

Znaczenie dróg na obszarze zurbanizowanym w kształtowaniu odpływu i transportu fluwialnego (Kielce)

The role of roads in urbanized areas in runoff and fluvial transport shaping (Kielce city)

Tadeusz Ciupa

Instytut Geografii, Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, ul. Świętokrzyska 15, 25-406 Kielce, tciupa@ujk.kielce.pl

Zarys treści: W artykule przedstawiono rolę sieci dróg na obszarze zurbanizowanym w kształtowaniu odpływu oraz transportu fluwialnego na przykładzie zlewni Sufragańca (62,01 km²) i Silnicy (49,40 km²). Rzeka Sufraganiec odwadnia zlewnię leśno-rolniczą z rosnącym w dół udziałem terenów zurbanizowanych. Natomiast rzeka Silnica odwadnia początkowo tereny zalesione, a następnie podmiejskie i zurbanizowane 200-tysięcznego miasta Kielce. Wykazano, że w zlewniach zurbanizowanych, o dużej powierzchni i gęstości dróg – w stosunku do zlewni leśnych, rolniczych i podmiejskich wyraźnie wzrasta rola letnich wezbrań opadowych w kształtowaniu odpływu, a roztopowych – transportu fluwialnego. Transformacja fal wezbraniowych na terenach zurbanizowanych polega m.in. na znacznym skróceniu czasu ich koncentracji i opadania oraz szybkim wzroście objętości. Obszary zurbanizowane, a w ich obrębie drogi – w porównaniu do innych rodzajów użytkowania gruntów analogicznej wielkości – wytwarzają znacznie więcej substancji rozpuszczonych i drobnoziarnistego sedymentu, a to wywiera istotny wpływ na dynamikę, wielkość i udział poszczególnych rodzajów ładunków w transporcie fluwialnym. Określone związki między wybranymi wskaźnikami zagospodarowania poszczególnych zlewni cząstkowych – z uwzględnieniem dróg – a charakterystykami odpływu i transportu materiału rozpuszczonego oraz zawiesiny, charakteryzujące się często wysokimi i istotnymi statystycznie współczynnikami determinacji, pozwalają prognozować ich zmiany w miarę wzrostu przeobrażeń antropogenicznych w zlewni.

Słowa kluczowe: obszar zurbanizowany, drogi, odpływ jednostkowy, transport fluwialny, Kielce

Abstract: In this paper, the important role of roads in the shaping of runoff and fluvial transport in an urban area was shown on the example of the catchments of the Sufraganiec River (62.01 km²) and the Silnica River (49.40 km²). The Sufraganiec River drains an agricultural and forested catchment, in which the share of urban areas grows as the river flows downstream. The Silnica River drains a catchment that encompasses initially a woodland area, and then a suburban area and the urban area of the City of Kielce of 200,000 inhabitants. In urban catchments with a substantial area of road surfaces and a high density of roads, in comparison to forested, agricultural and suburban catchments, the role of summer flood stages due to rains clearly increases in terms of shaping the runoff, and the role of snowmelt flood stages increases in terms of their impact on fluvial transport. Flood wave transformations in urban areas occur slightly differently. The flood wave concentration time is substantially shorter. The flood wave reaches its peak height and volume quickly, and then quickly subsides. Urban areas, including roads – in contrast to other forms of land use with a land area of comparable size – produce much more dissolved load and fine-grained sediment, and this impacts the dynamic, the amounts, and the share of specific kinds of loads in fluvial transport. Certain relationships between selected indicators of development of specific sub-catchments, including roads, and the properties of runoff and transport of dissolved load and aqueous suspension, often characterized by high and statistically significant coefficients of determination, allow forecasting changes of the latter as anthropogenic transformations in a catchment keep progressing.

Key words: urbanized area, roads, specific runoff, fluvial transport, Kielce

Wprowadzenie

Obszary zurbanizowane zajmują coraz większe powierzchnie, a to oznacza, że w strukturze ich przestrzennego użytkowania, w stosunku do obszarów sąsiednich, następuje skokowy wzrost powierzchni zajętych pod drogi. Znajdują się tu tereny o odsłoniętych, mało szorstkich i nieprzepuszczalnych powierzchniach z rozbudowanym system dróg i sieci drenażowej. Proces ten ma szczególne znaczenie w małych miejskich zlewniach, gdzie obieg wody jest pod silnym wpływem antropopresji, w tym dróg. Skutkiem tego jest zachwianie naturalnych proporcji pomiędzy infiltracją i spływem powierzchniowym, co ogranicza infiltrację i zwiększa składową odpływu powierzchniowego (m.in.: Van Sicle 1962, Soczyńska 1974, UNESCO 1974, Richards, Wood 1976, Singh 1989, Brun, Band 2000, Akan, Houghtalen 2003, Barszcz, Banasik 2008). To z kolei powoduje przyspieszenie odpływu powierzchniowego oraz zmniejszenie zdolności retencyjnych zlewni. Tego typu zmiany znajdują natychmiast swoje odzwierciedlenie w odpływie. Rzeki bowiem, zwłaszcza odwadniające małe zlewnie, stanowią bardzo czuły system reagujący na naturalne i antropogeniczne zmiany w zlewni (m.in. Jankowski 1986, Dynowska 1988, Gutry-Korycka 1993, Jankowski, Kaniecki 1996, Absalon, 1998, Czaja 1999, Jokić 2002, Soja 2002, Michalczyk 2003, Ciupa 2009). W literaturze przedmiotu wielu autorów wskazuje na wpływ sposobu zagospodarowania małych zlewni, w tym roli dróg, na kształtowanie transportu fluwialnego. Prace te dotyczą przede wszystkim zlewni leśnych i rolniczych (m.in.: Froehlich 1975, 1978, 1982, 1986a, b, 1991, 1995, Froehlich, Słupik 1980, 1984, Słupik 1981, Froehlich i in. 1986, 1993, Ciupa 1991, Biernat, Ciupa 1992, Froehlich, Walling 1992, 1997, 2003, 2005, 2010, 2011 Kostrzewski i in. 1994, Smolska 1996, Świeca 1998, Łajczak 1999, Mazurek 2000), a ostatnio również zurbanizowanych (m.in.: Trząski i in. 2000, Ciupa 2001, 2006, 2009, Nelson, Booth 2002, Sawicka-Siarkiewicz 2004).

Cel i metody badań

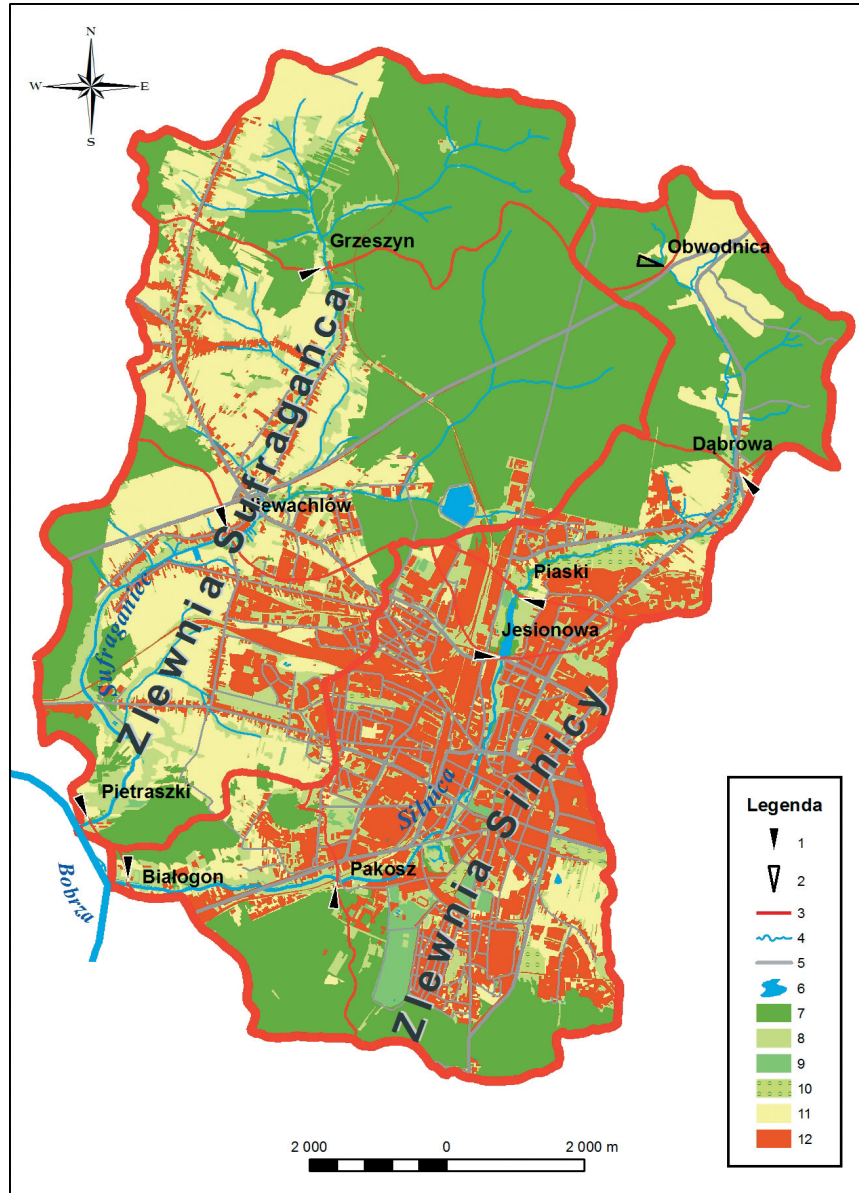
Celem pracy jest wykazanie wpływu dróg i występujących tam zanieczyszczeń komunikacyjnych na kształtowanie odpływu oraz transportu fluwialnego w małych zlewniach obszaru zurbanizowanego na przykładzie miasta Kielce.

