

Marek Zawilski, Grażyna Sakson

Ocena emisji zawiesin odprowadzanych kanalizacją deszczową z terenów zurbanizowanych

Obszary zurbanizowane stwarzają dogodne warunki do akumulacji zanieczyszczeń stałych, głównie na powierzchniach utwardzonych. Zanieczyszczenia te pochodzą przede wszystkim ze źródeł antropogenicznych. Podczas opadów atmosferycznych zanieczyszczenia zostają splukiwane z powierzchni zlewni i trafiają poprzez sieci kanalizacyjne do odbiorników wodnych, pogarszając ich naturalny stan chemiczny i ekologiczny. Nadal jednak brakuje szczegółowego rozpoznania emisji zanieczyszczeń trafiających do wód wraz z opadami atmosferycznymi, co jest związane z trudnościami w organizowaniu monitoringu ilościowego i jakościowego na wylotach kanałów deszczowych. Problem ten będzie się nasilał w związku z postępującą urbanizacją i przewidywanymi zmianami klimatycznymi, tym bardziej, że oczyszczanie ścieków deszczowych należy do rzadkości.

Głównym źródłem zawiesin w wodach odbiornika są procesy erozji i splukiwania zanieczyszczeń nagromadzonych w zlewni. Erozja jest konsekwencją naturalnych procesów zachodzących w środowisku lądowym i wodnym. Jest także skutkiem antropopresji, wynika bowiem m.in. z naruszenia struktury podłoża w procesach powstawania obiektów budowlanych, hydrotechnicznych, a także degradacji szaty roślinnej. Ze źródeł antropogenicznych pochodzą w większości zanieczyszczenia nagromadzone na powierzchniach uszczelnionych, tj. terenach zabudowanych i komunikacyjnych. Podczas deszczów, a także roztopów, są one splukiwane z powierzchni i trafiają do odbiornika bezpośrednio lub za pośrednictwem sieci kanalizacyjnej, gdzie dodatkowo może dojść do wypłukiwania osadów nagromadzonych w kanałach. Wykaz podstawowych źródeł zawiesin występujących w zbiornikach wodnych zestawiono w tabeli 1 [1].

Podstawowym zanieczyszczeniem ścieków deszczowych są zawiesiny ogólne, wraz z którymi transportowane są m.in. pierwiastki śladowe [2, 3]. Wpływ zawiesin na organizmy wodne jest dość dobrze rozpoznany, jednak – jak dotąd – brakuje powiązania masy zawiesin splukiwanych ze zlewni zurbanizowanych ze stopniem zagrożenia dla biocenozy odbiornika. W pracy przedstawiono skalę zagrożenia środowiska wodnego zawiesinami oraz metodykę prognozowania ich emisji na przykładzie rzeczywistej zlewni zurbanizowanej.

Zawartość zawiesin i związanych z nimi zanieczyszczeń w ściekach deszczowych

Wody deszczowe trafiające do sieci kanalizacyjnej z terenów zurbanizowanych stają się ściekami deszczowymi, których skład zależy przede wszystkim od takich czynników, jak:

- charakter powierzchni, w tym rodzaj materiału, z jakiego została wykonana, a także sposób jej użytkowania,
- tempo nagromadzania się zanieczyszczeń,
- lokalizacja źródeł zanieczyszczeń w zlewni,
- charakterystyka deszczu,
- czas trwania pogody bezdeszczowej przed opadem atmosferycznym,
- podatność zanieczyszczeń na splukiwanie.

Przykładowe wartości wskaźników zanieczyszczenia ścieków deszczowych odpływających z terenów o różnym stopniu zagospodarowania przestrzennego w wybranych krajach przedstawiono w tabelach 2–4. W pracach [4–7] wykazano, że od 7% do 32% (śr. 17%) zawiesin w ściekach ogólnospławnych pochodziło z wód deszczowych, w tym średnio 5% z dachów, 3% z podwórek, 9% z ulic. Pozostałe źródła zawiesin stanowiły osady w kanałach – 26÷82% (śr. 63%) i ścieki komunalne – 2÷60% (śr. 20%) [8]. Skład ścieków deszczowych był również przedmiotem wielu badań w Polsce, lecz bez oceny wpływu tych ścieków na wody odbiornika [9–11].

Ścieki deszczowe charakteryzują się dodatkowo bardzo dużym sezonowym zróżnicowaniem wartości wskaźników jakościowych, a także zmiennością w czasie trwania spływu wód deszczowych lub roztopowych. Duże znaczenie ma tzw. pierwsza fala zanieczyszczeń, objawiająca się transportem stężonych ścieków zaraz po wystąpieniu opadu atmosferycznego. Zjawisko to tłumaczy się tym, że pierwsze partie deszczu trafiają na względnie duże nagromadzenie zanieczyszczeń na powierzchni zlewni. Wstępowanie tego zjawiska jest znacznie uzależnione od charakteru deszczu, a ściślej od wystąpienia jego dużego natężenia na początku. Jeśli warunek ten nie jest spełniony, to pierwszej fali zanieczyszczeń raczej się nie obserwuje. Opisywane zjawisko pierwszej fali zanieczyszczeń może skłaniać do konstruowania obiektów technicznych zagospodarowywania ścieków deszczowych w taki sposób, aby tę pierwszą falę przechwycić. Zgodnie z obecnie obowiązującymi w Polsce uregulowaniami prawnymi, ścieki deszczowe odprowadzane do wód i do ziemi nie powinny zawierać zawiesin w ilości przekraczającej 100 g/m³ [12].

