

Analiza wahań zwierciadła płytkich wód podziemnych na obszarze sandru Brdy

Beata Jaworska-Szulc¹, Małgorzata Pruszkowska-Caceres¹, Adam Szymkiewicz¹,
Anna Gumuła-Kawęcka¹, Wioletta Gorczewska-Langner¹

Groundwater table fluctuations in the shallow aquifer of the Brda River outwash plain. Prz. Geol., 65: 1069–1074.

Abstract. In the Brda River outwash plain – the largest and the most typical landform of this kind in Poland (Galon, 1972) – there are 10 observation wells of the monitoring network of the Polish Geological Institute – National Research Institute. Analysis of groundwater level observations for the period of 2003–2016, obtained from the monitoring network, show a long-term trend of water table lowering. In most cases the groundwater table has been below the monthly average water level since 2006.

In order to correlate the water table and weather data from the meteorological station in Chojnice, numerical simulations were performed using HYDRUS 1D (Šimůnek et al. 2016) – vadose zone software package, based on the Richards equation. A one-dimensional model of the vadose zone was developed to simulate groundwater recharge, applying different bottom boundary conditions (Constant Pressure Head or Free Drainage) considering bare soil evaporation or root water uptake of the grass cover.

Keywords: water table fluctuations, groundwater recharge, vadose zone

W pracy przeprowadzono analizę wahań zwierciadła wód podziemnych na obszarze sandru Brdy, na podstawie obserwacji z 10 punktów pomiarowych sieci obserwacyjno-badawczej wód podziemnych Polskiego Instytutu Geologicznego – Polskiego Instytutu Badawczego (PIG-PIB), publikowanych w Rocznikach Hydrogeologicznych w latach 2003–2016. Na podstawie danych z Roczników określono trendy położenia zwierciadła wód podziemnych, analizowano stany średnie miesięczne, stany charakterystyczne z wielolecia oraz oceniono zagrożenie wystąpienia suszy gruntowej (niżówki hydrogeologicznej).

Została także podjęta próba skorelowania obserwacji położenia zwierciadła wody z danymi meteorologicznymi ze stacji w Chojnicach, zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie sandru Brdy. W tym celu wykonano symulacje numeryczne przepływu wody przez strefę aeracji dla wybranego, reprezentatywnego punktu obserwacyjnego. Uzyskane w ten sposób wartości zasilania infiltracyjnego porównano z obserwowanymi wahaniami zwierciadła wody. Do obliczeń numerycznych wykorzystano program Hydrus-1D (Šimůnek i in., 2013), który opiera się na równaniu Richardsa opisującym pionowy przepływ w strefie aeracji, z możliwością zadawania zmiennych w czasie warunków brzegowych na powierzchni terenu, wyznaczonych na podstawie danych pogodowych.

OBSZAR BADAŃ

Sandr i dolina Brdy, oraz ich wschodnie odgałęzienie – sandr i dolina Wdy, znane jako Bory Tucholskie, należą do najbardziej typowych obszarów sandrowych stadiału pomorskiego. Sandr Brdy wraz z sandrem Wdy jest uważany za największy sandr na ziemiach polskich (Galon, 1972). Można go podzielić na właściwe pole sandrowe z licznymi wyspami moreny dennej i czołowej oraz doliny sandrowe prowadzące do pradoliny Noteci–Warty i doliny Wisły (ryc. 1). Na wschód od doliny i sandru Brdy rozpościera

się Równina Świecka, a na zachód wysoczyzna Pojezierza Krajeńskiego.

