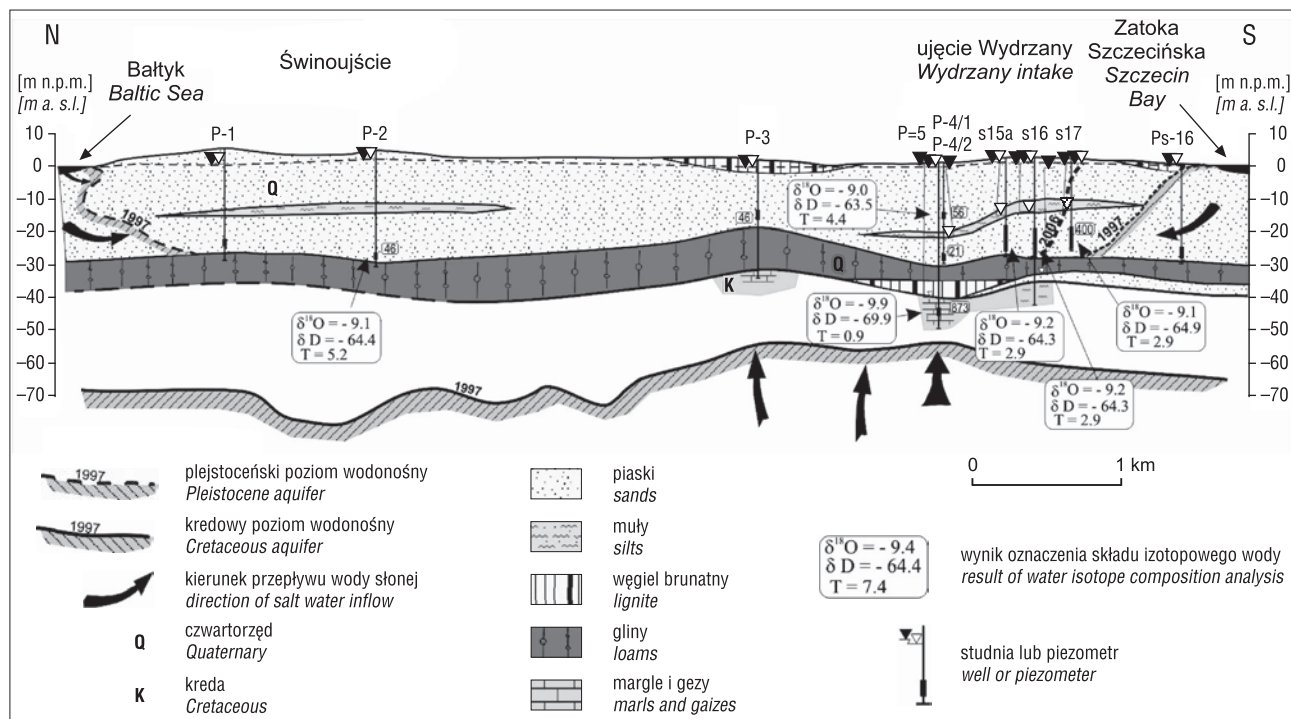
Od kilku dziesięcioleci w badaniach wód słonych i brackich powstających w wyniku ascenzji lub ingresji w strefie brzegowej Bałtyku Południowego są stosowane metody izotopowe. Wyniki badań składu izotopowego wód podziemnych na rozpatrywanym obszarze opublikowali Dowgiało (1965, 1988), Sadurski (1989), Zuber i Grabczak (1990), Zuber i in. (1990), Krawiec i in. (2000) oraz Krawiec (2013). Na podstawie oznaczeń izotopów wodoru, radiowęglu i chloru ^{36}Cl jest określany czas przebywania wód podziemnych w systemie wodonośnym. Wartości delty tlenowej i wodorowej pozwalają wnioskować o warunkach klimatycznych w czasie infiltracji wód do warstw wodonośnych oraz o genezie wód podziemnych. W ostatnich latach wykorzystuje się także oznaczenia stężenia gazów szlachetnych rozpuszczonych w wodach podziemnych wybrzeża do oceny ich temperatury na wejściu do systemów hydrogeologicznych. Na podstawie oznaczeń stężenia gazów szlachetnych we wgłębnych wodach podziemnych występujących na wybrzeżu Bałtyku Południowego stwierdzono, że infiltrowały one w okresach chłod-

nych, typowych dla schyłku plejstocenu i początku holocenu (Krawiec, 2013).

