

## BILANS WODNY POWIERZCHNI ZIEMI NA OBSZARZE WROCŁAWIA NA PODSTAWIE BADAŃ SYMULACYJNYCH PRZY POMOCY MODELU WETSPASS

Joanna Kajewska-Szkudlarek<sup>1\*</sup>, Ireneusz Kajewski<sup>1</sup>, Irena Otop<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, , pl. Grunwaldzki 24, 50-363 Wrocław

<sup>2</sup> Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział we Wrocławiu, ul. Parkowa 30, 51-618 Wrocław

\* Autor do korespondencji: joanna.kajewska-szkudlarek@upwr.edu.pl

### STRESZCZENIE

Urbanizacja wywiera negatywny wpływ na procesy hydrologiczne w różnej skali, zachodzące zarówno na powierzchni, jak i pod powierzchnią ziemi. Nadal poszukuje się odpowiedzi na pytanie w jaki sposób zmiany użytkowania powierzchni wpływają na bilans wodny w skali regionalnej i narzędzi, które ją umożliwią. W niniejszej pracy wykorzystano symulacyjny model WetSpaas do oceny struktury bilansu wodnego na obszarze miasta Wrocławia o powierzchni 295 km<sup>2</sup>, z czego około 40% posiada typowe cechy obszarów wiejskich. Przedstawiono zależności między użytkowaniem terenu a składowymi bilansu wodnego (infiltracja efektywna, ewapotranspiracja rzeczywista, spływ powierzchniowy) dla całej aglomeracji miejskiej, jak i poszczególnych historycznych dzielnic. Średnia roczna suma zasilania infiltracyjnego we Wrocławiu w wieloleciu 1981-2010 wynosiła zaledwie 16,5 mm/rok (ok. 3% rocznej sumy opadów), ewapotranspiracji rzeczywistej 443,7 mm/rok, natomiast spływu powierzchniowego 79,3 mm/rok. Na podstawie wyników symulacyjnych stwierdzono podobieństwo między Starym Miastem i Śródmieściem, gdzie notowano wartości ewapotranspiracji równe ok. 410 mm i spływu powierzchniowego ok. 110 mm oraz między Psim Polem i Fabryczną z wyższą ewapotranspiracją (450 mm) i niższym spływem powierzchniowym (70 mm).

**Słowa kluczowe:** bilans wodny obszarów zurbanizowanych, infiltracja, model symulacyjny WetSpaas, użytkowanie terenu

## EARTH SURFACE WATER BALANCE FOR AREA OF WROCLAW BASED ON WETSPASS MODEL SIMULATIONS

### ABSTRACT

Booming urbanization has negative impact on hydrological processes at different scales, which occurring both on and below the earth surface. However, there is still a question of how modifications in the land use affect the regional water balance and searching the tools that will enable it. In the current work, a simulation WetSpaas model



SIEĆ NA RZECZ  
INNOWACJI W ROLNICTWIE  
I NA OBSZARACH WIEJSKICH



Krajowa Sieć  
Obszarów Wiejskich



„Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich: Europa inwestująca w obszary wiejskie”.

Artykuł opracowany na zlecenie Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie.

Artykuł współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach II Schematu Pomocy Technicznej

„Krajowa Sieć Obszarów Wiejskich” Program Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014–2020.

Instytucja Zarządzająca Programem Rozwoju Obszarów Wiejskich na lata 2014-2020

– Minister Rolnictwa i Rozwoju Wsi.

was used to assess the water balance structure in the city of Wrocław (total area 295 km<sup>2</sup>, with significant share, amounting 40%, of typical rural areas). The relationship between land use and components of the water balance (groundwater recharge, actual evapotranspiration, surface runoff) for the entire urban agglomeration as well as individual historical districts has been presented. The average annual groundwater recharge in Wrocław in the years 1981-2010 was only 16.5 mm/year (3% mean annual precipitation), evapotranspiration 443.7 mm/year, and surface runoff 79.3 mm/year. A similarity was observed between the Stare Miasto and the Śródmieście districts, where the values of evapotranspiration equal to approx. 410 mm and surface runoff of about 110 mm and between Psie Pole and Fabryczna districts with higher evapotranspiration (450 mm) and lower surface runoff (70 mm) were calculated.

**Keywords:** water balance of urban areas, groundwater recharge, WetSpas simulation model, land use

## WSTĘP

Powierzchnia terenu na dowolnym obszarze stanowi granicę, przez którą zachodzi wymiana wody między atmosferą i środowiskiem geologicznym. Część opadów atmosferycznych – pomniejszona o parowanie z gleby i powierzchni roślin (ewapotranspirację rzeczywistą) oraz spływ powierzchniowy zasila wody podziemne, stanowi zatem na określonym terenie zasoby odnawialne wód podziemnych, częściowo możliwe do gospodarczego wykorzystania.

Spośród trzech głównych składników bilansu wodnego powierzchni na ziemi infiltracja opadów posiada najbardziej istotne znaczenie, zarówno z gospodarczego, jak i przyrodniczego punktu widzenia, wpływa na kształtowanie się poziomu wody gruntowej, ilość wody niezbędnej dla rozwoju roślin i stan środowiskowy ekosystemów zależnych od wód podziemnych. Złożoność procesu zasilania wód podziemnych i wynikające z niej trudności jego ilościowej oceny najtrafniej można oddać cytując fragment podręcznika 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”.