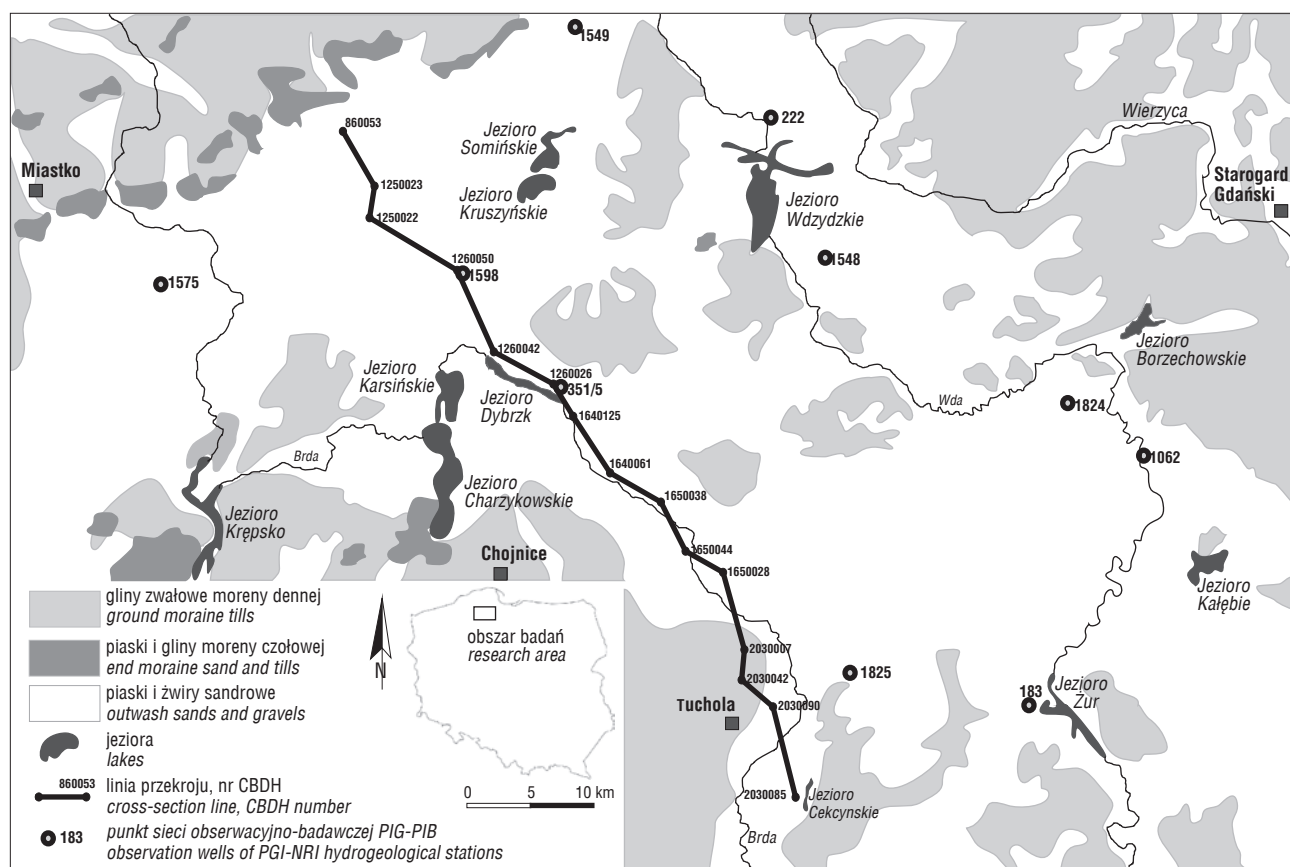
Mięszość utworów czwartorzędowych zwykle wynosi ponad 100 m, a w rynnach dochodzi nawet do 200 m. Występują tu osady zlodowaceń południowopolskich, środkowopolskich i północnopolskich oraz osady interglacjału mazowieckiego i eemskiego (Błaszkiwicz, 1999). Największą mięszość, od kilkudziesięciu metrów do ponad 100 m, mają utwory zlodowaceń północnopolskich. Tworzą one ciągłą pokrywę i są reprezentowane przez dwa lub trzy poziomy glin zwałowych, utwory wodnolodowcowe międzymorenowe i najmłodsze osady sandrowe. Piaski i żwiry fluwioglacjalne międzymorenowe często łączą się z utworami sandrowymi występującymi na powierzchni terenu (ryc. 2).

W osadach czwartorzędu można wyróżnić trzy główne użytkowe poziomy wodonośne: poziom związany z piaskami wodnolodowcowymi zlodowaceń północnopolskich (sandrowo-międzymorenowy), poziom międzymorenowy związany z piaskami wodnolodowcowymi zlodowaceń środkowopolskich oraz lokalnie poziom związany z utworami interglacjału mazowieckiego i fluwioglacjalnymi zlodowaceń południowopolskich (Kreczko, 2000, 2004; Prusak, 2000, 2002; Muter, 2002).