BADANIA GEOFIZYCZNE

W rozpoznawaniu powierzchni równowagi wód słonych i słodkich od dawna korzystano z wyników badań geofizycznych. Początkowo, w latach 40. XX w., były to głównie sondowania i profilowania elektrooporowe, uzupełnione w latach 80. XX w. obrazowaniem elektrooporowym – tomografią elektrooporową. Metody te były stosowane głównie w badaniach polskiego wybrzeża Bałtyku, rozpoczętych przez W. Stankiewicza (z poznańskiego ośrodka PBG) i R. Kucharskiego (z ośrodka warszawskiego) na przełomie lat 60. i 70. XX w. Wyniki są szczególnie istotne w połączeniu z modelowaniem równowagi wód słonych i słodkich oraz zmian położenia powierzchni rozdziału tych wód (Krawiec i in., 2000; Burzyński i in., 2004; Gurwin & Krawiec, 2010; ryc. 2).

Do określania miąższości warstwy wód słodkich wykorzystuje się metodę elektromagnetyczną TDEM (*Time Domain Electromagnetic Method*; Goldman & Kafri, 2004), natomiast do oceny rozdziału faz słonej i słodkiej – metody indukcji elektromagnetycznej (Martens i in., 2004). W ostatnim 15-leciu w badaniach wybrzeży coraz częściej są stosowane pomiary elektromagnetyczne z anten unoszonych nad terenem przez helikopter lub samolot (Fitterman & Deszcz-Pan, 1998). Na podstawie wyników badań elektrooporowych zlokalizowano strefy ascenzji i ingresji wód o podwyższonej mineralizacji. Pochodzenie wód słonawych i słonych jest zróżnicowane, a ich skład chemiczny wskazuje na dominujące procesy ascenzji solanek, a niekiedy także ingresję wód morskich na wybrzeżu Bałtyku Południowego.



Ryc. 2. Przekrój hydrogeologiczny przez polską część wyspy Uznam. Granicę między soczewą wód słodkich i słonych zaznaczono zgodnie ze stanem na rok wykonania pomiarów geoelektrycznych (wg Krawca & Sadurskiego, 2010)

Fig. 2. Hydrogeological cross-section of the polish part of Uznam Island. The boundary between fresh water lens and salt groundwater stated according to the date of geoelectrical logging (after Krawiec & Sadurski, 2010)

BADANIA HYDRODYNAMICZNE – MODELOWANIE

Na obszarze mierzei i półwyspów soczewy wód słodkich w pierwszym poziomie wodonośnym powstały wyłącznie w wyniku długookresowej akumulacji wód opadowych. W ten sposób odbywa się też jej naturalne zasilanie. W warunkach ustalonych między wodą słodką i wodą słoną wytwarza się stan równowagi, zależny głównie od ciężaru objętościowego płynów. W analizowanym przypadku przepływu wody słonej i słodkiej w warstwie wodonośnej opis matematyczny równowagi wód oparto na założeniu, że dwa płyny, tj. woda słona i słodka, nie mieszają się i oddziela je od siebie powierzchnia rozdziału faz oraz że są spełnione założenia Dupuita dotyczące rozkładu ciśnienia w przekroju pionowym warstwy, a przepuszczalność ośrodka grunto-wo jest stała (uśredniona) w przekroju pionowym:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \rho_p z$$

gdzie:

p – ciśnienie,

z – rzędna,

ρ_p – gęstość cieczy ($\rho_p = \rho_f$ dla wody słodkiej, $\rho_p = \rho_s$ – dla wody słonej).