Rozwiązanie tak postawionego problemu badawczego wymagało wykonania kilkuletnich (1998–2003) stacjonarnych badań terenowych, hydrologicznych i fluwialnych. Do badań wybrano dwie małe zlewnie w Górach Świętokrzyskich, tj. rzeki Silnicy (5 przekrojów pomiarowych) i Sufragańca (3). W tym okresie codziennie o godzinie 7:00 prowadzono obserwacje

stanów wody, a także pobierano próby wody w celu określenia koncentracji zawiesiny i materiału rozpuszczonego. Koncentrację zawiesiny ustalano metodą sączkową, a materiału rozpuszczonego – metodą konduktometryczną. Ponadto podczas kilkunastu wezbrań prowadzono pomiary koncentracji zawiesiny (odpowiednio: w półroczu letnim co 1 godz. od 7:00 do 20:00 i w zimowym – co 2 godz. od 7:00 do 19:00). W przekrojach tych oraz w przekrojach: Obwodnica – zamykającym zalesioną górną część zlewni Silnicy; rów przydrożny – przy drodze ekspresowej (Warszawa–Kielce) i kanał zakryty z wodą płynącą wykonywano okresowe pomiary przepływu, koncentracji zawiesiny i materiału rozpuszczonego – 190 serii pomiarowych, a także pobierano próby na określenie składu chemicznego wody (ok. 90 serii pomiarowych). Jednocześnie w latach 1998–2003 prowadzono ciągle zapis stanów wody, wykorzystując limnigrafy, w półroczach letnich (V–X) w przekrojach Sufragańca (Grzeszyn i Pietraszki) i Silnicy (Dąbrowa, Pakosz i Białogon, oraz pomiary opadów w półroczach letnich za pomocą deszczomierzy i pluwiografów na dwóch stanowiskach w zlewni Sufragańca (Grzeszyn i Pietraszki) i Silnicy (Dąbrowa i Pakosz). Ponadto w całym tym okresie, średnio raz na 2–3 tygodnie, pobierano próby wody w celu określenia ich składu chemicznego – w tym zawartości chlorków i sodu. Analizę stężenia chlorków przeprowadzono metodą kolorymetryczną w oparciu o reakcję z rodankiem rtęci na spektrofotometrze SPECTRONIC GENESYS 2 firmy Milion Roy. Pomiary stężenia sodu wykonano metodą fotometrii płomieniowej na fotometrze płomieniowym Flam Photometer 420 firmy Sherwood Scientific Ltd. We wszystkich przekrojach, w wybranych okresach wezbrań, prowadzono m.in. także pomiary przewodności elektrolitycznej z częstotliwością co 1–2 godziny (ryc. 1).

Teren badań

Do badań wybrano rzekę Silnicę, wypływającą z obszaru zalesionego, a następnie przepływającą przez tereny podmiejskie i centrum 200-tysięcznego miasta Kielce, i rzekę Sufraganiec – odwadniającą zlewnię leśno-rolniczą z rosnącym w dół udziałem terenów zurbanizowanych (Ciupa 2009). Te sąsiadujące ze sobą zlewnie charakteryzują się podobną powierzchnią (odpowiednio: 49,40 km² i 62,01 km²), budową geologiczną, rzeźbą terenu, natomiast różnią się użytkowaniem ziemi, w tym gęstością i powierzchnią dróg. Udział terenów zakrytych (zabudowa, drogi, chodniki, parkingi, place) w poszczególnych zlewniach częściowych rzeki Silnicy wynosił od 0,28% (Obwodnica) do 30,2% (Pakosz), a w zlewni Sufragańca od 1,70% (Grzeszyn) do 6,70% (Pietraszki). Powierzchnia dróg utwardzonych przypadająca na 1 km biegu rzeki (km² km⁻¹) zmieniała się tu również w szerokich granicach



Ryc. 1. Mapa użytkowania zlewni Sufragańca i Silnicy

1 – wodowskaz, 2 – wodowskaz okresowy, 3 – działy wodne, 4 – cieki, 5 – drogi utwardzone, 6 – zbiorniki wodne, 7 – lasy, 8 – trwałe użytki zielone, 9 – tereny zieleni, 10 – sady i ogródki działkowe, 11 – grunty orne, 12 – tereny uszczelnione (budynki, drogi, parkingi itd.). Na podstawie Topograficznej Bazy Danych

Fig. 1. Sufragańiec and Silnica river basin land use map

1 – water gauge, 2 – seasonal water gauge, 3 – drainage divides, 4 – water courses, 5 – paved roads, 6. water reservoirs, 7 – forests, 8 – permanent grassland, 9 – green areas, 10 – orchards and private gardens, 11 – arable land, 12 – impermeable areas (buildings, roads, parking lots, etc.). Based on the Topographic Data Base

od 0,011 km² km⁻¹ (Obwodnica) do 0,152 km² km⁻¹ (Pakosz). Te dwa wskaźniki odnoszące się do powierzchni uszczelnionych, tj. praktycznie nieprzepuszczalnych, charakteryzują wielkość potencjalnych obszarów zasilania w poszczególnych zlewniach cząstkowych. System drenażu opisują dwa wybrane wskaźniki, tj. gęstość kanałów zakrytych i odkrytych oraz gęstość dróg. Maksymalne ich wartości występują w zurbanizowanej zlewni Silnicy zamkniętej wodowskazem Pakosz (odpowiednio: 4,97 km km⁻² i 12,67 km km⁻²) (ryc. 1, tab. 1).

W celu określenia roli dróg w kształtowaniu odpływu i transportu fluwialnego w zlewniach zurbani-

zowanych – w odniesieniu do zlewni leśnych, rolniczych i podmiejskich – posłużono się wskaźnikami charakteryzującymi użytkowanie i zagospodarowanie omawianych zlewni – w tym powierzchnia i gęstość dróg, a mającymi wpływ na powierzchniową fazę obiegu materii (wody, materiału rozpuszczonego i zawiesiny) i jej dostawę do koryt rzecznych (Ciu-pa 2009, 2010). Spośród kilkudziesięciu wybrano kilka, tj.: udział terenów zakrytych (%), powierzchnia dróg utwardzonych przypadająca na 1 km biegu rzeki (km² km⁻¹), gęstość wszystkich dróg (km km⁻²) oraz gęstość kanałów burzowych zakrytych i odkrytych (km km⁻²) (tab. 1). Udział terenów uszczelnionych

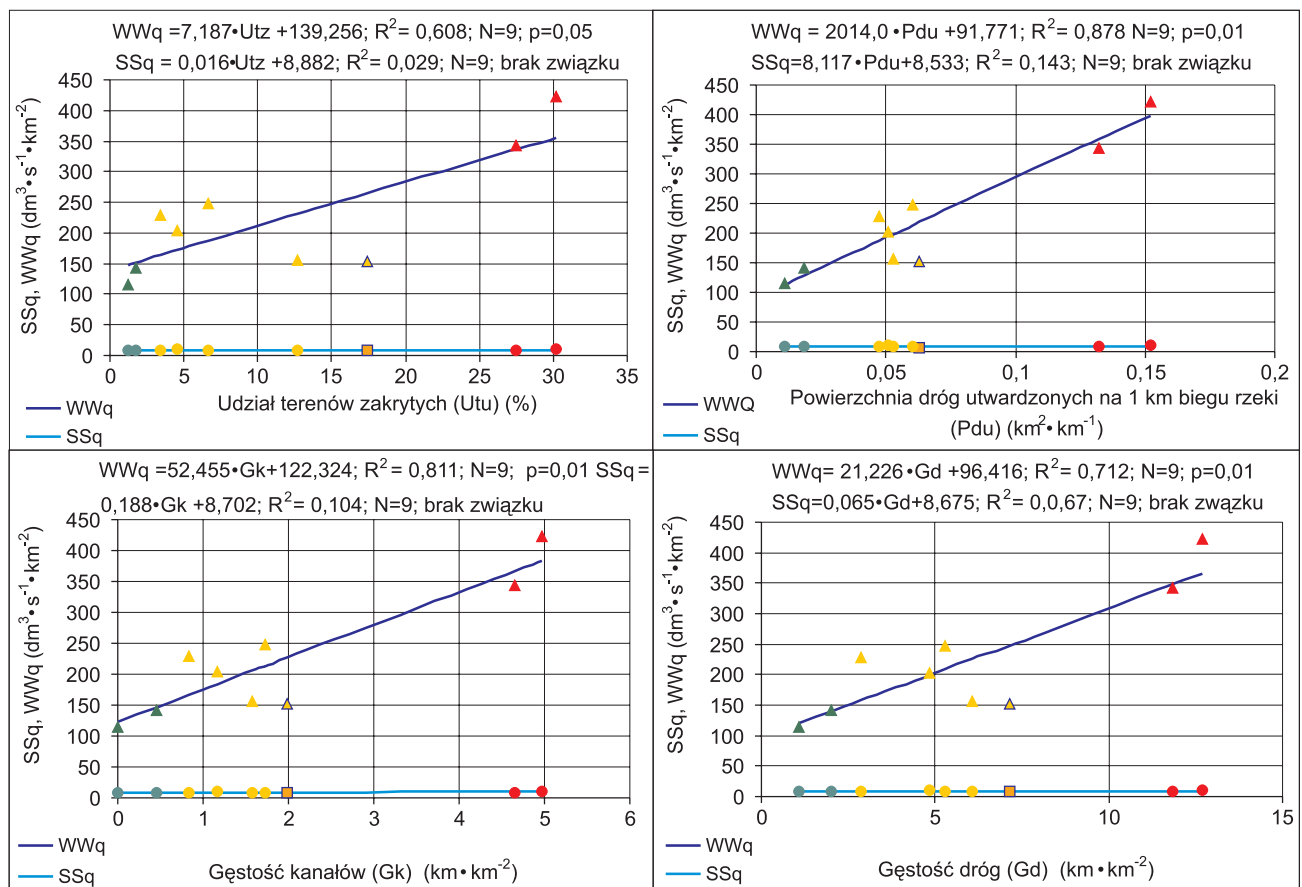
Tabela 1. Powierzchnia zlewni (*A*) oraz wybrane rodzaje użytków i wskaźniki zagospodarowania zlewni Silnicy i Sufragańca
Table 1. Catchment surface area (*A*) and selected forms of land use and development indicators for the catchments of the Silnica and Sufraganiec rivers