Obecnie jedyną metodą oceny bilansu wodnego rozpatrywanego obszaru są symulacyjne modele hydrologiczne, umożliwiające oceny przestrzennego rozkładu wartości elementów cyklu hydrologicznego, modele takie stanowią zarazem cenne narzędzie prognozowania tendencji zmian tych elementów w zależności od cią-

gle postępujących procesów urbanizacyjnych i obserwowanego ostatnio globalnego ocieplenia i zmniejszania się ilości opadów.

Celem pracy była obecnej struktury bilansu wodnego na obszarze Wrocławia a bardziej szczegółowe zróżnicowanie jego składowych przeprowadzono według podziału administracyjnego miasta na dzielnice. Mimo, że od 20 marca 1991 roku obowiązuje podział na 47 osiedli, to pięć historycznych dzielnic nadal funkcjonuje w świadomości mieszkańców i strukturze niektórych organów administracji państwowej (Uchwała Nr XX/110/91 Rady Miejskiej Wrocław z dnia 20 marca 1991 r.).

W pracy przedstawiono rezultaty badań symulacyjnych przy pomocy modelu WetSpas (o parametrach przestrzennie rozłożonych) głównych składników bilansu wodnego: ewapotranspiracji rzeczywistej, spływu powierzchniowego oraz zasilania wód podziemnych (infiltracji efektywnej) na obszarze miasta Wrocławia, o powierzchni ok. 295 km<sup>2</sup>, z czego niemal 40% stanowią tereny użytkowane rolniczo, posiadające wszystkie najistotniejsze cechy terenów wiejskich.

Twórcami modelu WetSpas są Okke Batelaan i Florimond De Smedt, którzy na Uniwersytecie w Brukseli wykorzystywali go pierwotnie do modelowania infiltracji wód podziemnych w obrębie zlewni (Batelaan 2006; Batelaan i De Smedt 2001). Był on jednak z powodzeniem stosowany w modelowaniu bilansu wodnego na obszarach, które zlewniami nie są: Strefa Gazy (Aish i in. 2010, Aish 2014), Wysoczyzna Poznańska (Graf i Przybyłek 2014), Delta Nilu (Armanuos i in. 2016), Pomorze Zachodnie (Kajewska-Szkudlarek i in. 2017), Flandria (Zomlot i in. 2015). Zhang i in. (2018) jako jedni z pierwszych wykorzystali model na obszarze miejskim do oceny wpływu urbanizacji na bilans wodny aglomeracji Pekinu. Weryfikacje modelu WetSpas przeprowadzone przez Pokojką (2004) i Graf oraz Przybyłek (2014), wskazują na możliwość jego stosowania

w większej skali. Jednak zestawienie wielkości infiltracji obliczanej różnymi metodami z uzyskaną za pomocą modelu nie dostarczyło jednoznacznych wyników. Według Pokojskiej występujące między nimi różnice nie są istotne, natomiast Graf i Przybyłek wskazują na istnienie istotnych różnic – średnio infiltracja efektywna otrzymana z wykorzystaniem modelu WetSpass była niższa o 5-10%, a sporadycznie nawet o 20%.

Autorzy obejmowali badaniami symulacyjnymi za pomocą modelu obszary o różnej wielkości, nawet tysięcy km<sup>2</sup>. Wang i in. (2015) badali przeobrażenia w obrębie składowych bilansu wodnego w konsekwencji zmian podstawowych elementów klimatu dla zlewni górnego odcinka rzeki Yangcy o powierzchni 983 tys. km<sup>2</sup>. Kajewska-Szkudlarek i in. (2017) przeprowadzili symulacje na terenie Pomorza Zachodniego ograniczonego od północy wybrzeżem Bałtyku o całkowitej powierzchni 18,82 tys. km<sup>2</sup>. Badania Zhang i in. (2018) dotyczyły aglomeracji pekińskiej obejmującej obszar 16,5 tys. km<sup>2</sup>.

Wrocław położony jest na *wrocławsko-opolskim obszarze ciepła*, który wynika z lokalizacji w dolinie Odry i na przedpolu Sudetów, i jest konsekwencją dynamicznego ogrzewania się mas powietrza osiadających po zawiętrznej stronie masywu górskiego. W związku z tym obejmują go swoim zasięgiem wiatry fenowe występujące średnio 71 dni w roku. Wpływ doliny Odry uwidacznia się słabym przewietrzaniem i pojawianiem się częstych zamglenia i podwyższonej wilgotności powietrza. W wieloleciu 1981-2000 średnia roczna temperatura powietrza wynosiła 9,0°C, stycznia -0,4°C, a lipca 18,8°C. Amplituda roczna temperatury równa 19,2°C jest jedną z niższych w kraju. Na obszarze miasta notuje się niskie opady (583 mm dla wielolecia 1901-2000), które występują przez 167 dni w roku (Dubicki i in. 2002, Suder i Szymanowski 2014, Sikora 2008).

