

WPŁYW URBANIZACJI W STREFIE PODMIEJSKIEJ NA STOSUNKI WODNE W ZLEWNIACH MAŁYCH CIEKÓW

Jolanta Kanclerz¹, Sadzide Murat-Błażejewska¹, Katarzyna Dragon¹, Sara Birk¹

¹ Instytut Melioracji, Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, ul. Piątkowska 94, 60-649 Poznań, e-mail: jkanclerz@up.poznan.pl, smurat@up.poznan.pl

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wyniki analizy wpływu urbanizacji stref podmiejskich miasta Poznania w latach 1936–2011 na stosunki wodne zlewni cieków Dopływ spod Lusówka i cieków Przeźmierki. Zlewnie te położone są na terenie gmin, gdzie w ostatnich latach obserwuje się gwałtowny rozwój terenów zurbanizowanych. Przeprowadzona analiza zmian form użytkowania zlewni, wykazała prawie pięciokrotny wzrost terenów zurbanizowanych w zlewni cieków Dopływ spod Lusówka i dziesięciokrotny w zlewni cieków Przeźmierka. Na wskutek uszczelnienia terenów zlewni wzrosła wielkość opadów efektywnych, konsekwencją czego był szybki odpływ wód opadowych i prawie dwukrotny wzrost przepływów w ciekach.

Słowa kluczowe: zlewnia, formy użytkowania, urbanizacja, model opad-odpływ.

IMPACT OF URBANIZATION OF SUBURBAN AREA ON WATER RELATION IN THE SMALL CATCHMENTS

ABSTRACT

This paper presents results of analysis focused on impact of urbanization of Poznań suburban area on water relation for Dolyw spod Lusówka and Przeźmierki catchments during 1936–2011. Both catchments are located in municipalities which recently showing sharp growth in urban area. Analysis of changes in land use for studied catchments showed almost 5-fold increase in urban area for Dopływ spod Lusówka and 10-fold for Przeźmierka. As a consequence of land sealing increase in amounts of effective precipitation was observed that led to fast runoff of rain waters and almost double flow in watercourses.

Keywords: catchment, land use, urbanization, rainfall-runoff model.

WSTĘP

Dynamiczny rozwój miast wywiera coraz silniejszy wpływ na wzrost urbanizacji strefy podmiejskiej tych miast. Nowo powstałe osiedla mieszkaniowe, wielkoobszarowe centra handlowe wraz z potężnymi parkingami wymagają przyspieszonego rozwoju infrastruktury technicznej. Zmiana zagospodarowania przestrzeni jest zjawiskiem wielowymiarowym, ponieważ powoduje przekształcenie krajobrazu i jego fragmentacje.

Intensyfikacja procesów urbanizacyjnych poprzez zwiększenie udziału terenów zabudowanych i powierzchni uszczelnionych prowadzi do zmiany struktury powierzchni czynnej zlewni,

która wpływa na przebieg procesów hydrologicznych [Graf 2014]. Wpływ ten jest bardziej wyraźny szczególnie w zlewniach małych cieków, gdzie odpływ powierzchniowy ulega przyśpieszeniu w wyniku uszczelnienia i zmiany szorstkości powierzchni. Zwiększony odpływ zanieczyszczonych wód opadowych do niewielkich cieków prowadzi do degradacji ekosystemów wodnych i od wody zależnych [Sojka i in. 2014].

Dodatkowo powstawanie zabudowy na terenach dotychczas użytkowanych rolniczo z istniejącym już systemem drenarskim prowadzi do uszkodzenia elementów konstrukcji hydrotechnicznych. W rezultacie obserwuje się wyższy poziom wód podziemnych oraz miejscowe podtopienia [Przybyła i in. 2011].

W wyniku zmian sposobu zagospodarowania a przede wszystkim zwiększenia powierzchni nieprzepuszczalnych zaburza się dotychczasowy rozkład i wielkość odpływu z obszaru zlewni poprzez wzrost przepływu kulminacyjnego wezbrań przy jednoczesnym zmniejszeniu czasu wystąpienia kulminacji. Zgodnie z Metodyką [2009] do oceny przepływów wezbraniowych w małych zlewniach stosuje się koncepcyjne modele typu opad-odpływ [Banasik i in. 2008, Sikorska i Banasik 2010].