Rodzaj wydzielen	Zlewnia Silnicy					Zlewnia Sufragańca			
	Obwodnica	Dąbrowa	Piaski	Jesionowa	Pakosz	Białogon	Grzeszyn	Niewachlów	Pietraszki
Powierzchnia zlewni (<i>A</i>)									
<i>A</i> (km ²)	1,46	9,23	15,49	17,88	42,62	49,38	13,61	42,25	62,01
Wskaźniki zagospodarowania									
<i>Pdu</i> (km ² km ⁻¹)	0,011	0,051	0,053	0,063	0,152	0,132	0,018	0,047	0,060
<i>Ud</i> (%)	0,63	2,36	3,00	3,48	5,31	4,76	0,60	1,08	1,54
<i>Gd</i> (km km ⁻²)	1,10	4,84	6,08	7,14	12,67	11,83	2,03	2,88	5,27
<i>Gk</i> (km km ⁻²)	0,00	1,16	1,58	1,99	4,97	4,65	0,46	0,83	1,72

A – powierzchnia zlewni, *Pdu* – powierzchnia dróg utwardzonych na 1 km biegu rzeki, *Ud* – udział powierzchni dróg, *Gd* – gęstość dróg, *Gk* – gęstość kanałów zakrytych i odkrytych
A – river catchment area, *Pdu* – area of paved roads per 1 km of river length, *Ud* – road area contribution, *Gd* – density of road network, *Gk* – density of covered and open canals

Utu (budynki, drogi, chodniki, parkingi, place itd.) w poszczególnych zlewniach cząstkowych rzeki Silnicy wynosił od 0,3% – Obwodnica do 30,2% – Pakosz, a

w zlewni Sufragańca od 1,7% – Grzeszyn do 6,7% – Pietraszki (Ciupa 2010). Powierzchnia dróg utwardzonych (*Pdu*) przypadająca na 1 km biegu rzeki



Ryc. 2. Związek między wskaźnikami charakteryzującymi zagospodarowanie zlewni cząstkowych Sufragańca i Silnicy a maksymalnym odpływem jednostkowym (*WWq*) i średnim rocznym odpływem jednostkowym (*SSq*) w latach 1998–2003

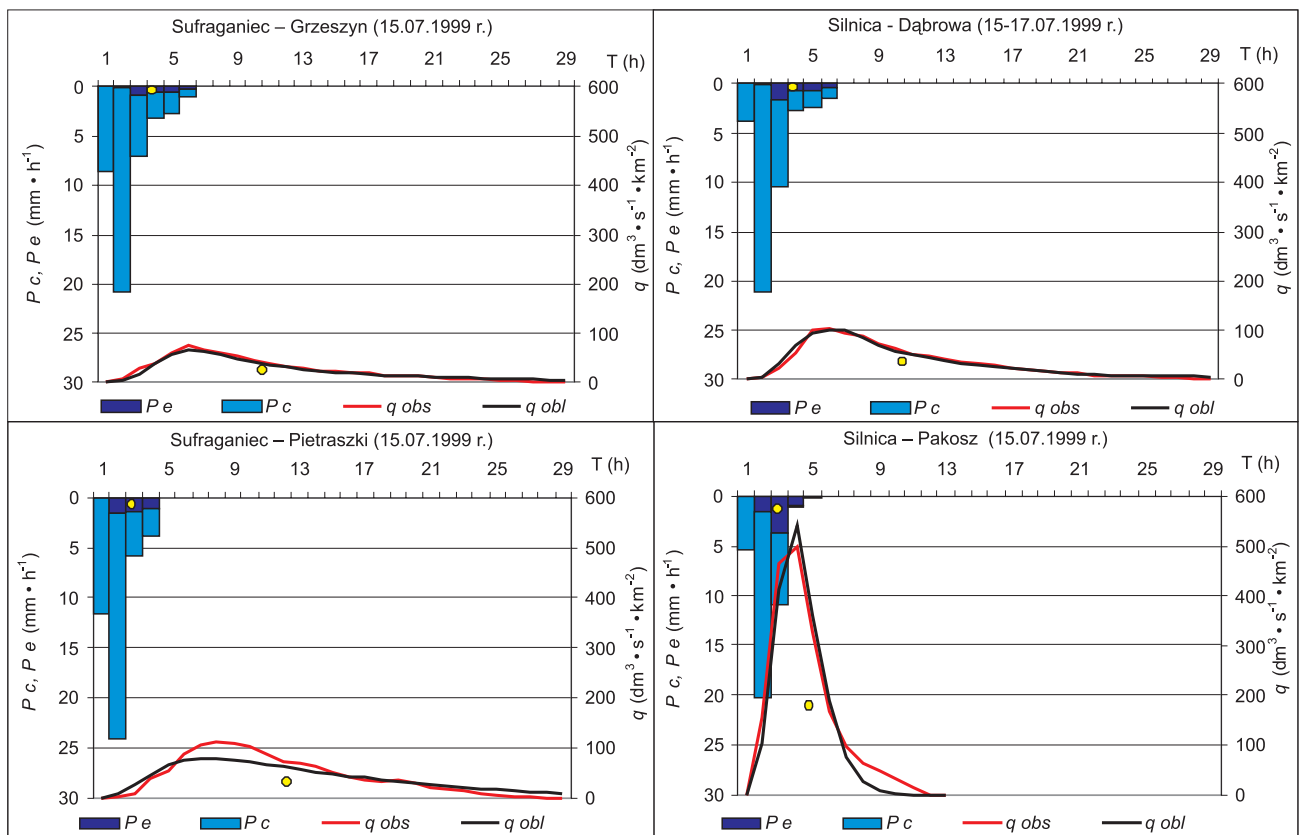
Utu – udział terenów uszczelnionych, *Pdu* – powierzchnia dróg utwardzonych na 1 km biegu rzeki, *Gk* – gęstość kanałów, *Gd* – gęstość dróg
Fig. 2. The relationship between indicators describing land use in the Sufraganiec and Silnica river sub-catchments and maximum specific runoff (*WWq*) and mean annual specific runoff (*SSq*) from 1998 to 2003

Utu – percentage of impermeable areas, *Pdu* – area of paved roads per 1 km of river length, *Gd* – density of road network, *Gk* – canal density

zmieniała się również w szerokich granicach w zlewni Silnicy od $0,011 \text{ km}^2 \text{ km}^{-1}$ (Obwodnica) do $0,152 \text{ km}^2 \text{ km}^{-1}$ (Pakosz). Te dwa wskaźniki odnoszące się do powierzchni uszczelnionych, tj. praktycznie nieprzepuszczalnych, charakteryzują wielkość potencjalnych obszarów bezpośredniego zasilania koryt w poszczególnych zlewniach cząstkowych (tab. 1). System drenażu najlepiej opisują wskaźniki gęstości kanałów zakrytych i odkrytych (Gk) oraz gęstości dróg (Gd). Maksymalne ich wartości występują w zurbanizowanej części zlewni Silnicy – Pakosz, osiągając odpowiednio: $4,97 \text{ km km}^{-2}$ i $12,67 \text{ km km}^{-2}$ (tab. 1).

