

Badania hydrogeologiczne na wybrzeżu klifowym w diagnozowaniu i prognozowaniu geozagrożeń

Mirosław Lidzbarski¹, Ewa Tarnawska¹

The role of the hydrogeological research on cliff coast in diagnosis and forecasting of the geological hazards. Prz. Geol., 63: 901–907.

A b s t r a c t. In the course of the research there have been a complex analysis of hydrogeological conditions of a coastal aquifer system onshore and, as far as possible, offshore. On the cliff coast of Jastrzębia Góra there has been listed the occurrence of groundwater: springs and seepages, in the wall of the cliff and surroundings. A mathematical model of the water flow and mass transport enabled the final verification of the assumed water circulation system and the estimation of the groundwater volume, drained through the sea bottom sediments in the multi layered system. The intensity of erosion processes on the cliff coast depends on several factors. The most essential is the geological structure, hydrogeological conditions, especially the occurrence of suspended groundwater in unsaturated zone.

Keywords: hydrogeological conditions of the coastal zone, forecasting of the geological hazards

Erozję brzegu morskiego kształtują nie tylko czynniki odmorskie, lecz także odlądowe. Na tempo, zasięg i charakter zjawisk geodynamicznych, modelujących strefę brzegową, mają wpływ wzajemnie powiązane ze sobą elementy, takie jak: budowa geologiczna, geomorfologia, zjawiska meteorologiczne i stan morza oraz zachodzące w dłuższym okresie zmiany klimatu (Jurys & Uścińowicz, 2014). Groźna w skutkach jest zwłaszcza abrazja wybrzeży klifowych, gdzie na powstanie osuwisk wpływają również warunki hydrogeologiczne, pokrycie terenu oraz niekiedy ingerencja człowieka. W strefach aktywnych klifów lub osuwisk występują często wypływy wód gruntowych. Na niektórych odcinkach wybrzeży klifowych podejmuje się działania ochronne, zmierzające do zatrzymania lub ograniczenia niekorzystnych zjawisk. Planowanie prac ratunkowych i zabezpieczających jest jednak trudne oraz obarczone dużym ryzykiem z uwagi na brak wiarygodnych danych o występowaniu i systemie obiegu wód podziemnych w rejonie klifów (Werno i in., 2010). Konieczne okazało się pozyskanie informacji o warunkach hydrogeologicznych, a zwłaszcza o systemie obiegu wody na zapleczu klifu i w jego aktywnej części. Badania podjęto w celu identyfikacji systemu krążenia wód podziemnych w rejonie wybrzeży klifowych na przykładzie wybranych odcinków strefy brzegowej Bałtyku.

METODY I ZAKRES PRAC

Celem podjętych prac badawczych było poznanie warunków hydrogeologicznych, wpływających na erozję brzegu morskiego. Rozpoznano system obiegu wody oraz ustalono zależność między tempem zachodzących zmian geodynamicznych wybrzeża klifowego a budową geologiczną i warunkami hydrogeologicznymi. Do badań wytypowano rejon Jastrzębiej Góry, gdzie erozja brzegu morskiego najintensywniej zachodzi w aktywnej części brzegu klifowego, a zabiegi ochronne nie przynoszą spodziewa-

nych rezultatów. Obszar badań był ograniczony brzegiem morskim między 133,5 a 134,75 km wg kilometrażu Urzędu Morskiego (km UM) oraz przyległy teren w pasie ok. 0,5 km na zapleczu korony klifu (ryc. 1).

Z uwagi na specyfikę obszaru, jego nadmorskie położenie, dostępność terenu oraz zachodzące procesy geodynamiczne w ramach prac terenowych przeprowadzono szczegółowe kartowanie hydrogeologiczne i geologiczne. W granicach obszaru badawczego zinwentaryzowano wszystkie przejawy wód podziemnych i powierzchniowych. Wstępnie oceniono genezę oraz charakter wód na powierzchni terenu, pojawiających się w ścianie klifu i w obrębie osuwisk. W obrębie osuniętej części klifu na odcinku 150 m zidentyfikowano 16 różnych wystąpień wody – osiem wysięków, pięć niewielkich młak, które pojawiają się tam, gdzie następuje zablokowanie swobodnego odpływu na powierzchni i trzy źródła. Uzyskane dane wraz z archiwalnymi danymi hydrogeologicznymi i wynikami badań geologicznych były podstawą opracowania trójwymiarowego matematycznego modelu warunków i procesów hydrogeologicznych. Model ten pozwolił na zweryfikowanie nadmorskiego systemu obiegu wód. Określono wewnętrzną strukturę, granice i geometrię przestrzenną systemu wodonośnego wraz z pełną charakterystyką hydrogeologiczną z odwzorowaniem kartograficznym. Opiszano dynamikę wód podziemnych, położenie i charakter stref hydrodynamicznych, natężenie przepływów poziomych i pionowych oraz zasoby wód podziemnych. Podjęto także próbę określenia skali hydrogeozagrożeń z uwzględnieniem istniejącej zabudowy hydrotechnicznej oraz prognozowanych zmian klimatycznych.

W pracy badawczej wykorzystano także wyniki pomiarów laserowego skaningu wybrzeża klifowego oraz badań geofizycznych wykonanych metodą tomografii elektrooporowej w ramach Pilotażowego programu kartografii 4D w strefie brzegowej południowego Bałtyku (Kramarska i in., 2014; Kamiński i in., 2012).

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Kościarska 5, 80-328 Gdańsk; miroslaw.lidzbarski@pgi.gov.pl.