Przepływ w płaszczyźnie (x,y) opisuje prawo Darcy'ego:

$$\vec{q} = -\frac{k}{\mu} \text{grad } p$$

gdzie:

k – przepuszczalność gruntu,

μ – lepkość dynamiczna płynu.

Wykorzystując wzór Ghybena–Herzberga w postaci:

$$Z = \frac{\rho^f}{\rho^s - \rho^f} h^f$$

i prawo Darcy'ego wraz z równaniem ciągłości przepływu, otrzymujemy układ równań różniczkowych, który opisuje ewolucję swobodnej powierzchni wody słodkiej i powierzchni rozdziału fazy słonej i słodkiej (Bear, 1972; Bear & Verruijt, 1987):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x^f (h^f - Z) \frac{\partial h^f}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y^f (h^f - Z) \frac{\partial h^f}{\partial y} \right] = \\ = Q^f + S^f \frac{\partial h^f}{\partial t} - S^s \frac{\partial Z}{\partial t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left[K_x^s (Z - Z_s) \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho^f}{\rho^s} h^f + \frac{\rho^s - \rho^f}{\rho^f} Z \right) \right] + \\ + \frac{\partial}{\partial y} \left[K_y^s (Z - Z_s) \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\rho^f}{\rho^s} h^f + \frac{\rho^s - \rho^f}{\rho^f} Z \right) \right] = \\ = Q^s + S^s \frac{\partial Z}{\partial t} \end{aligned}$$

gdzie:

f, s – indeksy oznaczające parametry ośrodka (odpowiednio w odniesieniu do wody słodkiej i słonej),

K – składowe tensora współczynnika filtracji,

h^f – wysokość hydrauliczna dla wody słodkiej,

Z – rzędna powierzchni rozdziału fazy słodkiej i słonej,

t – czas,

Z_s – rzędna spągu warstwy nieprzepuszczalnej,

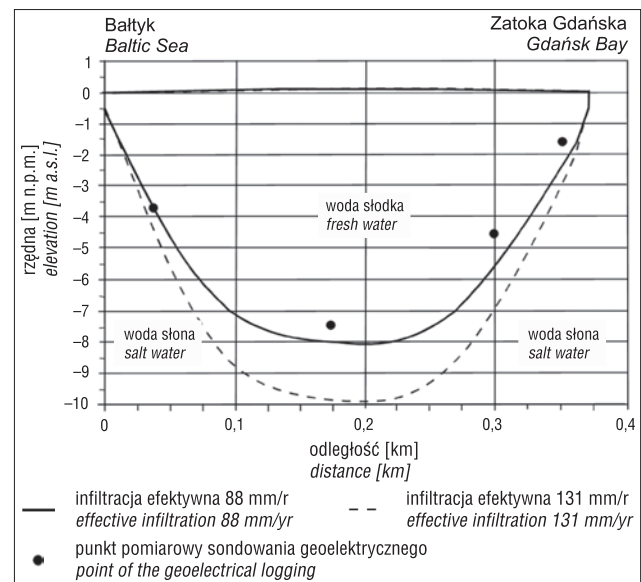
S – współczynnik odsączalności,

Q – wielkość zasilania zewnętrznego.

Na podstawie przytoczonych równań opracowano model matematyczny równowagi wód słonych i słodkich wykorzystany do symulacji zmian zasobów wód pierwszego poziomu wodonośnego mierzei wybrzeża Bałtyku Południowego (Burzyński, 1987). Do przestrzennej dyskretyzacji równań zastosowano metodę elementów skończonych, a dyskretyzację równań względem czasu wykonano według różnicowego niejawnego schematu Adamsa pierwszego rzędu. Opisany model umożliwił badanie zarówno ustalonego, jak i niustalonego stanu systemu.