W badanych zlewniach odpływ jednostkowy, zwłaszcza w zakresie wartości maksymalnych, wyka-

zuje związek z użytkowaniem zlewni i systemem ich drenażu (Ciupa 2009). Użytkowanie charakteryzowano za pomocą wskaźnika określającego udział procentowy terenów uszczelnionych – Utu i powierzchni dróg utwardzonych przypadającej na 1 km biegu rzeki – Pdu , a system drenażu – wskaźnikiem gęstości dróg – Gd i kanałów – Gk (ryc. 2). Określono związek między tymi wskaźnikami a średnim rocznym (SSq) i maksymalnym odpływem jednostkowym (WWq). W pierwszym przypadku nie stwierdzono istotnego statystycznie związku, a w drugim – związek ten przybliżają równania liniowe przy dość wysokich współczynnikach determinacji ($0,608\text{--}0,878$) istotnych na poziomie $0,05$ i $0,01$. Naj-



Parametry fal	Sufraganiec		Silnica	
	Grzeszyn	Pietraszki	Dąbrowa	Pakosz
P_c (mm)	43,7	45,4	42,1	40,1
P_e (mm)	2,5	4,3	3,6	6,7
$I_{c_{max}}$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	20,9	24,1	21,2	20,2
$I_{e_{max}}$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	0,9	1,6	1,6	3,7

Ryc. 3. Hydrogram odpływu jednostkowego powierzchniowego obserwowanego (q_{obs}) i obliczonego programem FALA (q_{obl}) oraz parametry fali wezbraniowej w zlewni Sufragańca i Silnicy w dniu 15.07.1999 r.

Krok czasowy przyjęty do analizy – $\Delta t = 1 \text{ h}$. Kropkami oznaczono punkty ciężkości opadu efektywnego i fali wezbraniowej (obliczonej).
 Objaśnienia: P_c – opad całkowity, P_e – opad efektywny, $I_{c_{max}}$ – maksymalne natężenie opadu całkowitego, $I_{e_{max}}$ – maksymalne natężenie opadu efektywnego

Fig. 3. Hydrographs of observed surface specific runoff (q_{obs}) and that calculated using FALA software (q_{obl}) as well as the flood wave parameters in the Sufraganiec and Silnica catchments for July 15th, 1999

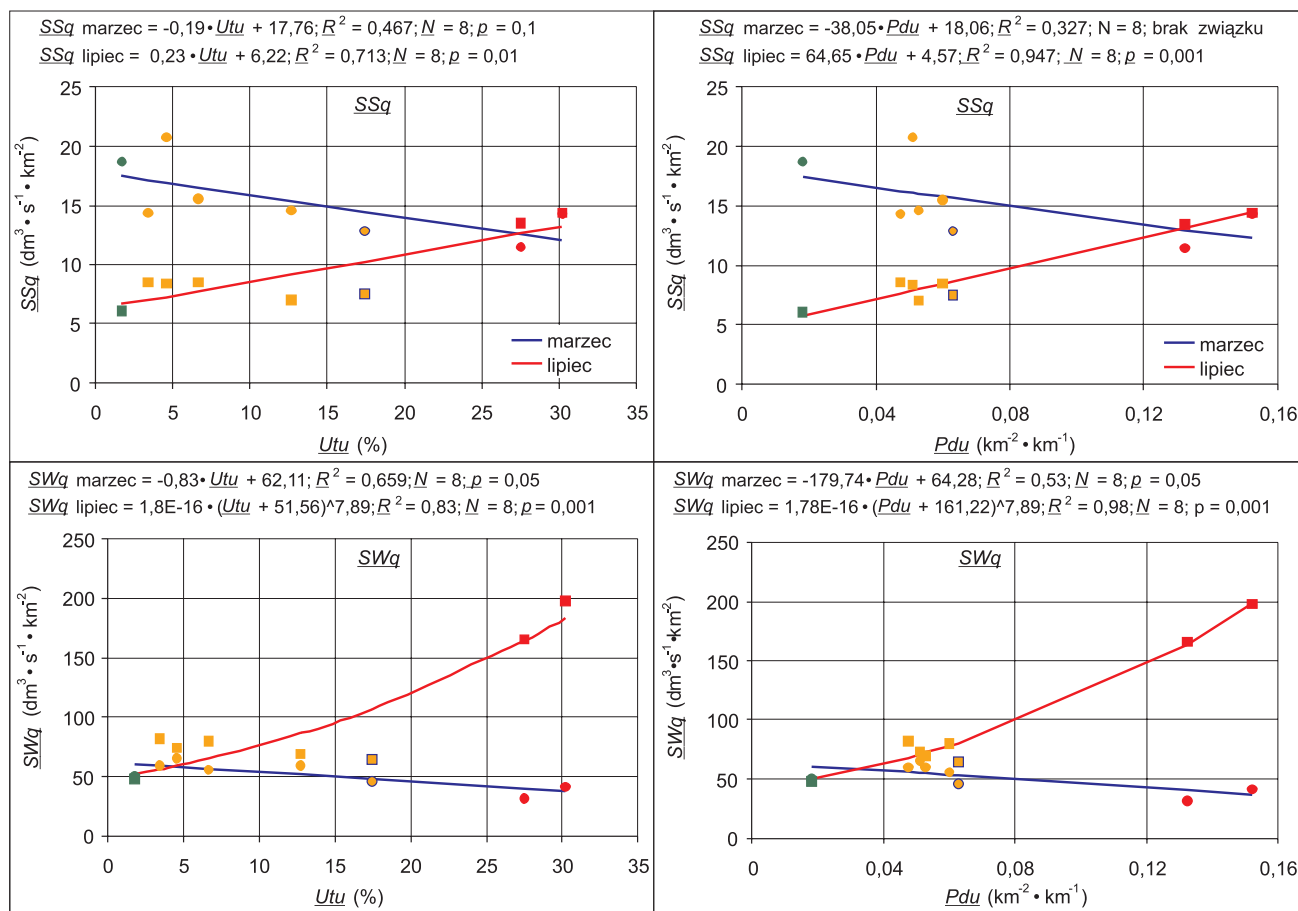
The selected time interval $\Delta t = 1 \text{ h}$. The dots stand for cells of intensive effective precipitation and the [calculated] flood wave. Legend: P_c – total precipitation, P_e – effective rainfall, $I_{c_{max}}$ – maximum intensity of total precipitation, $I_{e_{max}}$ – maximum intensity of effective rainfall

silniejszy związek zauważono między wskaźnikami: *Pdu* i *WWq*, co potwierdza dużą rolę dróg w kształtowaniu odpływów maksymalnych na terenach zurbanizowanych. Na wykresach punkty reprezentujące zlewnie leśne grupują się w ich dolnej części, zlewnie rolnicze i podmiejskie – w środkowej, zaś zurbanizowane – w górnej. Maksymalny odpływ jednostkowy w przekroju Jesionowa (poniżej zbiornika wodnego) wykazuje największe odchylenia od linii trendu, co wiąże się głównie z jego oddziaływaniem na odpływ Silnicy (ryc. 2).

Analiza fal wezbraniowych wykazała, że w zurbanizowanej zlewni Silnicy występował znacznie szybszy spływ powierzchniowy wód do koryta rzecznego niż w zlewni leśno-rolniczej Sufragańca (Ciupa 2009). Przykładem może być wezbranie opadowe w dniach 15–17.07.1999 r., wywołane opadem ulewnym (o obszarowej wysokości od 40,1 do 45,4 mm), kiedy to współczynnik odpływu powierzchniowego w zlewni zurbanizowanej (przekrój Pakosz poniżej centrum miasta) był wyższy o 76,8% niż w zlewni leśno-rolniczej (przekrój Pietraszki w odcinku ujściowym). Pod-

czas kulminacji tego wezbrania parametry fali wezbraniowej w tych przekrojach hydrometrycznych kształtowały się odpowiednio: odpływ jednostkowy 500,8 i 111,2 $\text{dm}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, czas koncentracji 1,25 i 4,25 h i czas opóźnienia 1,5 i 9,5 h. Parametry te w górnych częściach obu zlewni, najbardziej zalesionych, wykazały duże podobieństwo (ryc. 3).

W celu wykazania odmiennej roli obszarów uszczelnionych, w tym dróg, w kształtowaniu odpływu jednostkowego (*SSq* i *SWq*) w marcu i lipcu określono związki między ww. parametrami a wybranymi wskaźnikami użytkowania zlewni (*Utu* i *Pdu*) (ryc. 4). W marcu w obu przypadkach stwierdzono jedynie słabą zależność lub jej brak. Wykazano tylko pewną tendencję zmniejszania odpływu jednostkowego wraz z przyrostem wielkości analizowanych wskaźników użytkowania. Natomiast w lipcu uzyskano wysoką korelację między wskaźnikami użytkowania (*Utu* i *Pdu*) a średnim miesięcznym odpływem jednostkowym. Omawiany związek opisują także równania liniowe, a współczynniki determinacji osiągały wartości 0,713 i 0,947, istotne na poziomie



Ryc. 4. Związek między wybranymi parametrami charakteryzującymi zagospodarowanie zlewni Sufragańca i Silnicy a średnim miesięcznym – *S(Sq)* i średnim z maksymalnych miesięcznych odpływem jednostkowym – *S(Wq)* w marcu i lipcu w latach 1998–2003

Utu – udział terenów uszczelnionych, *Pdu* – powierzchnia dróg utwardzonych na 1 km biegu rzeki