We Wrocławiu zachodzą typowe dla każdej dużej aglomeracji miejsko-przemysłowej modyfikacje podstawowych elementów klimatu, które wynikają ze sposobu zagospodarowania i użytkowania terenów zurbanizowanych. Obszary zwartej, wysokiej zabudowy wpływają na intensywność przepływu powietrza, determinując wymianę ciepła i pary wodnej. Dodatkowo, emisja zanieczyszczeń pyłowych i gazowych oddziałuje na bilans promieniowania, natomiast emisja ciepła z procesów spalania paliw w przemyśle, transporcie i gospodarce komunalnej powoduje zmiany energetyczno-hydrologiczne w stosun-

ku do obszarów naturalnych lub użytkowanych rolniczo. Miasto wpływa na wzrost zachmurzenia, a w jego konsekwencji – opadów, oraz spadek wielkości promieniowania i usłonecznienia, natomiast duża ilość sztucznych powierzchni powoduje zmniejszenie wilgotności w stosunku do obszarów naturalnych (Sikora 2008, Dubicki i in. 2002, Landsberg 1981).

Najbardziej charakterystycznym zjawiskiem oddziaływania aglomeracji miejskiej na klimat jest miejska wyspa ciepła (MWC), która objawia się występowaniem podwyższonej temperatury w mieście w stosunku do obszarów je otaczających. Największe różnice pojawiają się podczas letnich nocy przy bezchmurnej i bezwietrznej pogodzie. Intensywność MWC uzależniona jest od struktury użytkowania terenu i układu urbanistyczno-architektonicznego. Jej średnie roczne natężenie we Wrocławiu w najcieplejszym, centralnym obszarze wynosi 1,0°C i zmienia się od 0,5°C w dzień do 1,6°C w nocy. W zabudowie wysokiej notowane jest wyższe średnie natężenie równe 0,7°C, podczas gdy w willowej wynosi ono 0,3°C. MWC maksymalną intensywność wykazuje letnimi nocami, podczas których różnice między miastem a obszarami pozamiejskimi wynoszą od 0,6°C w zabudowie jednorodzinnej i 1,6°C w zabudowie wysokiej do 2,3°C w centrum (Dubicki i in. 2002, Szymanowski 2004, Szymanowski i Kryza 2009, 2012).

## MATERIAŁY I METODY

### 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. Oparty jest na analizie danych przestrzennych w formacie rastrowym i wykorzystuje szereg równań fizyki oraz zależności empirycznych (Batelaan 2006, Batelaan i de Smedt 2001).

Dane do obliczeń symulacyjnych stanowi 8 map numerycznych (rastrowych), zawierających dane liczbowe dotyczące: użytkowania terenu, rodzajów gleb (ze względu na skład granulometryczny), głębokości położenia zwierciadła wód podziemnych, sumy opadów atmosferycznych, parowania wskaźnikowego, prędkości wiatru, temperatury powietrza oraz spadków powierzchni terenu. Dane przestrzenne wykorzystywane w

obliczeniach uzupełniają bazy danych przygotowane przez autorów programu. Bazy danych (zapisane w 4 plikach typu DBF) zawierają niezbędne parametry obliczeniowe, z których korzysta model. Dane zawarte w tych plikach dotyczą właściwości gleb, zawierają współczynniki spływu powierzchniowego oraz właściwe współczynniki konieczne do obliczenia natężenia wartości ewapotranspiracji rzeczywistej (parowania terenowego). W rezultacie obliczeń symulacyjnych uzyskuje się mapy rastrowe przestrzennego zróżnicowania poszczególnych składników bilansu wodnego dla rozpatrywanego obszaru, w podziale na półrocze letnie i zimowe oraz dla całego roku (rys. 1).

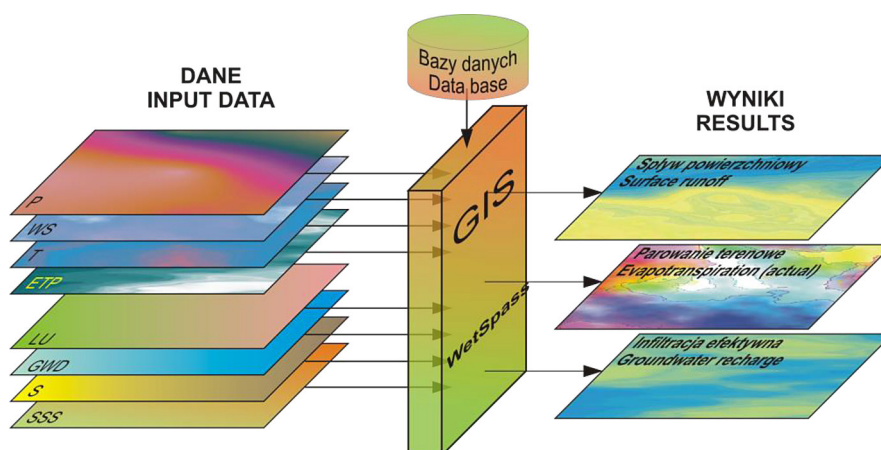
### Dane do modelowania

Dane klimatyczne do obliczeń symulacyjnych przyjęto jako stałe dla całego obszaru badań modelowych, na podstawie danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej Oddział we Wrocławiu dla Lotniskowej Stacji Meteorologicznej

Wrocław-Strachowice z wielolecia 1981-2010 (tab. 1), przy czym sumy parowania z wolnej powierzchni wody obliczono przy wykorzystaniu formuły Iwanowa.

