

ANALIZA NUMERYCZNA WPŁYWU ANTROPOPRESJI NA BILANS WÓD PODZIEMNYCH W REJONIE REZERWATU TORFOWISKOWEGO ŻURAWINIEC W POZNANIU

NUMERICAL ANALYSIS OF HUMAN PRESSURE ON GROUNDWATER BUDGET IN THE AREA OF THE ŻURAWINIEC PEAT BOG NATURE RESERVE IN POZNAŃ

PIOTR HERMANOWSKI¹, DAGMARA POPIEL², WOJCIECH KUKULSKI¹

Abstrakt. Postępujący przez dziesiątki lat rozwój przestrzeni miejskich, połączony z intensywną zabudową powierzchni terenu, systematycznie przyczynia się do redukcji infiltracji wód opadowych. Zjawisko to powoduje zmiany zasobów wód podziemnych w danej jednostce hydrostrukturalnej, często pociągając za sobą negatywne skutki przyrodnicze, których odwrócenie jest bardzo trudne lub niemożliwe do osiągnięcia. W ramach tego opracowania wykonano analizy wpływu rozwoju urbanistycznego na bilans wodny i w konsekwencji na ekosystem zależny od wód. W roku 1959 ustanowiono w północnej części Poznania rezerwat torfowiskowy Żurawiniec, którego powierzchnia wynosi ok. 1,5 ha. Przez dziesięciolecia obszar ten tracił swój pierwotny charakter, aż doszło do jego osuszenia i całkowitego zaniku roślinności, dla której ustanowiono obszar ochronny. Analizę zmian zachodzących na terenie rezerwatu dokonano przez zintegrowanie modeli odnoszących się do powierzchniowego oraz podziemnego bilansu wód. Dla tych modeli przeprowadzono symulacje numeryczne na podstawie danych zgromadzonych dla lat: 1952, 2001 i 2014. Wyniki przeprowadzonych symulacji uwiadcniają znaczący wpływ antropopresji na bilans wód podziemnych, skutkujący ciągłym obniżaniem się zwierciadła tych wód, które w 2001 r. znajdowało się ponad 2 m niżej niż w 1952 r. Główną przyczyną zmniejszenia się zasobów wód podziemnych była postępująca przez lata redukcja infiltracji wód opadowych w wyniku urbanizacji obszaru.

Słowa kluczowe: numeryczny model hydrogeologiczny, antropopresja, ekosystemy zależne od wód, rezerwat Żurawiniec, Poznań.

Abstract. Growth of a city, which is linked with intensive urban development, systematically affects groundwater recharge by diminishing its rate. Thus, the phenomenon influences groundwater resources in a hydrogeological unit and, in turn, it causes negative environmental consequences which are difficult or even impossible to reverse. This study analyses the effect of urban development on water budget and its impact on the water-dependent ecosystem. In 1959, a peat bog nature reserve – the Żurawiniec Nature Reserve – was established in the north of Poznań, covering an area of ca. 1.5 ha. During many years the area was losing its original character, which resulted in desiccation and complete deterioration of peatland plants. The analysis of water budget reduction was done through the integration of a spatially distributed water balance model and a numerical hydrogeological model. The simulations were based on data collected for the years 1952, 2001 and 2014. The results of simulations emphasize the significant human impact on groundwater budget leading to a continuous groundwater level dropdown, resulting in over 2 m lower groundwater level in year 2001 in relation to year 1952. The main reason for negative repercussion was a constant decrease of groundwater recharge due to urbanization.

Key words: hydrogeological numerical model, human pressure, wetlands, Żurawiniec Nature Reserve, Poznań.

WSTĘP

Sposób zagospodarowania terenu ma istotny wpływ na wielkość infiltracji wód opadowych, co przekłada się na zasoby wód podziemnych danej jednostki hydrogeo-

logicznej (Eastoe, Gu, 2016). Ma to szczególne znaczenie na obszarach zurbanizowanych, gdzie skala uszczelnienia powierzchni terenu jest na tyle duża, że istotnie wpływa na zasilanie warstw wodonośnych i dynamikę wód podziemnych, szczególnie w odniesieniu do poziomu wód grunto-

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, ul. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań; e-mail: piotr.hermanowski@amu.edu.pl.

² PANGEA S.R.L., Via Pinturicchio 5, 20133 Mediolan, Włochy.

wych (Mays, 2011). Liczne badania pokazują, że na obszarach miejskich zasilanie wód podziemnych ulega wzrostowi w wyniku urbanizacji (np. Foster, 1990; Appleyard, 1995; Yang i in., 1999), jednak wielkość zasilania jest przestrzennie bardzo zróżnicowana (Howard, Lloyd, 1979). Rozwój zabudowy miejskiej sprawia, że infiltracja ulega znacznemu skoncentrowaniu, zależnemu od rozmieszczenia infrastruktury hydrotechnicznej (Lerner, 2002). Konsekwencją tego typu zjawisk jest zmiana systemu krążenia wód podziemnych, przyczyniająca się na jednych obszarach do podniesienia, a na innych do obniżenia zwierciadła wód podziemnych. Podczas analizy długoterminowych trendów zmian nie bez znaczenia są różnice w wielkości opadów na danym obszarze, będące konsekwencją zmieniającego się klimatu (Herrera-Pantoja i in., 2012).

Obiektami szczególnie wrażliwymi na zmiany poziomu wód gruntowych i dynamiki strumienia filtracji są ekosystemy zależne od wód. Wiąże się to z ich dużą wrażliwością na zmiany wielkości zasilania lub jakości docierających do nich wód, co w konsekwencji może doprowadzić do zaniku typowej dla tych obszarów flory i fauny (np. Harding, 1993). Odwrócenie tego typu negatywnych trendów jest często bardzo trudne lub niemożliwe, każdorazowo wymaga jednak podjęcia działań mitygujących, umożliwiających przywrócenie warunków wodnych zbliżonych do pierwotnych.

Na obszarze badań, w otoczeniu rezerwatu Żurawiniec, z inicjatywy Zakładu Lasów Poznańskich, działania renaturyzacyjne zostały zapoczątkowane w 2012 r., a w 2015 r. uruchomiono system doprowadzania wody do systemu drenów zlokalizowanych w otoczeniu rezerwatu. Obecnie obserwuje się pozytywne skutki tych działań, jak np. wzrost rzędnej zwierciadła wód gruntowych do poziomu umożliwiającego utrzymywanie się wody na powierzchni rezerwatu.

Celem tego opracowania jest analiza zmian warunków wodnych, jakie dokonały się na przestrzeni kilkudziesięciu lat w konsekwencji intensywnej urbanizacji rozpatrywanego obszaru. Analizy nie uwzględniają zmian będących konsekwencją działań renaturyzacyjnych realizowanych od roku 2015. Badania mają za zadanie wskazać, w jakim stopniu intensywna zabudowa przyczyniła się do całkowitego osuszenia torfowiska typu przejściowego. Badaniami objęto poszczególne elementy bilansu wodnego z uwzględnieniem składowych hydrologicznych i hydrogeologicznych.

