

## Ocena zasobów odnawialnych wód podziemnych Pomorza Zachodniego na podstawie modelu symulacyjnego WetSpass

Joanna Kajewska-Szkudlarek<sup>1</sup>, Justyna Kubicz<sup>1</sup>, Ireneusz Kajewski<sup>1</sup>, Paweł Dąbek<sup>2</sup>

Assessment of renewable groundwater resources in Western Pomerania based on the WetSpass simulation model. *Prz. Geol.*, 65: 1080–1084.

*Abstract.* The aim of the study was to assess Western Pomeranian renewable groundwater resources in relation to climate change. The objective was accomplished by simulating the water balance components in two periods of 1971–2000 and 1981–2010, differing in terms of climatic parameters (precipitation, evaporation, air temperature and wind speed). The results of the simulation calculations allowed to assess the impact of climate change on the water balance structure of Western Pomerania and particularly on groundwater recharge. The data for the simulation calculations in the WetSpass model were included 8 numerical maps (raster), representing the basic elements of the climate, land use, types of soil (due to soil texture), depth of the groundwater table and terrain slopes. As a result of the simulation calculations, raster maps of the spatial distribution of particular elements of the water balance were obtained sub-divided into the summer and winter seasons and for the whole year.

**Keywords:** water balance, WetSpass model, Western Pomerania, renewable groundwater resources, climate change

Głównym czynnikiem odnawiania zasobów wód podziemnych jest infiltracja opadów atmosferycznych. Decyduje ona w dużym stopniu o możliwości ich zanieczyszczenia ze źródeł znajdujących się na powierzchni terenu. Według Kowalskiego (2007) „proces infiltracji opadów atmosferycznych zależy od czynników: geomorfologicznych, geologicznych, klimatycznych, biosferycznych oraz antropogenicznych (gospodarczej działalności człowieka)”. Czynniki te, na określonym obszarze, charakteryzują się najczęściej znaczną zmiennością przestrzenną. Jedne z nich, pod względem czasowym, można uważać za stosunkowo stałe, inne (przede wszystkim klimatyczne i meteorologiczne) za ulegające ciągłym zmianom zarówno w okresie wieloletnim, jak i w ciągu jednego roku, a nawet w czasie krótszym.

W pracy przedstawiono rezultaty badań symulacyjnych, przeprowadzonych za pomocą modelu WetSpass (o parametrach przestrzennie rozłożonych), głównych składników bilansu wodnego: ewapotranspiracji rzeczywistej, spływu powierzchniowego oraz zasilania wód podziemnych (infiltracji efektywnej) na Pomorzu Zachodnim. Analizy przeprowadzono dla dwóch trzdziestolecia: 1971–2000 oraz 1981–2010 w celu oceny zasobów odnawialnych wód podziemnych w obliczu ocieplenia klimatu. Obecnie w badaniach klimatu trzdziestolecie 1971–2000 uważa się za normę klimatologiczną (Atlas, 2005), natomiast lata, w których notowano w Polsce rekordy ciepła oraz wyższe opady przypadają na okres 2000–2010.

Przeprowadzenie analiz dla trzdziestolecia 1981–2010 miało na celu ocenę, na ile współczesne ocieplenie może mieć wpływ na strukturę bilansu wodnego, a w szczególności na zmiany wielkości infiltracji efektywnej na tle okresu normatywnego.

### MODEL SYMULACYJNY WETSPASS

Model WetSpass (Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under quasi-Steady State), stanowiący rozszerzenie do programu ArcView GIS, jest przeznaczony do modelowania zjawisk obiegu wody w skali regionalnej. Model ten jest oparty na analizie danych przestrzennych w formacie rastrowym. Wykorzystuje szereg równań fizyki procesu parowania oraz zależności empirycznych.