Dla przeciętnego roku hydrologicznego oraz sezonu letniego w wieloleciu 1981-2010 ubytek wody w postaci parowania wskaźnikowego przeważał o ponad 100 mm opady atmosferyczne. Średnia roczna temperatura wynosiła 9,1°C, sezonu letniego 15,3°C a zimowego 2,8°C. Średnia prędkość wiatru (ok. 3 m/s) była zbliżona we wszystkich analizowanych okresach.

Dane przestrzenne dotyczące użytkowania powierzchni terenu opracowano na podstawie numerycznej mapy sozologicznej województwa dolnośląskiego w skali 1:50 000 udostępnionej przez Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej we Wrocławiu oraz wektorowej mapy numerycznej rejonu Wrocławia wchodzącej w skład tzw. European Urban Atlas (rys. 2). Wyróżniono 19 różnych sposobów użytkowania terenu we Wrocławiu. Około połowy (głównie na obrzeżach miasta) zajmują obszary rolnicze,



**Rys. 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 [%]

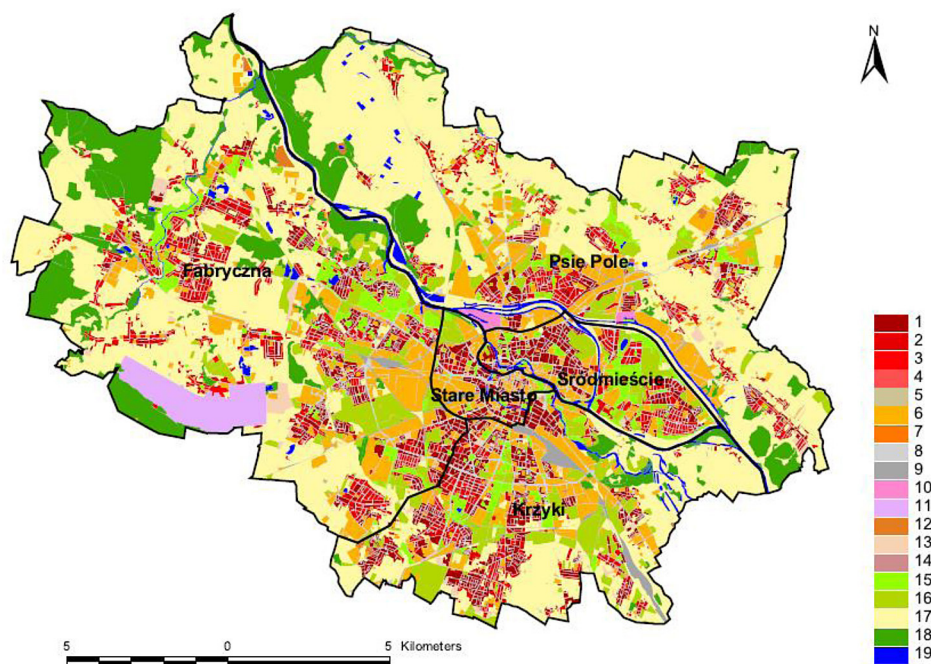
**Fig. 1.** Schematic diagram of water balance components in the WetSpass model (Kajewski, 2008); P – precipitation index [mm]; WS – wind speed [m/s]; T – air temperature [°C]; ETP – potential evaporation [mm]; LU – land use; GWD – groundwater depth [m]; S – soil; SSS – slope [%]

**Tabela 1.** Średnie okresowe i roczne wartości podstawowych parametrów klimatycznych dla stacji Wrocław-Strachowice w latach 1981-2010

**Table 1.** Mean seasonal and annual values of basic climatic parameters for Wrocław-Strachowice station in 1981-2010 period

Okres	Opad [mm]	Parowanie wskaźnikowe [mm]	Temperatura powietrza [°C]	Prędkość wiatru [m/s]
XI-IV	185,7	174,3	2,8	3,6
V-X	351,2	466,2	15,3	2,8
XI-X	536,9	640,5	9,1	3,2





**Rys. 2.** Mapa użytkowania terenu na obszarze Wrocławia; 1–5: Zabudowa miejska o zróżnicowanej gęstości; 6: Zabudowa przemysłowa, usługowa, militarna; 7–9: Drogi i szlaki kolejowe wraz z terenami przyległymi; 10: Port rzeczny; 11: Port lotniczy; 12: Wyrobiska surowców mineralnych i składowiska odpadów; 13: Tereny inwestycyjne; 14: Tereny nieużytkowane; 15: Zieleń miejska; 16: Tereny sportowe i rekreacyjne; 17: Tereny rolnicze, semi-naturalne i podmokłe; 18: Lasy; 19: Wody. Opracowanie własne na podstawie European Urban Atlas