OBSZAR BADAŃ

Obszar badań znajduje się w północnej części Poznania, w odległości ok. 5 km od centrum miasta (fig. 1). Główny obiekt badań, którym jest rezerwat Żurawiniec, stanowi niewielką część rozpatrywanego obszaru i położony jest w kompleksie lasów komunalnych, w obrębie Lasu Piątkowskiego. Całkowita powierzchnia analizowanego obszaru wynosi ok. 9 km², natomiast powierzchnia samego rezerwatu to 1,47 ha. Rezerwat Żurawiniec ustanowiono w roku 1959, w celu zachowania, ze względów naukowych i dydaktycz-

nych (Szafran, 1957), zespołu roślinności charakterystycznej dla torfowisk przejściowych (Zarządzenie nr 345). W okresie tworzenia rezerwatu występowała na tym terenie typowa roślinność torfowiskowa (Staniewska-Zątek, 1992), której obecnie już nie ma, została zastąpiona przez pospolite rośliny, charakterystyczne dla mezo- i higrofilnych zbiorowisk, silnie zniekształconych siedlisk (Siepak, Staniewska-Zątek, 1995).

Zdecydowana większość obszaru badań, jak też sam rezerwat, znajduje się na terenie sandru Naramowic-Umul-towa (Chmal, 1997), którego powierzchnia lekko opada ku południowemu wschodowi w kierunku Warty. Na obszarze badań głównym ciekim jest Różany Strumień, znajdujący się w odległości ok. 0,7 km na północ od rezerwatu (Niećko i in., 2001). Rezerwat stanowi fragment dawnej doliny nieistniejącego już Potoku Naramowickiego, a wcięcie erozyjne, w którym znajduje się rezerwat wynosi ok. 2–10 m.

Na całym obszarze badań podłoże osadów czwartorzędowych stanowią ły zdeponowane w okresie neogenu (Kunkel, 1975), powyżej których występują osady zlodowacenia odry. W czasie zlodowacenia odry zostały zdeponowane głównie gliny zwałowe, a także piaski i żwiru fluwioglacjalne (Chmal, 1997). Płytko zalegające utwory na przeważającej części obszaru są zdominowane przez piaski fluwioglacjalne zdeponowane w czasie fazy poznańskiej zlodowacenia wisły, których podłoże stanowią gliny zwałowe fazy poznańskiej (fig. 2; Chmal, 1990). W otoczeniu rezerwatu strop glin nawiercono na głębokościach 5,5–17,0 m p.p.t. (fig. 3). Na terenie rezerwatu występują torfy o miąższości dochodzącej do 2 m (Hermanowski, Górski, 2013), pod którymi znajdują się piaski drobnoziarniste i pylaste (Cenin, 2003).

Na terenie Poznania zwierciadło wody pierwszego poziomu wodonośnego wykazuje przestrzenne zróżnicowanie, nawiązujące do przebiegu osi głównych rynien subglacjalnych i dolin ukształtowanych w okresie zlodowacenia wisły. Na obszarze badań dominującym kierunkiem przepływu wód podziemnych jest kierunek południowo-wschodni, do doliny Warty (Chmal, 1997). W roku 2012, w bezpośrednim otoczeniu rezerwatu, wykonano 11 otworów wiertniczych, z których trzy zostały zafiltrowane i są wykorzystywane do monitoringu położenia zwierciadła wody. Dodatkowo cztery piezometry, również zlokalizowane w bezpośredniej bliskości rezerwatu, wykonano w 2015 r. Na podstawie wykonanych wierceń wynika, że zwierciadło wód gruntowych znajdowało się ok. 5 m p.p.t. w otoczeniu rezerwatu, natomiast na terenie samego rezerwatu ok. 1,5 m p.p.t. (Hermanowski, Górski, 2013).

METODA BADAŃ

Analiza zmian w bilansie wodnym wymaga uwzględnienia wielu elementów, obejmujących zarówno czynniki meteorologiczne, hydrologiczne, jak i hydrogeologiczne. Uwzględnienie poszczególnych elementów wymaga podejścia kompleksowego, które w ramach tego opracowania

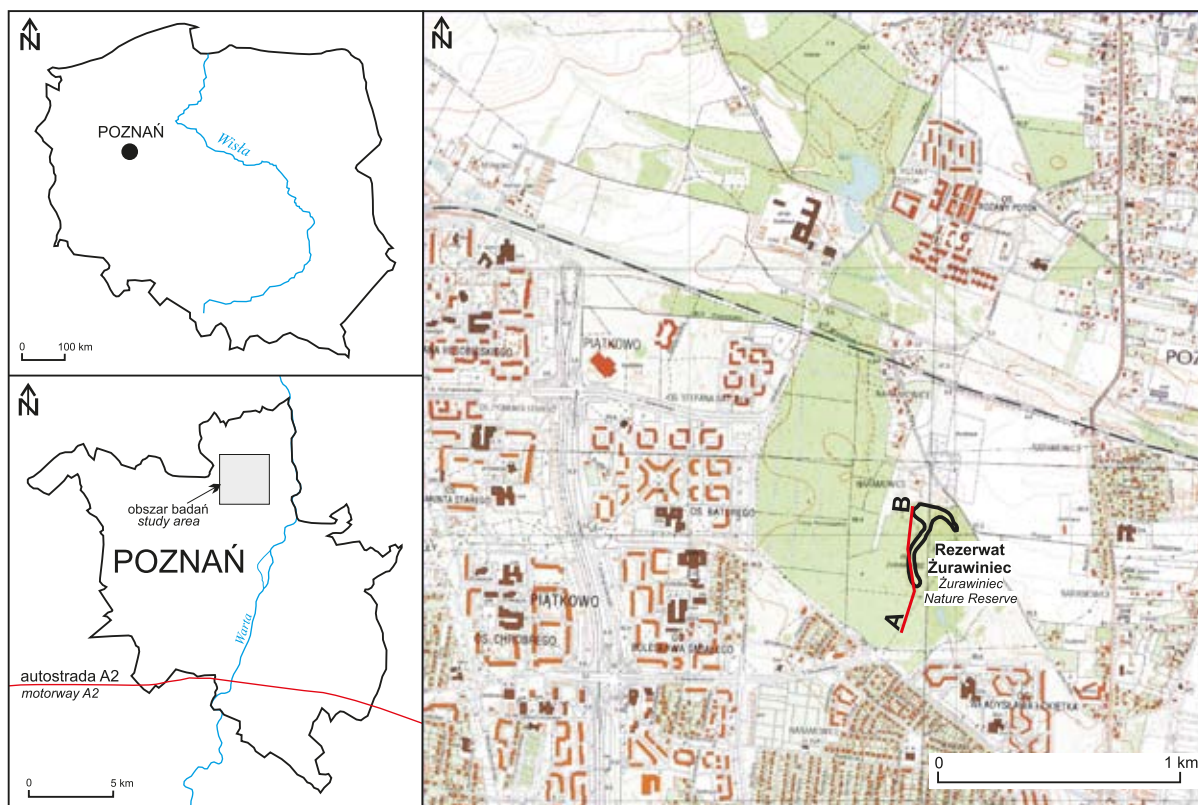


Fig. 1. Obszar badań wraz z lokalizacją rezerwatu Żurawiniec

Linia A–B – lokalizacja przekroju hydrogeologicznego (fig. 3)