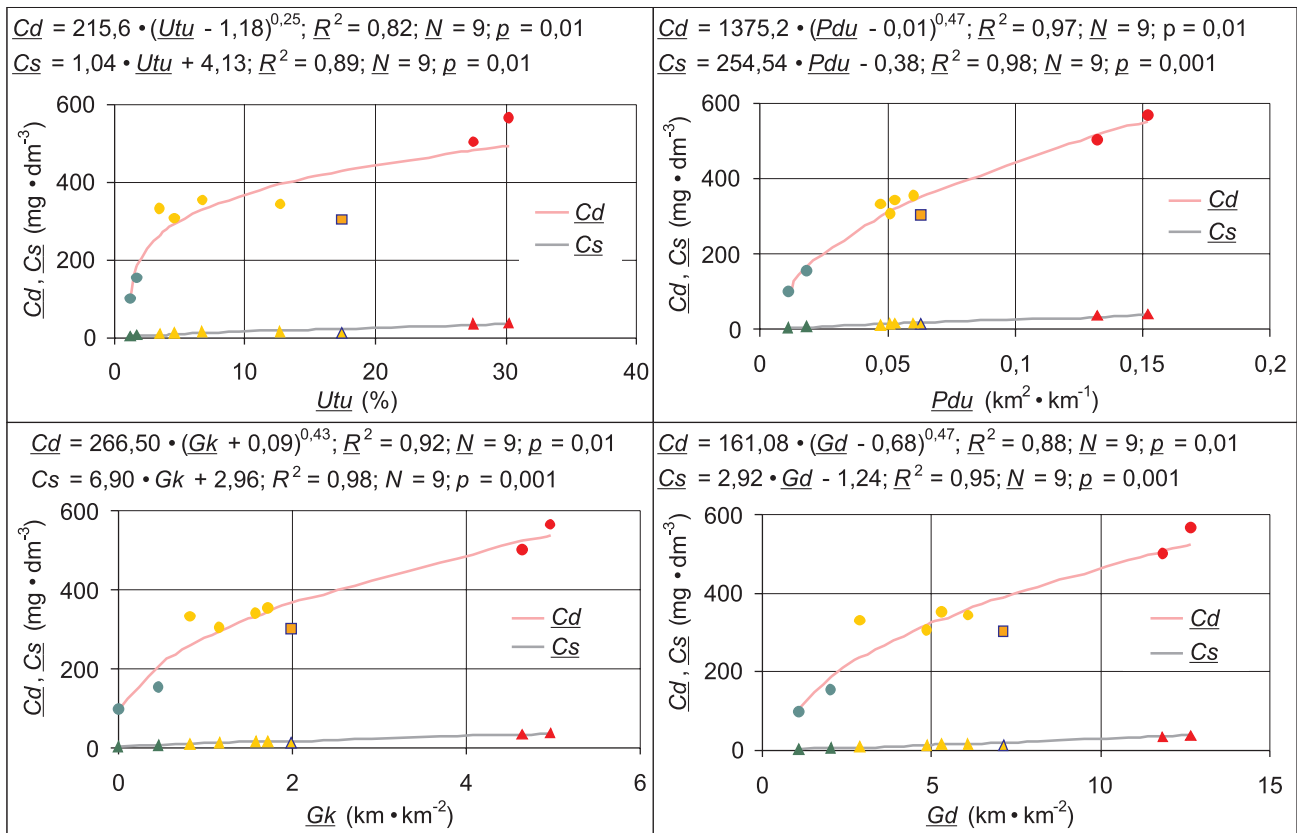
Fig. 4. The relationship between selected parameters characteristic of land use in the Sufragańca and Silnica catchments and average monthly – *S(Sq)* and average maximum monthly specific runoff – *S(Wq)* in March and July from 1998 to 2003

Utu – impermeable areas, *Pdu* – paved roads area per one kilometer of river length

0,01 i 0,001. Wskazuje to na dominującą rolę powierzchni uszczelnionych, w tym głównie dróg, w kształtowaniu średniego odpływu jednostkowego w lipcu. Związek między wybranymi wskaźnikami użytkowania (Utu i Pdu) a średnimi maksymalnymi wartościami odpływu jednostkowego w marcu opisują równania liniowe. Współczynnik determinacji wynosił 0,659 i 0,529, a związek był istotny na poziomie 0,05. W lipcu związek taki opisują równania wykładnicze o wysokich wartościach współczynnika R^2 (0,894 i 0,977) istotnych na poziomie 0,001. Postać funkcji oraz wysoki współczynnik determinacji wskazują tu na szczególną rolę dróg w kształtowaniu maksymalnego odpływu podczas wezbrań letnich. Nożycowy układ wykresów w rozpatrywanych miesiącach, w odniesieniu do wartości średnich i maksymalnych, potwierdza odmienne znaczenie powierzchni uszczelnionych, w tym dróg utwardzonych, dla powstawania odpływu w marcu i lipcu. W marcu jest to efekt przyspieszonego topnienia pokrywy śnieżnej i zwiększonego parowania w obrębie dróg, parkingów, terenów zabudowanych itd., w lipcu zaś – skutek przyspieszonego spływu powierzchniowego wód opadowych na obszarach zurbanizowanych o znac-

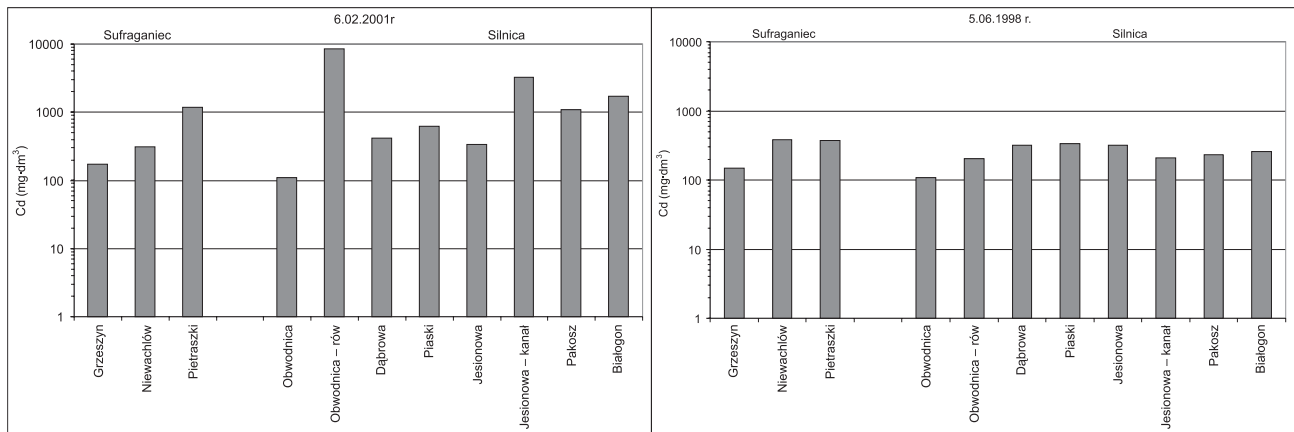
nie ograniczonej infiltracji i intercepcji (ryc. 4) (Ciupa 2008, 2009).

W przekrojach pomiarowych omawianych rzek określono związki między wybranymi wartościami charakteryzującymi transport fluwialny (koncentracja materiału rozpuszczonego i zawiesiny) a wybranymi wskaźnikami zagospodarowania, w tym odnoszącymi się również do dróg – gęstość dróg i powierzchnia dróg utwardzonych przypadająca na 1 km biegu rzeki. Te drugie charakteryzują cechy zlewni, które mają wpływ na powierzchniową fazę obiegu materii (wody, materiału rozpuszczonego i zawiesiny) i jej dostawę do koryt rzecznych. Związki między ww. parametrami (cechy obszaru zurbanizowanego, w tym systemu dróg – transport fluwialny) opisują równania nieliniowe i liniowe, a współczynniki determinacji są na ogół wysokie (przekraczają często wartość $R^2 = 0,9$). W obrazie średnich wartości różnice te nie są aż tak duże (ryc. 5). Widać je szczególnie wyraźnie dopiero podczas wezbrań. Wówczas obszary zasilania zwiększają tu maksymalnie swoją powierzchnię. W warunkach miejskich, poprzez gęstą sieć dróg, a następnie kanałów burzowych, możliwość dostawy materiału z obszarów zasilania do koryta jest znacznie ułatwiona. Tutaj bowiem, na odsło-



Ryc. 5. Związek między wskaźnikami charakteryzującymi zagospodarowanie (Utu – udział terenów uszczelnionych, Pdu – powierzchnia dróg utwardzonych na 1 km biegu rzeki, Gk – gęstość kanałów, Gd – gęstość dróg) zlewni cząstkowych Sufrağanica i Silnicy a średnią roczną koncentracją materiału rozpuszczonego (Cd) i zawiesiny (Cs) w latach 1998–2001

Fig. 5. Relationship between selected land use indicators (Utu – size of impermeable areas, Pdu – surface area of paved roads per 1 km of river length, Gk – density of canal network, Gd – density of road network) in Sufrağaniec and Silnica river sub-catchments and mean annual total dissolved solid concentration (Cd) and suspended sediment concentration (Cs) from 1998 to 2001



Ryc. 6. Koncentracja materiału rozpuszczonego (*Cd*) w przekrojach pomiarowych rzek Sufraganiec i Silnica oraz w przekroju rowu przydrożnego i kanału deszczowego z wodą płynącą podczas roztopów śródzimowych (6.02.2001 r.) i po opadzie ulewnym (5.06.1998 r.)