**Fig. 2.** Land use map in the area of Wrocław; 1– 5: Continuous and discontinuous urban fabric; 6: Industrial, commercial, public, military and private units; 7–9: Roads, railways and associated land; 10: Port areas; 11: Airport; 12: Mineral extraction and dump sites; 13: Construction sites; 14: Land without current use; 15: Green urban areas; 16: Sports and leisure facilities; 17: Agricultural, semi-natural areas and wetlands; 18: Forests; 19: Water bodies. Own study, based on European Urban Atlas

30% stanowi zabudowa miejska o zróżnicowanej gęstości, natomiast 11% to tereny sportowe, rekreacyjne i zieleń miejska a 5% szlaki komunikacyjne. Struktura użytkowania w poszczególnych dzielnicach wskazuje na podobieństwa pomiędzy Śródmieściem i Starym Miastem, gdzie przeważa zabudowa miejska o różnej gęstości (55-70%) oraz Fabryczną i Psim Polem, w których tereny rolnicze stanowią 50–60% powierzchni. Wrocław jest miastem charakteryzującym się dużą ilością terenów zielonych i rekreacyjnych: 20% w Śródmieściu, 15% na obszarze Krzyków, po 10% w Fabrycznej i Starym Mieście.

Dane dotyczące przestrzennego rozkładu gleb na obszarze objętym badaniami modelowymi opracowano na podstawie numerycznej mapy hydrograficznej województwa dolnośląskiego w skali 1:50 000 (wykorzystano warstwę informacyjną zawierającą dane na temat przepuszczalności utworów powierzchniowych) oraz mapy glebowo-rolniczej w skali 1:25000, udostępnionych przez Wojewódzki Ośrodek Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej we Wrocławiu.

Dane przestrzenne dotyczące głębokości zwierciadła wody pierwszego poziomu wodonośnego oraz ukształtowania powierzchni terenu i spadków powierzchni terenu zostały opracowane na podstawie interpolacji punktowych danych rozproszonych dotyczących otworów hydrogeologicznych na terenie Wrocławia, zgromadzonych w Centralnym Archiwum Geologicznym (CAG) w ramach tzw. Banku HYDRO.

## WYNIKI BADAŃ

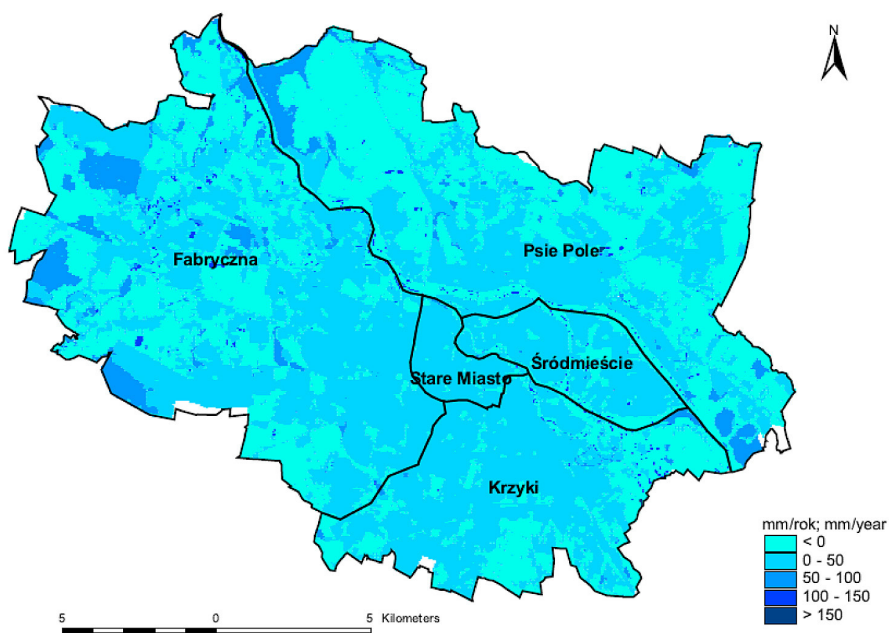
Na rysunkach 3-5 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych w postaci map obrazujących rozkład przestrzenny średnich rocznych sum składowych bilansu wodnego na obszarze Wrocławia.

Średnia roczna wartość infiltracyjnego zasilenia wód podziemnych otrzymana za pomocą modelu WetSpas we Wrocławiu wynosi 17,2 mm. Obszary o najwyższych wartościach (50–100 mm) obejmują głównie lasy położone w zachodniej części miasta. Na terenach zabudowa-