Study area and location of the Żurawiniec Nature Reserve

Line A–B – location of the hydrogeological cross-section (Fig. 3)

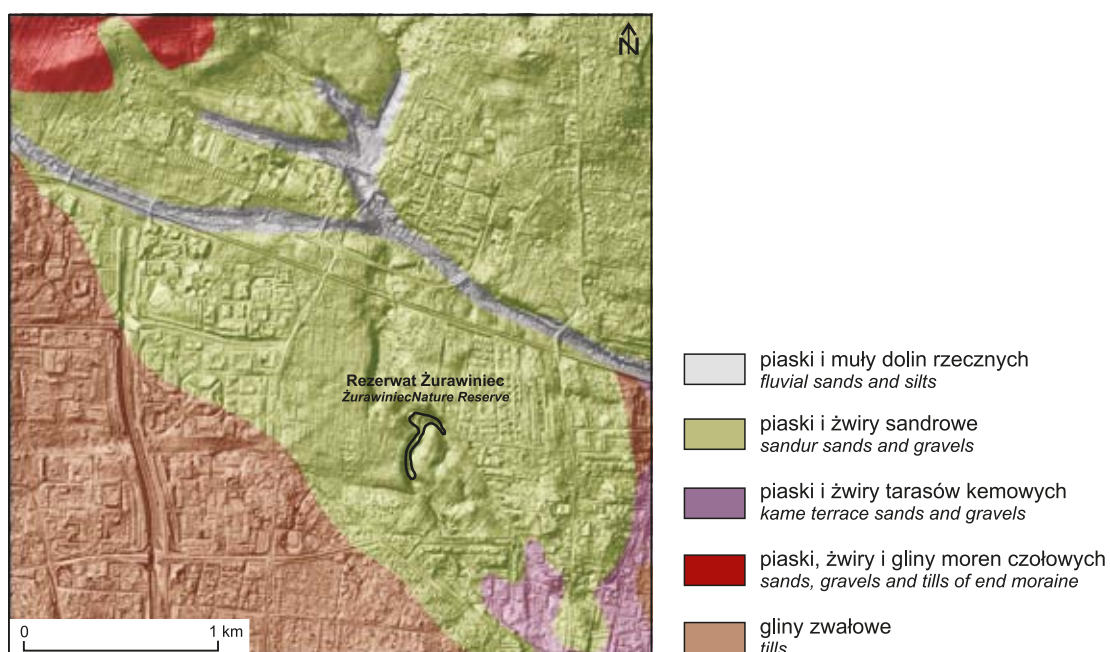


Fig. 2. Geologia obszaru badań na tle cieniowanego reliefu terenu

Geology of the study area on a background of a shaded-relief map

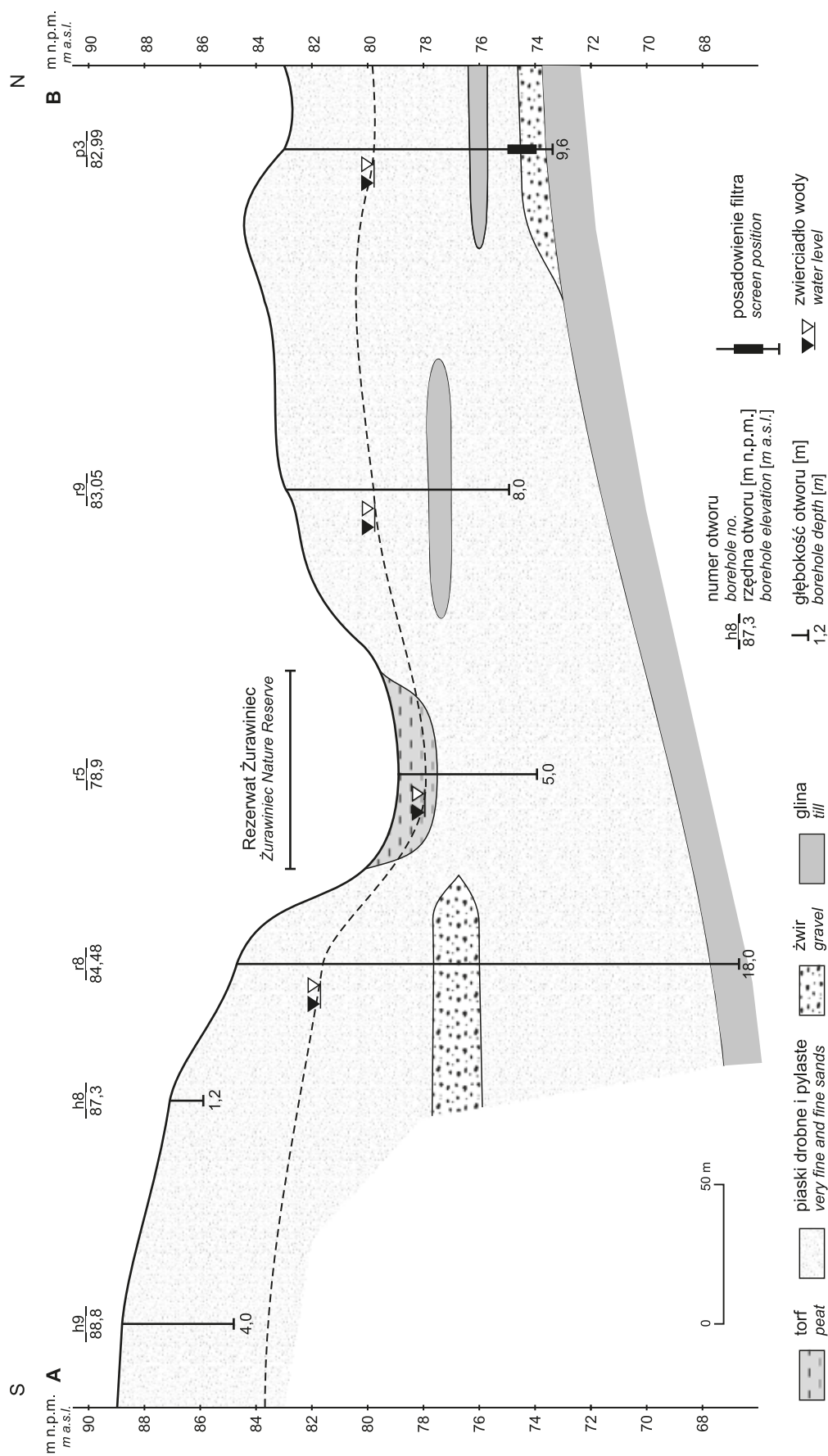


Fig. 3. Przekrój hydrogeologiczny poprowadzony w bezpośredniej bliskości rezerwatu Żurawiniec (Hermanowski, Górski, 2013, zmieniony)

Lokalizację przekroju pokazano na figurze 1

Hydrogeological cross-section in the close vicinity of the Żurawiniec Nature Reserve (Hermanowski, Górski, 2013, modified)

See Figure 1 for the cross-section location

wykonano przez zintegrowanie modelu WetSpas (*Water and Energy Transfer between Soil, Plants and Atmosphere under Steady State*) z numerycznym modelem hydrogeologicznym opracowanym w programie FEFLOW.