Dr hab. inż. M. Zawilski, dr inż. G. Sakson: Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Zakład Techniki Ochrony Wód i Hydrologii Terenów Zurbanizowanych, al. Politechniki 6, 93–950 Łódź
marek.zawilski@p.lodz.pl, grazyna.sakson-sysiak@p.lodz.pl

Tabela 1. Źródła zawiesin i czynniki wpływające na zmianę ich zawartości w środowisku wodnym (opr. własne na podstawie [1])
Table 1. Sources of suspended solids and factors affecting their concentration in aquatic environment (according to [1])

Źródło zawiesin	Czynniki wpływające na zawartość zawiesin w wodzie
Rolnictwo	zubożenie szaty roślinnej w pobliżu cieków i zbiorników wodnych (np. wycinanie roślin i wypasanie zwierząt) powodujące przyspieszoną erozję brzegów
Budowa zapór i zbiorników	intensyfikacja sedymentacji, niszczenie habitatów wodnych
Pogłębianie dna	destabilizacja podłoża, zmiana cyrkulacji wody i warunków transportu osadów niekontrolowane przemieszczanie osadów powodujące naruszenie warunków bytowania bentosu
Powódzie	splukiwanie materiałów naturalnych i zanieczyszczeń antropogenicznych z zalanych terenów
Pożary i wyrąb lasów	zmiana warunków odpływu i transportu zanieczyszczeń ze zlewni na skutek zmniejszenia zdolności retencyjnych i infiltracyjnych terenu oraz przyspieszonej erozji gleby
Górnictwo	odprowadzanie wód kopalnianych o ekstremalnie dużej zawartości zawiesin
Żegluga	unoszenie osadów powodujące wzrost mętności wody
Budowa i eksploatacja dróg	erozja gleby, destabilizacja nadbrzeży cieków, wycinanie roślinności, a także ścieranie nawierzchni jezdni i noszenie zanieczyszczeń przez ruch samochodowy
Rozwój miast	naruszenie wierzchniej warstwy gleby podczas prac budowlanych i jej przyspieszona erozja, odprowadzanie zanieczyszczeń splukiwanych ze zlewni kanalizacją deszczową, wzrost obciążenia hydraulicznego odbiorników, wzrost zdolności transportowej osadów
Wiatr, falowanie i prądy wodne	resuspensja i transport osadów
Kruszenie i przemieszczanie się lodu	erozja brzegów, uwalnianie osadów z topniejącego lodu, wzrost zdolności transportowej osadów

Tabela 2. Mediana zawartości zawiesin ogólnych i metali śladowych w ściekach deszczowych [4]
Table 2. Median of total suspended solid and trace metal concentrations in stormwater [4]

Wskaźnik jednostka	Ogółem	Rodzaj terenu			
		mieszkaniowy	handlowy	przemysłowy	otwarty
Zawiesiny ogólne g/m ³	58	48	43	78	51
Ołów mgPb/m ³	16	12	18	25	5
Miedź mgCu/m ³	16	12	17	22	–
Cynk mgZn/m ³	116	73	150	210	39

Tabela 3. Zawartość zawiesin ogólnych i metali śladowych w ściekach deszczowych [5]
Table 3. Total suspended solid and trace metal concentrations in stormwater [5]

Wskaźnik jednostka	Wartość	Świat	Europa Centralna
Zawiesiny ogólne g/m ³	zakres	2÷3093	29÷1535
	średnia	281,6	318,8
	mediana	141	153
Ołów mgPb/m ³	zakres	0,2÷2745	7÷2408
	średnia	209	196
	mediana	118	95
Miedź mgCu/m ³	zakres	3÷1800	5,7÷1143
	średnia	133,2	121,8
	mediana	48,0	65
Cynk mgZn/m ³	zakres	1÷3563	24÷3563
	średnia	445	760
	mediana	275	430

Tabela 4. Zawartość zawiesin ogólnych i metali śladowych w ściekach deszczowych odprowadzanych z różnych powierzchni
Table 4. Total suspended solid and trace metal concentrations in runoff from different surfaces

Wskaźnik jednostka	Wartość	Genua [6]		Paryż [7]		
		drogi	dachy	dachy	podwórka	ulice
Zawiesiny ogólne g/m ³	zakres	15÷377	0÷42	3÷304	22÷490	49÷498
	średnia	140	19	–	–	–
	mediana	119	18	29	74	92,5
Miedź mgCu/m ³	zakres	0,1÷53,3	0,6÷18,3	3÷247	13÷50	27–191
	średnia	19,4	10	–	–	–
	mediana	1,1	10,6	37	23	61
Ołów mgPb/m ³	zakres	6,1÷23,3	2,4÷7,3	16÷2764	40÷225	71÷523
	średnia	13,2	5,1	–	–	–
	mediana	12,6	5,3	493	107	133
Cynk mgZn/m ³	zakres	27,7÷123,4	212,1÷758,8	802÷38061	57÷1359	246÷3859
	średnia	81,1	446,7	–	–	–
	mediana	84,2	408	3422	563	550

Wpływ zawiesin na odbiornik

Skutki podwyższonej ilości zawiesin w wodzie i jej zwiększonej mętności to przede wszystkim [1, 13]:

- zmiana jakości wody (pogorszenie smaku, zapachu, zmniejszenie zawartości tlenu rozpuszczonego, zwłaszcza w głębszych warstwach jezior),
- zmniejszenie przenikania promieni światła słonecznego, a w konsekwencji zahamowanie procesu fotosyntezy oraz produkcji pierwotnej,
- obniżenie wartości estetycznej i rekreacyjnej cieków i zbiorników wodnych,
- pogorszenie warunków bytowania roślin wodnych, bezkręgowców i ryb, zmiana składu gatunkowego i liczebności organizmów wodnych, zanik niektórych gatunków, zmiany fizjologiczne dotyczące układu oddechowego i trawiennego, opóźniony rozwój jaj i larw.

Skutki oddziaływania zwiększonych ilości zawiesin w wodzie na kondycję zdrowotną ryb zestawiono w tabeli 5. Stopień zagrożenia ryb wynika zarówno z zawartości zawiesin, jak i czasu występowania danej ich ilości w wodzie odbiornika (rys. 1). Za ilość bezpieczną, niezagrażającą kondycji zdrowotnej ryb, uważa się 25 g/m^3 , niezależnie od czasu jej występowania. Skutki paraletalne obserwuje się przykładowo już przy zawartości zawiesin przekraczającej 100 g/m^3 i czasie występowania ponad 1000 min, ale także już po minucie przy ich zawartości ponad 3000 g/m^3 .