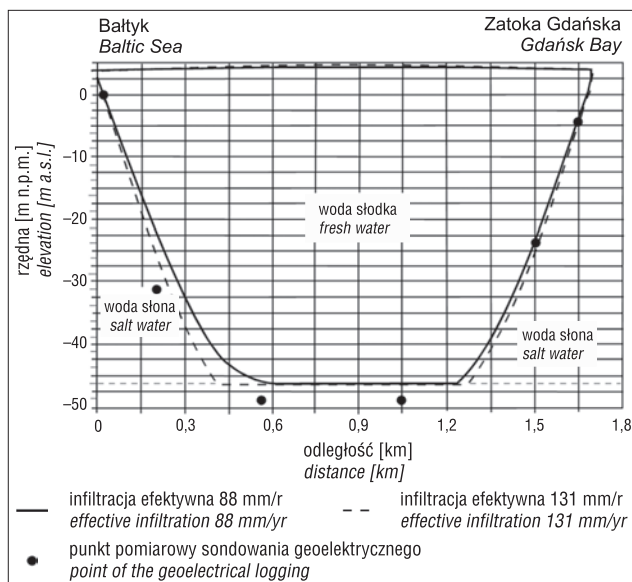
Na rycinach 3 i 4 przedstawiono przykładowe wyniki symulacji numerycznych zmian położenia granicy rozdzielającej wody słodkiej i słonej oraz sondowań geoelektrycznych w pionowych przekrojach poprzecznych przez Mierzę Helską w jej wąskiej (w rejonie Kuźnicy) i szerokiej części (rejon Hel-Bór) przy różnych wielkościach zasilania infiltracyjnego: 88 mm/r dla pięciolecia suchego i 131 mm/r dla roku hydrologicznego średniego z wielolecia (Burzyński & Sadurski, 1995a, b).

W wąskiej części mierzei soczewa wód słodkich jest bardzo płytka i „zawieszona” w otaczającej ją wodzie słonej (morskiej). W szerokiej części mierzei dół soczewy „opiera się” na stropie utworów nieprzepuszczalnych. Z wykonanych obliczeń (ryc. 5) wynika, że objętość wód słodkich



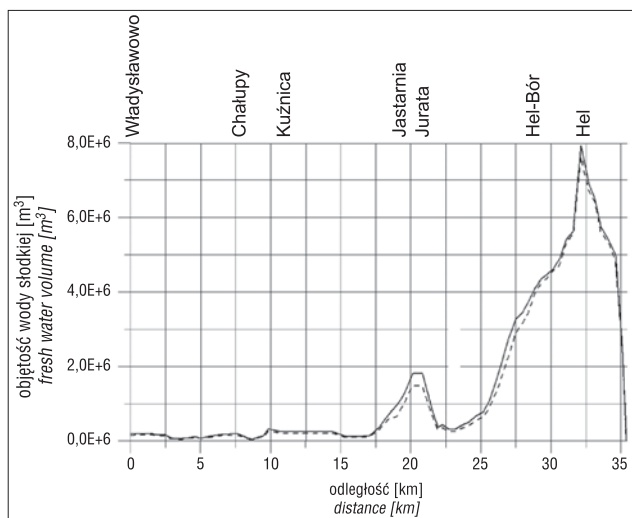
Ryc. 3. Soczewa wody słodkiej w przekroju poprzecznym Półwyspu Helskiego w rejonie Kuźnicy w okresie niskich (infiltracja efektywna 88 mm/r) oraz wysokich opadów (infiltracja efektywna 131 mm/r; wg Burzyńskiego & Sadurskiego, 1995a, b)

Fig. 3. Fresh groundwater lens across Hel Sand Spit in Kuźnica village during low (effective infiltration 88 mm/yr) and high (effective infiltration 131 mm/yr) precipitation period (after Burzyński & Sadurski, 1995a, b)



Ryc. 4. Soczewa wody słodkiej w przekroju poprzecznym Półwyspu Helskiego w rejonie Helu-Boru w okresie niskich (infiltracja efektywna 88 mm/r) oraz wysokich opadów (infiltracja efektywna 131 mm/r; wg Burzyńskiego & Sadurskiego, 1995b)

Fig. 4. Fresh groundwater lens across Hel Sand Spit in Hel-Bór Village during low (effective infiltration 88 mm/yr) and high (effective infiltration 131 mm/yr) precipitation period (after Burzyński & Sadurski, 1995b)