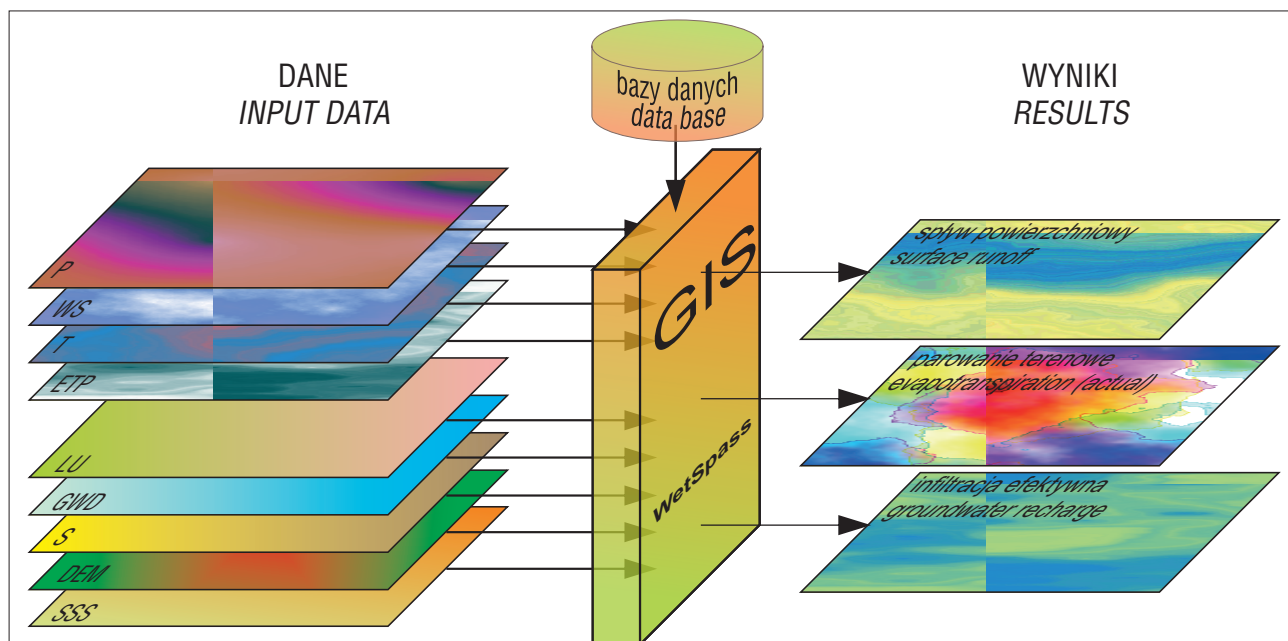
Dane wejściowe do obliczeń symulacyjnych stanowi 8 map numerycznych (rastrowych), przedstawiających: użytkowanie terenu, rodzaje gleb (ze względu na skład granulometryczny), głębokość położenia zwierciadła wód podziemnych, sumy opadów atmosferycznych, parowania wskaźnikowego, prędkości wiatru, temperatury powietrza oraz spadków powierzchni terenu (ryc. 1). W wyniku obliczeń symulacyjnych uzyskuje się mapy rastrowe przestrzennego różnicowania poszczególnych składników bilansu wodnego dla rozpatrywanego obszaru, w podziale na półrocze letnie i zimowe oraz dla całego roku (ryc. 1).

### MODEL WETSPASS W LITERATURZE

Model WetSpass został opracowany przez Batelaana i De Smedta z Uniwersytetu w Brukseli jako narzędzie służące do modelowania infiltracji wód podziemnych w zlewni (Batelaan, 2006; Batelaan, De Smedt, 2001). Kilukrotnie był jednak z powodzeniem wykorzystywany do modelowania bilansu wodnego na obszarach, które nie są zlewniami: Strefa Gazy (Aish i in., 2010; Aish, 2014), Wysocka Poznańska (Graf, Przybyłek, 2014), Delta Nilu (Armanuos i in., 2016). Pokojska (2004) i Graf oraz

<sup>1</sup> Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław; joanna.kajewska-szkudlarek@upwr.edu.pl, justyna.kubicz@upwr.edu.pl, ireneusz.kajewski@upwr.edu.pl.

<sup>2</sup> Instytut Kształtowania i Ochrony Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław; pawel.dabek@upwr.edu.pl.