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z 4 października 2002 r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać wody śródlądowe będące środowiskiem życia ryb w warunkach naturalnych, średnioroczna zawartość zawiesin ogólnych nie powinna być wyższa niż 25 g/m^3 , przy czym wartość ta nie odnosi się do zawiesin zawierających substancje niebezpieczne [16]. Wymóg ten nie obowiązuje w przypadku, gdy do odbiornika trafiają zawiesiny powstające w wyniku procesów naturalnych. W innych krajach graniczna zawartość zawiesin również wynosi 25 g/m^3 , lecz często uwzględnia się także zawiesiny pochodzenia naturalnego oraz czas występowania danej ilości zawiesin. Przykładowo, w celu ochrony zbiorników wodnych przed skutkami obciążenia nadmierną ilością zawiesin, Ministerstwo Ochrony Wód, Lądu i Powietrza Kanady wprowadziło następujące ograniczenia [17]:

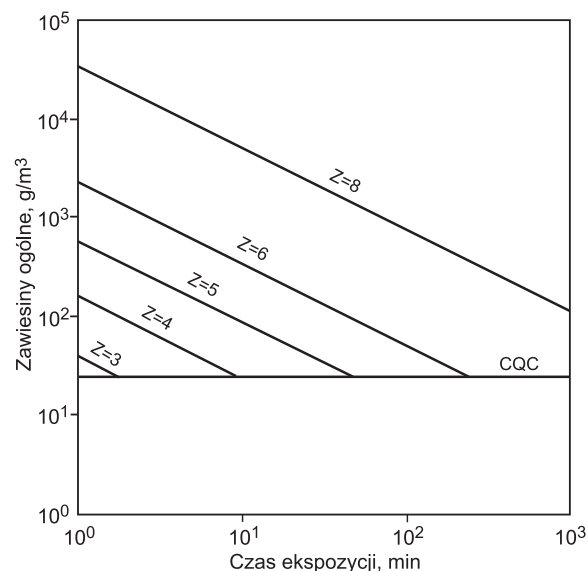
– wprowadzanie zawiesin do odbiornika nie może zwiększyć ich ilości więcej niż o 25 g/m^3 w czasie 24 h (przy zalecanym poborze próbek co 1 h) oraz o 5 g/m^3 w czasie od 24 h do 30 d (przy zalecanym poborze próbek co 1 d),

– w przypadku, gdy naturalna zawartość zawiesin w wodzie odbiornika wynosi $25 \div 250 \text{ g/m}^3$, wprowadzanie zawiesin nie może zwiększyć ich ilości więcej niż o 25 g/m^3 w dowolnym czasie; jeśli zaś naturalna zawartość zawiesin w wodzie odbiornika przekracza 250 g/m^3 , wówczas zwiększenie ilości zawiesin nie może wynosić więcej niż 10% ich zawartości naturalnej.

Na terenach zurbanizowanych zwiększenie ilości zawiesin w odbiorniku wynika głównie z odprowadzania wód deszczowych z uszczelnionej powierzchni zlewni. Krytyczna wartość współczynnika spływu, powyżej której obserwuje się zmniejszenie bioróżnorodności w wodzie odbiornika wynosi 5% [18]. Następuje wówczas zmniejszenie liczebności organizmów wodnych wywołane wzrostem tzw. zakłóceń hydraulicznych w odbiorniku. Przy wartościach współczynnika spływu mieszczących się w przedziale 2÷5% skutki zależą od warunków lokalnych, natomiast poniżej 2% nie mają znaczącego wpływu na warunki biotyczne panujące w odbiorniku. W przypadku kanalizacji ogólnospławnej krytyczne obciążenie odbiornika, uwzględniające

Tabela 5. Skala zagrożenia kondycji zdrowotnej ryb (Z), związanego z podwyższoną zawartością zawiesin w wodzie [14]
Table 5. Scale of severity of ill effects (Z) on fish, associated with increased amounts of suspended solids in water [14]

Skala zagrożenia (Z)	Skutek
brak skutków	
0	brak skutków behawioralnych
skutki behawioralne	
1	zaniepokojenie
2	porzucanie kryjówek
3	obniżona reakcja na bodźce
skutki subletalne	
4	krótkotrwałe zaburzenia w odżywianiu
5	nieznaczny stres fizjologiczny, wzrost tempa oddychania, wzrost intensywności „kasłania”,
6	umiarkowany stres fizjologiczny
7	umiarkowana degradacja habitatów, zaburzenia orientacji
8	znaczny stres fizjologiczny, długotrwałe zaburzenia odżywiania się, słaba kondycja
skutki letalne i paraletalne	
9	obniżona szybkość wzrostu, opóźnione wylęganie, obniżenie liczebności
10	śmiertelność 0÷20%, nasilenie zachowań drapieżnych, umiarkowana do znacznej degradacja habitatów
11	śmiertelność 20÷40%
12	śmiertelność 40÷60%
13	śmiertelność 60÷80%
14	śmiertelność 80÷100%



Rys. 1. Stopień zagrożenia kondycji zdrowotnej ryb (Z), jako funkcja ilości zawiesin w wodzie odbiornika i czasu ekspozycji [14, 15] (CQC – długoczasowe kryterium jakości; stopień zanieczyszczenia wód odbiornika bezpieczny dla ryb)

Fig. 1. Level of severity of ill effects (Z) on fish as a function of TSS concentration in receiving water and of exposure time [14, 15] (CQC – chronic quality criterion)

zawartość zawiesin, azotu amonowego oraz zapotrzebowanie na tlen (BZT_5 , $ChZT$), można oszacować na $15 \div 40 \text{ RLM}$ na każdy $1 \text{ dm}^3/\text{s}$ strumienia objętości wody w odbiorniku

podczas pogody bezdeszczowej, zależnie od prędkości jej przepływu i głębokości odbiornika. Przykładowo, przy głębokości wody w odbiorniku w zakresie 0,1÷0,5 m oraz prędkości przepływu wody 0,1÷0,5 m/s może być uznane za bezpieczne obciążenie równe 20 RLM/(dm³/s), przy prędkości w granicach 0,5÷1,0 m/s – 25 RLM/(dm³/s), zaś przy prędkości powyżej 1,0 m/s – 40 RLM/(dm³/s).