Celem niniejszej pracy było określenie wpływu wzrostu urbanizacji terenu na stosunki wodne w zlewniach małych cieków położonych w strefie podmiejskiej Poznania.

Do analizy wybrano obiekty badawcze położone w odległości 12,3 km – zlewnia ciek Dopływ Spod Lusówka i 9,4 km – zlewnia cieku Przeźmierka od granic miasta Poznania.

MATERIAŁY I METODY

W pracy przeprowadzono szczegółową analizę materiałów kartograficznych w celu rozpoznania sposobu zagospodarowania terenu zlewni ciek Dopływ spod Lusówka i ciek Przeźmierki w latach 1936, 1998 i 2011. Parametry przestrzenne i fizjograficzne wraz ze strukturą użytkowania zlewni oszacowano na podstawie warstw informacyjnych map topograficznych w skali 1:25 000 z roku 1936 arkusz 3566 Sady pobrane z archiwum Map Zachodnich (www.mapy.amzp.pl) i rastrowych map topograficznych w skali 1:10 000 z roku 1998 zaktualizowanych ortofotomapą z 2013 roku (aktualność topograficzna 2011), które pobrano ze strony www.geoportal.gov.pl. Wykorzystano także Rastrową Mapę Podziału Hydrograficznego Polski w skali 1:50 000 z 2010 roku, arkusze N-33-130-C, N-33-130-D oraz mapę glebowo-rolniczą w skali 1:25 000 z 1998 roku – arkusze Tarnowo Podgórne, Miasto Poznań, Rokietnica i Dopiewo.

Zgromadzone materiały kartograficzne stanowiły materiał wejściowy do utworzenia numerycznej bazy danych analizowanych zlewni. Po ustaleniu zmian struktury użytkowania zlewni oszacowano wpływ tych zmian na potencjalne zdolności retencyjne terenów zlewni za pomocą metody CN-SCS [1986], opracowanej przez Służbę Ochrony Gleb w USA. W metodzie tej poszczególnym gatunkom gleb z mapy glebowo - rolniczej, pokrywa-

jącym dany sposób użytkowania powierzchni, przypisano odpowiednią grupę glebową SCS (Ignar 1993). Grupy te zostały sklasyfikowane na podstawie możliwości tworzenia odpływu powierzchniowego ze zlewni. Na podstawie wartości parametru CN wyznaczono maksymalną potencjalną retencję zlewni (S).

Po przeanalizowaniu zdolności retencyjnych w badanych zlewniach w latach 1936, 1998 i 2011 przeprowadzono obliczenia opadu efektywnego i jego transformacji w odpływ powierzchniowy. Do obliczeń wielkości przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwie przewyższenia 10% i 1% zastosowano koncepcyjny model transformacji opadu w odpływ – model kaskadowy zbiorników liniowych Nasha. Wysokość opadu obszarowego o określonym czasie trwania (2h) i prawdopodobieństwie przewyższenia (10% i 1%) wyznaczono na podstawie wzoru empirycznego Bogdanowicz i Stachy [1998]. Natomiast wielkość opadu efektywnego wyznaczono również za pomocą metody CN-SCS.

Transformację opadu efektywnego w odpływ bezpośredni wykonano przy użyciu modelu, w którym chwilowy hydrogram jednostkowy jest dwuparametrowa funkcją gęstości prawdopodobieństwa rozkładu gamma:

$$u(t) = \frac{1}{k \cdot \Gamma(N)} \cdot \left(\frac{t}{k}\right)^{N-1} \cdot \exp\left(-\frac{t}{k}\right) \quad (1)$$

gdzie: $u(t)$ – rzędne chwilowego hydrogramu jednostkowego IUH [h^{-1}],

t – czas od początku układu współrzędnych [h],

k – parametr retencji zbiornika [h],

N – liczba zbiorników [-],

$\Gamma(N)$ – funkcja gamma, której wartość dla całkowitej liczby zbiorników wynosi:

$$\Gamma(N) = (N-1)!$$

Obie badane zlewnie ze względu na ich małą powierzchnię są zlewniami niekontrolowanymi dlatego czas opóźnienia odpływu (LAG) oraz parametr retencji k obliczono na podstawie zależności według Rao i in. [1972]. Natomiast liczbę zbiorników N w modelu Nasha obliczono jako iloraz czasu opóźnienia odpływu LAG i parametru retencji zbiornika k :