**Ryc. 1.** Schemat ideowy obliczeń składników bilansu wodnego w modelu WetSpass (Kajewski, 2008); P – wskaźnik opadu [mm]; WS – prędkość wiatru [m/s]; T – temperatura powietrza [°C]; ETP – parowanie z powierzchni wody [mm]; LU – użytkowanie terenu; GWD – głębokość do zwierciadła wody podziemnej [m]; S – rodzaje gleb; SSS – spadki powierzchni terenu [%]

**Fig. 1.** Schematic diagram of water balance components in the WetSpass model (after Kajewski, 2008); P – precipitation index [mm]; WS – wind speed [m/s]; T – air temperature [°C]; ETP – potential evaporation [mm]; LU – land use; GWD – groundwater depth [m]; S – soil; SSS – slope [%]

Przybyłek (2014) przeprowadzili weryfikacje modelu WetSpass, które wskazują na możliwość jego stosowania w większej skali. Porównanie wielkości infiltracji obliczanej różnymi metodami z uzyskaną za pomocą modelu nie dostarczyło jednoznacznych wyników. Według Pokojskiej (2004) nie występują między nimi istotne różnice, natomiast Graf i Przybyłek (2014) wskazują na ich istnienie – średnio infiltracja efektywna otrzymana z wykorzystaniem modelu WetSpass jest niższa o 5–10%, a sporadycznie nawet o 20%.

Wielu autorów stosowało model WetSpass do oceny wpływu zmian klimatu i użytkowania terenu na zasilanie wód podziemnych. Woldeamlak, Batelaan i De Smedt (2007) modelowali zmiany wielkości zasobów wód podziemnych w kontekście zmian klimatu w zlewni Grote-Nete w Belgii, stosując trzy rodzaje scenariuszy: „chłodny”, „mokry” i „suchy”.

Wang i in. (2015) badali zmiany składowych bilansu wodnego w konsekwencji zmian podstawowych elementów klimatu dla dwóch głównych scenariuszy wg IPCC (A2 i B2), na obszarze górnego odcinka zlewni Yangcy o powierzchni 983 tys. km<sup>2</sup>.

Powstało kilka publikacji na podstawie badań dotyczących możliwego wpływu zmian klimatu na zasoby wód podziemnych w Strefie Gazy (np. Aish i in., 2010; Mogheir, Ajjur, 2013; Gharbia i in., 2015a, b). Obszar ten, położony na wybrzeżu Morza Śródziemnego, jest wysoce zagrożony występowaniem deficytów wody.

W ostatnich latach coraz większą popularność do prognozowania zasobów wód podziemnych zdobywają modele hybrydowe. Pandian i in. (2014) oraz Shrestha i in. (2016) wykorzystali w tym celu połączenie modeli WetSpass i MODFLOW.

## OBSZAR BADAŃ I DANE DO BADAŃ MODELOWYCH

Badaniami symulacyjnymi objęto Pomorze Zachodnie o całkowitej powierzchni 18,82 tys. km<sup>2</sup>, ograniczone od północy Bałtykiem.

Dane klimatyczne, przyjęte do obliczeń symulacyjnych dla obszaru badań modelowych, zestawiono w tabeli 1. Średnie lub sumy podstawowych elementów klimatu obliczono na podstawie danych IMGW-PIB z wielolecia 1971–2000 oraz 1981–2010. Sumy parowania z wolnej powierzchni wody obliczono na podstawie wzoru Bacia:

$$E_o = 3d\sqrt{v} + 0,344T$$

gdzie:

$d$  – średnia miesięczna wartość niedosytu wilgotności powietrza [hPa];

$v$  – średnia miesięczna prędkość wiatru [m/s];

$T$  – suma miesięczna całkowitego promieniowania słonecznego [kWh/m<sup>2</sup>].

W przypadku wszystkich elementów klimatu, z wyjątkiem prędkości wiatru, wyższe średnie wartości notowano w trzydziestolecu 1981–2010. Największą procentową zmianę w stosunku do okresu 1971–2000 obserwowano dla temperatury powietrza w sezonie zimowym (11,5%) oraz sumy opadu atmosferycznego w obu sezonach i w całym roku (9,1%). Wzrost temperatury i opadów spowodował również wzrost sumy parowania z powierzchni wody o ok. 5% (tab. 1).