Model WetSpas pozwala na przeprowadzenie analizy danych przestrzennych, na podstawie których możemy oszacować wielkości zasilania wód podziemnych, spływu powierzchniowego oraz ewapotranspiracji rzeczywistej, wykorzystując do tego celu dane dyskretne (np. Wang i in., 1996; Batelaan, De Smedt, 2001; Dams i in., 2008; Porretta-Brandyk i in., 2010; Graf, Kajewski, 2013). Jako dane wejściowe do modelu WetSpas wykorzystano: ukształtowanie terenu, głębokość zwierciadła wody, zagospodarowanie terenu, rodzaj gleb, wielkość opadu, prędkość wiatru, wielkość ewapotranspiracji potencjalnej, średnią wartość temperatury i nachylenie terenu. Zgromadzone dane pozwoliły na przeprowadzenie symulacji dla trzech scenariuszy odpowiadających różnemu stopniowi zagospodarowania rozpatrywanego terenu. Symulacje modelowe przeprowadzono dla warunków występujących w latach: 1952, 2001 i 2014. Okresy te wybrano ze względu na dostępność danych kartograficz-

nych, dostarczających informacji na temat zabudowy analizowanego obszaru. Dla przeprowadzenia analizy porównawczej istotne jest, że w roku 1952 tę część współczesnego Poznania stanowiły obszary rolnicze o rozproszonej zabudowie. W roku 2001 na większości terenu występowała już zabudowa zwarta, której rozprzestrzenienie zwiększało się do 2014 r., szczególnie w otoczeniu rezerwatu Żurawiniec. Obszar badań o powierzchni 9 km² pokryto regularną, kwadratową siatką dyskretyzacyjną – długość boku pola siatki wynosi 100 m.

Numeryczny model hydrogeologiczny opracowano w programie FEFLOW, który bazuje na metodzie elementów skończonych (Diersch, 2014), wykorzystującej siatkę trójkątną, dzięki której było możliwe stosunkowo precyzyjne odwzorowanie geometrii rezerwatu Żurawiniec (fig. 4). Ponieważ wpływ na warunki wodne rezerwatu, oprócz czynników zewnętrznych, mają wyłącznie wody poziomu gruntowego, skonstruowano model jednowarstwowy. Geometrię warstwy odwzorowano na podstawie interpolacji 65 otworów wiertniczych, dane pobrano z Atlasu geologiczno-inżynierskiego Poznania (Musiatewicz, 2007). Średnia

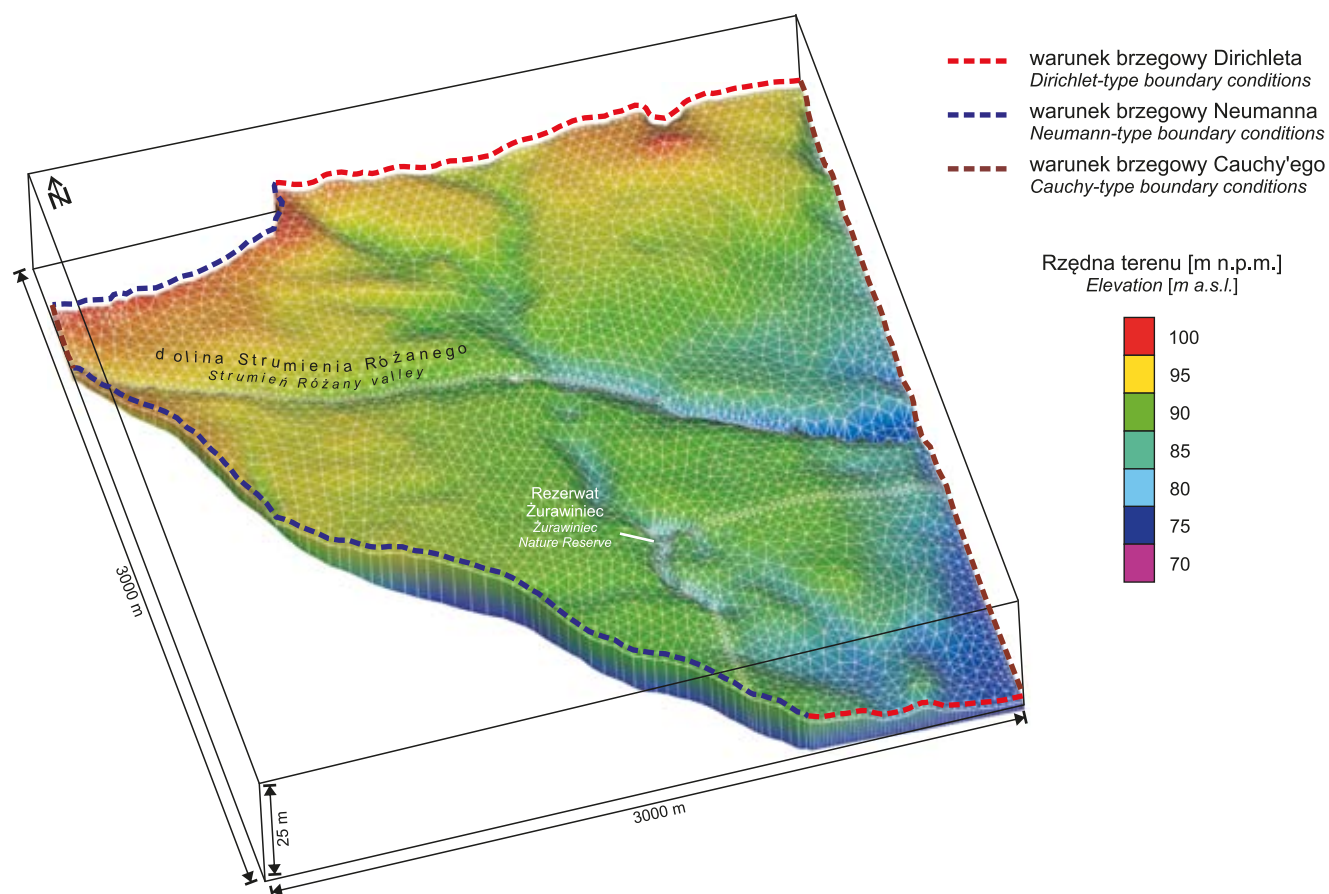


Fig. 4. Trójwymiarowy obraz przedstawiający obszar numerycznego modelu hydrogeologicznego z nałożoną siatką dyskretyzacyjną oraz zadanymi warunkami brzegowymi na granicach zewnętrznych. Warunkiem brzegowym Cauchy'ego odwzorowano także Strumień Różany oraz rezerwat Żurawiniec