WYSTĘPOWANIE I DYNAMIKA WÓD PODZIEMNYCH

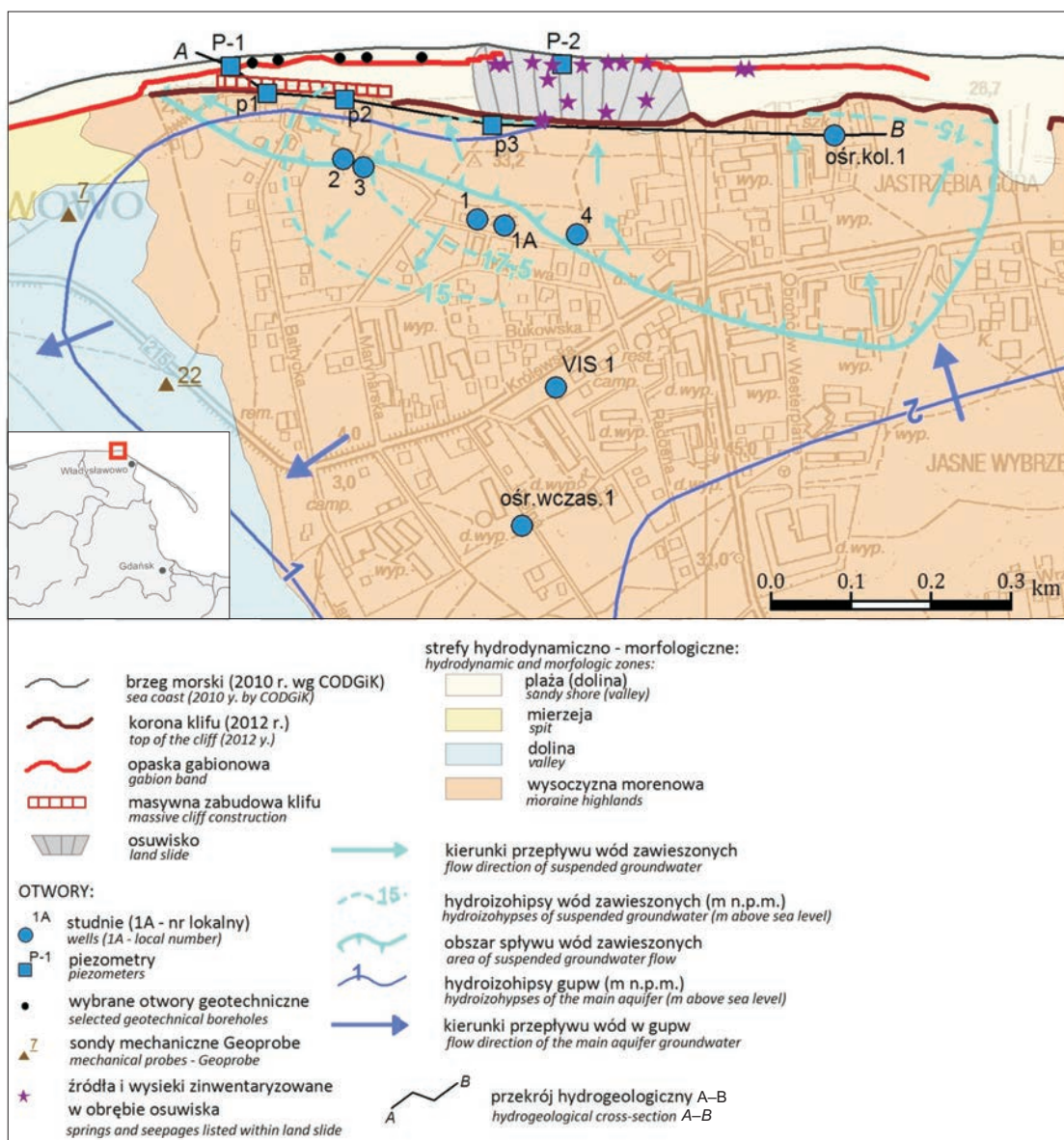
Warunki hydrogeologiczne strefy nadmorskiej w rejonie Jastrzębiej Góry charakteryzują się rozbudowanym układem hydrostrukturalnym oraz skomplikowanym systemem obiegu wody. Występują tu dwa piętra wodonośne – czwartorzędowe oraz neogeńsko-paleogeńskie, pozostające ze sobą w ścisłej więzi hydraulicznej (Frączek, 1998).

Zasadnicze znaczenie w zaopatrzeniu na potrzeby komunalne mają główne użytkowe poziomy wodonośne (GUPW) związane z piaszczystymi osadami wyżej wymienionych pięter. W czwartorzędzie rozpoznano dwa poziomy wodonośne – międzyglinowy, związany z osadami interglacjału eemskiego oraz podglinowy, utożsamiany z osadami piaszczystymi zlodowacenia południowopolskiego. Powiązane są one między sobą hydraulicznie i występują na głębokości 20–50 m. Miąższość warstw wodonośnych wynosi najczęściej 10–40 m, chociaż w miejscach

kontaktów hydraulicznych z wodami z neogenu i paleogenu przekracza 100 m.

Na obszarze prac badawczych warstwę wodonośną tworzą czwartorzędowe piaszki o różnej granulacji, które oddzielone są od powierzchni terenu warstwą glin zlodowacenia Wisły. Miejscami nie spełnia ona kryteriów GUPW, jednak na większości obszaru pozostaje w związku hydraulicznym z głębiej leżącymi czwartorzędowo-miocenijskim użytkowym poziomem wodonośnym (UPW). Zwierciadło wody ma charakter napięty, lokalnie swobodny. Stabilizuje się na rzędnej ok. 10–20 m n.p.m., a w sąsiedztwie brzegu morskiego obniża się do ok. 0–3 m n.p.m. Spływ wód podziemnych odbywa się w kierunku północnym do Morza Bałtyckiego.