ANALIZA OBSERWACJI WAHAŃ ZWIERCIADŁA WÓD PODZIEMNYCH W PUNKTACH SIECI OBSERWACYJNO-BADAWCZEJ PIG-PIB

Analiza wahań zwierciadła wody dotyczy poziomu sandrowo-morenowego, a właściwie jego górnej – sandrowej części. Na przekroju (ryc. 2) przedstawiono jego zasięg (1-Qp₄) oraz powiązania z dolną, międzymorenową częścią osadów wodonośnych zlodowaceń północnopolskich (2-Qp₄). Wody podziemne o zwierciadle swobodnym występują tu na głębokości od 3 do 20 m p.p.t. Na obszarze sandru Brdy znajduje się dziesięć punktów pomiarowych sieci obserwacyjno-badawczej wód podziemnych PIG-PIB,

¹ Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Politechnika Gdańska, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk; bejaw@pg.gda.pl, mpru@pg.gda.pl, adams@pg.gda.pl, annkawec@pg.gda.pl, wioletta.gorczewska-langner@pg.gda.pl.



Ryc. 1. Szkic geomorfologiczny sandru Brdy (opracowano wg Marksa i in., 2006), lokalizacja punktów sieci obserwacyjno-badawczej PIG-PIB

Fig. 1. Geomorphological sketch-map of the Brda River outwash plain (after Marks *et al.*, 2006), observation wells of the PGI-NRI hydrogeological stations

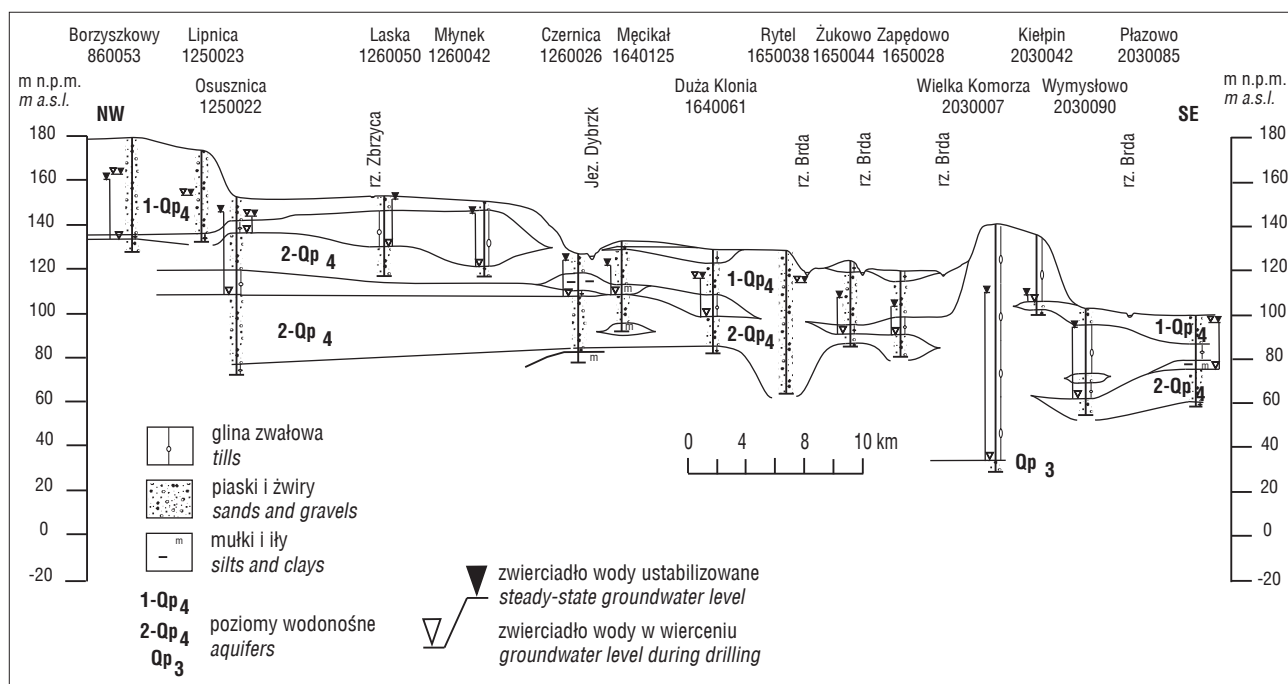
w których jest mierzone położenie zwierciadła wód podziemnych w wodach podziemnych poziomu sandrowego (ryc. 1, tab. 1). Obserwacje są publikowane w Rocznikach Hydrogeologicznych od 2003 r., jednak jedynie trzy stacje pomiarowe (nr 183, 222, 351/5) posiadają pełen cykl obserwacji. Natomiast w pięciu z nich obserwacje są prowadzone zaledwie od dwóch–trzech lat.