Ryc. 5. Zmiany objętości soczewy wody słodkiej wzdłuż osi Półwyspu Helskiego (wg Burzyńskiego & Sadurskiego, 1995a, b)

Fig. 5. Groundwater specific resources changes along axis of Hel Sand Spit (after Burzyński & Sadurski, 1995a, b)

na Półwyspie Helskim przy niskim zasilaniu z wielolecia (88 mm/r) jest równa 0,0993 km³, przy średnim zasilaniu (131 mm/r) wynosi ok. 0,1060 km³, natomiast w przypadku intensywnego zasilania (175 mm/r) sięga 0,1090 km³. Największą zgodność wyników obliczeń z wynikami pomiarów elektrooporowych uzyskano dla zasilania efektywnego warstw wodonośnych w wysokości 105 mm/r.

W podobny sposób oznaczono zasięg soczewy wód słodkich i zmiany zasobów wód podziemnych na obszarze Mierzei Wiślanej (Burzyński & Sadurski, 1999).

Przedstawione informacje dotyczące zasobów wód słodkich obszarów mierzei podkreślają delikatność równowagi wód słodkich i słonych w przybrzeżnych warstwach wodonośnych. Delikatność ta wynika z ograniczonej zasobności

warstw, a także z niskiego efektywnego zasilania wodami opadowymi. Efektem nadmiernej bądź niewłaściwej eksploatacji warstwy wodonośnej może być zasolenie wody, co prowadzi do wieloletniej degradacji zasobów wód słodkich. Wyniki modelowania przepływu wód w strefie wybrzeża Bałtyku Południowego pozwoliły na oszacowanie całkowitego odpływu wód podziemnych do akwenu z polskiego wybrzeża – wynosi on ok. 0,5 km³/r (Burzyński & Sadurski, 1990a).

PODSUMOWANIE

Warstwy wodonośne w strefie wybrzeża Bałtyku Południowego są wrażliwe na degradację zasobów następującą w wyniku zarówno naturalnych procesów ascencji lub ingresji słonych wód morskich, jak i presji antropogenicznej. Powierzchnia równowagi wód słonych i słodkich (podziemnych) podlegała zmianom w holocenie wraz z ewolucją Bałtyku. Obecnie zmiany tej powierzchni są powodowane zwiększającym się poborem wód w ujęciach nadmorskich, oddziaływaniem systemów melioracyjnych i budową obiektów hydrotechnicznych, m.in. kanałów portowych, nabrzeży i umocnień brzegowych.

Najbardziej wrażliwe na intruzję wód morskich są niziny nadmorskie, gdzie zwierciadło wód gruntowych ulega obniżaniu pod wpływem systemów drenażu, a także półwyspy i mierzeje, gdzie odnawialność zasobów wód podziemnych jest bardzo powolna z uwagi na niskie zasilanie soczewy wód słodkich. Ocena zmian zasobów wód podziemnych w strefie brzegowej wymaga zastosowania modeli numerycznych, uwzględniających powierzchnie równowagi wód słonych i słodkich. Przykładem jest program TFS opracowany na Politechnice Gdańskiej. Stosowane w praktyce programy bazujące na modelach komercyjnych MODFLOW lub FEEFLOW nie pozwalają na uwzględnienie zmian kształtu i położenia powierzchni granicznej wód słonych i słodkich.

Wyniki badań składu chemicznego i izotopowego wód podziemnych w rozpatrywanej strefie umożliwiły rozpoznanie procesów zachodzących na granicy dwóch środowisk hydrogeochemicznych, genezy i czasu przepływu (przebywania) wód, a także bieżących zmian chemizmu wód wywołanych dużą presją antropogeniczną. Na licznych obszarach słonawe wody podziemne wybrzeża są mieszaniną wód zmineralizowanych ascendujących z warstw mezozoicznych i współczesnych wód infiltracyjnych lub infiltracyjnych wód słodkich z przelomu plejstocenu i wczesnych faz klimatycznych holocenu. W regionalnym systemie krążenia strefa intensywnej wymiany wód podziemnych ma największy zasięg w profilu pionowym w otworze wiertniczym w Połczynie-Zdroju na Pomorzu Zachodnim – do głębokości 800 m. W rejonie Trójmiasta głębokość regionalnego systemu krążenia schodzi do ok. 500 m, natomiast obszar zasilania tego systemu znajduje się w pasie wzniesień morenowych Pojezierza Kaszubskiego.