**Tab. 1.** Średnie okresowe i roczne sumy opadu i parowania wskaźnikowego oraz średnie okresowe i roczne temperatury powietrza oraz prędkości wiatru dla Pomorza Zachodniego w latach 1971–2000 oraz 1981–2010**Tab. 1.** Mean seasonal and annual sums of precipitation and potential evaporation, mean seasonal and annual air temperature and wind speed values for Western Pomerania in 1971–2000 and 1981–2010

| Okres<br>Period          | Opad atmosferyczny [mm]<br>Precipitation [mm] |     |      | Parowanie z powierzchni wody [mm]<br>Potential evaporation [mm] |     |      | Temperatura powietrza [°C]<br>Air temperature [°C] |      |      | Prędkość wiatru [m/s]<br>Wind speed [m/s] |     |      |
|--------------------------|---|-----|------|---|-----|------|--|------|------|---|-----|------|
|                          | XI–IV   | V–X | XI–X | XI–IV   | V–X | XI–X | XI–IV  | V–X  | XI–X | XI–IV                                     | V–X | XI–X |
| 1971–2000                | 252   | 330 | 582  | 158   | 405 | 563  | 2,6  | 14,1 | 8,4  | 3,4                                       | 2,8 | 3,1  |
| 1981–2010                | 275   | 360 | 635  | 167   | 424 | 591  | 2,9  | 14,5 | 8,7  | 3,4                                       | 2,9 | 3,2  |
| Zmiana<br>Change         | 23  | 30  | 53   | 9   | 19  | 28   | 0,3  | 0,4  | 0,4  | 0,0                                       | 0,1 | 0,1  |
| Zmiana [%]<br>Change [%] | 9,1   | 9,1 | 9,1  | 5,7   | 4,7 | 5,0  | 11,5   | 2,8  | 4,2  | 0,0                                       | 0,0 | 1,6  |

Dla danych wejściowych, dotyczących temperatury powietrza, prędkości wiatru, parowania z powierzchni wody oraz wielkości opadu, pochodzących ze stacji pomiarowych Pomorza Zachodniego, wykonano geostatystyczną estymację wartości tych elementów dla obszaru poddanego analizie. Do interpolacji przestrzennej parametrów zastosowano metodę krigingu w środowisku ArcGIS. W rezultacie otrzymano mapy rastrowe parametrów klimatycznych w formacie GRID, o wielkości siatki 100 × 100 m.

Do modelowania w programie WetSpas wykorzystano także informacje o pokryciu powierzchni terenu w formie wektorowej – Corine Land Cover (CLC) 2012. Z Wojewódzkiego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej (WODGiK) pozyskano wektorowe mapy glebo-rolnicze w skali 1 : 50 000. Informacje z CLC i mapy z WODGiK zreklasyfikowano zgodnie z kodowaniem danych w WetSpas. Dane z postaci wektorowej przekształcono na postać rastrową w programie ArcGIS. Rastrową mapę głębokości wód podziemnych opracowano na podstawie warstwy informacyjnej mapy hydrograficznej w skali 1 : 50 000, zawierającej hydroizobaty. Z bazy danych Centralnego Ośrodka Dokumentacji Geodezyjnej

i Kartograficznej pozyskano zbiór punktów wysokościowych w rozkładzie regularnej siatki o boku 100 m. Na podstawie tych danych wykonano numeryczny model terenu (NMT) w formacie GRID 100 × 100 m, z którego opracowano mapę spadków terenu o takiej samej rozdzielczości przestrzennej.