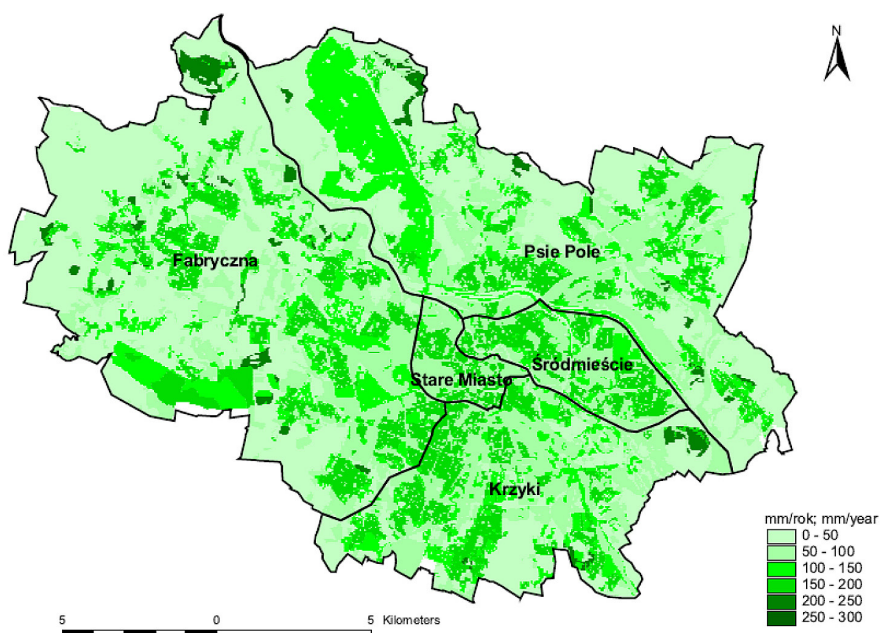
nych, zlokalizowanych w centrum, roczna wielkość infiltracji efektywnej mieści się w przedziale 0-50 mm, natomiast ujemne wartości występują na peryferyjnych obszarach użytkowanych rolniczo. Dodatkowo wartości tej składowej bilansu wodnego w centrum wynikają z występowania terenów zielonych i rekreacyjnych oraz zastosowania zrównoważonych miejskich systemów służących do zatrzymywania wód opadowych. Ujemne wartości na obszarach rolniczych świadczą o przewadze procesu ewapotranspiracji w okresie letnim oraz

nieznacznym wpływie opadów letnich na zmiany położenia zwierciadła wód podziemnych lub braku takiego wpływu. W sezonie letnim ujemne wartości zasilania infiltracyjnego wód podziemnych identyfikowane są przede wszystkim na obszarach użytkowanych rolniczo, co związane jest ze znaczną transpiracją roślin na terenach z płytkim występowaniem wód gruntowych (rys. 3).

Rozkład przestrzenny rocznych sum spływu powierzchniowego odzwierciedla sposoby użytkowania terenu na obszarze miasta (rys. 4).



Rys. 3. Roczne sumy infiltracji efektywnej na obszarze Wrocławia  
 Fig. 3. Annual sums of groundwater recharge in the area of Wrocław



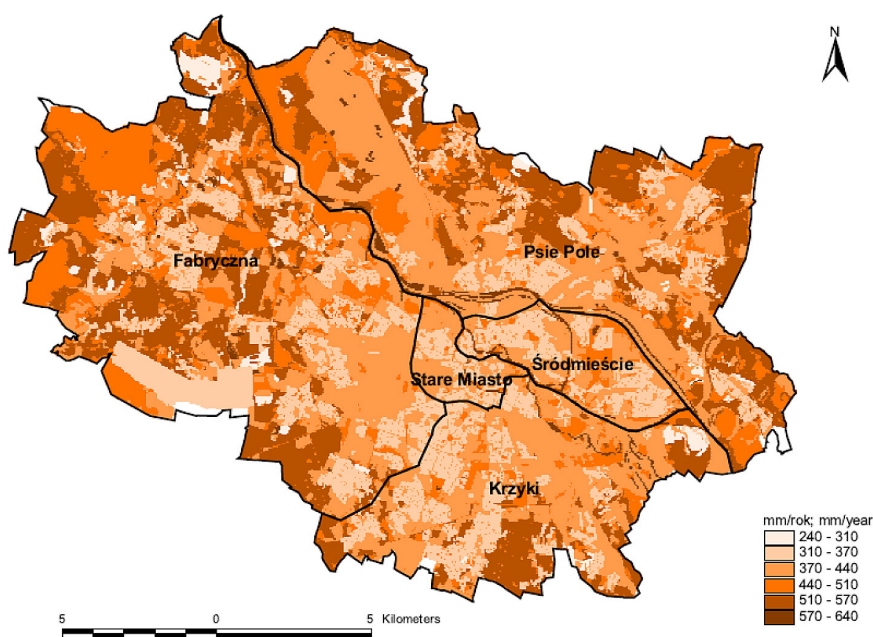
Rys. 4. Roczne sumy spływu powierzchniowego na obszarze Wrocławia  
 Fig. 4. Annual sums of surface runoff in the area of Wrocław

W rezultacie obliczeń symulacyjnych uzyskano wartości z zakresu 0–300 mm/rok. Najniższe wartości obejmują peryferyjne obszary rolnicze, natomiast najwyższe obserwowano głównie dla utwardzonych powierzchni ścisłego centrum miasta. Wyniki modelowania uwidoczniły lotnisko Strachowice, położone na północnym-zachodzie Wrocławia, którego silnie uszczelniony obszar charakteryzuje się wysokimi wartościami spływu powierzchniowego.