$$LAG = 1,28 \cdot A^{0,46} \cdot (1 + U)^{-1,66} \cdot H^{-0,27} \cdot D^{0,37} \quad (2)$$

$$k = 0,56 \cdot A^{0,39} \cdot (1 + U)^{-0,62} \cdot H^{-0,11} \cdot D^{0,22} \quad (3)$$

$$N = \frac{LAG}{k} \quad (4)$$

gdzie: LAG – czas opóźnienia [h],
 k – parametr retencji zbiornika [h],
 N – liczba zbiorników [–],
 A – powierzchnia zlewni [km²],
 U – udział powierzchni nieprzepuszczalnej w zlewni [–],
 H – wysokość opadu efektywnego [mm],
 D – czas trwania opadu efektywnego [h].

Rzędne hydrogramu jednostkowego wyznaczono na podstawie rzędnych chwilowego hydrogramu jednostkowego, a także powierzchni zlewni oraz współczynnika przeliczeniowego:

$$h_i = \frac{A}{3,6} \cdot \bar{u}_i = \frac{A}{3,6 \cdot \Delta t} \cdot \int_{t-\Delta t}^t u(\tau) d\tau \quad (5)$$

dla $t = \Delta t \cdot i; i = 1, 2, \dots, m$

gdzie: h_i – rzędne hydrogramu jednostkowego [m³·s⁻¹·mm⁻¹],
 A – powierzchnia zlewni [km²],
 $1/36$ – współczynnik przeliczeniowy z [mm·km²·h⁻¹·mm⁻¹] na [m³·s⁻¹·mm⁻¹],
 m – liczba rzędnych hydrogramu jednostkowego,
 \bar{u}_i – rzędne bezwymiarowego czasowego hydrogramu jednostkowego [h⁻¹], tj. reakcji zlewni na bezwymiarowy opad jednostkowy o czasie trwania Δt , obliczone z zależności:

$$\bar{u}_i = 0,5 \cdot [u(t) + u(t - \Delta t)] \quad (6)$$

dla $t = \Delta t \cdot i; i = 1, 2, \dots, m$

gdzie: Δt – obliczeniowy krok czasowy [h], wyrażony wzorem:

$$\Delta t = \frac{LAG}{5} \quad (7)$$

gdzie: LAG – czas opóźnienia odpływu [h].

Hydrogramy odpływu bezpośredniego z badanych zlewni obliczono za pomocą równania dla opadu o n przedziałach czasowych i hydrogramu jednostkowego o m rzędnych:

$$Q_i = \sum_{j=i}^{\min(i,n)} h_k \cdot \Delta H_j \quad (11)$$

$k = i - j + 1; i = 1, 2, \dots, m + n - 1$.

gdzie: Q_i – rzędne hydrogramu odpływu bezpośredniego [m³·s⁻¹],
 ΔH_j – cząstkowy opad efektywny w przedziale czasowym j [mm],
 n – liczba przedziałów czasowych opadu efektywnego.