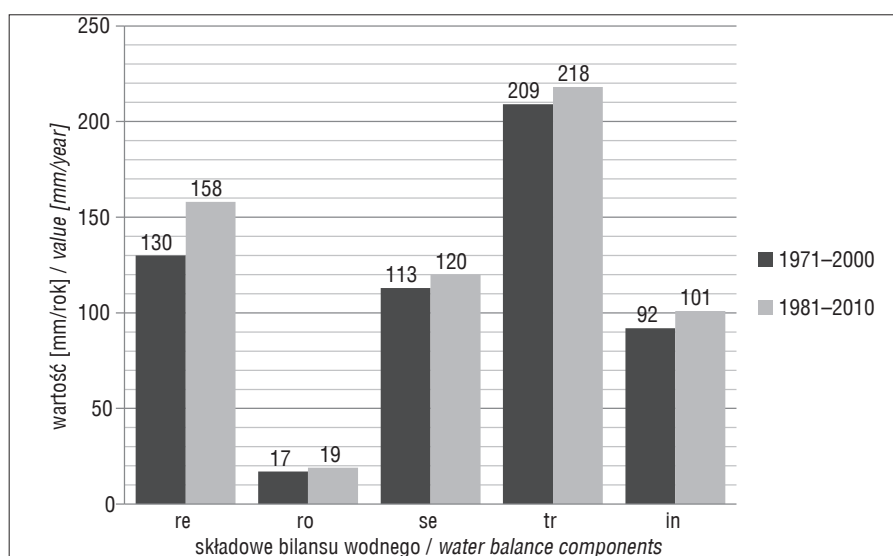
#### WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

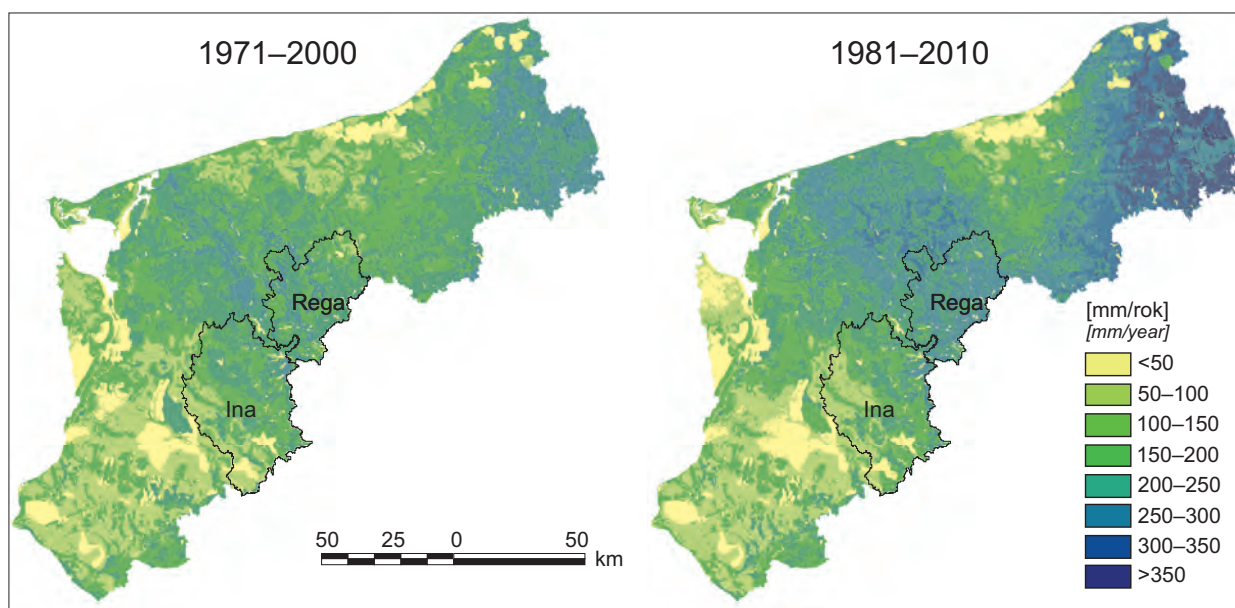
W wyniku obliczeń symulacyjnych otrzymano rastrowe mapy przestrzennego rozkładu poszczególnych elementów bilansu wodnego dla rozpatrywanego obszaru, w podziale na półrocze letnie i zimowe oraz dla całego roku.

Syntetyczne wyniki obliczeń struktury bilansu wodnego Pomorza Zachodniego w analizowanych wieloletniach dla obszaru badań przedstawiono na rycinie 2.