W dziewięciu punktach, stwierdzono tendencję do obniżania się poziomu zwierciadła wód podziemnych. W jednym punkcie, w którym stwierdzono tendencję rosnącą (nr 1548), obserwacje są prowadzone zaledwie od dwóch lat i nie można tego uznać za trend długofalowy. Dla trzech wspomnianych punktów z pełnym opublikowanym cyklem pomiarów 2003–2016, określono w Rocznikach także sta-

Tab. 1. Punkty sieci obserwacyjno-badawczej PIG-PIB na obszarze sandru Brdy

Table 1. Observation wells of the PGI-NRI hydrogeological stations in the Brda River outwash plain

Nr punktu sieci obserwacyjno-badawczej PIG-PIB <i>Observation wells in PGI NRI hydrogeological stations</i>	Nr CBDH <i>CBDH number</i>	Lokalizacja <i>Location</i>	Obserwacje publ. w Roczniku od roku: <i>Observations published in the Hydrogeological Annual Report since:</i>	Rzędna terenu [m n.p.m.] <i>Land elevation [m a.s.l.]</i>	Głębokość nawierconego zwierciadła wody [m] <i>Depth to groundwater level [m]</i>	Głębokość ustalonego zwierciadła wody [m] <i>Depth to steady-state groundwater level [m]</i>
183	2040002	Wierzchy	2003	89,6	12,5	12,5
222	880042	Wąglikowice	2003	99,5	12,6	12,6
351/5	1260038	Czernica	2003	128	3,5	3,5
1062	1670017	Wda	2007	100	17,5	5,8
1548	–	Podrąbiona	2015	139,24	7,2	7,2
1549	–	Róg	2014	180,45	21,7	21,7
1575	1240029	Załęże	2008	165,1	14,7	14,7
1598	1260037	Laska	2015	124,72	3,0	3,0
1824	–	Osowo Leśne	2014	106,34	7,7	3,2
1825	2040013	Zalesie	2014	114,87	8	7,1



Ryc. 2. Przekrój hydrogeologiczny
Fig. 2. Hydrogeological cross-section

ny charakterystyczne z okresu 1991–2005. Długookresowy trend położenia zwierciadła wody jest tu malejący (ryc. 3), od 2006 roku poziom zwierciadła wód podziemnych występuje poniżej poziomu średniego z wielolecia, a w dwóch ostatnich latach układa się przeważnie poniżej minimalnego stanu z wielolecia 1991–2005. Podobnie we wszystkich tych trzech stacjach obserwacyjnych występuje zagrożenie niżówką. W trakcie całego okresu analizowanych 14 lat obserwacji publikowanych w interwale miesięcznym, we wszystkich punktach obserwacyjnych występowało ciągłe zagrożenie suszą, jednak do 2016 r. nie odnotowano wystąpienia suszy ani niżówki.