WYNIKI

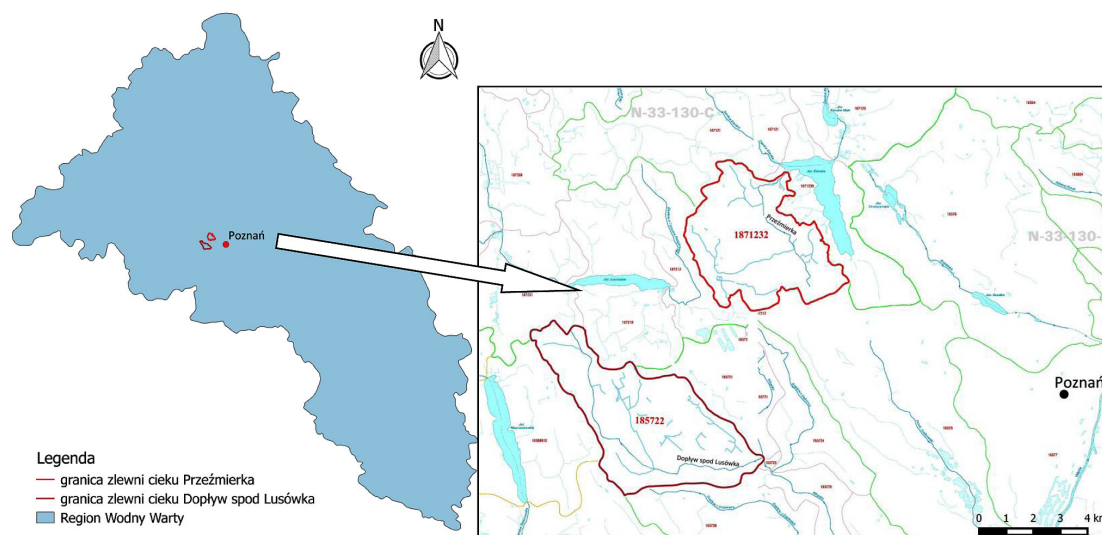
W układzie hydrograficznym zlewnia ciek Dopływ spod Lusówka o powierzchni 24,81 km² i zlewnia cieku Przeźmierka (pow. 20,02 km²) znajdują się Regionie Wodnym Warty (rys. 1). W systemie kodowania jednostek hydrograficznych stosowanym w Unii Europejskiej zlewnia Dopływu spod Lusówka otrzymała kod 185722 i recipientem ciek jest rzeka Wirynka, a ciek Przeźmierka o kodzie 1871232 uchodzi do Jeziora Kierskiego.

Zarówno Dopływ spod Lusówka jak i Przeźmierka to cieki IV rzędu o długości odpowiednio 11,42 km i 6,12 km [Czarnecka 2005]. Ciek Dopływ spod Lusówka od źródła znajdującego się na wysokości 98,65 m n.p.m. do ujścia na wysokości 78,75 m n.p.m. pokonuje 11,42 km, co daje spadek podłużny ciek 1,74‰. Natomiast źródło ciek Przeźmierka znajduje się na wysokości 88,15 m n.p.m. a ujście na 72,35 m n.p.m. przy długości ciek 6,12 km daje spadek podłużny 2,58‰. Spadki poprzeczne doliny ciek w obu zlewniach wynoszą średnio 2,7‰.

Pod względem administracyjnym zlewnie położone są w powiecie Poznańskim, ok. 90% powierzchni zlewni ciek Dopływ spod Lusówka podlega gminie Dopiewo a 10,5% gminie Tarnowo Podgórne, 86% powierzchni zlewni ciek Przeźmierki znajduje się w gminie Tarnowo Podgórne, ok. 10% w obszarze Miasta Poznań i 4% w gminie Rokietnica. (rys. 2).

Według podziału geograficznego obie zlewnie położone są w obrębie podprowincji Pojezierza Południowobałtyckiego (314–316), w makroregionie Pojezierze Wielkopolskie (315.5), w mezoregionie Pojezierze Poznańskie (315.51) o typie wysoczyzny młodoglacjalnej [Kondracki 2009].

Badane zlewnie zlokalizowane są w północno-wschodniej części monokliny przedsudeckiej, która zbudowana jest z utworów permsko-mezozoicznych. Strop mezozoiku zbudowany jest w większości z wapieni kredy górnej a także margla. Utwory te przykryte zostały osadami trzeciorzędowymi (zielone i szare piaski oligoceńskie, piaski z iłami, lignit mioceński, pstre ły poznańskie). Nad osadami trzeciorzędowymi zalegają osady czwartorzędowe takie jak: gliny zwałowe, żwiry, piaski i mułki z okresu zlodowacenia południowolskiego, środkowopolskiego, bałtyckiego oraz interglacjału mazowieckiego i eemskiego, których miąższość dochodzi do 80 metrów [Kostecki 2001].



Rys. 1. Położenie hydrograficzne zlewni cieków Dopływu spod Lusówka i Przeźmierki
Fig. 1. Hydrogeographic localization of Dopływ spod Lusówka and Przeźmierki catchments



Rys. 2. Położenie administracyjne zlewni cieków Dopływu spod Lusówka i Przeźmierki
Fig. 2. Administrative localization of Dopływ spod Lusówka and Przeźmierki catchments