Modelowanie akumulacji zawiesin w zlewni miejskiej i ich splukiwania w czasie deszczu

W celu ochrony odbiornika i oceny zagrożenia organizmów wodnych, jakie stanowią zawiesiny spływające z terenów zurbanizowanych, istotne jest określenie dynamiki zmian ilości zawiesin i związanych z nimi innych zanieczyszczeń zawartych w ściekach deszczowych. Tempo gromadzenia się zanieczyszczeń w zlewni jest zależne od jej charakteru, przy czym szczególnie duże obserwuje się na terenach przemysłowych oraz na powierzchniach komunikacyjnych (w tym przypadku zależy ono głównie od natężenia ruchu kołowego). Tereny budownictwa mieszkaniowego są pod tym względem zróżnicowane, np. z uwagi na zanieczyszczenia emitowane do atmosfery z palenisk domowych, charakterystyczne na terenach ze starą zabudową. Akumulacja zanieczyszczeń stałych w zlewni jest związana przede wszystkim z czasem występowania pogody bezdeszczowej (tab. 6). Jednak, jak wykazały badania tego zjawiska, tempo akumulacji zanieczyszczeń nie jest stałe i zmniejsza się wraz z upływem czasu. Wyjaśnieniem tego zjawiska może być fakt, że część nagromadzonych zanieczyszczeń ulega wynoszeniu na tereny nieutwardzone przez wiatr lub też na skutek ruchu pojazdów.

Model akumulacji zanieczyszczeń na powierzchni zlewni w czasie pogody bezdeszczowej można zapisać w postaci zależności [27]:

$$A = dM/dt = a_1(F - F_u)\beta_1 + a_2F_u\beta_2\eta - wM \quad (1)$$

w której:

M – masa nagromadzonych zanieczyszczeń stałych, kg

t – czas, d

a₁ – opad pyłu, kg/ha·d

a₂ – intensywność gromadzenia się zanieczyszczeń na ulicach i placach, kg/ha·d

F – całkowita uszczelniona powierzchnia zlewni, ha

F_u – uszczelniona powierzchnia ulic (pasów drogowych wraz z chodnikami), ha

β₁, β₂ – bezwymiarowe współczynniki przeliczenia zanieczyszczeń na zawiesiny

η – współczynnik skuteczności czyszczenia ulic (η < 1)

w – czynnik wiatru zmniejszający tempo akumulacji, 1/d

Tabela 6. Tempo akumulacji zanieczyszczeń stałych
Table 6. Solid pollutant accumulation rate

Miasto, kraj	Rok publikacji	Tempo akumulacji kg/ha·d
Los Angeles, USA	2011 [19]	0,71
Odivelas, Portugalia	2008 [20]	10,56
Milwaukee, USA	2008 [21]	14,8
Toronto, Kanada	2006 [22]	7,2
Santander, Hiszpania	2006 [23]	17,5
Pavia, Włochy	2002 [24]	18
Austin, USA	1998 [25]	0,16
Kyoto, Japonia	1996 [26]	0,7÷1,0

Ilość nagromadzonych zanieczyszczeń stałych można zmniejszyć m.in. przez czyszczenie ulic, w stopniu zależnym od jego skuteczności i częstotliwości. Ubytek masy zanieczyszczeń zależy m.in. od zastosowanej technologii czyszczenia i użytego sprzętu, przy czym większą sprawność wykazują technologie polegające na odsysaniu zanieczyszczeń stałych, natomiast czyszczenie mechaniczne ma mniejszą sprawność, a w skrajnych przypadkach obserwuje się nawet przyrost masy zanieczyszczeń z powodu ścierania się nawierzchni jezdni [28].

W modelu SWMM (Storm Water Management Model), wykorzystanym w niniejszej pracy, tempo nagromadzania się zawiesin w zlewni opisane jest zależnością:

$$dM/dt = C_1 C_2 - C_2 B \quad (2)$$

w której:

B – jednostkowa akumulacja zanieczyszczeń, kg/ha (może być również odniesiona do długości drogi, kg/m)

C₁ – kumulacja graniczna, kg/ha

C₂ – stała odnosząca się do szybkości akumulacji zanieczyszczeń, równoważna czynnikowi wiatru (w), 1/d

Z zależności tej wynika, że akumulacja masy zanieczyszczeń zwiększa się nieliniowo w funkcji czasu podczas pogody bezdeszczowej:

$$B = C_1(1 - e^{-C_2 t}) \quad (3)$$

Wynika stąd również, że iloczyn C₁ C₂ wyznacza tempo akumulacji zanieczyszczeń. W czasie występowania deszczu zanieczyszczenia nagromadzone w zlewni są splukiwane w tempie zależnym od stopnia ich nagromadzenia na powierzchni (B) oraz intensywności deszczu (q), zgodnie z zależnością:

$$W = dB/dt = -K_1 q^{K_2} B \quad (4)$$

w której:

W – intensywność splukiwania zanieczyszczeń, kg/ha·s

q – intensywność deszczu, mm/h

K₁ – empiryczny współczynnik splukiwania

K₂ – empiryczny współczynnik potęgowy (w opisie modelu SWMM [29] współczynniki K₁ i K₂ oznaczono jako C₁ i C₂; zmiany oznaczeń dokonano w celu odróżnienia obu współczynników od występujących we wzorach (2) i (3))

Czynnikiem decydującym o intensywności splukiwania zanieczyszczeń jest intensywność deszczu (i w konsekwencji strumień objętości wód deszczowych), występujące w zależności (4) w potęgze większej od jedności (K₂). W związku z szybkimi zmianami intensywności deszczu (np. podczas burz) intensywność splukiwania zanieczyszczeń również ulega gwałtownym zmianom, dając w rezultacie dynamiczne zmiany niesionego przez ścieki deszczowe ładunku zawiesin i związanych z nimi zanieczyszczeń. Dlatego też trudno jest określić miarodajną (średnią) zawartość zawiesin, nie odnosząc jej do warunków panujących podczas ich splukiwania z terenu zlewni.