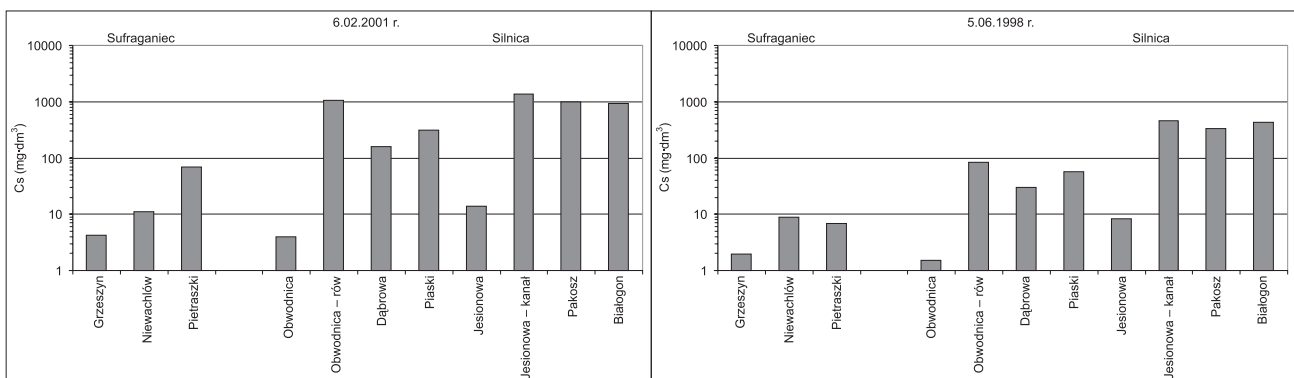
Fig. 6. Total dissolved solid concentration (*Cd*) at hydrometric cross sections of the Sufraganiec and Silnica rivers as well as at cross sections of the roadside ditch and the covered stormwater canal mid-winter snowmelt water (6.02.2001) and convective rainfall water (5.06.1998)

niętych powierzchniach dróg, w okresach bez spływu powierzchniowego gromadzą się różnego rodzaju zanieczyszczenia komunikacyjne oraz materiał klastyczny pochodzenia naturalnego. Podczas opadów i roztopów substancje te z dużą łatwością są spłukiwane i wraz z wodą odpływają gęstym systemem dróg oraz kanałów burzowych do koryta rzeki Silnicy. Największe konsekwencje hydrologiczne i fluwialne tego procesu obserwuje się w małych zlewniach miejskich o dużym udziale dróg w ogólnej powierzchni (ryc. 4, 5) (Ciupa 2009).

Przedstawione poniżej dwie przykładowe, a jednocześnie charakterystyczne, sytuacje hydrometeorologiczne w różnych porach roku objaśniają odmienną rolę dróg w dostawie materiału rozpuszczonego i zawiesiny w zlewniach zurbanizowanych (Ciupa 2009).

Podczas roztopów w dniu 6.02.2001 r. koncentracja materiału rozpuszczonego w korycie Silnicy (Obwodnica), powyżej drogi szybkiego ruchu, wynosiła

109 mg dm⁻³, a w rowie odwadniającym samą drogę już 8519 mg dm⁻³ (ryc. 6), a zawiesiny odpowiednio: 4 mg dm⁻³ i 1 050 mg dm⁻³. Poniżej, na odcinku Obwodnica–Dąbrowa o długości 3,4 km, stwierdzono 15 miejsc bezpośredniej dostawy wody i materiału z dróg oraz rowów przydrożnych do koryta Silnicy. Przyczyniło się to do wzrostu koncentracji materiału rozpuszczonego ze 109 do 422 mg dm⁻³, a zawiesiny odpowiednio: 4 do 157 mg dm⁻³. Natomiast poniżej zbiornika wodnego (przekrój Jesionowa) – pokrytego wówczas lodem – koncentracja w korycie Silnicy obniżyła się prawie 2-krotnie, a zawiesiny – 20-krotnie. Kilkanaście metrów dalej zlokalizowany jest pierwszy duży wylot kanału deszczowego. Woda w kanale miała prawie 10-krotnie większą koncentrację materiału rozpuszczonego u wylotu kanału deszczowego niż w rzece (odpowiednio: 3 283 i 335 mg dm⁻³). Jeszcze większą różnicę – prawie 100-krotną – wykazała koncentracja zawiesiny (odpowiednio: 1377 i 14 mg dm⁻³). W obrębie centrum



Ryc. 7. Koncentracja zawiesiny (*Cs*) w przekrojach pomiarowych Sufraganiec i Silnicy oraz w przekroju rowu przydrożnego i kanału burzowego zakrytego z wodą płynącą podczas roztopów śródzimowych (6.02.2001 r.) i po opadzie ulewnym (5.06.1998 r.)

Ryc. 7. Suspended sediment concentration (*Cs*) at hydrometric cross sections of the Sufraganiec and Silnica rivers and at cross sections of the roadside ditch and covered stormwater canal filled with mid-winter snowmelt (6.02.2001) and convective rainfall (5.06.1998)

miasta na odcinku Silnicy o długości 4,6 km (Jesionowa–Pakosz) w okresie badań stwierdzono ok. 90 punktów takiej dostawy, co przyczyniło się do skokowego wzrostu koncentracji materiału rozpuszczonego i zawiesiny w przekroju Pakosz (odpowiednio: 1991 mg dm⁻³ i 993 mg dm⁻³). Za to w odcinku ujściowym nastąpiło obniżenie obydwu rodzajów koncentracji (odpowiednio: 1695 mg dm⁻³ do 927 mg dm⁻³). Jest to fluwialny efekt zmniejszania się w tym kierunku gęstości i powierzchni dróg. W tym samym czasie w przekroju Grzeszyn, zamykającym leśną górną część zlewni Sufragańca, koncentracja materiału rozpuszczonego wynosiła 174 mg dm⁻³, a w odcinku ujściowym wzrastała do 1180 mg dm⁻³, co było wynikiem narastającego wpływu obszarów zasilania obejmujących zachodnie dzielnice Kielc. Koncentracja zawiesiny zaś nie przekroczyła tu 70 mg dm⁻³ (Pietraszki).

Przykładem prawidłowości rozkładu koncentracji materiału rozpuszczonego w czasie wezbrania wywołanego opadem ulewnym była sytuacja 5.06.1998 r. ($P_c = 25,8$ mm, $I_{\max} = 15,4$ mm h⁻¹). Zlewnie nieurbanizowane zareagowały na ten opad z opóźnieniem i niezbyt gwałtownie, a koncentracja materiału rozpuszczonego i zawiesiny charakteryzowała się wartościami zbliżonymi do średnich. Natomiast w zlewni zurbanizowanej na skutek przyspieszonego spływu powierzchniowego przy braku wydajnych źródeł dostawy, którymi podczas roztopów śródzimowych były drogi, koncentracja materiału rozpuszczonego w wodzie odpływającej kanałem (207 mg dm⁻³) oraz w poszczególnych przekrojach pomiarowych (235–256 mg dm⁻³) była stosunkowo niska, podobnie jak i zawiesiny (odpowiednio: 2–454 mg dm⁻³; ryc. 7).

Przedstawiona analiza przestrzenna zmienności koncentracji materiału rozpuszczonego oraz zawiesiny w dwóch różnych porach roku, kiedy wystąpiły odmienne warunki kształtujące odpływ powierzchniowy i dostawę materiału do koryt, wyraźnie wskazuje na istotną rolę dróg i sieci drenażu powierzchniowego w dostawie wody i sedymentu do koryta rzeki, szczególnie w zlewniach zurbanizowanych.

Na obszarach zurbanizowanych transportowany w korycie sedyment pochodzi głównie z dróg, ich poboczy, chodników i częściowo z parkingów. Na powierzchni utwardzonych dróg gromadzi się przede wszystkim materiał pochodzący z niszczenia nawierzchni dróg i z zanieczyszczeń, w tym komunikacyjnych. Są to w szczególności produkty: spalania, ścierania – opon, tarcz, klocków hamulcowych i powierzchni dróg, a także substancje służące do zimowego utrzymania dróg, materiał przenoszony na oponach itd. W sezonie letnim często na poboczach dróg i na chodnikach gromadzi się materiał, który na powierzchnię wydobyły zwierzęta, tj. pierścienice (np. dżdżownice), owady (np. mrówki), ssaki (np. nornice, krety, ryjówki) itd. Wymienione zwierzęta wykazują szczególną aktywność w obrębie poboczy dróg i chodników, znajdując tam dość dogodne wa-

runki do życia. Źródła dostawy materiału do koryt, zwłaszcza w obrębie dróg i chodników, mają charakter sezonowy. W półroczu letnim duży udział ma materiał wydobywany na powierzchnię przez zwierzęta, natomiast w zimie substancje chemiczne, które wraz z piaskiem są używane do zimowego utrzymania dróg, chodników i parkingów. Substancje te najczęściej zawierają chlorki i sól (Ciupa 2009).