W analizowanych zlewniach dominują gleby płowe i rdzawe oraz czarne ziemie, wytworzone z piasków słabogliniastych (zlewni Dopływu spod Lusówka ok. 67%, a w zlewni Przeźmierki ok. 38%) i piasków gliniastych lekkich (odpowiednio ok. 30% i 44%). Pozostałą część zlewni pokrywają gleby wytworzone z piasków luźnych i glin lekkich. Procesy urbanizacyjne przyczyniły się do istotnych zmian w sposobie użytkowania powierzchni zlewni cieków Dopływu spod Lusówka i Przeźmierki w latach 1936–2011 (tab. 1). Obie zlewnie są zlewniami zurbanizowanymi, ponieważ udział powierzchni nieprzepuszczalnych

(dachy budynków, drogi, chodniki i parkingi) jest wyższy od 5% i wynosi w zlewni cieków Dopływu spod Lusówka ok. 14% a w zlewni cieków Przeźmierki ok. 23%.

Na przełomie lat 1936–2011 na terenie obu zlewni następował stopniowy przyrost terenów uszczelnionych. Analiza zmian struktury użytkowania wykazała prawie 5-krotny wzrost powierzchni zabudowy i szlaków komunikacyjnych w zlewni cieków Dopływu spod Lusówka wzrosła, a w zlewni cieków Przeźmierki aż 9-krotny. W roku 2011 tereny zabudowane i szlaki komunikacyjne stanowiły prawie 14% w zlewni cieków Dopływ spod Lusówka, a w zlewni Przeźmierki prawie 23% powierzchni zlewni, co przyczyniło się do uszczelnienia terenu. Rozwój terenów zurbanizowanych odbył się kosztem gruntów ornych, których powierzchnia w latach 1936–2011 zmalała odpowiednio o 13 i 25%.

Stopniowy przyrost udziału terenów nieprzepuszczalnych w zlewniach w latach 1936–2011 doprowadził do zmniejszenia ich potencjalnych zdolności retencyjnych. W celu określenia warunków retencyjnych metodą CN-SCS poszczególnym gatunkom gleb przypisano odpowiednią grupę glebową (Banasik 2009). Obie zlewnie pokryte były głównie glebami z grupy B (zlewnia cieków Dopływ spod Lusówka w 99,9%, a Przeźmierki w 93%), które charakteryzują się średnią przepuszczalnością o współczynniku filtracji $3.8 < k < 7.6$ mm/h. Pozostałe części zlewni pokryte były glebami z grupy A o dużym współczynniku filtracji ($k > 7,6$ mm/h). W analizowanych latach wartość parametru CN w zlewni Cieków Dopływ

Tabela 1. Formy użytkowania terenu zlewni w latach 1936, 1998 i 2011**Table 1.** Land use in the catchments during 1936, 1998 and 2011

Rodzaj użytkowania	Zlewnia ciek Dopływ spod Lusówka			Zlewnia ciek Przeźmierka		
	1936	1998	2011	1936	1998	2011
	[%]					
Tereny rolne:						
• grunty orne	60,77	55,31	47,7	91,06	72,63	66,58
• użytki zielone	1,57	1,87	2,62	5,54	8,54	7,69
Lasy	34,81	36,89	35,67	0,7	1,6	1,7
Tereny przekształcone:						
• zabudowa i szlaki komunikacyjne	2,75	5,28	13,62	2,5	14,89	22,68
• sady	–	–	–	–	2,09	0,95
Wody powierzchniowe	0,1	0,65	0,39	0,2	0,25	0,4
Suma	100	100	100	100	100	100