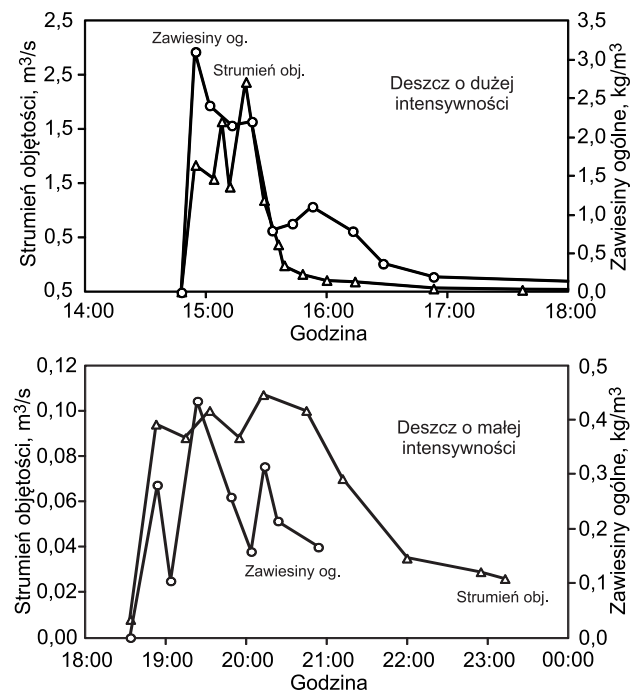
Celowe jest także modelowanie odpływu ścieków deszczowych i transportowanych wraz z nimi zanieczyszczeń w dłuższym czasie (np. w ciągu roku). Wynika to ze współzależności akumulacji i splukiwania zanieczyszczeń ze zlewni. Wynika stąd m.in. mała przydatność analiz pojedynczych deszczów, głównie z powodu nieznamoścności masy nagromadzonych zanieczyszczeń na powierzchni zlewni. Podobnie problematyczne jest określanie jednostkowej ilości splukanych zanieczyszczeń, np. z 1 ha powierzchni i z 1 mm deszczu, ponieważ zależy ona od nagromadzenia zanieczyszczeń przed wystąpieniem deszczu

oraz od jego intensywności i czasu trwania. Modelowanie w dłuższych przedziałach czasu jest również właściwe ze względów hydrologicznych, tj. konieczności uwzględnienia wpływu parametrów hydrologicznych zlewni przed wystąpieniem danego deszczu, co zwykle jest konsekwencją serii wcześniejszych deszczów (stopień nasycenia gleby wodą, wykorzystanie retencji terenowej, a niekiedy także stopień wypełnienia kanałów i zbiorników retencyjnych).

Metoda badań

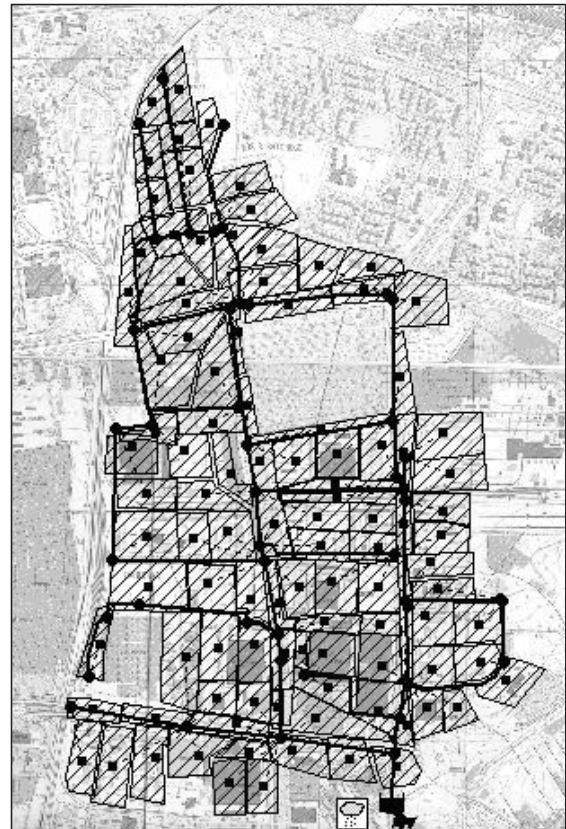
Badania mające na celu określenie ładunku zawiesin w ściekach deszczowych odprowadzanych ze zlewni miejskiej zostały przeprowadzone w zlewni „Dąbrowa Przemysłowa” w Łodzi. Analizowana zlewnia ma powierzchnię 335 ha, a stopień jej uszczelnienia wynosi 40%. W zlewni tej prowadzony był w latach 1989–1992 ciągły monitoring ilościowy i jakościowy, tj. pomiar strumienia objętości ścieków deszczowych i ilości zawiesin w odpływie z kanalizacji (rys. 2) [27]. Opracowano model komputerowy w programie SWMM, który już wcześniej został poddany kalibracji i weryfikacji w odniesieniu do strumienia objętości ścieków [30,31] (rys. 3). Zbiór danych dotyczących strumienia objętości ścieków deszczowych i zawartości zawiesin ogólnych posłużył do kalibracji modelu SWMM w odniesieniu do masy splukanych zawiesin, a także do analizy zjawiska tzw. pierwszej fali splywu (rys. 4).

Stwierdzenie wystąpienia tzw. pierwszej fali odbywa się na podstawie analizy zależności splywu masy zanieczyszczeń w stosunku do splywu objętości ścieków deszczowych, gdzie wartości $L(t)$ i $V(t)$ są naliczane narastająco od początku wystąpienia fali splywu, natomiast L_{sum} i V_{sum} stanowią odpowiednio sumaryczną masę zanieczyszczeń i objętość wód deszczowych z danego zjawiska opadowego. Jako najłagodniejsze kryterium występowania pierwszej fali zanieczyszczeń przyjmuje się zazwyczaj taką sytuację, w której co najmniej 60% masy zanieczyszczeń