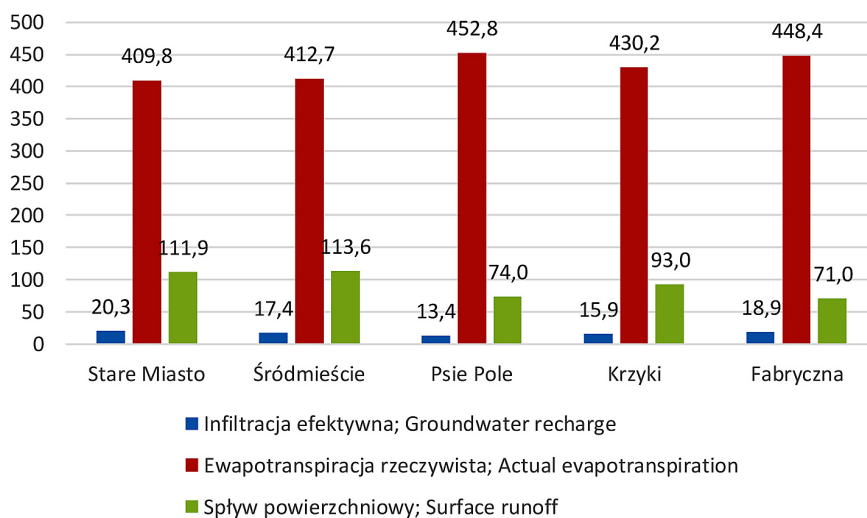
Kontrastową mapę otrzymano dla ewapotranspiracji rzeczywistej (rys. 5). W przypadku tej składowej bilansu wodnego zakres wartości wynosił od 240 do 640 mm/rok; najwyższe sumy

roczne parowania terenowego notowano na obszarach użytkowanych rolniczo oraz leśnych, podczas gdy najniższe na terenach pokrytych zwartą zabudową miejską.

Zaobserwowane zależności widoczne były również w poszczególnych dzielnicach (rys. 6). W przypadku dzielnic, w których przeważają tereny rolnicze (Psie Pole, Fabryczna) otrzymano wyższe (odpowiednio 452,8 oraz 448,4 mm) wartości ewapotranspiracji i niższe (74,0 i 71,0 mm) spływu powierzchniowego w stosunku do dzielnic, gdzie dominującym sposobem użytkowania jest zwarta zabudowa miejska (Stare Miasto i Śródmieście). Średnia roczna



Rys. 5. Roczne sumy ewapotranspiracji rzeczywistej na obszarze Wrocławia  
 Fig. 5. Annual sums of actual evapotranspiration in the area of Wrocław



Rys. 6. Wartości średnich rocznych składowych bilansu wodnego w historycznych dzielnicach Wrocławia  
 Fig. 6. Values of mean annual water balance components in the historical districts of Wrocław



**Tabela 2.** Minimalne, maksymalne i średnie roczne wartości infiltracji efektywnej, ewapotranspiracji rzeczywistej oraz spływu powierzchniowego na obszarze Wrocławia

**Table 2.** Basic statistical data on groundwater recharge, actual recharge and surface runoff in area of Wrocław

Składnik bilansu wodnego	Minimum [mm/rok]	Maksimum [mm/rok]	Średnia [mm/rok] / %opadu	Odchylenie standardowe [mm/rok]
Infiltracja efektywna	-170,2	158,1	16,5/3,06	19,0
Ewapotranspiracja rzeczywista	241,6	640,5	443,7/82,24	69,7
Spływ powierzchniowy	1,5	295,3	79,3/14,7	62,2

wielkość infiltracji efektywnej była najmniejsza dla Psiego Pola (13,4 mm) a największa dla Starego Miasta (20,3 mm).

Podstawowe informacje statystyczne charakteryzujące infiltrację efektywną oraz ewapotranspirację rzeczywistą i spływ powierzchniowy na terenie Wrocławia zestawiono w tabeli 2.

## PODSUMOWANIE

Syntetyczne dane o obecnej strukturze bilansu wodnego całego miasta wynikające z przeprowadzonych badań modelowych przedstawiają się następująco: ewapotranspiracja rzeczywista 82,2%, spływ powierzchniowy 14,7% oraz infiltracja efektywna 3,1% średniej wieloletniej sumy opadów atmosferycznych. Powierzchniowy rozkład wszystkich składników bilansu posiada bardzo silne zróżnicowanie na obszarze miasta, wynikające przede wszystkim ze sposobu użytkowania terenu w poszczególnych rejonach aglomeracji i związanego z tym stopnia uszczelnienia powierzchni terenu.

Uwzględniając dane liczbowe związane z przestrzennym rozkładem infiltracji efektywnej można ocenić, że średnia wartość wskaźnika infiltracji na terenie miasta wynosi zaledwie ok. 3%, podczas gdy szacuje się, że wartość ta dla obszaru całego kraju wynosi około 18% (Tarka i in., 2017). Obliczona na podstawie uzyskanych wyników wartość modułu zasilania wód podziemnych na terenie miasta jest równa 0,522 l/s/km<sup>2</sup>, natomiast odnawialne zasoby wód podziemnych na obszarze całego miasta wynoszą ok. 13,2 tys. m<sup>3</sup>/d.

Biorąc pod uwagę stosunkowo wysoki udział spływu powierzchniowego w bilansie wodnym miasta za konieczne należy uznać wszelkie działania o charakterze administracyjnym, organizacyjnym i technicznym, ukierunkowane na „zrównoważone gospodarowanie wodami opadowymi polegające na stosowaniu zasady zagospodarowania opadu w miejscu jego wystąpienia oraz stop-

niowego uwalniania oraz opóźniania spływu wód, których pełne zagospodarowanie w miejscu opadu nie jest możliwe”, uszczegółowione w Zarządzeniu Prezydenta Wrocławia z dnia 17 marca 2017 r.