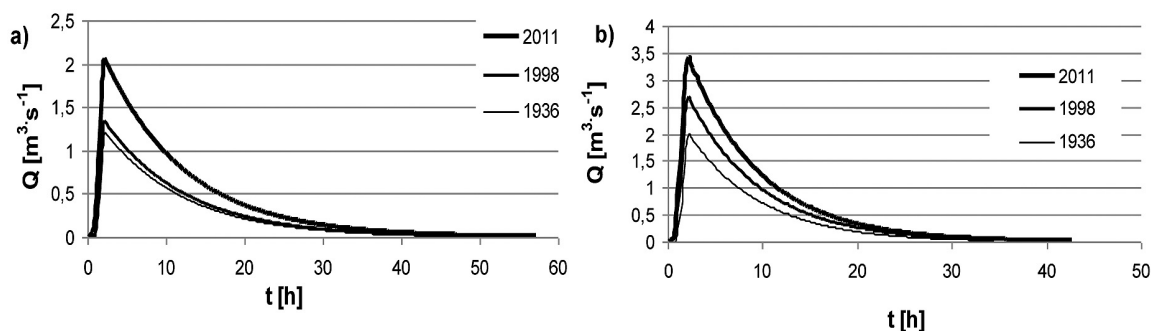
spod Lusówka wzrosła z 68,48 do 69,74, czyli o ok. 2%. Podobny wzrost parametru CN notowano w zlewni Przeźmierki, z 71,35 do 73,23. Pomimo znacznego wzrostu powierzchni zurbanizowanej wartość parametru CN nie zmieniła się radykalnie, na co wpływ miał wzrost powierzchni lasów oraz wód stojących. W konsekwencji wzrost powierzchni zurbanizowanych przełożył się na zmniejszenie maksymalnej potencjalnej retencji, która w zlewni ciek Dopływ spod Lusówka zmalała o 7 mm, co w przeliczeniu daje aż 174 tys. m³ wody, która zamiast zinfiltrować w głąb gruntu do wód podziemnych sływa po powierzchni zlewni do cieków i odpływa ze zlewni. Natomiast w zlewni Przeźmierki maksymalna potencjalna retencja zmniejszyła się o 9 mm, co przyczyniło się do bezproduktywnego odpływu wody wynoszącego ok. 180 tys. m³.

Uszczelnienie terenów zlewni przyczyniło się również do wzrostu wielkości opadu efektywnego w latach 1936–2011 o ok. 0,8 mm jako reakcji na opad o prawdopodobieństwie przewyższenia 10% i o ok. 1,5 mm o prawdopodobieństwie prze-

wyższenia 1% (o czasie trwania deszczu $t = 2$ h i wysokości odpowiednio 39,42 i 55,82 mm).

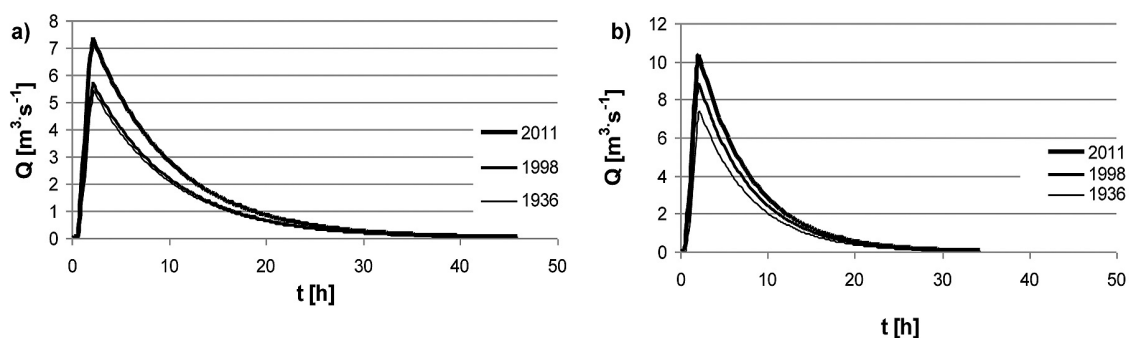
Efektem wyższych opadów efektywnych oraz braku zagospodarowania wód opadowych w zlewni był widoczny wzrost przepływów w ciekach. Tradycyjne podejście do zagospodarowania wód opadowych poprzez jak najszybsze odprowadzenie ich do sieci kanalizacyjnej i do najbliższego odbiornika może doprowadzić do prawie dwukrotnego wzrostu przepływów maksymalnych w analizowanych ciekach (rys. 3, 4). Obliczenia symulacyjne wykazały, że w roku 2011 w obu zlewniach przepływ o prawdopodobieństwie przewyższenia 10% był wyższy o ponad 70% od przepływów w roku 1936, a przepływ o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% o ponad 40%. Skróceniu także ulegnie czas od wystąpienia opadu do osiągnięcia kulminacji o ok. 30 min.

Dalsze przekształcenie terenów strefy podmiejskiej wynikające z realizacji miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego spowoduje zmiany zdolności retencyjnych terenów i wzrost przepływów w małych ciekach.