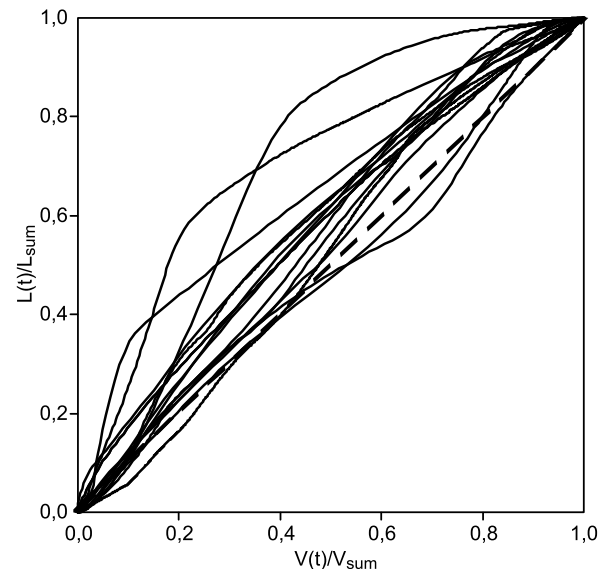
Rys. 2. Przykładowe hydro- i polutogramy podczas intensywnego i mało intensywnego opadu atmosferycznego

Fig. 2. Example hydro- and pollutographs for intense and moderately intense rainfall event



Rys. 3. Schemat zlewni „Dąbrowa Przemysłowa” w Łodzi w programie SWMM

Fig. 3. Scheme of 'Dabrowa Przemysłowa' catchment in Łódź in SWMM

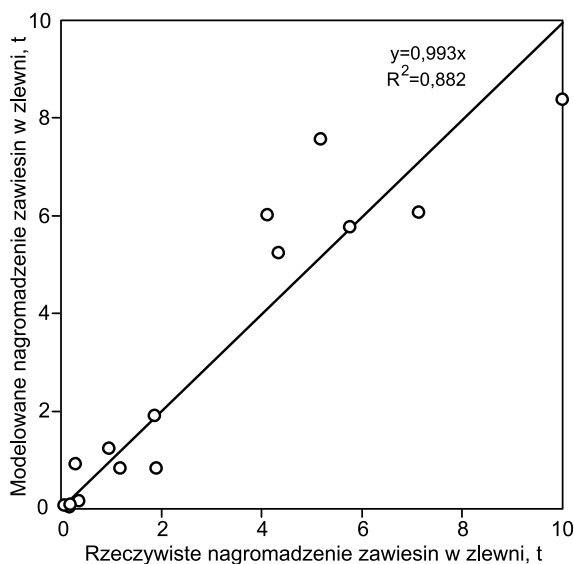


Rys. 4. Przebieg zjawiska pierwszej fali splywu w zlewni „Dąbrowa Przemysłowa” w Łodzi w latach 1989–1991

Fig. 4. The first flush phenomenon in 'Dabrowa Przemysłowa' catchment in Łódź in the period 1989–1991

transportowanych jest przez 40% objętości splywu [32]. Jak wynika z analiz, zjawisko to obserwowano faktycznie jedynie w przypadku niektórych deszczów ulewnych, mimo iż znacznie częściej stwierdzano podwyższoną zawartość zawiesin ogólnych na początku splywu. Zwiększona ilość zanieczyszczeń na początku splywu – dość często obserwowana – nie jest rozstrzygająca, aby stwierdzić występowanie tzw. pierwszej fali splywu.

Cyfrowy model zlewni uwzględnił jej podział na 60 podzlewni o powierzchniach cząstkowych od 1,79 ha do 17,16 ha. W celu uzyskania dokładniejszych wyników modelowania procesu spłukiwania zanieczyszczeń konieczne było wyodrębnienie dwóch rodzajów powierzchni o zróżnicowanym stopniu nagromadzenia zawieszin (bardzo zanieczyszczone – pasy ulic oraz mniej zanieczyszczone – pozostałe). Przyjęty model spływu ścieków deszczowych wraz z zawieszinami został następnie poddany kalibracji. Podstawowym kalibrowanym parametrem była masa zawieszin spłukanych z analizowanej zlewni w czasie każdego zjawiska opadowego. Wyniki przedstawiono na rysunku 5.

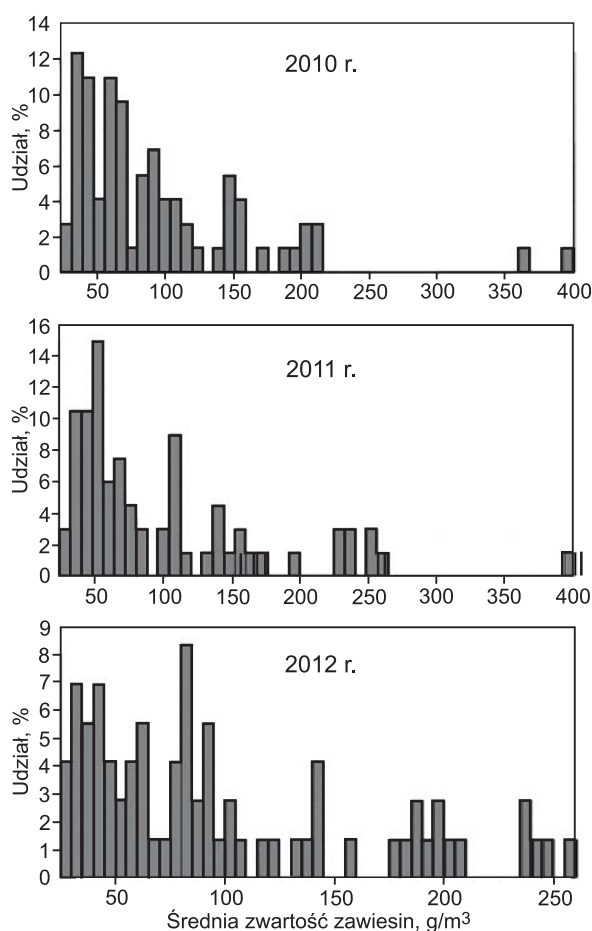


Rys. 5. Zależność między zmierzoną a modelowaną ilością zawieszin spłukiwanych ze zlewni „Dąbrowa Przemysłowa”

Fig. 5. Relationship between the measured and the modeled TSS amount washing out from ‘Dabrowa Przemysłowa’ catchment

Wartości współczynnika granicznej akumulacji (C_1) w skalibrowanym modelu SWMM w przypadku powierzchni o różnym stopniu zanieczyszczenia wynosiły odpowiednio 200 kg/ha i 75 kg/ha, stała $C_2=0,1$, a wartości współczynników spłukiwania $K_1=0,04$ i $K_2=2,0$.