Na podstawie zrealizowanych projektów badań hydrogeologicznych na wybrzeżu Bałtyku można uznać, że po metody geofizyczne pozwalające na kartowanie stref ascencji i ingresji wód słonych sięga się rzadko. Podstawowe badania prowadzono dotąd metodą elektrooporową, ostatnio z zastosowaniem tomografii elektrooporowej. Również inne metody prospekcji geofizycznej, tańsze w porównaniu z klasycznymi metodami wiertniczymi i umożliwiające lepsze rozpoznanie parametrów hydraulicznych i struktur wodonośnych wybrzeża, nie są wykorzystywane w pełni.

W artykule przedstawiono zagadnienia dotyczące zasobów wód słodkich w warstwach wodonośnych wybrzeża Bałtyku Południowego. Na polskim wybrzeżu Bałtyku występują trzy typy obszarów przybrzeżnych, różnych pod względem intensywności wnikania wód morskich w warstwę wodonośną. Najbardziej wrażliwe na intruzję wód słonych są obszary wysp i mierzei, gdzie zasilanie soczew wody słodkiej odbywa się wyłącznie poprzez retencję nadwyżki opadów, natomiast najmniej wrażliwe są strefy wybrzeży klifowych, zasilanych głównie w wyniku dopływu lateralnego na kępach wysoczyznowych.