Rys. 3. Hydrogram przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwie przewyższenia 10% w latach 1936, 1998 i 2011: a) Dopływu spod Lusówka b) ciek Przeźmierka

Fig. 3. Hydrograph of maximal flow with 10% probability to exceed during 1936, 1998 and 2011: a) Dopływ spod Lusówka, b) Przeźmierka watercourse



Rys. 4. Hydrogram przepływów maksymalnych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% w latach 1936, 1998 i 2011: a) Dopływu spod Lusówka, b) ciekłu Przeźmierka

Fig. 4. Hydrograph of maximal flow with 1% probability to exceed during 1936, 1998 and 2011: a) Dopływ spod Lusówka, b) Przeźmierka watercourse

WNIOSKI

Postępująca urbanizacja w latach 193–2011 w strefie podmiejskiej Poznania w istotny sposób wpłynęła na sposób użytkowania powierzchni oraz na stosunki wodne w badanych zlewniach. Przeprowadzona analiza zmian formy użytkowania terenu w latach 1936–2011 wykazała wzrost powierzchni terenów zabudowanych w zlewni ciekłu Dopływ spod Lusówka (o pow. 24.81 km²) o prawie 11% a w zlewni ciekłu Przeźmierka (o pow. 20,02 km²) o 20%. Wzrost terenów zabudowanych, a także rozwój sieci komunikacyjnej przyczynił się do uszczelnienia powierzchni zlewni i w związku z tym do zmniejszenia potencjalnej zdolności retencyjnych zlewni odpowiednio o 7 i 9 mm. Obliczenia symulacyjne wykazały, że zmniejszenie zdolności retencyjnych zlewni może spowodować prawie dwukrotny wzrost przepływów wezbraniowych wywołanych deszczem nawalnym o założonym czasie trwania i prawdopodobieństwie przewyższenia.

LITERATURA

- Banasik K. 2009. Wyznaczenie wezbrań powodziowych w małych zlewniach zurbanizowanych. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
- Banasik K., Hejduk L., Barszcz M. 2008. Flood flow consequences of land use changes in a small urban catchment of Warsaw. Proc. Of 11th International conference on urban drainage, Edinburgh, Scotland, UK, 31, 10.
- Bogdanowicz E., Stachy J. 1998. Maksymalne opady deszczu w Polsce, charakterystyki projektowe. Mat. Bad. IMGW 23 seria Hydrologia i Oceanologia 85.
- Czarnecka H. (red.) 2005. Atlas Podziału Hydrograficznego Polski, cz. 1 i 2. Wyd. IMGW Warszawa.
- Graf R. 2014. Przestrzenne zróżnicowanie spływu powierzchniowego w zlewniach zurbanizowanych na przykładzie miasta Poznania. Woda w mieście. Monogr. Komisji Hydrolog. PTG. Tom 2, 59–71.
- Ignar S. 1993. Metodyka obliczania przepływów wezbraniowych w zlewniach nieobserwowanych. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW. s. 56.
- Kondracki J. 2009. Geografia regionalna Polski. PWN, Warszawa.
- Kostecki M. 2001. Komentarz do mapy hydrograficznej. Arkusz N-33-130-C. WODGiK Poznań.
- Metodyka obliczania przepływów i opadów maksymalnych określonym prawdopodobieństwie przewyższenia dla zlewni kontrolowanych i niekontrolowanych oraz identyfikacji modeli transformacji opadu w odpływ. 2009. SHP, Warszawa.
- Przybyła Cz., Bykowski J., Mrozik K., Napierała M. 2011. Rola infrastruktury wodno-melioracyjnej w procesie suburbanizacji. Śródkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, Rocznik Ochrona Środowiska, T. 13., 769–786.
- Rao R.A., Delleur J.W., Sarma B.S. 1972. Conceptual hydrologic models for urbanizing basins. Journal of the Hydraulics Division, 98(7), 1205–1220.
- SCS (Soil Conservation Service) 1986. Urban hydrology for small watersheds. Tech. Report 55, US Dept of Agric., Waszyngton, D.C.
- Sikorska A., Banasik K. 2010. Parameter identification of a conceptual rainfall-runoff model for a small urban catchment. Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW. Land Reclamation 42(2), 279–293.
- Sojka M., Murat-Błażejewska S., Wróżyński R. 2014. Prognoza wpływu realizacji zapisów miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego na wzrost przepływów wezbraniowych. Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk, Zeszyt XX, Tom II, 155–164.