SYMULACJE NUMERYCZNE PRZEPIYU WÓD PRZEZ STREFĘ AERACJI

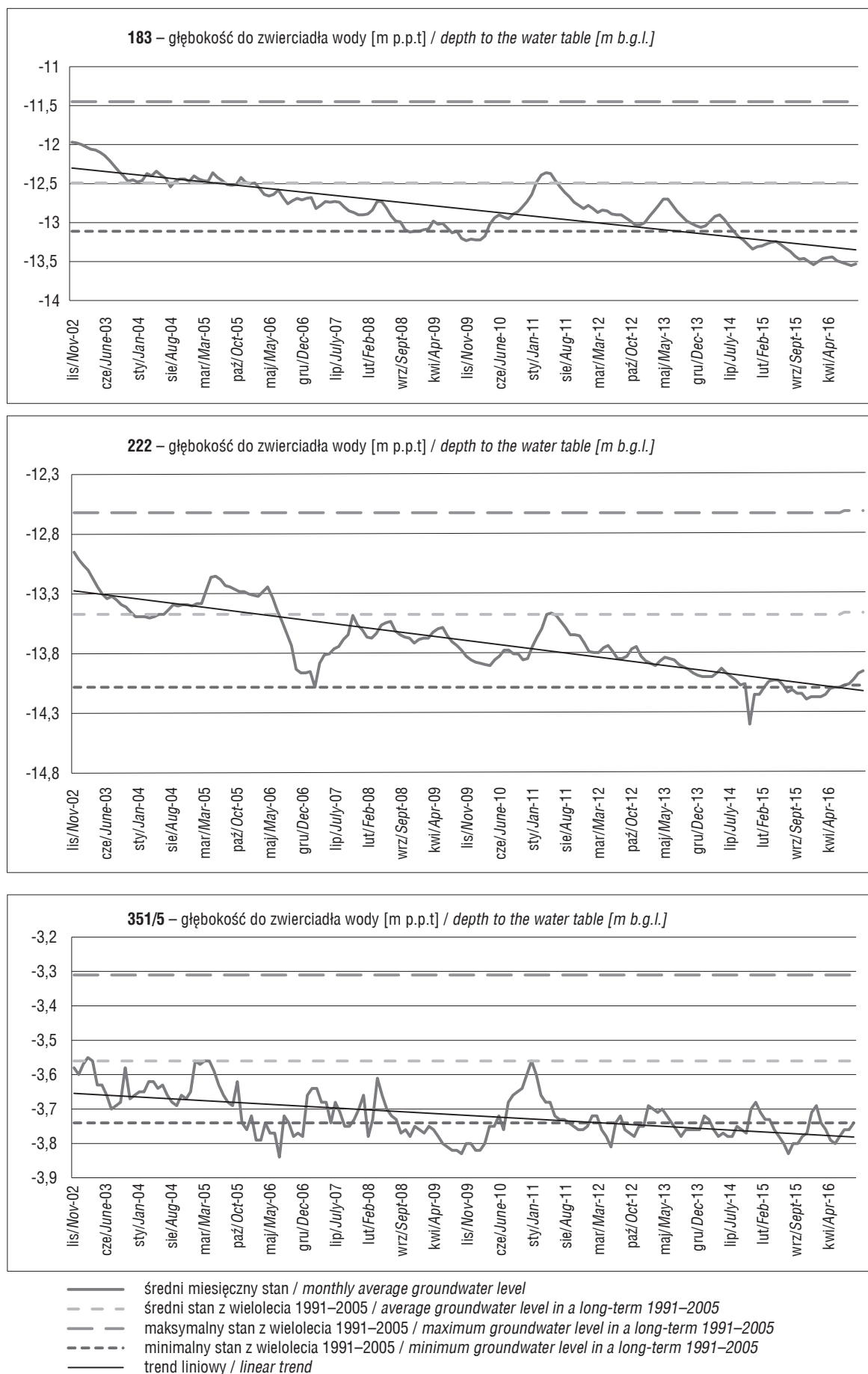
W ramach pracy podjęto próbę skorelowania obserwacji położenia zwierciadła wód podziemnych z danymi meteorologicznymi pozyskanymi ze stacji w Chojnicach. W tym celu, na podstawie jednowymiarowego modelu strefy aeracji, wykonano symulacje przepływu w strefie nienasyconej. Badania modelowe przeprowadzono w pro-

gramie Hydrus 1-D (Šimůnek i in., 2013), który rozwiązuje równanie Richardsa i adwekcyjno-dyfuzyjne równania transportu ciepła i substancji rozpuszczonych metodą elementów skończonych.