Three-dimensional image of the hydrogeological numerical model area including finite element grid and applied boundary conditions at the model borders. Cauchy-type boundary conditions were also applied along the Strumień Różany and the Żurawiniec Nature Reserve

miąższość modelowanej warstwy modelu wynosi ok. 10 m. Model opracowano dla warunków ustalonych, jednak dla trzech scenariuszy odpowiadających analogicznym okresom jak w modelu WetSpas, tj. dla lat: 1952, 2001 i 2014. W pierwszej kolejności wykonano model dla 2014 r., który poddano kalibracji, opierając się na pomiarach zwierciadła wód podziemnych w siedmiu piezometrach zlokalizowanych bezpośrednio przy rezerwacie, a następnie modyfikacji poddano wartość infiltracji efektywnej, bazując na wynikach modelu WetSpas. Warunki brzegowe zewnętrzne w ok. 45% granic obszaru odpowiadają rozprzestrzenieniu poziomu wodonośnego i na tych granicach zadano warunek brzegowy Neumanna (stała wartość zasilania/drenażu; fig. 4). Pozostałych ok. 55% granic obszaru nie odpowiada granicom naturalnym i dla nich zadano warunek brzegowy Dirichleta (stała wartość wysokości hydraulicznej; granice N i S) i Cauchy'ego (kombinacja liniowa warunków Dirichleta i Neumanna; granice W i E). Wyznaczenie granic modelowanego obszaru niepokrywających się z granicami naturalnymi uznano jako pozbawione istotnego wpływu dla głównego, rozpatrywanego obiektu, tj. rezerwatu Żurawiniec, ze względu na ich znaczne oddalenie od rezerwatu. Przez cały modelowany obszar, z zachodu na wschód, przepływa ciek Różany Strumień, który odwzorowano warunkiem brzegowym Cauchy'ego. Tym samym warunkiem brzegowym odwzorowano rezerwat Żurawiniec.

WYNIKI SYMULACJI

MODEL WETSPASS

Jako wynik modelu WetSpas otrzymano m.in. mapy obrazujące rozkład przestrzenny infiltracji efektywnej. Mapy te odzwierciedlają istotne zmiany w wielkości zasilania wód podziemnych na przestrzeni analizowanych kilkudziesięciu lat (fig. 5). Analizy wykonane dla roku 1952 wskazują, że na zdecydowanej większości badanego obszaru wartość infiltracji efektywnej wynosiła ok. 200 mm/a (fig. 5A). W roku 2001 infiltracja uległa znaczącej redukcji, z dominującymi wartościami poniżej 100 mm/a (fig. 5B). Dalszy spadek stwierdzono na modelu z 2014 r., uzyskując wartości infiltracji efektywnej poniżej 50 mm/a (fig. 5C).

Wartości uzyskane dla terenu rezerwatu Żurawiniec obrazują inną tendencję niż otrzymane dla całego obszaru badań. Wyniki modelu wskazują, że w roku 2001 wielkość infiltracji efektywnej wynosiła ok. 190 mm/a i była niemal dwukrotnie większa od wartości uzyskanej dla roku 1952, pomimo mniejszej sumy opadów (tab. 1). Chociaż podobną sumę opadów pomierzono w latach 2001 i 2014, w drugim przypadku wielkość infiltracji zmalała o ok. 17 mm/a. Uzyskane wartości ewapotranspiracji rzeczywistej wykazują tendencję zniżkową. Wartości sumaryczne uwiadcniają wzrost o ok. 30 mm/a ubytku w bilansie wodnym rezerwatu w roku 2001 w stosunku do roku 1952 i dalszą tendencję negatywną w roku 2014.

MODEL FEFLOW

Uzyskany na numerycznym modelu hydrogeologicznym rozkład hydroizohips, dla każdego z analizowanych okresów, odzwierciedla dominujący kierunek przepływu wód podziemnych na południowy wschód, tj. w stronę doliny Warty (fig. 6). Porównanie wysokości zwierciadła wód podziemnych w latach 1952 i 2001 pokazuje, że obniżenie zwierciadła wód gruntowych wynosiło ok. 2 m. Model dla roku 1952 wskazuje, że przez rezerwat przebiegała hydroizohipsa o rzędnej 82 m n.p.m. (fig. 6A), natomiast zwierciadło wód podziemnych odwzorowane na modelu dla roku 2014 (fig. 6C) wynosiło poniżej 80 m n.p.m., co potwierdzają również pomiary w sieci piezometrów zlokalizowanych w bezpośrednim otoczeniu rezerwatu (różnica pomiędzy zwierciadłem obliczonym na modelu a pomierzonym w piezometrach nie przekracza 0,5 m). Mapy hydroizohips uzyskane na modelach dla roku 2001 i 2014 (fig. 6B, C) nie wykazują różnic, które wskazywałyby na istotną zmianę warunków hydrogeologicznych.

Bilans wodny każdego z trzech numerycznych modeli hydrogeologicznych wskazuje na dominującą rolę infiltracji efektywnej w zasilaniu obszaru badań (tab. 2). Uwagę zwraca redukcja, o blisko połowę, wielkości infiltracji efektywnej w roku 2001 w stosunku do roku 1952. Na każdym z modeli drenaż odbywa się głównie przez granice zewnętrzne modelu, na których zadano warunek brzegowy Dirichleta. Bilans wód podziemnych dla samego rezerwatu Żurawiniec wskazuje na postępującą redukcję zasilania rezerwatu przez wody podziemne, które w latach 1952, 2001 i 2014 wynosiło odpowiednio 10,31; 9,6 i 6,8 m³/d.

DYSKUSJA

Ekosystemy zależne od wód są obszarami szczególnie wrażliwymi na zmiany warunków wodnych zarówno w kontekście ilościowym, jak i jakościowym. Tego typu zmiany mogą być konsekwencją powolnie zachodzących zmian klimatu (Rouse, 2002) lub znacznie szybciej przebiegających procesów będących efektem działalności człowieka (Jacobson, 2011; Chlost, Cieśliński, 2018).