Chlorki i sól transportowane przez rzeki odwadniające zlewnie zbliżone do naturalnych pochodzą głównie z ługowania skał i gleb oraz przemieszczane są znad oceanów wraz z opadami atmosferycznymi. W zlewniach przekształconych antropogenicznie, a szczególnie w zurbanizowanych i uprzemysłowionych, chlorki i sól do wód rzecznych przedostają się przeważnie ze ściekami komunalnymi, przemysłowymi i komunikacyjnymi. Te ostatnie mają charakter sezonowy i związane są ze stosowaniem soli (NH₄Cl, CaCl₂, MgCl₂) do zimowego utrzymania dróg (Dojli-do 1995, Chełmicki 2001, Ciupa 2006, 2009).

Średnia roczna koncentracja chlorków i sodu w wodach rzeki Silnicy i Sufragańca, w ich przekrojach podłużnych, była bardzo zróżnicowana. W Silnicy najniższe ich wartości (chlorki – 7,9 mg dm⁻³; sól – 4,1 mg dm⁻³) zarejestrowano w najwyższym położonym przekroju Obwodnica (17,22 km) zamykającym zlewnię prawie w całości zalesioną. W przekroju Dąbrowa (13,78 km) zaznaczył się skokowy wzrost ich wartości (chlorki – 42,6 mg dm⁻³; sól – 25,6 mg dm⁻³). Zalesienie zlewni po ten przekrój jest w dalszym ciągu wysokie, ale przebiegają tu liczne drogi, w tym szybkiego ruchu Kraków–Warszawa oraz wylotowa z Kielc do Warszawy, pojawia się zabudowa strefy podmiejskiej Kielc. Do przekroju Piaski (9,27 km) wzrost koncentracji chlorków i sodu był stosunkowo niewielki, a poniżej zbiornika retencyjnego w przekroju Jesionowa zaznaczył się ich spadek (chlorki – 37,9 mg dm⁻³; sól – 24,1 mg dm⁻³). W zbiorniku wodnym następuje zawsze częściowe strącanie zanieczyszczeń transportowanych przez rzekę. Drugi skokowy wzrost omawianych stężeń udokumentowano w przekroju Pakosz (3,56 km) położonym poniżej centrum Kielc (chlorki – 74,6 mg dm⁻³; sól – 44,4 mg dm⁻³). W zlewni Silnicy po ten przekrój udział terenów uszczelnionych wzrasta aż do 30,2%. W przekroju ujściowym Silnicy (Białogon; 0,24 km) koncentracja chlorków i sodu ulega ponownemu niewielkiemu obniżeniu, bowiem zmniejsza się w zlewni (do 27,5%) udział powierzchni zakrytych (Ciupa 2006, 2009).

W górnej części zlewni Sufragańca (przekrój Grzeszyn; 11,63 km) rejestrowano również niewielkie koncentracje chlorków i sodu (odpowiednio: 7,7 i 4,9 mg dm⁻³). Zlewnia ta cechuje się znacznym zalesieniem, dużym udziałem łąk i terenów rolniczych, a małą gęstością dróg. W poniżej położonym przekroju Niewachłów (6,44 km) obserwowano już znaczny wzrost chlorków i sodu (odpowiednio: 36,1 i 20,6 mg dm⁻³). Wynika to z dużej dostawy do transportu

rzecznego zanieczyszczeń komunikacyjnych i komunalnych w tej części zlewni. W kierunku ujścia Sufragańca (Pietraszki; 0,25 km) następuje niewielki wzrost koncentracji chlorków i sodu.

W cyklu rocznym średnie miesięczne koncentracje chlorków i sodu wykazywały duże zróżnicowanie w poszczególnych przekrojach badawczych obydwu rzek. W przekrojach Obwodnica i Grzeszyn, zamykających zlewnie w znacznym stopniu zalesione – z małą gęstością dróg i zabudowy – stężenie chlorków oraz sodu utrzymywało się przez cały rok na podobnym niewysokim poziomie. W pozostałych przekrojach najwyższe ich koncentracje występowały w miesiącach półroczu zimowego, a najniższe wiosną i latem. Najwyraźniej jednak zjawisko to zaznaczyło się w przekrojach zamykających zlewnie cząstkowe o największym stopniu zurbanizowania, tj. Pakosz i Białogon. Podczas odwilży i roztopów śródziemnych wielokrotnie stwierdzono, że przewodność elektrolityczna wód płynących w rowach przydrożnych i w kanałach burzowych była dziesiątki razy większa niż w tym samym czasie w rzece (Ciupa 2006, 2009).

W miesiącach półroczu zimowego, zwłaszcza w okresach odwilży śródziemnych i w początkowej fazie roztopów, w cyklu dobowym występuje przypuszczalnie również duże zróżnicowanie koncentracji chlorków i sodu. W takim cyklu prowadzono jedynie badania w zakresie przewodności elektrolitycznej. Wykazywała ona jednak wielokrotnie, szczególnie w zurbanizowanym segmencie zlewni rzeki Silnicy, wyraźny związek z dobowym przebiegiem temperatur powietrza i wody.

Wnioski

- Zagospodarowanie terenu, w tym powierzchnia i gęstość dróg oraz sezonowa działalność człowieka, a szczególnie stosowanie piasku z solą do zimowego utrzymania dróg, w zlewniach rolniczych i podmiejskich modyfikują, a w zlewniach zurbanizowanych decydują o rozkładzie przestrzennym i czasowym odpływu oraz transportu fluwialnego.
- Na terenach zurbanizowanych występują rozległe obszary zasilania, które dzięki sieci dróg mogą sięgać wododziału. Tutaj bowiem na odsłoniętych powierzchniach dróg gromadzą się znaczne ilości materiału, głównie zanieczyszczeń komunikacyjnych w sezonie zimowym, pochodzenia antropogenicznego i naturalnego. Materiał ten w okresach występowania spływu powierzchniowego z dużą łatwością jest uruchamiany i systemem dróg oraz kanałów deszczowych dostaje się w krótkim czasie do koryta rzeki.
- W zlewniach zurbanizowanych – o dużej powierzchni i gęstości dróg – w stosunku do zlewni leśnych, rolniczych i podmiejskich wyraźnie wzrasta rola letnich wezbrań opadowych w kształtowa-

niu odpływu, a roztopowych – transportu fluwialnego. Transformacja fal wezbraniowych na terenach zurbanizowanych polega m.in. na znacznym skróceniu czasu ich koncentracji i opadania, szybkim wzroście wysokości oraz objętości.

- Obszary zurbanizowane, a w ich obrębie drogi – w porównaniu do innych rodzajów użytkowania gruntów analogicznej wielkości wytwarzają znacznie więcej substancji rozpuszczonych i drobnoziarnistego sedymentu, a to wywiera istotny wpływ na dynamikę, wielkość i udział poszczególnych rodzajów ładunków w transporcie fluwialnym.
- Określone związki między wybranymi wskaźnikami zagospodarowania poszczególnych zlewni cząstkowych – z uwzględnieniem dróg a charakterystykami odpływu i transportu materiału rozpuszczonego oraz zawiesiny, cechujące się często wysokimi i istotnymi statystycznie współczynnikami determinacji, pozwalają prognozować ich zmiany w miarę wzrostu przeobrażeń antropogenicznych w zlewni.
- Uzyskane wyniki mogą być i już są wykorzystywane w planowaniu przestrzennym Kielc, zwłaszcza w zakresie opracowywania dokumentacji hydrotechnicznych i organizowania osłony przeciwpowodziowej.

Literatura

- Absalon D. 1998. Antropogeniczne zmiany odpływu rzecznoego w zlewni Rudy. UŚ, Katowice.
- Akan A.O., Houghtalen R.J. 2003. Urban hydrology, hydraulics, and stormwater quality. Engineering applications and computer modeling. Wiley, Hoboken, New Jersey.
- Barszcz M., Banasik K. 2008. The analysis of flood phenomenon in urbanized catchment – Sluzew Creek case study (Suburb of Warsaw). W: W. Chełmicki, J. Siwek (red.), XII Biennial International Conference „Hydrological extremes in small basins” 18–20 September 2008, Cracow, Poland. Euromediterranean Network of Representative and Experimental Basins. Jagiellonian University Institute of Geography and Spatial Management, 25.
- Biernat T., Ciupa T. 1992. Denudacja mechaniczna i chemiczna we wschodniej części pasa wyżyn południowopolskich. W: A. Kotarba (red.), System denudacyjny Polski, Prace Geogr. IGiPZ PAN, 155: 133–148.
- Brun S.E., Band L.E. 2000. Simulating runoff behavior in an urbanizing watershed. Computers. Environment and Urban Systems, 24: 5–22.
- Chełmicki W. 2001. Woda. Zasoby, degradacja, ochrona. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Ciupa T. 1991. Współczesny transport fluwialny w zlewni Białej Nidy. Wyd. WSP, Kielce: 1–150.