LITERATURA

- BEAR J. 1972 – Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, New York.
- BEAR J. & VERRUIJT A. 1987 – Modeling groundwater flow and pollution (theory and applications of transport in porous media). Springer, Netherlands.
- BEEKMAN H.E. & APPELO C.A.J. 1990 – Ion chromatography of fresh-water intrusion along two transects of the water-body of Hoorn, the Netherlands. [W:] Kozerski B. & Sadurski A. (red.), Proceedings of the 11th Salt Water Intrusion Meeting, Gdańsk, 14–17 May 1990. Tech. Univ. Gdańsk, Dep. Hydrogeol. Water Supp., Gdańsk: 264–282.
- BURZYŃSKI K. 1987 – Modelowanie równowagi wód słonych i słodkich w obszarach mierzei polskiego wybrzeża. Zesz. Nauk. Polit. Gdań., 554, Bud. Wod., 43: 1–93.
- BURZYŃSKI K. & SADURSKI A. 1990a – Groundwater outflow to the Baltic Sea in the Gdansk region. Mitt. Ing. Hydrogeol., H. 37: 125–148.
- BURZYŃSKI K. & SADURSKI A. 1990b – The groundwater exchange rate of the southern Baltic coastal lowland. J. Hydrol., 119: 293–306.
- BURZYŃSKI K. & SADURSKI A. 1995a – Zagadnienie eksploatacji ujęć w strefie brzegowej morza. [W:] Szczepańska J. i in. (red.), Współczesne Problemy Hydrogeologii. T. 7, cz. 1. AGH, Zakł. Hydrogeol. Ochr. Wód, Kraków: 69–77.
- BURZYŃSKI K. & SADURSKI A. 1995b – Problem zasobów wód podziemnych na przykładzie Półwyspu Helskiego. Prz. Geol., 43 (3): 198–202.
- BURZYŃSKI K., KOZERSKI B. & SADURSKI A. 1999 – Procesy ingresji i ascenzji wód na polskim wybrzeżu bałtyckim. Biul. Państw. Inst. Geol., 388: 35–48.
- BURZYŃSKI K., KRAWIEC K. & SADURSKI A. 2004 – The origin and mobilization of deep brines to the aquifer system by considering the circulation systems existing on the Polish western coast of the Baltic Sea. [W:] Araguás L. i in. (red.), Groundwater and saline intrusion. Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting: 18 SWIM, Cartagena (Spain), 31 May–3 June 2004. Hidrogeol. Aguas Subterr., 15: 521–531.
- COOPER H.H. 1959 – A hypothesis concerning the dynamic balance of fresh water and salt water in a coastal aquifer. J. Geophys. Res., 64: 461–467.
- DOWGIAŁŁO J. 1965 – Solanki Pomorza Zachodniego. Państw. Wyd. Nauk., Szczecin.
- DOWGIAŁŁO J. 1988 – Geneza wód chlorkowych Niżu Polskiego. Aktualne poglądy i kierunki badań. [W:] IV Ogólnopolskie Sympozjum Aktualne Problemy Hydrogeologii. T. 2. Inst. Morsk., Gdańsk: 1–11.
- FITTERMAN D.V. & DESZCZ-PAN M. 1998 – Helikopter EM mapping of saltwater intrusion in Everglades National Park, Florida. Expl. Geophys., 29: 240–243.
- GLOVER R.E. 1964 – The pattern of fresh-water in a coastal aquifer. [W:] Sea water in coastal aquifers. Geol. Surv. Water Supp. Pap., 1613-C: 32–35.
- GOLDMAN M. & KAFRI U. 2004 – The use of time domain electromagnetic (TDEM) method to evaluate porosity of saline water saturated aquifers. [W:] Araguás L. i in. (red.), Groundwater and saline intrusion. Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting: 18 SWIM, Cartagena (Spain), 31 May–3 June 2004. Hidrogeol. Aguas Subterr., 15: 327–340.
- GURWIN J. & KRAWIEC A. 2010 – Zagrożenia dla zasobów wód słodkich na wyspie Uznam w świetle badań modelowych i geofizycznych. Biul. Państw. Inst. Geol., 442: 61–68.
- HENRY H.R. 1959 – Salt intrusion into fresh-water aquifers. J. Geophys. Res., 64: 1911–1919.
- HUBBERT M.K. 1940 – The theory of groundwater motion. J. Geol., 48: 784–944.
- JENTSCH A. 1911 – Geologisches über Salzpflanzen des norddeutschen Flachlandes. [W:] Jahrbuch der Königlich Preussischen geologischen Landesanstalt zu Berlin für das Jahr 1911, 32 (1).
- KLECZKOWSKI A.S. & NGUYEN-MANH-HA 1977 – The effect of the Baltic water on the chemical composition of ground water. Bull. Acad. Pol. Sci. Sér. Sci. Terre, 25 : 31–38.
- KOZERSKI B. & SADURSKI A. 1985 – Klasyfikacja hydrogeologiczna strefy brzegowej południowego Bałtyku. Peribalticum III, Ossolineum, Gdańsk.