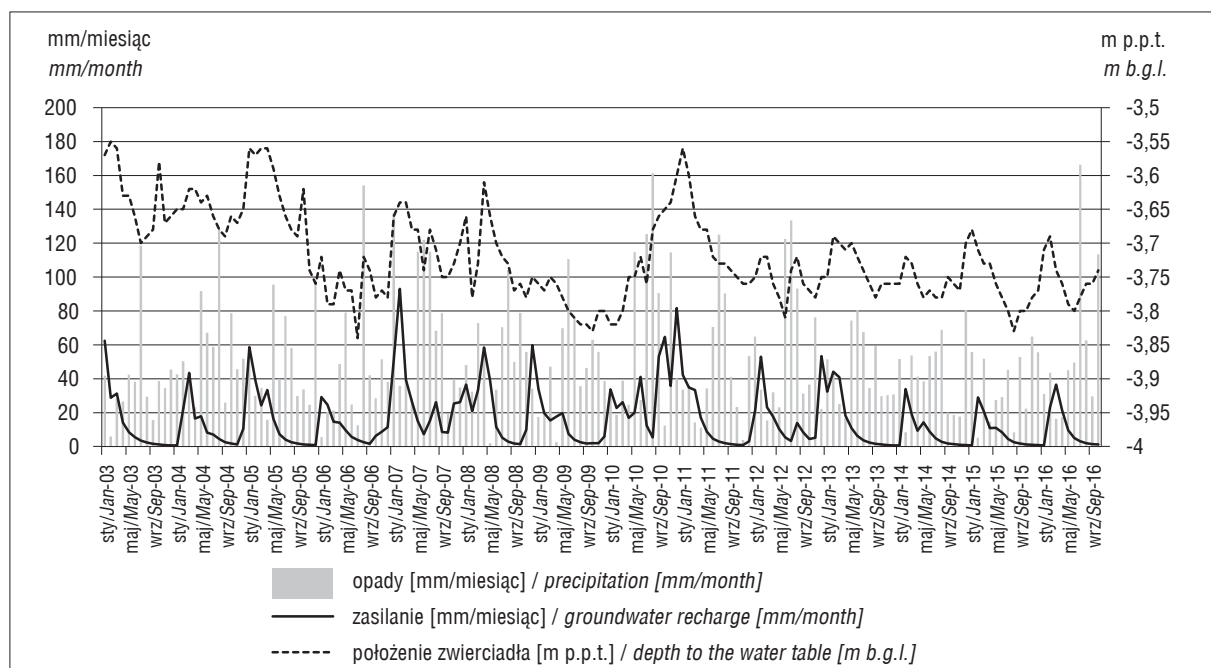
Model strefy nienasyconej zbudowano na podstawie profilu otworu nr 351/5 stacji hydrogeologicznej PIG-PIB w miejscowości Czernica w powiecie chojnickim. Punkt ten został wybrany ze względu na największe podobieństwo warunków hydrogeologicznych do badanego przez autorów, w ramach projektu Narodowego Centrum Nauki, fragmentu sandru Brdy, a także stosunkowo długi okres obserwacji zwierciadła wody. Występujące płytko zwierciadło wody podlega wyraźnym fluktuacjom związanym z infiltracją wód opadowych, aczkolwiek amplituda wahań jest ograniczona, prawdopodobnie z uwagi na bliskość jeziora, lokalnej bazy drenazu. W profilu występują piaski drobnoziarniste rozdzielone przewarstwieniem piasku gliniastego (0,40–0,80 m p.p.t.) i gliny piaszczystej (0,80–1,20 m p.p.t.). Parametry krzywej retencji i współczynnik filtracji poszczególnych warstw (piasek drobny, piasek gliniasty, glina piaszczysta – tab. 2) zostały przyjęte na podstawie artykułu Carsela i Parisha (1988), wg modelu Van Genuchtena–Mualema (Van

Tabela 2. Parametry hydrauliczne przyjęte w modelu Van Genuchtena–Mualema
Table 2. Parameters of the Van Genuchten–Mualem hydraulic model for the soils used in simulations

Rodzaj materiału Type of soil	Rezydualna wilgotność objętościowa Residual water content q_r	Wilgotność objętościowa gruntu nasyconego Saturated soil water content q_s	Parametr a funkcji krzywej retencji Parameter a of soil water retention function [1/mm]	Parametr n funkcji krzywej retencji Parameter n of soil water retention function	Współczynnik filtracji gruntu nasyconego Saturated hydraulic conductivity K_s [m/24h]
Piasek drobny Fine sand	0,045	0,43	0,0145	2,68	7,128
Piasek gliniasty Loamy sand	0,057	0,41	0,0124	2,28	3,502
Gлина piaszczysta Sandy loam	0,065	0,41	0,0075	1,89	1,061



Ryc. 3. Przebieg wahań zwierciadła wód podziemnych w punktach sieci obserwacyjno-badawczej PIG-PIB
Fig. 3. Groundwater level fluctuation in observation wells of the PGI-NRI hydrogeological stations



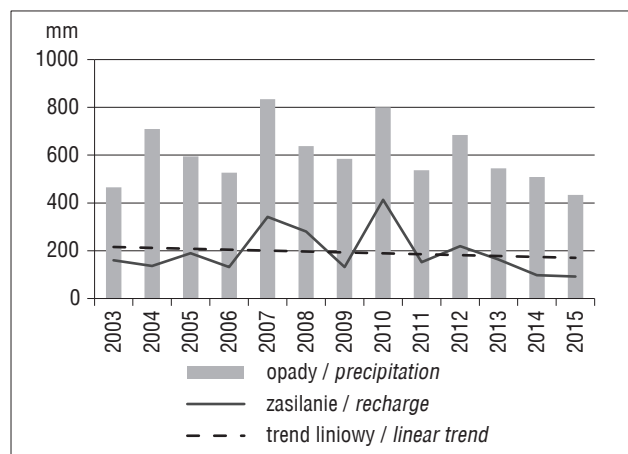
Ryc. 4. Wielkości zasilania otrzymane na podstawie symulacji numerycznej
Fig. 4. Values of groundwater recharge obtained from numerical simulation