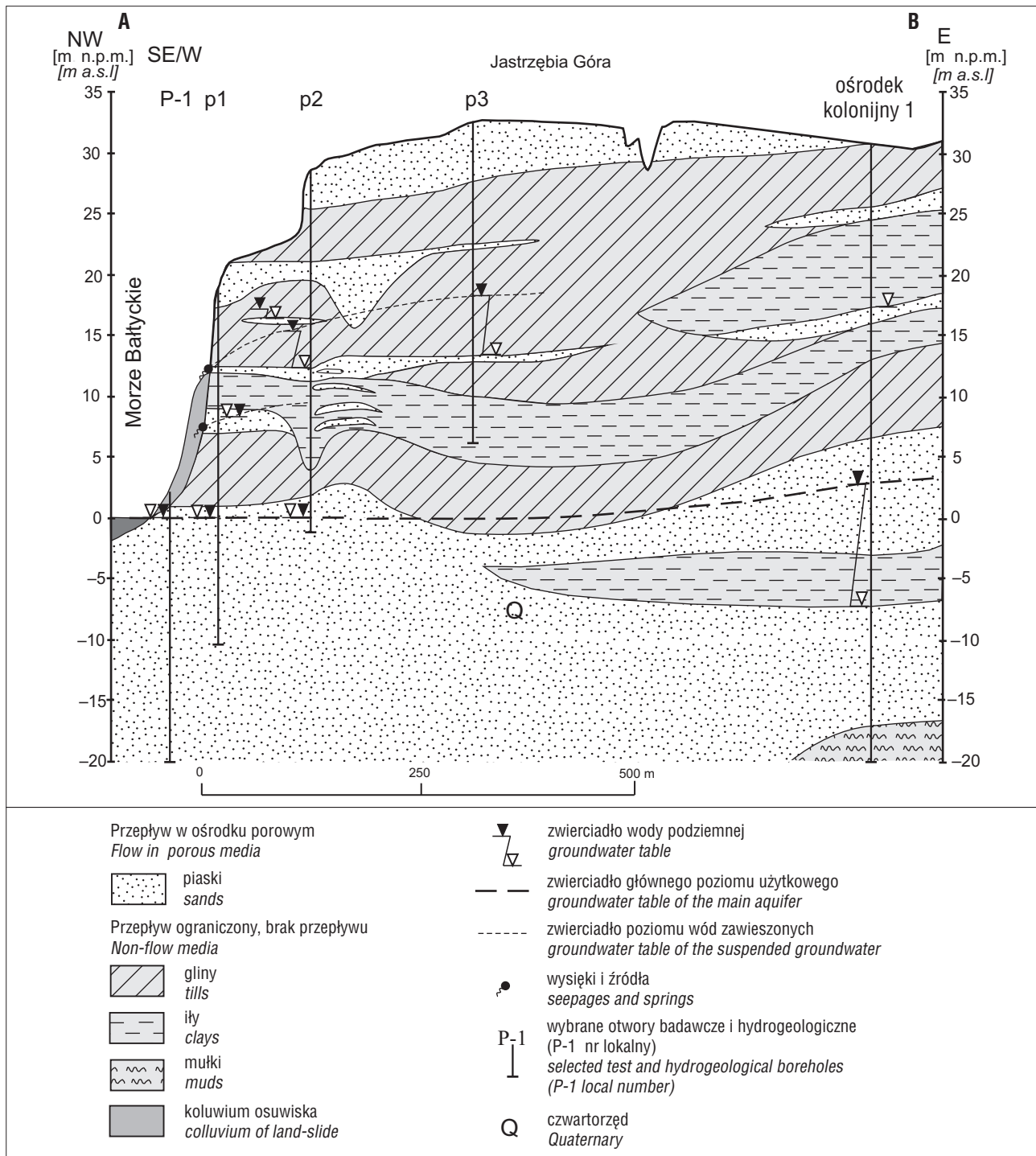
Powyżej, w strefie aeracji występują wody zawieszane, które stanowią pośrednie ogniwo w systemie obiegu wód między powierzchnią terenu a wodami podziemnymi. Występują w szerokim przedziale głębokości 1–25 m. Wypełniają przewarstwienia piaszczyste w kompleksie utworów słabo przepuszczalnych, leżących ponad strefą saturacji.



Ryc. 1. Mapa hydrogeologiczna obszaru badań
Fig. 1. Hydrogeological map of the study area

Cechuje je zmienna miąższość, najczęściej jednak nie przekracza 2–3 m. Warstwy wód zawieszonych są nieciągłe, występują mozaikowo i nie mają ze sobą kontaktu. Pomimo licznych wierceń geologiczno-inżynierskich i geotechnicznych nadal są one słabo rozpoznane. Wynika to ze skomplikowanych warunków geologicznych, charakterystycznych dla stref zaburzeń głacictonicznych. Tym niemniej występowanie tych wód ma zasadnicze znaczenie w stymulowaniu zjawisk geodynamicznych, zachodzących w klifie nadmorskim. W trakcie prac terenowych prowadzonych w latach 2012–2013 zidentyfikowano wypływy wód zawie-

szonych w ścianie klifu na rzędnej ok. 10–13 m n.p.m. oraz w strefie koluwium na rzędnych 6–9 m n.p.m. (ryc. 2). Z analizy profili geologiczno-inżynierskich wynika, że wody mogą występować okresowo w płytszych przewarstwiach piaszczystych na rzędnych ok. 17 oraz 25 m n.p.m. Spąg tych przewarstwień jest urozmaicony, a jego przegłębienia mogą okresowo wypełniać wody zasilane opadami infiltrującymi z powierzchni terenu. Dynamikę wód zawieszonych cechuje duża zmienność. Najczęściej odpływają one swobodnie ku ścianie klifu, jednak w niektórych miejscach ich przepływ jest zablokowany utworami słabo



Ryc. 2. Przekrój hydrogeologiczny A–B
Fig. 2. Hydrogeological cross-section A–B

przepuszczalnymi, co powoduje znaczne ciśnienia porowe. Zjawisko to osłabia spójność otaczających gruntów i przyczynia się do obniżenia ich właściwości wytrzymałościowych.