Wyniki przeprowadzonych symulacji na modelu WetSpas odzwierciedlają znaczącą redukcję infiltracji efektywnej na całym obszarze badań w okresie analizowanych kilkudziesięciu lat. W roku 1952, w tej części Poznania, nie występowała zwarta zabudowa miejska, były to obszary rolnicze o rozproszonej zabudowie. Taki sposób zagospodarowania przestrzennego sprzyjał infiltracji opadów atmosferycznych, przyczyniając się do zachowania naturalnie kształtowanych dynamicznych zasobów wód podziemnych. Należy uznać, że znaczące zmniejszenie infiltracji efektywnej obserwowane na modelu dla roku 2001 dokonywało się stopniowo wraz z postępującą urbanizacją tej części miasta. Redukcja infiltracji nie mogła mieć jednak charakteru liniowego, były to raczej zmiany skokowe powodowane przez

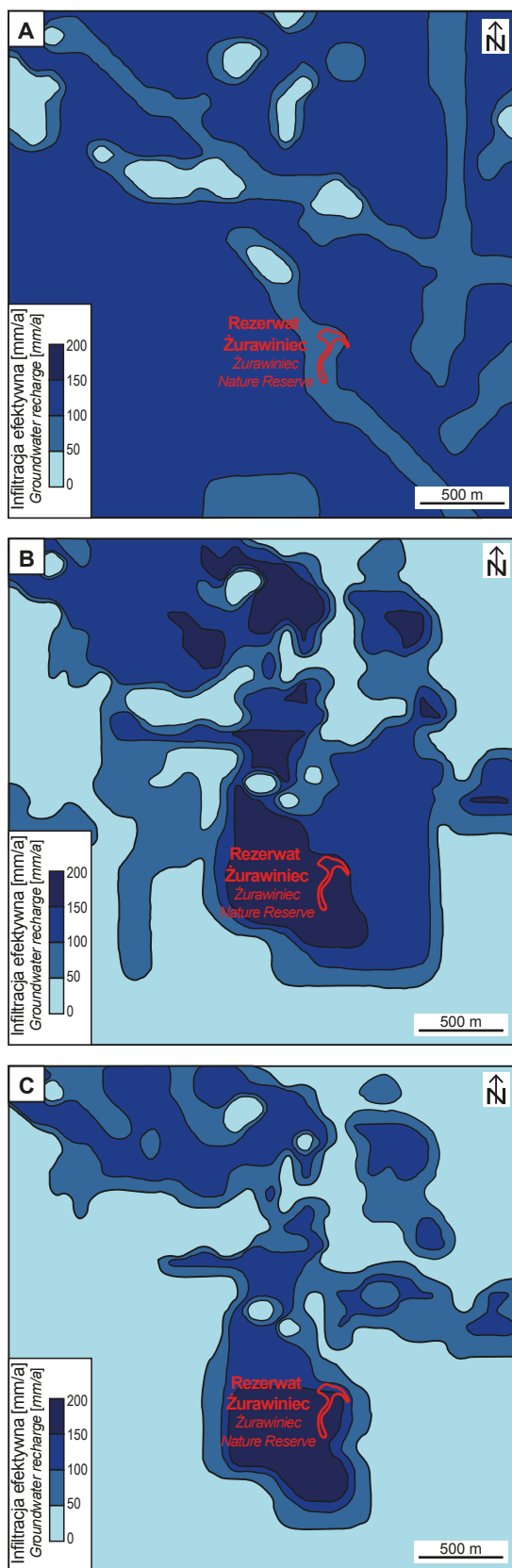


Fig. 5. Wielkość infiltracji efektywnej obliczona na podstawie modelu WetSpas dla lat: 1952 (A), 2001 (B) i 2014 (C)

Groundwater recharge rate calculated in the WetSpas model for years: 1952 (A), 2001 (B) and 2014 (C)

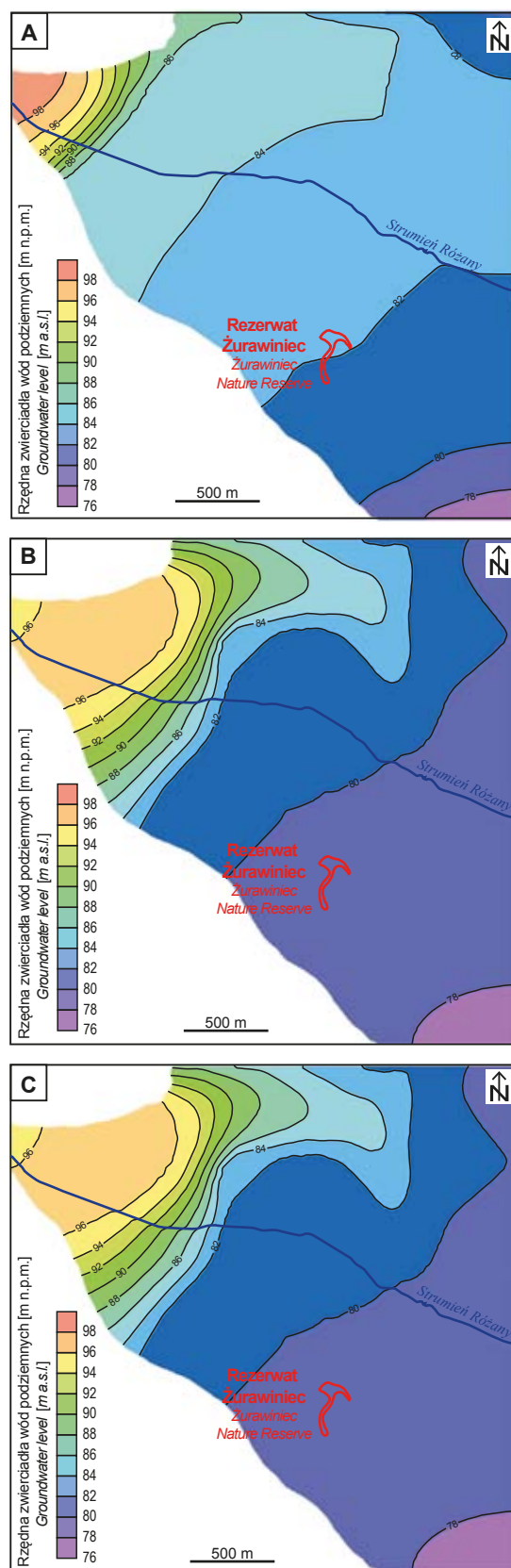


Fig. 6. Mapa położenia zwierciadła wód podziemnych wykreślona na podstawie numerycznego modelu hydrogeologicznego dla lat: 1952 (A), 2001 (B) i 2014 (C)

Map of groundwater level constructed based on the numerical hydrogeological model for years: 1952 (A), 2001 (B) and 2014 (C)

następujące po sobie inwestycje budowlane powiązane z uszczelnieniem powierzchni terenu i zbieraniem większości wód opadowych przez kolektor Naramowice. Po roku 2001 inwestycje budowlane były kontynuowane na tym obszarze, co przyczyniło się do dalszej redukcji infiltracji wód opadowych. Pomimo znaczących zmian w zagospodarowa-

Tabela 1

Składniki bilansu wodnego dla obszaru rezerwatu Żurawiniec na podstawie modeli WetSpa

Components of the water budget for the Żurawiniec Nature Reserve, based on the WetSpa models

Składnik bilansu wodnego	Wartość [mm/a]		
	1952 r.	2001 r.	2014 r.
Opad	+535,00	+515,00	+513,80
Infiltracja efektywna	-101,34	-190,13	-172,90
Ewapotranspiracja rzeczywista	-410,82	-342,63	-338,73
Spyływ powierzchniowy	-2,83	-2,24	-2,15
Intercepcja	-20,60	-10,70	-30,83
Suma	-0,59	-30,70	-30,81