Genuchten, 1980). Zastosowano stały krok dyskretyzacji przestrzennej równy 2 cm. Założono, że poziom zwierciadła wód podziemnych znajduje się na stałej głębokości 3,5 m p.p.t. (warunek brzegowy 1 rodzaju – *constant pressure head*). Górną granicę modelu zdefiniowano warunkiem brzegowym w postaci zmiennego w czasie natężenia infiltracji z możliwością swobodnego spływu powierzchniowego (*atmospheric boundary condition with surface runoff*). Dane meteorologiczne dla okresu od 1 stycznia 2003 r. do 30 września 2016 r. zostały pozyskane ze stacji meteorologicznej IMGW zlokalizowanej w Chojnicach (53,69°N, 17,56°E).

Ewapotranspiracja w modelu jest uwzględniona w sposób uproszczony, jako człon źródłowy w obszarze strefy korzeniowej, proporcjonalnie do gęstości korzeni. Przyjęto głębokość strefy korzeniowej 3 m (las iglasty, Meyer i in., 1997) i gęstość korzeni malejącą liniowo od powierzchni terenu do dolnej granicy strefy korzeniowej. Parametry opisujące pobór wody przez korzenie przyjęto na podstawie literatury (Huang i in., 2011). Założono, że ewapotranspiracja potencjalna (maksymalna, przy nieograniczonej dostępności wody) jest równa ewapotranspiracji wskaźnikowej ET₀. Wielkość tę początkowo wyznaczono ze wzoru Grabarczyka (Grabarczyk, Żarski, 1986), z uwagi na ograniczoną dostępność danych meteorologicznych. Z literatury Tredera i in. (2010) wynika, że model ten zaniża wartości ewapotranspiracji w sezonie wegetacyjnym w porównaniu do innych modeli (Penmana–Monteitha, Hargreavesa). Z pracy (Treder i in., 2010) wynika, że w sezonie wegetacyjnym wartości ET₀ wg Grabarczyka są ok. dwukrotnie niższe niż wg wzoru Penmana–Moteitha, w związku z czym w obliczeniach dla okresu maj–wrzesień użyto wartości ET₀ wg Grabarczyka pomnożonych przez 2. Wyniki obliczeń dla tak przyjętych danych wyjściowych przedstawiono na rycinie 4. Wykonano również szereg obliczeń wariantowych, które wskazały, że wielkość zasilania wyznaczona modelowaniem w istotny sposób zależy nie tylko od wielkości ET₀, ale również od głębokości strefy korzeniowej oraz od rozdzielczo-

ści czasowej danych meteorologicznych. Przyjęcie w symulacji wartości dziennych opadów (wg IMGW) i ET₀ skutkuje znacznie wyższym zasilaniem, niż w przypadku wartości miesięcznych (por. Batalha i in., 2017). Analizy te mają charakter wstępny, a opracowanie bardziej dokładnego modelu przepływu przez strefę aeracji i jego kalibracja są przedmiotem aktualnie prowadzonych przez autorów badań.

Otrzymane z obliczeń modelowych dzienne wartości zasilania zostały zsumowane i przeanalizowane w skali miesiąca w korelacji z obserwacjami położenia zwierciadła wód podziemnych w punkcie nr 351/5 oraz sumą miesięcznych opadów w okresie 01.01.2003–30.09.2016 (ryc. 4). Dokonano również porównania rocznych wartości zasilania obliczonych w poszczególnych symulacjach z rocznymi sumami opadów (ryc. 5). Uzyskano wartości wskaźnika infiltracji efektywnej w zakresie od 0,19 dla 2004 r. do 0,52 dla 2010 r.



Ryc. 5. Roczne wartości zasilania porównane z rocznymi sumami opadów

Fig. 5. Values of annual groundwater recharge and annual amount of precipitation

Na podstawie analizy wyników obliczeń można stwierdzić, że tendencje zmian średnich rocznych wartości zasilania w okresie 2003–2016 w znacznym stopniu odzwierciedlają tendencje zmian średnich rocznych sum opadów i zaobserwowanych wahań zwierciadła wód podziemnych. Tendencja spadkowa wartości zasilania wód podziemnych jest szczególnie widoczna na wykresach przedstawiających analizowane parametry w skali rocznej. Znaczący spadek zasilania został odnotowany dla okresu od września 2012 r. do września 2016 r.