BADANIA MODELOWE PROCESÓW HYDROGEOLOGICZNYCH

Do modelowania numerycznego wykorzystano program ModFlow w pakiecie oprogramowania GMS 8.3 (Groundwater Modeling System). Zastosowano wersję ModFlow 2000, pakiet do schematyzacji warunków hydrogeologicznych LPF (Layer Property Flow), a do aproksymacji pochodnych w metodzie różnic skończonych – metodę PCG2.

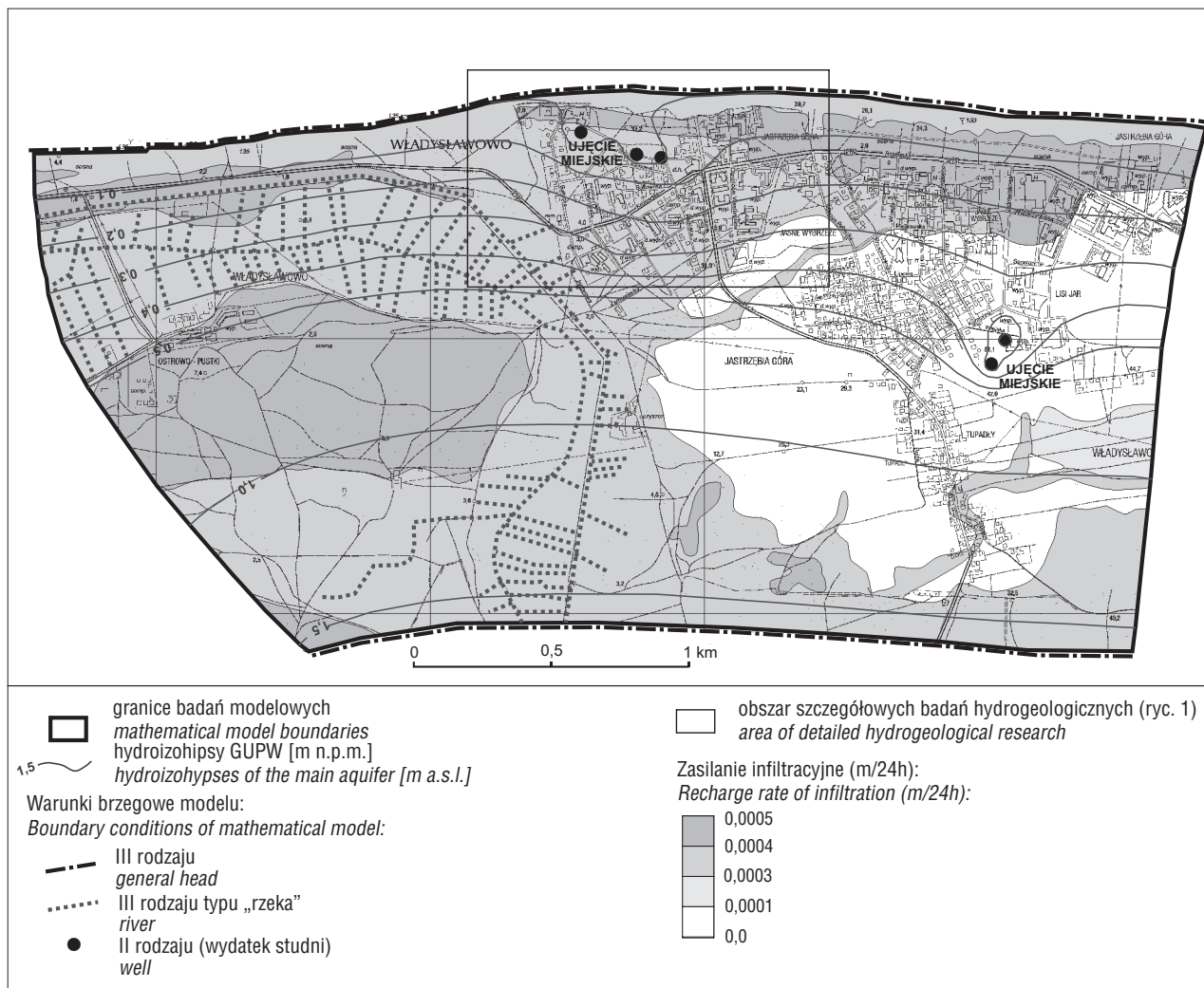
Obszar badań o powierzchni 7,2 km² został zdyskretyzowany siatką kwadratową o wymiarze 10 × 10 m (ryc. 3). Łączna liczba bloków obliczeniowych wyniosła 408 480, w tym liczba celek aktywnych, wykorzystywanych w obliczeniach – 218 315. Na podstawie przyjętego modelu koncepcyjnego na potrzeby modelowania cały kompleks wodonośny obszaru badań został poddany schematyzacji. Uwzględniono przy tym m.in. występowanie, wykształcenie i wzajemne kontakty hydrauliczne warstw i poziomów wodonośnych oraz system krążenia wód podziemnych.