## Podziękowania

Badania naukowe sfinansowano ze środków Instytutu Inżynierii Środowiska UP we Wrocławiu, wydanie publikacji zostało sfinansowane ze środków konferencji naukowo-technicznej „Współczesne wyzwania gospodarki wodnej na obszarach wiejskich”. Autorzy składają podziękowania Wojewódzkiemu Ośrodkowi Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej we Wrocławiu za udostępnienie map numerycznych obszaru badań (umowa 213.2014).

## LITERATURA

1. Aish A.M., Batelaan O., De Smedt F. 2010. Distributed recharge estimation for groundwater modeling using WetSpaas model, case study – Gaza strip, Palestine. Arab. J. Sci. Eng., 35 (1B), 155–163.
2. Aish A.M. 2014. Estimation of Water Balance Components in the Gaza Strip with GIS Based WetSpaas Model. Civil Environ. Res., 6 (11), 77–85.
3. Armanuos A.M., Negm A., Yoshimura C., Saavedra O.C. 2016. Application of WetSpaas model to estimate groundwater recharge variability in the Nile Delta aquifer. Arab. J. Geosci., 9 (10), 553.
4. 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.
5. Batelaan O., De Smedt F. 2001. WetSpaas: 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.



6. Bryś K., Bryś T. 2010. The First One Hundred Years (1791–1890) of the Wrocław Air Temperature Series. W: R. Przybylak, J. Majorowicz, R. Brázdil, M. Kejna (red.) *The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview*, 485-524. Dordrecht-Heidelberg-London-New York: Springer.
7. Dubicki A., Dubicka M., Szymanowski M. 2002. *Klimat Wrocławia*. W: K. Smolnicki, M. Szykasiuk (red.) *Informator o stanie środowiska Wrocławia 2002*, 9-25. Wrocław: Dolnośląska Fundacja Ekorozwoju.
8. Graf R., Przybyłek J. 2014. Estimation of shallow groundwater recharge using a GIS-based distributed water balance model. *Quaestiones Geographicae*, 33 (3), 27–37.
9. Kajewska-Szkudlarek J., Kubicz J., Kajewski I., Dąbek P. 2017. Ocena zasobów odnawialnych wód podziemnych Pomorza Zachodniego w trzydziestoleciach 1971-2000 oraz 1981-2010. Wyniki badań symulacyjnych przy pomocy modelu WetSpass. *Przegląd Geologiczny* 65, 11/1, 1080-1084.
10. Kajewski I. 2008. Ocena składników bilansu wodnego w skali regionalnej przy pomocy modelu WetSpass. *Zesz. Probl. Post. Nauk Rol.*, 528, 63–70.
11. Kowalski J. 2007. *Hydrogeologia z podstawami geologii*. Wydawnictwo UP we Wrocławiu.
12. Landsberg H.E. (1981). *The urban climate*. Academic Press, 285 pp.
13. Pokojka P. 2004. Application and verification of water balance model with distributed parameters (on the example of Rega River Basin). *Miscellanea Geographica*, 11, 139–149.
14. Sikora S. 2008. *Bioklimat Wrocławia*. Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego 5. Wrocław: Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego.
15. Suder A., Szymanowski M. 2014. Determination of Ventilation Channels In Urban Area: A Case Study of Wrocław (Poland). *Pure Appl. Geophys.* 171, 965–975. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00024-013-0659-9>.
16. Szymanowski M. 2004. Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu. *Acta Universitatis Wratislaviensis No 2690, Studia Geograficzne* 77, 1-229.
17. Szymanowski M., Kryza M. 2009. GIS-based techniques for urban heat island spatialization. *Clim Res* 38, 171–187. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr00780>.
18. Szymanowski M., Kryza M. 2012. Local regression models for spatial interpolation of urban heat island – an example from Wrocław, SW Poland. *Theor Appl Climatol* 108, 53–71. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-011-0517-6>.
19. Tarka R., Olichwer T., Staśko S. 2017. Evaluation of groundwater recharge using the infiltration coefficient method. *Geological Quarterly* 61(2), 384-395. DOI: <http://dx.doi.org/10.7306/gq.1341>.
20. 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.
21. Zhang Y., Liu S., Cheng F., Shen Z. 2018. WetSpass-Based Study of the Effects of Urbanization on the Water Balance Components at Regional and Quadrat Scales in Beijing, China. *Water* 10(1), 5. DOI: <https://doi.org/10.3390/w10010005>.
22. Zarządzenie nr 6541/17 Prezydenta Wrocławia z dnia 17 marca 2017 r. w sprawie zagospodarowania wód opadowych. <http://uchwaly.um.wroc.pl/uchwala.aspx?numer=6541/17>.
23. Zomlot Z., Verbeiren B., Huysmans M., Batelaan O. 2015. Spatial distribution of groundwater recharge and base flow: Assessment of controlling factors. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, Volume 4, Part B, 349-368. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.07.005>.