- Ciupa T. 2001. Funkcjonowanie systemu fluwialnego Silnicy i Sufragańca w strefie miejskiej Kielc. W: A. Karczewski, Z. Zwoliński (red.), Funkcjonowanie geosystemów w zróżnicowanych warunkach morfoklimatycznych. Monitoring–ochrona–edukacja: 103–113.
- Ciupa T. 2006. Wpływ użytkowania na transport chlorków i sodu w małych zlewniach na przykładzie Silnicy i Sufragańca (Kielce). W: L. Krzysztofiak (red.), Funkcjonowanie i monitoring geosystemów Polski w warunkach narastającej antropopresji. Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa: 297–307.
- Ciupa T. 2008. Rola użytkowania w kształtowaniu obszarów dostawy sedymentu do koryt w zlewni Sufragańca i Silnicy (Góry Świętokrzyskie). *Landform Analysis*, 9: 75–78.
- Ciupa T. 2009. Wpływ zagospodarowania terenu na odpływ i transport fluwialny w małych zlewniach na przykładzie Sufragańca i Silnicy (Kielce). UJK, Kielce.
- Ciupa T. 2010. Zastosowanie wskaźnika stabilności obszarowej zlewni do analizy wybranych cech odpływu i transportu fluwialnego na przykładzie Sufragańca i Sinicy. *Landform Analysis*, 13: 5–11.
- Czaja S. 1999. Zmiany stosunków wodnych w warunkach silnej antropopresji (na przykładzie konurbacji katowickiej). *Prace Nauk. US*, 1782: 1–189.
- Dojlido J.R. 1995. Chemia wód powierzchniowych. Wyd. Ekonomia i Środowisko, Białystok: 342.
- Dynowska I., (red.) 1988. Antropogeniczne uwarunkowania zmian odpływu i reżimu rzek w różnych regionach Polski. *Dok. Geogr.*, 4.
- Froehlich W. 1975. Dynamika transportu fluwialnego Kamienicy Nawojowskiej. *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, 114.
- Froehlich W. 1978. The role of land use in varying the suspended load during continuous rainfall (Kamienica Nawojowska catchment, Flysch Carpathians). *Geographia Polonica*, 41: 27–37.
- Froehlich W. 1982. Mechanizm transportu fluwialnego i dostawy zwietrzelin w górskiej zlewni fliszowej. *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, 143.
- Froehlich W. 1986a. Recherches sur l'origine et la production de la charge en suspension. *Bulletin de L'Association de Geographes Francais*, 63: 357–361.
- Froehlich W. 1986b. Sediment delivery model for the Homerka drainage basin. W: *Drainage Basin Sediment Delivery. Proceedings of the Albuquerque Symposium, New Mexico, USA, August 1986. IAHS Publ.*, 159: 403–412.
- Froehlich W. 1991. Sediment production from unmetalled road surfaces. W: *Sediment and Stream Water Quality in a Changing Environment: Trends and Explanation. Proceedings of the Vienna Symposium, August 1991. IAHS Publ.*, 203: 21–29.
- Froehlich W. 1995. Sediment Dynamics in the Polish Flysch Carpathians. W: I. Foster, A. Gurnel, B. Webb (red.), *Sediment and Water Quality in River Catchments. John Wiley & Son*: 453–461.
- Froehlich W., Słupik J. 1980. Importance of splash in erosion process within a small flysch catchment basin. *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 14: 77–112.
- Froehlich W., Słupik J. 1984. Water and sediment dynamics of the Homerka catchment. W: T.P. Burt, D.E. Walling (red.), *Catchment experiments in Fluvial Geomorphology. Proceedings of a meeting of the IGU Commission on Field Experiments in Geomorphology, Exeter and Huddersfield, UK, August 16–24, 1981. Geo Books, Norwich*: 265–276.
- Froehlich W., Słupik J. 1986. Rola dróg w kształtowaniu spływu i erozji w karpaccich zlewniach fliszowych. *Przeegl. Geogr.*, 58, 1–2: 67–87.
- Froehlich W., Walling D.E. 2005. Using environmental radionuclides to elucidate sediment sources within a small drainage basin in the Polish Flysch Carpathians. *Sediment Budgets*, 1. *IAHS Publ.*, 291: 102–112.
- Froehlich W., Walling D.E. 2010. Long-term monitoring of the ¹³⁷Cs activity in suspended sediment transported by the Homerka stream. *Polish Flysch Carpathians Sediment Dynamics for a Changing Future. IAHS Publ.*, 337: 172–180.
- Froehlich W., Walling D.E. 1997. The role of unmetalled roads as a sediment source in the fluvial systems of the Polish Flysch Carpathians. W: D.E. Walling, J.-L. Probst (red.), *Human Impact on Erosion and Sedimentation. Proceedings of the Rabat Symposium, April 1997. IAHS Publ.*, 245: 159–168.
- Froehlich W., Walling D.E. 1992. The use of radionuclides in investigations of erosion and sediment delivery in the Polish Carpathians. W: *Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions. IAHS Publ.*, 209: 61–76.
- Froehlich W., Walling D.E. 2003. Impact of Anthropogenic Sediment Sources of Reservoir Sedimentation in the Polish Carpathians. W: G. Di Silvio, R. Hotchkiss (red.), *Proceedings of International Workshop on Ecological, sociological and economic implications of sediment management in reservoirs, Paestum, Italy, 8–10 April, 2002. UNESCO-IAHP*: 108–112.
- Froehlich W., Walling D.E., Higgitt D.L. 1993. The use of Cs-137 to investigate soil erosion and sediment delivery from cultivated slopes in the Polish Carpathians. W: S. Wicherek (red.), *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills. Proceedings of the International Symposium on Farm Land Erosion, Paris, Saint Cloud, France, 25–29 May 1992. Elsevier Science Publishers B.V.*: 271–283.

- Froehlich W., Walling, D.E. 2011. The use of excess Lead-210, Beryllium-7 and Caesium-137 in investigations of sediment delivery dynamics in the Homerka and Dunajec catchments in the Polish Flysch Carpathians. W: *Impact of Soil Conservation Measures on Erosion Control and Soil Quality*, IAEA-TECDOC: 115–129.
- Gutry-Korycka M. 1993. Naturalne i antropogeniczne zmiany obiegu wody. W: I. Dynowska (red.), *Przemiany stosunków wodnych w Polsce w wyniku procesów naturalnych i antropogenicznych*. Kraków: 273–390.
- Jankowski A.T. 1986. Antropogeniczne zmiany stosunków wodnych na obszarze uprzemysłowanym i urbanizowanym (na przykładzie Rybnickiego Okręgu Węglowego). *Prace Nauk. UŚ*, 868.
- Jankowski A.T., Kaniecki A. (red.) 1996. *Dziejowe przemiany stosunków wodnych na obszarach zurbanizowanych*. PTG, UM, Poznań–Sosnowiec.
- Jokiel P. 2002. Woda na zapleczu wielkiego miasta. Możliwości wykorzystania i problemy ochrony zasobów i obiektów wodnych w małej zlewni strefy podmiejskiej Łodzi. UŁ, Łódź.
- Kostrzewski A., Mazurek M., Zwoliński Z. 1994. Dynamika transportu fluwialnego górnej Parsęty jako odbicie funkcjonowania systemu zlewni. SGP, Poznań.
- Łajczak A. 1999. Współczesny transport i sedymentacja materiału unoszonego w Wiśle i głównych dopływach. Monografie, Kom. Gosp. Wodnej PAN, 15: 1–215.
- Mazurek M. 2000. Zmienność transportu materiału rozpuszczonego w zlewni Kłudy jako przejaw współczesnych procesów denudacji chemicznej (Pomorze Zachodnie). *Wyd. Naukowe UAM, ser. Geografia*, Poznań, 62: 1–125.
- Michalczyk Z. 2003. Stan i zmiany stosunków wodnych w rejonie Chelma. W: T. Szczypek, M. Rzętała (red.), *Człowiek i woda*. PTG o. Katowice, Sosnowiec: 91–100.
- Nelson E.J., Booth D.B. 2002. Sediment sources in an urbanizing, mixed land-use watershed. *Journal of Hydrology*, 264: 51–68.
- Richards K.S., Wood R. 1976. Urbanisation, water redistribution and their effect on channel processes. Paper presented at Institute of British Geogr. Annual Conference, Lanchester Polytechnic. Coventry: 487–498.
- Sawicka-Siarkiewicz H. 2004. Ograniczanie zanieczyszczeń w spływach powierzchniowych z dróg. Ocena technologii i zasady wyboru. Dział Wydawnictw IOŚ, Warszawa.
- Singh V.P. 1989. *Hydrologic systems, watershed modeling*. Vol. 2. Prentice Hall, Englewood Cliffs, USA.
- Smolska E. 1996. Funkcjonowanie systemu korytoowego w obszarze młodogłacjalnym na przykładzie górnej Szeszupy (Pojezierze Suwalskie). *Wydz. Geogr. i Stud. Reg. UW*, Warszawa.
- Soczyńska U. 1974. Hydrologiczne skutki urbanizacji. *Wiad. Meteorol. i Gosp. Wodna*, 22(4): 11–22.
- Soja R. 2002. Hydrologiczne aspekty antropopresji w polskich Karpatach. *Prace Geogr. IGiPZ PAN*, 186.
- Trząski L., Molenda T., Kupka R. 2000. Renaturyzacja miejskiego potoku – program dla Ślepotki. *Problemy Ekologii*, 4(1).
- UNESCO 1974. *Hydrological effects of urbanization*. Studies and Reports in Hydrology. Paris, 18.
- Van Sicle D. 1962. The effect of urban development on storm runoff. *The Texas Engineer*, 32, 12.