Wpływ na sposób schematyzacji miała również przyjęta metoda obliczeń modelowych, zakładająca trójwymiarową parametryzację przestrzeni filtracyjnej. W procesie agregacji warstw wodonośnych uwzględniano kierunki przepływu wód podziemnych oraz występujące różnice ciśnień hydrostatycznych. Wyodrębniono cztery (I–IV) warstwy modelowe – II i IV obejmują poziomy wodonośne, a I i III skupiają utwory półprzepuszczalne.

Identyfikację kierunków przepływu wód podziemnych oraz bilans obiegu wody dla całego obszaru badań modelowych przeprowadzono w trzech podstawowych wariantach, symulując różne poziomy eksploatacji wód podziemnych:

- wariant 1 – aktualny stan poboru wód podziemnych, przy ich eksploatacji na ujęciu Jastrzębia Góra, przyjęto z 2012 r. średnią eksploatację na 1422 m³/d;
- wariant 2 – brak eksploatacji, obrazujący odtworzenie naturalnej powierzchni piezometrycznej na obszarze badań;
- wariant 3 – symulacja warunków hydrogeologicznych, uwzględniająca prognozowane zmiany klimatyczne (podniesienie bazy drenażu o 1 m).

Wyniki przeprowadzonych symulacji modelowych w ramach wariantu 1 pozwoliły na weryfikację, w rejonie prowadzonych badań, aktualnych kierunków przepływu wód podziemnych. Na podstawie linii prądu zweryfikowano obszary spływu wód w wyznaczonych poziomach



Ryc. 3. Granice badań modelowych
 Fig. 3. Mathematical model boundaries

wodonośnych. Obliczenia powierzchni piezometrycznej potwierdziły fakt, że główny obszar zasilania wód podziemnych rozprzestrzenia się na południe od granic modelowania. W rejonie ujęcia wody w Jastrzębiej Górze wyraźnie zaznacza się lokalny lej depresji, na co wskazuje przebieg hydroizohips.

Całkowita ilość wód biorących udział w obiegu na obszarze badań modelowych wynosi 4634 m³/d. Analizowany system wodonośny jest zasilany z dwóch głównych kierunków – przez infiltrację bezpośrednią (47%) i dopływ boczny (prawie 53%). Dopływ ten w głównej mierze zachodzi w obrębie IV warstwy modelowej, a więc w poziomie dolnopolejstoczeńsko-mioczeńsko-oligoceńskim. Zasilanie z wód powierzchniowych jest znikome i nie przekracza 0,1% sumy bilansowej, co wskazuje na drenujący charakter systemu wód powierzchniowych. Po stronie rozchodów ogólnego równania bilansowego przeważa odpływ w kierunku Morza Bałtyckiego (ok. 64%). Jest on równie intensywny w II, jak i IV warstwie modelowej (1422 m³/d i 1492 m³/d), co świadczy o znaczącej roli stropowej części strefy saturacji w kształtowaniu dynamiki systemu wodonośnego. Po stronie rozchodów w równaniu bilansowym zaznacza się duży udział eksploatacji wód podziemnych (1420 m³/d – wartości średnie dla roku). Okresowo, zwłaszcza w sezonie letnim, może on wzrastać nawet trzykrotnie. W wymianie pionowej wód między poziomami wodonośnymi przeważa strumień wód skierowany w głąb systemu wodonośnego – 1236 m³/d z III do IV warstwy modelowej, wobec 101 m³/d z IV do III warstwy modelowej.

Bardzo trudne do oszacowania są ilości wód biorących udział w płytkim obiegu w strefie aeracji. Brak powiązania wód zawieszonych ze strefą saturacji uniemożliwia wykorzystanie badań modelowych do ich bilansowania. Niedostateczne rozpoznanie strefy aeracji oraz duża zmienność warunków geologicznych ograniczały zastosowanie innych metod obliczeniowych. Szacuje się jednak, że na całym obszarze badań modelowych przez warstwy wód zawieszonych przepływa i przesącza się ok. 15–20% wód opadowych, infiltrujących z powierzchni terenu (ok. 200–320 m³/d).

SYSTEM OBIEGU WODY

Głównymi czynnikami determinującymi system obiegu wody na obszarze badań są wyraźnie zarysowane strefy drenażu wód, są nimi: brzeg morski, obniżenie nadmorskie Bielawskich Błot oraz Dolina Czarnej Wody. Krążenie wód inicjują opady atmosferyczne, infiltrujące w głąb systemu wodonośnego przez kompleks osadów słabo przepuszczalnych. W przepływach poziomych dominuje strumień wód podziemnych skierowany do Morza Bałtyckiego. Lokalne obiegi wody o niewielkim zasięgu są generowane w pasie wydym nadmorskich, skąd wody podziemne spływają w kierunku brzegu morskiego i na południe do Bielawskich Błot.

W granicach opracowania w strefie brzegowej Bałtyku rozpoznano dwa układy drenażowe – podmorski na odcinku klifowym oraz brzegowy w pasie wydym nadmorskich (zgodnie z klasyfikacją przyjętą przez Kozerskiego i Sadowskiego, 1983). W przypadku drenażu podmorskiego wody podziemne są drenowane przez osady denne akwenu morskiego. Intensywność wypływu tych wód jest determinowana przez rodzaj osadów dna morskiego i ciśnienia hy-

drostatyczne w strumieniu wód podziemnych. W strefie kontaktu ładu z akwenem Morza Bałtyckiego drenaż brzegowy ma charakter liniowy. W Jastrzębiej Górze, w rejonach intensywnej eksploatacji, strumień wód podziemnych skierowany do osadów dennych jest osłabiony, a czasowo nawet odwrócony, co w efekcie przyczynia się do zaniku drenażu podmorskiego. W latach największej eksploatacji wód (1975–1990), w niektórych studniach zakładowych i na ujęciu miejskim w Jastrzębiej Górze, rejestrowano wzrost zawartości chlorków wywołany ingresją wód morskich (Prussak, 1987).