Skalibrowany model posłużył do przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych obejmujących przedział trzech lat. W oparciu o własne dane pluwiometryczne z lat 2010–2012 przeprowadzono symulację spływu ścieków deszczowych i ilości spłukiwanych zawieszin, przy założeniu takiego tempa nagromadzania się zanieczyszczeń, jakie zostało określone w procesie kalibracji modelu. Program SWMM, oprócz symulacji poszczególnych zjawisk opadowych, umożliwia także statystyczne przedstawienie wyników obliczeń zawartości zanieczyszczeń w postaci histogramu przedstawionego na rysunku 6, który obrazuje rozkład średniej zawartości zawieszin z poszczególnych opadów atmosferycznych w każdym roku. Statystyka ta objęła spływy o zawartości zawieszin ponad 25 g/m³. Nie uwzględniono spływów wód deszczowych o mniejszej zawartości zawieszin, gdyż w tym wypadku obserwowano wyraźny wpływ wód infiltracyjnych na wartość tego wskaźnika. Jak wynika z przedstawionych histogramów, w przypadku około jednej trzeciej opadów atmosferycznych stwierdzono przekroczenie dopuszczalnej zawartości zawieszin w ściekach deszczowych odprowadzanych do wód lub do ziemi, tj. 100 g/m³. W przypadku około 10% zjawisk zawartość zawieszin przekraczała 200 g/m³. Dodatkowo sytuację może pogarszać wystąpienie tzw. pierwszej fali zanieczyszczeń.



Rys. 6. Histogramy rozkładu średniej zawartości zawieszin w odpływie ze zlewni zurbanizowanej „Dąbrowa Przemysłowa” w Łodzi w latach 2010–2012

Fig. 6. Histograms of the mean TSS concentration distribution for runoff from the urbanized catchment ‘Dabrowa Przemysłowa’ in Lodz in the period 2010–2012

W przypadku badanej zlewni obserwowano chwilową zawartość zawieszin nawet do kilku tysięcy g/m³. Tak znaczna ilość zawieszin, występująca nawet przez krótki czas, może zagrażać organizmom wodnym odbiornika.

Ścieki deszczowe z analizowanej zlewni są odprowadzane do niewielkiej rzeki miejskiej, co w przypadku braku ich oczyszczania nie gwarantuje odpowiedniego rozcieńczenia tych ścieków w takim stopniu, aby zachować w odbiorniku zawartość zawieszin mniejszą niż 25 g/m³. Sytuacja taka jest typowa w przypadku większości wylotów kanalizacji deszczowej do odbiorników na terenach zurbanizowanych, czego przykładem może być zlewnia Łodzi.

Wnioski

◆ Konieczne jest monitorowanie składu ścieków deszczowych odprowadzanych ze zlewni zurbanizowanych, ponieważ podwyższona zawartość zawieszin wywiera negatywny wpływ na środowisko wodne. Szczególnie zagrożone są niewielkie cieki na terenach zurbanizowanych, których strumień objętości wody nie gwarantuje odpowiedniego rozcieńczenia ścieków deszczowych.

◆ Do prognozowania składu ścieków deszczowych i roztopowych pomocne są modele matematyczne, które powinny być skalibrowane na podstawie wieloletnich badań ilości i składu tych ścieków. Umożliwiają one prognozowanie ilości i składu ścieków deszczowych w dłuższym

przedziale czasu i ocenę stopnia zagrożenia czystości odbiornika w wyniku splukiwania zanieczyszczeń z powierzchni zlewni.

♦ Jak wykazują analizy przeprowadzone w przypadku zlewni zurbanizowanej, podczas około jednej trzeciej opadów atmosferycznych powstają ścieki deszczowe, w których ilość zawiesin przekracza dopuszczalną wartość 100 g/m^3 . Wynika stąd konieczność skutecznego usuwania zawiesin z tych ścieków, co obecnie nie jest powszechnie stosowane.

Badania naukowe zostały wykonane w ramach projektu pt. „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”, współfinansowanego przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