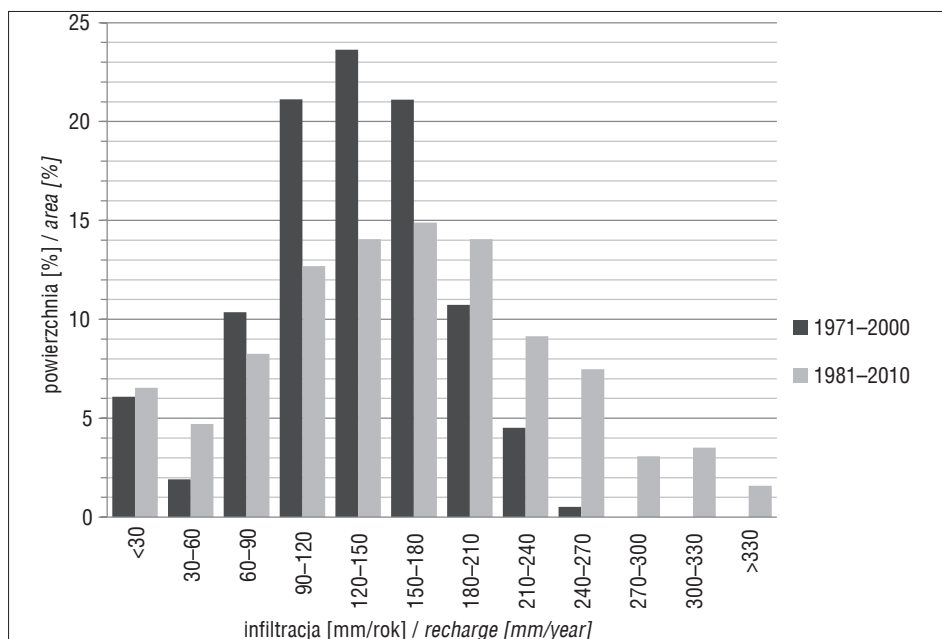
Na rycinie 3 przedstawiono mapy rocznych sum infiltracji efektywnej dla obu analizowanych okresów.

Podział powierzchni obszaru pod względem wartości infiltracji efektywnej na obszarze badań symulacyjnych w obu analizowanych trzydziestoleciach przedstawiono na rycinie 4.

**Ryc. 2.** Wartości średnich rocznych składowych bilansu wodnego dla Pomorza Zachodniego w latach 1971–2000 oraz 1981–2010; re – infiltracja efektywna, ro – spływ powierzchniowy, se – parowanie z gleby, tr – transpiracja, in – intercepcja**Fig. 2.** Values of mean annual water balance components of Western Pomerania in 1971–2000 and 1981–2010; re – groundwater recharge, ro – runoff, se – soil evaporation, tr – transpiration, in – interception



Ryc. 3. Przestrzenny rozkład rocznej sumy infiltracji efektywnej na Pomorzu Zachodnim  
 Fig. 3. Spatial distribution of annual groundwater recharge for Western Pomerania



Ryc. 4. Procentowy udział powierzchni badanego obszaru o określonej wartości infiltracji efektywnej  
 Fig. 4. Percentage of the area of Western Pomerania according to groundwater recharge values

Biorąc pod uwagę średnie wartości infiltracji efektywnej dla całego obszaru objętego badaniami modelowymi obliczono średnie wartości wskaźnika infiltracji (infiltracja/opad), które wyniosły: 22% dla okresu 1971–2000 oraz 23,8% dla trzydziestolecia 1981–2010. Wartość modułu zasilania infiltracyjnego dla całej powierzchni Pomorza Zachodniego wyniosła  $4,12 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{km}^2$  dla okresu 1971–2000 i  $5,01 \text{ dm}^3/\text{s}/\text{km}^2$  w trzydziestolecie 1981–2010.