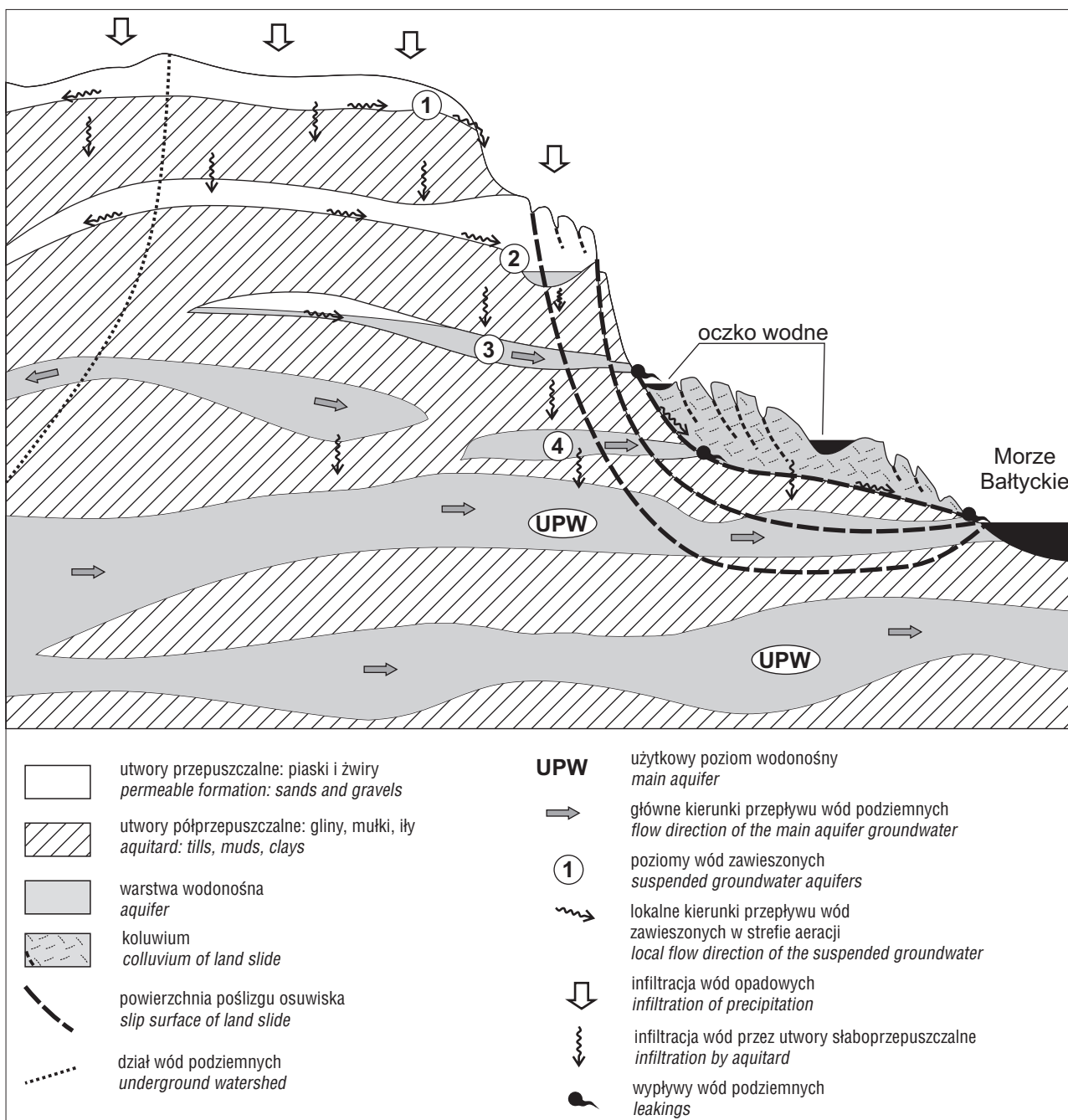
System obiegu wód zawieszonych obecnych w strefie aeracji jest bardziej złożony. W przeciwieństwie do wód strefy saturacji w poziomie wód zawieszonych zachodzą nie tylko przepływy w płaszczyźnie poziomej. Dominuje infiltracja pionowa skierowana w dół do strefy saturacji. W przypadku występowania przewarstwień piaszczystych część wód infiltrujących z powierzchni terenu zostaje w nich czasowo zmagazynowana, następnie przepływa zgodnie z morfologią terenu lub w kierunku lokalnych baz drenażu (brzegu morskiego, Doliny Czarnej Wody, lokalnych rozcięć erozyjnych). Część wód wypływa w ścianie klifu nadmorskiego w aktywnej części osuwiskowej, a także prawdopodobnie na zabudowanym odcinku pod geowłókniną, która izoluje opaskę gabionową od powierzchni klifu.

Przejawem wód zawieszonych są także sączenia pojawiające się w poziomych bruzdach w ścianie klifu. W okresie 10–11 grudnia 2012 r. na 300 m odcinku klifu między 133,80, a 134,13 km UM zarejestrowano ok. 3 m³/h wód, odciekających spod czoła osuwiska. Wielkość strumienia stanowiła suma wód zawieszonych, wypływających ze ściany klifu oraz wód GUPW, łączących się z nimi w końcowym odcinku koluwium. Można przypuszczać, że podobny strumień wód jest skierowany ku ścianie klifu, zabezpieczonej zabudową z gabionów.