Tabela 2

Składniki bilansu wód podziemnych na podstawie numerycznych modeli hydrogeologicznych dla całego obszaru objętego modelowaniem oraz dla rezerwatu Żurawiniec

Components of the groundwater budget, based on the hydrogeological numerical models for the whole model area and for the Żurawiniec Nature Reserve

Składniki bilansu modelu		Zasilanie [m ³ /d]	Drenaż [m ³ /d]	
Rok 1952	Dopływ boczny	warunek brzegowy Dirichleta	191	2867
		warunek brzegowy Neumanna	42	20
	Infiltracja efektywna	2654	–	
	Rezerwat Żurawiniec	10,31	1,25	
Rok 2001	Dopływ boczny	warunek brzegowy Dirichleta	259	1767
		warunek brzegowy Neumanna	78	48
	Infiltracja efektywna	1478	–	
	Rezerwat Żurawiniec	9,6	0,03	
Rok 2014	Dopływ boczny	warunek brzegowy Dirichleta	311	1334
		warunek brzegowy Neumanna	100	103
	Infiltracja efektywna	1026	–	
	Rezerwat Żurawiniec	6,8	0,4	

niu terenu, obszar rezerwatu Żurawiniec, jak i las w obrębie którego znajduje się rezerwat, nie zostały istotnie przekształcone. Wyniki modelu WetSpa w odniesieniu do samego rezerwatu wskazują na niższe wartości infiltracji efektywnej w roku 1952 – ok. 19% wielkości opadu w stosunku do lat 2001 i 2014, kiedy to obliczona wartość infiltracji efektywnej przekraczała 30% wielkości opadów. Natomiast w roku 1952 procentowo wyższy był udział ewapotranspiracji rzeczywistej, wynoszącej ok. 77% sumy opadów, w odniesieniu do lat 2001 i 2014, dla których wartość ta wynosiła ok. 66%. Pozorną poprawę poszczególnych elementów bilansu wodnego należy wiązać z utworzeniem na obszarach byłych pól uprawnych i łąk kompleksu lasów komunalnych. Wartości uzyskane dla obszaru rezerwatu na modelu skonstruowanym dla roku 1952 są zbliżone do wartości uzyskanych dla zlewni rzeki Mogilnicy (Graf, Kajewski, 2013), co można powiązać z takim samym, tj. rolniczym zagospodarowaniem terenu współczesnej zlewni rzeki Mogilnicy oraz otoczenia rezerwatu Żurawiniec w 1952 r.

Obliczony dla omawianego rezerwatu wzrost wartości infiltracji efektywnej nie dotyczy całego analizowanego obszaru, co znajduje swoje odzwierciedlenie w wysokości położenia zwierciadła wód podziemnych. Wyniki numerycznego modelu hydrogeologicznego wskazują, że obniżenie położenia zwierciadła wody na terenie rezerwatu jest konsekwencją zmian zagospodarowania terenu na obszarze znajdującym się poza rezerwatem, a nawet poza kompleksem lasów komunalnych, w obrębie których zlokalizowany jest rezerwat. Niemniej jednak, nie bez znaczenia jest fakt zalesienia terenów bezpośrednio znajdujących się w otoczeniu rezerwatu. Przekraczające 2 m obniżenie zwierciadła wód podziemnych na jego terenie spowodowało, że nawet w okresie po intensywnych opadach, retencja powierzchniowa wody była krótkotrwała, ponieważ zgromadzona woda powierzchniowa intensywnie zasilala poziom wód gruntowych. Było to możliwe wskutek braku podparcia hydraulicznego ze strony wód podziemnych. Analogiczne zmiany wywołane rozwojem zabudowy miejskiej obserwowano np. na terenie torfowiska Camosun w Vancouver w Kanadzie (Hermansen, Wynn, 2005). Wyniki pokazują, że hydrologiczne składniki bilansu wodnego mogą ulegać nawet znacznym zmianom przestrzennym, natomiast dynamika wód podziemnych jest wypadkową ich przestrzennej zmienności. Zasilanie rezerwatu przez wody podziemne ulegało na przestrzeni lat stopniowej redukcji, jednak obserwacja tego typu zmian jest możliwa wyłącznie, kiedy mamy do dyspozycji ciągłe, wieloletnie obserwacje, którymi w tym przypadku nie dysponowano. Zwierciadło wód podziemnych zwykle reaguje z pewnym opóźnieniem w stosunku do zmian w zakresie klimatycznego bilansu wodnego, co sprawia, że wpływ antropopresji może być obserwowany dopiero po kilku latach (np. Chen i in., 2002, 2004), czego przykładem może być rezerwat Żurawiniec.

PODSUMOWANIE

W opracowaniu przedstawiono symulacje numeryczne, uwzględniające zarówno klimatyczne, jak i hydrogeologiczne składniki bilansu wodnego. Uzyskane wyniki przedstawiają znaczące zmiany wartości składników bilansu wodnego na przestrzeni kilkudziesięciu lat, będące rezultatem zmian zagospodarowania przestrzennego. Intensywna urbanizacja północnej części Poznania doprowadziła do znaczącej redukcji infiltracji efektywnej, a w konsekwencji do obniżenia zwierciadła wód podziemnych o ponad 2 m, w stosunku do okresu, kiedy obszar ten był wykorzystywany rolniczo. Tak znaczne obniżenie zwierciadła wód podziemnych spowodowało utratę podparcia hydraulicznego dla wód powierzchniowych gromadzących się w niecce rezerwatu Żurawiniec, co sukcesywnie prowadziło do jego osuszenia. Przeprowadzenie analiz dla większego obszaru niż sam rezerwat pozwoliło wykazać, że przyczyną wysychania rezerwatu były zmiany zagospodarowania przestrzennego poza jego bezpośrednim sąsiedztwem. Nie bez znaczenia pozostaje jednak fakt zalesienia obszaru wokół rezerwatu, co niewątpliwie stanowi jedną ze składowych przyczyniających się do obniżenia zwierciadła wód podziemnych.