#### WERYFIKACJA UZYSKANYCH WYNIKÓW OCENY INFILTRACJI EFEKTYWNEJ

Ocenę wiarygodności uzyskanych wyników oszacowania infiltracji efektywnej na Pomorzu Zachodnim przeprowadzono porównując przedstawione wyżej rezultaty obliczeń symulacyjnych z wynikami obliczeń odpływu pod-

ziemnego metodami hydrologicznymi (Herbich i in., 2014). Analizę opracowano na podstawie szeregów czasowych przepływów wg danych IMGW-PIB dla dwóch zlewni hydrologicznych (ryc. 3): rzeki Regi (przekrój wodowskazowy w Resku, powierzchnia  $1133,58 \text{ km}^2$ ) oraz rzeki Iny (przekrój Stargard Szczeciński, powierzchnia  $1773,83 \text{ km}^2$ ). Odpływ podziemny w ww. przekrojach wodowskazowych obliczono dwiema metodami – Wundta i Killego. Zestawienie wartości odpływu podziemnego obliczonego metodami hydrologicznymi dla okresu 1971–2010 oraz średniej wartości infiltracji efektywnej dla tych zlewni oszacowanej przy pomocy modelu WetSpa przedstawiono w tabeli 2.

Opierając się na danych zebranych w tabeli 2 należy stwierdzić, że odpływ podziemny wyznaczony poszczególnymi metodami hydrologicznymi w obu zlewniach róż-

**Tab. 2.** Porównanie odpływu podziemnego obliczonego metodami hydrologicznymi (Wundta, Killego) z infiltracją efektywną obliczoną przy pomocy modelu WetSpass

**Table 2.** Comparison of groundwater outflow calculated by hydrological methods with groundwater recharge assessed by means of the WetSpass model

| Zlewnia<br>Catchment | Odpływ podziemny wg metody<br>GW outflow by method |                                  | Infiltracja efektywna<br>[mm/rok]<br>GW recharge<br>WetSpass<br>[mm/year] |
|----------------------|--|----------------------------------|---|
|                      | Wundta<br>[mm/rok]<br>[mm/year]                    | Killego<br>[mm/rok]<br>[mm/year] |   |
| Rega                 | 199,5  | 193,6                            | 174,91  |
| Ina                  | 125,9  | 120,2                            | 125,93  |

ni się znacząco. Średnia roczna wartość infiltracji efektywnej oszacowana na podstawie obliczeń symulacyjnych przy pomocy modelu WetSpass różni się od odpływu podziemnego obliczonego metodami hydrologicznymi stosunkowo nieznacznie. Szczególnie niewielkie różnice można stwierdzić dla zlewni rzeki Iny, dla której różnica odpływu podziemnego wg metody Killego oraz infiltracji efektywnej wg modelu WetSpass wynosi jedynie  $-5,7$  mm (niepełna 5%), zaś dla metody Wundta jest niemal identyczna.

## WNIOSKI

Przeprowadzone badania symulacyjne oceny bilansu wodnego Pomorza Zachodniego przy pomocy modelu WetSpass pozwoliły na oszacowanie zasobów odnawialnych wód podziemnych dla dwóch trzdziestolecia, w których warunki klimatyczne różniły się w znacznym stopniu. W okresie 1971–2000 średnioroczna suma infiltracji efektywnej dla całego obszaru badań wynosiła 130 mm/rok, w trzydziestolecia 1981–2010 wartość infiltracji efektywnej wyniosła 158 mm/rok. W obu porównywanych okresach otrzymano jednak bardzo zbliżoną wartość średniego wskaźnika infiltracji, wynoszącą około 23%. Analizy porównawcze wyników oszacowania infiltracji efektywnej przy pomocy modelu WetSpass z wartościami odpływu podziemnego obliczonymi przy pomocy metod hydrologicznych dowiodły dużej wiarygodności wyników zasilenia infiltracyjnego wód podziemnych otrzymywanych przy pomocy modelu WetSpass.

Zdaniem autorów niniejszej pracy model WetSpass powinien znaleźć szerokie zastosowanie w licznych zagadnieniach modelowania hydrogeologicznego o charakterze regionalnym, w których jest ważna przestrzenna zmienność infiltracji efektywnej – np. w opracowaniach na temat podatności wód podziemnych na zanieczyszczenie.

Autorzy składają serdeczne podziękowania prof. Marianowi Rojkowi za udzielone konsultacje w zakresie oszacowania wartości parowania z wolnej powierzchni wody. Praca została zrealizowana w ramach badań własnych Instytutu Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu ze środków przeznaczonych na działalność statutową.