W bezpośrednim otoczeniu aktywnej części wybrzeża klifowego w Jastrzębiej Górze zidentyfikowano cztery poziomy (warstwy) wód zawieszonych (ryc. 4). Dwa płytsze (nr 1 i 2) spełniają rolę tranzytową i najprawdopodobniej nie magazynują wód opadowych, infiltrujących do głębszych partii systemu wodonośnego. Nadmiar wód może pojawiać się po długotrwałych opadach atmosferycznych, następnie gromadzi się na słabo przepuszczalnym podłożu i migruje ku ścianie klifu, gdzie zaznacza się w formie wycieków i sąceń (ok. 0,5 m³/h). Nie można wykluczyć, że w obniżeniach słabo przepuszczalnego podłoża przewarstwień piaszczystych może okresowo znajdować się część wód infiltracyjnych (poziom nr 2 na ryc. 5). W głębiej występujących poziomach zawieszonych (nr 3 i 4) wody podziemne mają bardziej trwały charakter i są magazynowane w sposób ciągły. Część z nich może cechować znaczne ciśnienie porowe. Zmienia się także system obiegu, dominuje odpływ poziomy w kierunku ściany klifu, gdzie wypływa ok. 2,5 m³/h wody, a pozostała część w niewielkiej ilości (ok. 0,1 m³/h) infiltruje do strefy saturacji (ryc. 5).

HYDROGEOZAGROŻENIA

Zasadniczym czynnikiem destrukcyjnym, obniżającym stabilność wybrzeża klifowego w Jastrzębiej Górze, są wody podziemne. W strefie aeracji są to głównie poziomy wód zawieszonych. Cechuje je mozaikowe występowanie,



Ryc. 4. Sytuacja hydrogeologiczna i system obiegu wód podziemnych w rejonie wybrzeża klifowego
Fig. 4. Hydrogeological situation and groundwater circulation system in the area of cliff coast

zróznicowana miąższość oraz nieciągłość, wynikająca z zaburzeń glacytektonicznych. W wyniku infiltracji wód opadowych oraz dopływu z głębi lądu poziomy zawieszony prowadzą wody okresowo lub w sposób ciągły. Część tych wód występuje pod ciśnieniem hydrostatycznym. Trwała obecność warstw wodonośnych w strefie aeracji wpływa na uplastycznienie otaczających je utworów spójnych (glin zwałowych, ilów i mułków). Niezwykle groźne w skutkach mogą być wody wypełniające obniżenia w podścielających je utworach słabo przepuszczalnych. Prowadzi to do osłabienia spójności gruntów oraz radykalnego osłabienia właściwości wytrzymałościowych. W efekcie tych procesów tworzą się powierzchnie poślizgu, co skutkuje powstawaniem osuwisk.

Zagrożeniem dla stabilności wybrzeża klifowego jest także układ hydrostrukturalny w strefie saturacji. Do po-

wstania powierzchni poślizgu, uruchamiających głębokie osuwiska, przyczyniają się pokłady osadów plastycznych, leżące tuż pod podstawą klifu poniżej 0 m n.p.m. (ryc. 4). Dochodzi tam może do osłabienia spójności tych osadów, utraty zapasu stateczności całego zbocza i wytworzenia się powierzchni poślizgu, sięgającej pod podstawę klifu oraz głęboko w ląd na zaplecze klifu.

Badania modelowe pozwoliły na zanalizowanie zmian hydrodynamicznych, wynikających z prognozowanych zmian klimatycznych. Do symulacji obliczeniowej przyjęto skrajny wariant, zakładający podniesienie poziomu Morza Bałtyckiego o 1 m. Scenariusz, w którym zachodzi zmiana warunków hydrodynamicznych – podniesienie bazy drenażu do rzędnej 1 m n.p.m., wykazał daleko idące przeobrażenia w systemie hydrograficznym. W Dolinie Czarnej Wody i w bezpośredniej strefie nadmorskiej po-

wierzchnia terenu zostanie wówczas podtopiona wodami podziemnymi, które utworzą tam znaczne rozlewiska. Ogólna ilość wód podziemnych, biorących udział w obiegu, zmniejszy się o ok. 15%. Natężenie strumienia, odpływającego do Morza Bałtyckiego, wzrośnie kosztem drenażu przez wody powierzchniowe. Należy także spodziewać się intensywniejszych wypływów wód GUPW u podnóża klifu oraz w strefie koluwium (o ok. 10%). W wyniku podniesienia się bazy drenażu osłabieniu ulegną warunki geotechniczne gruntów pod podstawą klifu. Wzrośnie ich podatność na powstawanie osuwisk. Do utraty stateczności zboczy klifowych przyczynią się także częściej występujące spiętrzenia wód morskich, co będzie powodować czasowe odwrócenie kierunku przepływu wód podziemnych. W efekcie zmian hydrodynamicznych brzeg morski będzie bardziej narażony na abrazję, nie tylko w strefie klifów, lecz także na wybrzeżu mierzejowym. W rejonie ujęcia komunalnego w Jastrzębiej Górze wzrośnie zagrożenie ingresji wód słonych do warstw wodonośnych.

PODSUMOWANIE

1. Wyniki prac badawczych przeprowadzonych w rejonie Jastrzębiej Góry pozwoliły na identyfikację warunków hydrostrukturalnych oraz systemu krążenia wód podziemnych w strefie wybrzeża klifowego. Specyfikę warunków hydrogeologicznych określa rozbudowany system wodonośny, obejmujący użytkowe poziomy wodonośne, wody zawieszane oraz bezpośrednie sąsiedztwo wód morskich.