PODSUMOWANIE

Na obszarze sandru Brdy znajduje się dziesięć punktów pomiarowych sieci obserwacyjno-badawczej wód podziemnych PIG-PIB. W dziewięciu z nich stwierdzono tendencję do obniżania się poziomu zwierciadła wód podziemnych. Jedynie trzy stacje posiadają obserwacje z wielolecia 2003–2016 oraz określone stany charakterystyczne z okresu 1991–2005. Na stacjach tych jest obserwowany długookresowy trend obniżania się zwierciadła wody, a od 2006 r. poziom zwierciadła wód podziemnych występuje poniżej poziomu średniego z wielolecia.

Wstępna próba skorelowania obserwacji położenia zwierciadła wody z danymi meteorologicznymi ze stacji w Chojnicach, zlokalizowanej w bezpośrednim sąsiedztwie sandru Brdy, za pomocą symulacji numerycznych w znacznym stopniu potwierdziła spadkowy trend zasilania pierwszego poziomu wodonośnego. Planuje się weryfikację otrzymanych wyników na podstawie danych uzyskanych z prowadzonych przez autorów badań na obszarze sandru Brdy, w ramach projektu NCN.

Autorzy pragną podziękować Recenzentowi Prof. Stanisławowi Staśko za cenne uwagi i sugestie, które wniosły istotny wkład w ostateczny kształt pracy. Praca została wykonana w ramach projektu badawczego Narodowego Centrum Nauki nr 2015/17/B/ST10/03233.

LITERATURA

- BATALHA M.S., PONTEDEIRO E.M., VAN GENUCHTEN M.T.H. 2017 – Groundwater recharge calculations as affected by temporal averaging of meteorological data. [W:] Mat. 5th International Conference HYDRUS Software Applications to Subsurface Flow and Contaminant Transport Problems, March 30–31. 2017, Prague, Czech Republic: 12.
- BŁASZKIEWICZ M. 1999 – Objasnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50000. Ark. 128. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- CARSEL R.F., PARRISH R.S. 1988 – Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics. *Water Resour. Res.*, 24: 755–769.
- GALON R. (red.) 1972 – Geomorfologia Polski. Niż Polski. T. 2. Wyd. PWN, Warszawa.
- GRABARCZYK S., ŻARSKI J. 1986 – Porównanie wysokości szacowanych dawek wody według różnych metod sterowania deszczowaniem. *Zesz. Prob. Post. Nauk Roln.*, 327: 161–170.
- HUANG M., BARBOUR S.L., ELSHORBAGY A., ZETTL J.D., SI B.C. 2011 – Water availability and forest growth in coarse textured soils. *Can. J. Soil Sci.*, 91: 199–210.
- KRECKO M. 2000 – Mapa Hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000. Ark. 128, 165. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- KRECKO M. 2004 – Mapa Hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000. Ark. 124, 125. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MARKS L., BER A., GOGOŁEK W., PIOTROWSKA K. 2006 – Mapa Geologiczna Polski 1 : 500 000. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- MEYER P.D., ROCKHOLD M.L., GEE G.W. 1997 – Uncertainty analyses of infiltration and subsurface flow and transport for SDMP sites. Rep. NUREG/CR–6565, PNNL–11705, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC.
- MUTER K. 2002 – Mapa Hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000. Ark. 204. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PRUSSAK E. 2000 – Mapa Hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000. Ark. 166. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- PRUSSAK E., PRUSSAK W. 2002 – Mapa Hydrogeologiczna Polski 1 : 50 000. Ark. 126. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- ROCZNIKI HYDROGEOLOGICZNE PSH 2003–2016. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- ŠIMŮNEK J., ŠEJNA M., SAITO H., SAKAI M., VAN GENUCHTEN M.T.H. 2013 – The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Ver. 4.17. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, CA.
- TREDER W., WÓJCIK K., ŻARSKI J. 2010 – Wstępna ocena możliwości szacowania potrzeb wodnych roślin na podstawie prostych pomiarów meteorologicznych. *Zesz. Nauk. Inst. Sadow. Kwiac.*, 18: 143–153.
- VAN GENUCHTEN M.T.H. 1980 – A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44: 892–898.