LITERATURA

- APPLEYARD S.J., 1995 – The impact of urban development on the utilization of groundwater resources in Perth, Western Australia. *Hydrogeol. J.*, **3**: 65–75.
- BATELAAN O., DE SMEDT F., 2001 – WetSpa: a flexible, GIS based, distributed recharge methodology for regional groundwater modelling. *IAHS Publ.*, **269**: 11–17.
- CENIN K., 2003 – Raport z odwiertu przeprowadzonego w rezerwacie „Żurawiniec”. Arch. Regionalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska w Poznaniu.
- CHEN Z., GRASBY S.E., OSADETZ K.G., 2002 – Predicting average annual groundwater levels from climatic variables: an empirical model. *J. Hydrol.*, **260**: 102–117.
- CHEN Z., GRASBY S.E., OSADETZ K.G., 2004 – Relation between climate variability and groundwater levels in the upper carbonate aquifer, southern Manitoba, Canada. *J. Hydrol.*, **290**, 1/2: 43–62.
- CHLOST I., CIEŚLIŃSKI R., 2018 – Effects of environmental and anthropogenic determinants on changes in groundwater levels in selected peat bogs of Slowinski National Park, northern Poland. *Geologos*, **24**, 1: 13–28.
- CHMAL R., 1990 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1:50 000, ark. Poznań (471). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- CHMAL R., 1997 – Objąsnienia do Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski 1:50 000, ark. Poznań (471). Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- DAMS J., WOLDEAMLAK S.T., BATELAAN O., 2008 – Predicting land-use change and its impact on the groundwater system of the Kleine Nete catchment, Belgium. *Hydrol. Earth Syst. Sc.*, **12**: 1369–1385.
- DIERSCH H.-J.G., 2014 – FEFLOW: Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media. Springer, Heidelberg.
- EASTOE C.J., GU A., 2016 – Groundwater Depletion Beneath Downtown Tucson, Arizona: A 240-Year Record. *JCWRE*, **159**: 62–77.
- FOSTER S.S.D., 1990 – Impact of urbanization on groundwater. *IAHS Publ.*, **198**: 187–207.
- GRAF R., KAJEWSKI I., 2013 – Kształtowanie się elementów bilansu wodnego w zlewni Mogilnicy na podstawie badań symulacyjnych. *Nauka Przyroda Technologie*, **7**, 1: 1–11.
- HARDING M., 1993 – Redgrave and Lopham Fens, East Anglia, England: a case study of change in flora and fauna due to groundwater abstraction. *Biol. Conserv.*, **66**: 35–45.
- HERMANOWSKI P., GÓRSKI J., 2013 – Dokumentacja geologiczno określająca warunki hydrogeologiczne w rejonie Rezerwatu „Żurawiniec” w Poznaniu. Zakład Lasów Poznańskich, Poznań.
- HERMANSEN S., WYNN G., 2005 – Reflection on the Nature of Urban Bog. *Urban History Rev.*, **34**, 1: 9–27.
- HERRERA-PANTOJA M., HISCOCK K.M., BOAR R.R., 2012 – The potential impact of climate change on groundwater wetlands in Eastern England. *Ecohydrol.*, **5**: 401–413.
- HOWARD K.W.F., LLOYD J.W., 1979 – The sensitivity of parameters in the Penman evaporation equations and direct recharge balance. *J. Hydrol.*, **41**, 3/4: 329–344.
- JACOBSON C.R., 2011 – Identification and quantification of the hydrological impact of imperviousness in urban catchments: A review. *J. Environ. Manage.*, **92**: 1438–1448.
- KUNDEL A., 1975 – Osady ilowe neogenu młodszego Wielkopolski środkowej w świetle bibułowej chromatografii rozdzielczej. *Pr. Kom. Geogr.-Geol.*, **14**.
- LERNER D.N., 2002 – Identifying and quantifying urban recharge: A review. *Hydrogeol. J.*, **10**: 143–152.
- MAYS L.W., 2011 – Water Resources Engineering. Second Edition. John Wiley & Sons.
- MUSIATEWICZ M. (red.), 2007 – Baza danych geologiczno-inżynierskich wraz z opracowaniem Atlasu geologiczno-inżynierskiego Poznania. Ministerstwo Środowiska, Warszawa.
- NIEĆKO M., FOLWARCZNY M., CISZEWSKI D., 2001 – Mapa hydrograficzna w skali 1:50 000, ark. Poznań. GUGiK, Warszawa.
- PORRETTA-BRANDYK L., CHORMAŃSKI J., IGNAR S., OKRUSZKO T., BRANDYK A., SZYMCAK T., KRĘŻAŁEK K., 2010 – Evaluation and verification of the WetSpa model based on selected rural catchment in Poland. *J. Water Land Develop.*, **14**: 115–133.
- ROUSE W.R., 2002 – The Energy and water balance of high-latitude wetlands: control and extrapolation. *Global Change Biol.*, **6**: 59–68.
- SIEPAK J., STANIEWSKA-ZĄTEK W., 1995 – Wpływ antropopresji na degradację wód, torfu i roślinności w rezerwacie „Żurawiniec” w Poznaniu. *Ekologia i Technika*, **3**, 15: 13–17.
- STANIEWSKA-ZĄTEK W., 1992 – O Żurawinie i Żurawińcu – rezerwacie przyrody w Poznaniu. *Ten Świat*, **13**.
- SZAFRAN H., 1957 – Żurawiniec rezerwat dydaktyczny w Poznaniu. *Przyroda Polski Zachodniej*, **1**: 100–104.
- WANG Z.-M., BATELAAN O., DE SMEDT F., 1996 – A distributed model for water and energy transfer between soil, plants and atmosphere (WetSpa). *Phys. Chem. Earth*, **21**, 3: 189–193.
- YANG Y., LERNER D.N., BARRETT M.H., TELLAM J.H., 1999 – Quantification of groundwater recharge in the city of Nottingham, UK. *Environmen. Geol.*, **38**: 183–198.
- ZARZĄDZENIE nr 345 Ministra Leśnictwa i Przemysłu Drzewnego z dnia 20.10.1959 r. w sprawie uznania za rezerwat przyrody – znak: O.P.-244/87.

SUMMARY

The land development can both affect significantly many environmental components and influence the water budget of an area. It is especially important in rural areas which became urbanized. Such alternation of land use often thoroughly changes the groundwater recharge and thus groundwater resources of the area of interest. However, the consequences are often not immediately observed and can take years until we realize them. Wetlands are the environmental components which are very sensible to any water budget changes.

In this study we integrated a hydrological model and a numerical groundwater model to simulate the influence of land development on a peat bog in the Żurawiniec Nature Reserve. First, a hydrological model was designed using WetSpa application, and consequently the results, including groundwater recharge, were implemented to the hydrogeological model for which finite element code FEFLOW was applied. In both models, three different scenarios were simulated reflecting environmental conditions in the years 1952, 2001 and 2014.

The results show significant decrease of groundwater recharge due to intensive urbanization during last tens of years in the study area. As opposed to present days, the investigated terrain in 1952 was dominated by rural activity which enhanced infiltration of meteoric water through the unsaturated zone to recharge the uppermost aquifer. Nevertheless, considering only the Żurawiniec Nature Reserve area the WetSpa models indicate lower groundwater recharge in 1952 of *ca.* 19% of precipitation, while in the years 2001 and 2014 the recharge was *ca.* 30% of precipitation. On the other hand, the numerical hydrogeological models show a groundwater level dropdown by over 2 m in the period between 1952 and 2001. This indicates that the groundwater dropdown was caused outside the nature reserve. The reason for these processes was intensive urbanization in the second half of the 20th century which initiated continuous depletion of groundwater resources and consequently desiccation of the Żurawiniec Nature Reserve