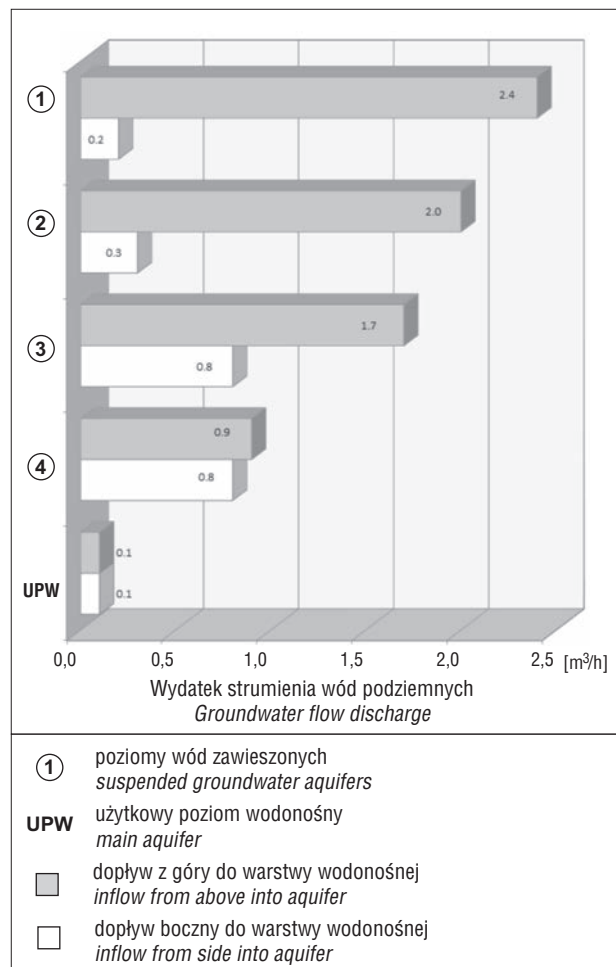
2. Głównymi czynnikami wpływającymi na zmiany geodynamiczne i powstawanie osuwisk są budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne. Wody podziemne występujące w strefie aeracji destrukcyjnie wpływają na stabilność wybrzeża klifowego. Powodują one osłabienie właściwości wytrzymałościowych gruntów spoistych, utrzymujących stabilność klifu. Stateczność zbocza obniżają także warstwy glin zwałowych i utworów ilastych, które występują u podstawy klifu w strefie wahań poziomu morza.

3. Na podstawie trójwymiarowego modelu warunków hydrogeologicznych nadmorskiego systemu wodonośnego sformułowano prognozę zmian hydrodynamicznych.

4. Uwzględniając scenariusza zmian klimatycznych, prognozując podniesienie się poziomu morza o 1 m, można przewidzieć, że w strefie wybrzeża klifowego wzrośnie zagrożenie abrazji brzegu morskiego. U podnóża klifu oraz w strefie koluwium zintensyfikuje się wypływ wód podziemnych. Wybrzeże mierzejowe będzie narażone na procesy destrukcyjne z dwóch stron – wzmożonej abrazji przez morze i podmywanie ciągu wałów wydmych od strony południowej, gdzie na powierzchni terenu wystąpią trwałe rozlewiska i podtopienia.

5. Podczas projektowania technicznych budowli zabezpieczających stabilność wybrzeża klifowego należy szczegółowo rozpoznać budowę geologiczną, warunki hydrogeologiczne oraz system obiegu wody, zwłaszcza w strefie nienasyconej.

6. Uzyskane w trakcie prac badawczych informacje mogą stanowić pomoc w diagnozowaniu ruchów masowych (geozagrożeń) w obrębie wybrzeża klifowych.



Ryc. 5. Kierunki i natężenie przepływu wód podziemnych w strefie aeracji

Fig. 5. Directions and flow discharge of groundwater in unsaturated zone

Artykuł opracowano na podstawie wyników prac badawczych realizowanych w latach 2012–2013 w ramach zadań statutowych PIG-PIB (nr tematu: 61.3709.1201.00.0)

LITERATURA

- FRĄCZEK E. 1998 – Mapa Hydrogeologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Puck. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- JURYS L. & UŚCINOWICZ SZ. 2014 – Naturalne i antropogeniczne czynniki kształtujące procesy geologiczne w pasie polskiego brzegu klifowego. [W:] Sokołowski R. (red.), Ewolucja środowisk sedimentacyjnych regionu Pobrzeża Kaszubskiego. Wydział Oceanografii i Geografii Uniwersytetu Gdańskiego, Gdynia: 27–37.
- KAMIŃSKI M., KRAWCZYK M. & ZIENTARA P. 2012 – Rozpoznanie budowy geologicznej klifu w Jastrzębiej Górze metodą tomografii elektrooporowej pod kątem zagrożenia osuwiskowego. Biul. Państw. Inst. Geol., 452: 119–130.
- KOZERSKI B. & SADURSKI A. 1983 – Klasyfikacja hydrogeologicznej strefy brzegowej południowego Bałtyku. Peribalticum, 3.
- KRAMARSKA R., UŚCINOWICZ G., JURYS L., JEGLIŃSKI W., PRZEŹDZIECKI P., FRYDEL J., TARNAWSKA E., LIDZBARSKI M., DAMRAT M. & WOŹNIAK M. 2014 – Pilotażowy program kartografii 4D w strefie brzegowej południowego Bałtyku. Państw. Inst. Geol., Gdańsk.
- PRUSSAK W. 1987 – Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów wód podziemnych z utworów czwartorzędowo-trzeciorzędowych. Przedsiębiorstwo Geologiczne w Warszawie, Zakład w Gdańsku.
- WERNO M. i in. 2010 – Uproszczony projekt usunięcia skutków nawalnych deszczy powodujących zsuwy oraz deformacje zabezpieczonej i odwodnionej skarpy klifu w Jastrzębiej Górze na odcinkach Zad. 2 i 3C (km 133 + 727 – 134 + 232). Geostab, Gdańsk.