## LITERATURA

- AISH A.M. 2014 – Estimation of Water Balance Components in the Gaza Strip with GIS Based WetSpass Model. *Civil Environ. Res.*, 6 (11): 77–85.
- AISH A. M., BATELAAN O., DE SMEDT F. 2010 – Distributed recharge estimation for groundwater modeling using WetSpass model, case study – Gaza strip, Palestine. *Arab. J. Sci. Eng.*, 35 (1B): 155–163.
- ARMANUOS A.M., NEGM A., YOSHIMURA C., SAAVEDRA O.C. 2016 – Application of WetSpass model to estimate groundwater recharge variability in the Nile Delta aquifer. *Arab. J. Geosci.*, 9 (10): 553.
- ATLAS KLIMATU POLSKI 2005 – Lorenc H. (red.). IMGW, Warszawa.
- BATELAAN O., DE SMEDT F. 2001 – WetSpass: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modelling. [W:] Gehrels H., Peters N.E., Hoehn E., Jensen K., Leibundgut Ch., Griffioen J., Webb B., Zaadnoordijk W.-J. (red.), Impact of human activity on groundwater dynamics. *IAHS Publ.*, 269: 11–18.
- BATELAAN O. 2006 – Phreatology. Characterizing groundwater recharge and discharge using remote sensing, GIS, ecology, hydrochemistry and groundwater modelling. Department of Hydrology and Hydraulic Engineering, Vrije Universiteit Brussel.
- GHARBIA S.S., AISH A., PILLA F. 2015a – Modelling Potential Impacts of Climate Change on Groundwater of the Gaza Coastal Aquifer from Ensemble of Global Climate Model Projections. *Civil Environ. Res.*, 7: 44–60.
- GHARBIA S.S., AISH A., PILLA F. 2015b – Impacts of climate change on a spatially distributed water balance in the Gaza Strip, Palestine. *J. Environ. Earth Sci.*, 5: 76–91.
- GRAF R., PRZYBYŁEK J. 2014 – Estimation of shallow groundwater recharge using a GIS-based distributed water balance model. *Quaestiones Geographicae*, 33 (3): 27–37.
- HERBICH P., KAPUŚCIŃSKI J., NOWICKI K., RODZIOCH A. 2014 – Metodyka określania zasobów dyspozycyjnych wód podziemnych w obszarach bilansowych z uwzględnieniem potrzeb jednolitych bilansów wodnospodarczych. *Poradnik metodyczny. Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, Ministerstwo Środowiska, Warszawa.*
- KAJEWSKI I. 2008 – Ocena składników bilansu wodnego w skali regionalnej przy pomocy modelu WetSpass. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 528: 63–70.
- KOWALSKI J. 2007 – Hydrogeologia z podstawami geologii. *Wyd. UWP, Wrocław*, s. 398.
- MOGHEIR Y., AJJUR S. 2013 – Effects of climate change on groundwater resources (Gaza strip case study). *Int. J. Sustainable Energy Environ.*, 1 (8): 136–149.
- PANDIAN M., RAJASIMMAN U.A.B., SARAVANAVEL J. 2014 – Identification of Groundwater Potential Recharge Zones using WetSpass Model in parts of Coimbatore and Tiruppur Districts in Tamil Nadu, India. *Int. J. Water*, 2 (1): 27–32.
- POKOJSKA P., 2004 – Application and verification of water balance model with distributed parameters (on the example of Rega River Basin). *Miscellanea Geographica*, 11: 139–149.
- SHRESTHA S., BACH T.V., PANDEY V.P. 2016 – Climate change impacts on groundwater resources in Mekong Delta under representative concentration pathways (RCPs) scenarios. *Environ. Sci. Policy*, 61: 1–13.
- WANG Y., LIAO W., DING Y., WANG X., JIANG Y., SONG X., LEI X. 2015 – Water resource spatiotemporal pattern evaluation of the upstream Yangtze River corresponding to climate changes. *Quatern. Internat.*, 380–381: 187–196.
- WOLDEAMLAK S.T., BATELAAN O., DE SMEDT F. 2007 – Effects of climate change on the groundwater system in the Grote-Nete catchment, Belgium. *Hydrogeo. J.*, 15: 891–901.