LITERATURA

1. S.J. KERR: Silt, turbidity and suspended sediments in the aquatic environment: An annotated bibliography and literature review. Ontario Ministry of Natural Resources 1995, Southern Region Science & Technology Transfer Unit Technical Report TR-008.
2. K. BARBUSIŃSKI, W. NOCOŃ, K. NOCOŃ, J. KERNERT: Rola zawiesin w transporcie metali ciężkich w wodach powierzchniowych na przykładzie Kłodnicy. *Ochrona Środowiska* 2012, vol. 34, nr 2, ss. 33–38.
3. K. BARBUSIŃSKI, W. NOCOŃ: Zawartość związków metali ciężkich w osadach dennych Kłodnicy. *Ochrona Środowiska* 2011, vol. 33, nr 1, ss. 13–17.
4. R.E. PITT, A. MAESTRE: Stormwater quality as described in the National Stormwater Quality Database (NSQD). Proc. 10th Int. Conf. on Urban Drainage, Copenhagen 2005.
5. H. BROMBACH, S. FUCHS: Datenpool gemessener Verschmutzungskonzentrationen von Trocken- und Regenwetterabflüssen in Misch- und Trennkanalisationen. ATV-DVWK-Forschungsfonds 2001, Projekt 1-01 2001.
6. I. GNECCO, T.C. BERRETTA, L.G. LANZA, P. la BARBERA: Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy. *Atmospheric Research* 2005, Vol. 77, pp. 60–73.
7. M.C. GROMAIRE-MERTZ, S. GARNAUD, A. GONZALEZ, G. CHEBBO: Characterization of urban runoff pollution in Paris. Innovative Technologies in Urban Drainage. Novatech 1998.
8. G. CHEBBO., M.C. GROMAIRE, M. AHYERRE, S. GARNAUD: Production and transport of urban wet weather pollution in combined sewer system: the 'Marais' experimental urban catchment in Paris. *Urban Water* 2001, Vol. 3, pp. 3–15.
9. H. SAWICKA-SIARKIEWICZ: Ograniczanie zanieczyszczeń w splywach powierzchniowych z dróg. Instytut Ochrony Środowiska, Warszawa 2003.
10. A. KRÓLIKOWSKI, K. GARBARCZYK, J. GWOŹDZIEJ-MAZUR, A. BUTAREWICZ: Osady powstające w obiektach systemu kanalizacji deszczowej. *Monografie PAN* 2005.
11. Ł. BAŃ, J. GÓRSKI, K. GÓRSKA, B. SZELĄG: Zawartość zawiesin i metali ciężkich w wybranych falach ścieków deszczowych w zlewni miejskiej. *Ochrona Środowiska* 2012, vol. 34, nr 2, ss. 49–52.
12. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego. Dz. U. nr 137, poz. 984.
13. W. BERRY, N. RUBINSTEIN, B. MELZIAN, B. HILL: The Biological Effects of Suspended and Bedded Sediment (SABS) in Aquatic Systems: A Review. Internal Report, U.S. EPA, 2003.
14. C.P. NEWCOMBE, J.O. JENSEN: Channel suspended solids and fisheries: a synthesis for quantitative assessment of risk and impact. *North American Journal of Fisheries Management* 1996, Vol.16, No.4, pp. 693–727.
15. L. ROSSI, R. FRANKHAUSER, N. CHEVRE: Water quality criteria for total suspended solids (TSS) in urban wet-weather discharges. Proc. 10th Int. Conf. on Urban Drainage, Copenhagen 2005.
16. Rozporządzenie Ministra Środowiska z 4 października 2002 r. w sprawie wymagań, jakim powinny odpowiadać wody śródlądowe będące środowiskiem życia ryb w warunkach naturalnych. Dz. U. nr 176, poz. 1455.
17. M.J. ROBERTSON, D.A. SCRUTON, R.S. GREGORY, K.D. CLARKE: Effect of suspended sediment on freshwater fish and fish habitat. Canadian Technical Report of Fisheries and Aquatic Sciences 2644, 2006.
18. D. BORCHARDT: Urban stormwater discharges: Ecological effects on receiving waters and consequences for technical measures. Proc. 7th Int. Conf. on Urban Drainage, Hannover 1996, pp. 359–364.
19. L. WANG, J. WEI, Y. HUANG, G. WANG, I. MAQSOOD: Urban nonpoint source pollution buildup and washoff models for simulating storm runoff quality in the Los Angeles County. *Environmental Pollution* 2011, Vol. 159, pp. 1932–1940.
20. M.J. CAMBEZ, J. PINHO, L.M. DAVID: Using SWMM 5 in the continuous modeling of stormwater hydraulics and quality. Proc. 11th Int. Conf. on Urban Drainage, Edinburgh 2008.
21. P. SOONTHORNNONDA, E.R. CHRISTENSEN, Y. LIU, J. LI: A washoff model for stormwater pollutants. *Science of the Total Environment* 2008, Vol. 402, pp. 248–256.
22. J. CHEN, B.J. ADAMS: Analytical urban storm water quality models based on pollutant buildup and washoff processes. *Journal of Environmental Engineering – ASCE* 2006, No. 10, pp. 1314–1330.
23. J. TEMPRANO, O. ARANGO, J. CAGIAO, J. SUAREZ, I. TEJERO: Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. *Water SA* 2006, Vol. 32, No. 1, pp. 55–63.
24. C. CIAPONI, M. MUTTI, S. PAPIRI: A conceptual model for the estimation of loadograph in sewer networks during meteorological events. Proc. 2nd International Conference 'New trends in Water and Environmental Engineering for Safety and Life: Eco-compatible Solutions for Aquatic Environments', Capri 2002.
25. R.J. CHARBENEAU, M.E. BARRETT: Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loads. *Water Environmental Research* 1998, Vol. 70, No. 7, pp. 1295–1302.
26. Z. HAIPING, K. YAMADA: Estimation for urban runoff quality modeling. *Water Science and Technology* 1996, Vol. 34, No. 3–4, pp. 49–54.
27. M. ZAWILSKI: Prognozowanie wielkości odpływu i ładunków zanieczyszczeń ścieków opadowych odprowadzanych z terenów zurbanizowanych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej* 1997, nr 792.
28. A. DELETIC, C. MAKSIMOVIC, F. LOUGHREIT, D. BUTLER: Modelling the management of street surface sediments in urban runoff. Innovative Technologies in Urban Drainage, Novatech 1998.
29. Storm Water Management Model. User's Manual, v. 5.0. U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati 2005.
30. M. ZAWILSKI, G. SAKSON: Modelowanie splywu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Część I. Kalibracja modelu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 11, ss. 32–35.
31. M. ZAWILSKI, G. SAKSON: Modelowanie splywu ścieków opadowych ze zlewni miejskiej przy wykorzystaniu programu SWMM. Część II. Weryfikacja modelu. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2011, nr 9, ss. 321–323.
32. M. ZAWILSKI, A. BRZEZIŃSKA: Występowanie zjawiska pierwszej fali w kanalizacji ogólnospławnej na przykładzie Łodzi. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2004, nr 12, ss. 419–424.

Zawilski, M., Sakson, G. Assessment of Total Suspended Solid Emission Discharged via Storm Sewerage System from Urban Areas. *Ochrona Srodowiska* 2013, Vol. 35, No. 2, pp. 33–40.

Abstract: Total suspended solid (TSS) input into receiving waters is an important pollutant adversely influencing aquatic environment and condition of aquatic biota. The main sources of total suspended solids are processes of soil erosion and washing out of solid matter by storm runoff, particularly from urban catchments. Quality of stormwater runoff essentially depends on rainfall duration and intensity, pollutant accumulation on the catchment as well as duration of dry weather period prior to the rainfall event. The frequency and levels of total suspended solid

concentration in stormwater discharged from a real urban catchment were determined using SWMM (Storm Water Management Model) software. The SWMM model has been calibrated based on the rainfall, receiving water flow rate and TSS concentration data obtained for that catchment. For more than one third of precipitation events TSS mean concentration was found to exceed 100 g/m^3 . Such level of pollution may be critical for ecosystems of small urban rivers. The results of presented analyses prove that quality monitoring as well as stormwater treatment should be introduced for stormwater discharges in urban catchments.

Keywords: Total suspended solids, wastewater receiver, urban areas, precipitation, SWMM model.