- KRAWIEC A. 2013 – Pochodzenie anomalii chlorkowych w wodach podziemnych polskiego wybrzeża Bałtyku. Wyd. Nauk. UMK, Toruń.
- KRAWIEC A. & SADURSKI A. 2010 – Salinization of the Świnoujście groundwater body (Polish part of Uznam Island). [W:] Condesso de Melo T. i in. (red.), Proceedings of the 21th Salt Water Intrusion Meeting. Azores, Portugal: 165–169.
- KRAWIEC A., RÜBEL A., SADURSKI A., WEISE S.M. & ZUBER A. 2000 – Preliminary hydrochemical, isotope, and noble gas investigations on the origin of salinity in coastal aquifers of Western Pomerania, Poland. [W:] Sadurski A. (red.), Proceedings of the 16th Salt Water Intrusion Meeting. UMK, Toruń: 87–94.
- MARTENS K., VAN CAMP M. & WALRAEVENS K. 2004 – Electromagnetic induction method to characterize the reference situation of fresh-salt water distribution at the area of the Deurganck Dock, Antwerp, Belgium. [W:] Araguás L. i in. (red.), Groundwater and saline intrusion. Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting: 18 SWIM, Cartagena (Spain), 31 May–3 June 2004. Hidrogeol. Aguas Subterr., 15: 353–362.
- OSTENDORF E. 1930 – Die Grundwasserböden des Weichseldeltas [rozprawa akademicka]. Danzig.
- PIEKAREK-JANKOWSKA H. 1994 – Zatoka Pucka jako obszar drenażu wód podziemnych. Wyd. Univ. Gdańskiego, Gdańsk.
- PIEKAREK-JANKOWSKA H. 1996 – Hydrochemical effects of the submarine groundwater discharge to the Puck Bay (Southern Baltic Sea, Poland). Geogr. Pol., 67: 103–120.
- POST V.E.A. 2004 – Groundwater salinization processes in the coastal area of the Netherlands due to transgressions during the Holocene [rozprawa doktorska]. Vrije Univ., Amsterdam.
- PRUSZKOWSKA-CACERES M. 2009 – Hydrogeochemia strefy kontaktu wód słono-słodkich na wybrzeżu Bałtyku na przykładzie rejonu Ustki. Inz. Mors. Geotech., 6: 430–435.
- PRUSZKOWSKA-CACERES M. 2012 – Analiza zmienności fizyczno-chemicznej słodkich wód podziemnych w strefie kontaktu z wodami słonymi na przykładzie rejonów nadmorskich i niecek endoreicznych. Monografie, 124. Wyd. Polit. Gdańskiej, Gdańsk.
- SADURSKI A. 1989 – Górnokredowy system wód podziemnych Pomorza Wschodniego. Zesz. Nauk. AGH, Geologia, 46.
- SADURSKI A. & KRAWIEC A. 1998 – Zagrożenia zasobów wód podziemnych w nadmorskich obszarach zurbanizowanych Bałtyku Południowego. [W:] Jankowski A.T. (red.), Materiały Sympozjum „Hydrogeologia obszarów zurbanizowanych i uprzemysłowionych”. UŚI, Katowice: 176–184.
- SADURSKI A., BORAWSKA J. & BURCZYK T. 1987 – Warunki hydrogeologiczne Mierzei Helskiej. Kwart. Geol., 31: 767–782.
- SCHROEDTER E. 1931 – Die salzhaltigen Grundwässer an der Weichselmündung. Geologische und chemische Untersuchungen. Danzig. Stat. Mitteil., 13.
- STUYFZAND P.J. 1993 – Hydrochemistry and hydrology of the coastal dune area of the Western Netherlands [rozprawa doktorska]. Vrije Univ., Amsterdam, KIWA Publ.
- TOMCZAK A. 1995 – Geological structure and Holocene evolution of the Polish Coastal Zone. Pr. Państw. Inst. Geol., 149: 90–102.
- UŚCINOWICZ S. 2006 – A relative sea-level curve for the Polish Southern Baltic Sea. Quatern. Int., 145–146: 86–105.
- WALRAEVENS K. & VAN CAMP M. 2004 – Advances in understanding natural groundwater quality controls in coastal aquifers. [W:] Araguás L. i in. (red.), Groundwater and saline intrusion. Selected papers from the 18th Salt Water Intrusion Meeting: 18 SWIM, Cartagena (Spain), 31 May–3 June 2004. Hidrogeol. Aguas Subterr., 15: 449–463.
- ZUBER A. & GRABCZAK J. 1990 – O pochodzeniu solanek mezozoiku Polski centralnej i północnej. Mat. Symp. WPH. Warszawa, s. 202–208.
- ZUBER A., KOZERSKI B., SADURSKI A., KWATERKIEWICZ A. & GRABCZAK J. 1990 – Origin of brackish waters in the Quaternary aquifer of the Vistula Delta. [W:] Kozerski B. & Sadurski A. (red.), Proceedings of the 11th Salt Water Intrusion Meeting, Gdańsk, 14–17 May 1990. Tech. Univ. Gdańsk, Dep. Hydrogeol. Water Supp., Gdańsk: 245–264.