

Andrzej Kotowski, Bartosz Kaźmierczak, Monika Nowakowska

## Analiza obciążenia systemu odwadniania terenu w przypadku prognozowanego zwiększenia częstości i intensywności deszczów z powodu zmian klimatycznych

Poprawa niezawodności i bezpieczeństwa działania systemów wodociągowych (ujęcia wody, pompownie, sieci wodociągowe) następuje dzięki rozwojowi teorii i praktyki w tych dyscyplinach i polega na zapewnieniu ciągłości dostawy wody o bezpiecznej jakości, w wymaganej ilości i pod odpowiednim ciśnieniem do odbiorców [1]. W przypadku systemów kanalizacyjnych (sieci i obiekty), a w szczególności kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej, nie jest możliwe osiągnięcie pełnej niezawodności ich działania ze względu na losowy (stochastyczny) charakter opadów [2]. Dążyć należy zatem do bezpiecznego ich wymiarowania, tj. osiągnięcia wspólnie wymaganego standardu odwodnienia terenów zurbanizowanych (wg PN-EN 752:2008 – tab. 1) [3], przy uwzględnieniu prognozowanych zmian klimatycznych. Zapewnienie odpowiedniego standardu odwodnienia terenu wymaga dostosowania systemu kanalizacyjnego do przyjęcia maksymalnego prognozowanego strumienia objętości wód opadowych, o częstości występowania równej dopuszczalnej częstości wystąpienia wylania na powierzchnię terenu.

W ostatnich dziesięcioleciach analizuje się zmiany klimatyczne (tzw. ocieplenie klimatu), chociaż nie ma zgody co do przyczyn ich trendu [4, 5]. Wzrost średniej rocznej temperatury na kuli ziemskiej wywołuje zwiększoną cyrkulację wody w cyklu hydrologicznym i nasilenie się ekstremalnych zjawisk pogodowych (powódzie, susze). Z powodu globalnych zmian klimatycznych będzie się zmieniać także wysokość opadów regionalnych. Stąd też w przyszłości może wystąpić więcej zdarzeń ekstremalnych opadów, które mogą powodować powódzie i znaczne szkody na obszarach miejskich. Kwantyfikacja problemu, jak również odpowiednie planowanie zaradczcze w celu zminimalizowania negatywnych skutków takich zdarzeń są już dziś pilnie potrzebne, bowiem budowane obecnie systemy odwadniania terenów powinny sprawdzać się w działaniu w perspektywie do 2100 r.

Obecny stan prawny nakłada na projektantów systemów kanalizacyjnych większą odpowiedzialność, w tym obowiązek bezpiecznego wymiarowania wynikający z najnowszej dostępnej wiedzy [2, 4]. Idea ta została podjęta w niniejszej pracy w odniesieniu do obecnych zasad projektowania systemów odwadniania terenów, dotyczących częstości deszczu obliczeniowego i dopuszczalnych częstości

Tabela 1. Zalecenia Polskiej Normy PN-EN 752:2008 [3]  
Table 1. Recommendations according to the Polish standard PN-EN 752:2008 [3]

Rodzaj zagospodarowania terenu	Częstość deszczu obliczeniowego	Częstość wystąpienia wylania
Tereny wiejskie	1 na rok	1 na 10 lat
Tereny mieszkaniowe	1 na 2 lata	1 na 20 lat
Centra miast, tereny usług i przemysłu	1 na 5 lat	1 na 30 lat
Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami itp.	1 na 10 lat	1 na 50 lat

wylewów z kanałów (wg zaleceń normy PN-EN 752:2008), przy uwzględnieniu skutków wynikających z prognozowanych zmian klimatu. Wykorzystano przy tym propozycje niemieckiego Stowarzyszenia Gospodarki Wodnej, Ściekowej i Odpadowej (Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall – DWA-A118:2006) odnośnie metodyki badania przeciążeń systemów kanalizacyjnych, zgodnie z postulatami Europejskiego Komitetu Normalizacji (CEN) ujednoczenia poziomu wymagań w tym zakresie w państwach członkowskich Unii Europejskiej.

### Prawdopodobne scenariusze deszczów

Obecnie w Europie przewiduje się wzrost częstości występowania intensywnych deszczów przyjmowanych jako kryterium do projektowania odwodnień terenów [6–8] (tab. 1). Podstawą do oceny przyszłych zagrożeń jest wybór odpowiednich scenariuszy deszczów, opisujących zmiany obecnych wzorców (Intensity-Duration Frequency, Depth-Duration Frequency), spowodowane przez zmiany klimatu. Regionalne modele klimatyczne, np. Gerstengarbe:2009 [7] czy ExUS:2010 [8], oparte na globalnych modelach klimatu typu IPCC:2007 [9], nie nadają się bezpośrednio do symulacji działania systemów odwadniających w przyszłości, bowiem dotyczą deszczów o czasie trwania 60 min, występujących na pojedynczych obszarach rastrowych o powierzchni 100÷300 km<sup>2</sup> [6]. Nie można na tej podstawie wyprowadzać wniosków co do intensywności deszczów trwających krócej i na mniejszej przestrzeni.

W celu zniwelowania luki, jaka jest między skalą modeli klimatycznych i lokalnych (dotyczących zlewni miejskich) najczęściej stosowane są statystyczne metody zmniejszania rozdzielczości w odniesieniu do opisu deszczów

Prof. dr hab. inż. A. Kotowski, dr inż. B. Kaźmierczak, mgr inż. M. Nowakowska: Politechnika Wroclawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Zakład Usuwania Ścieków, Wybrzeże Stanisława Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław  
andrzej.kotowski@pwr.wroc.pl, bartosz.kazmierczak@pwr.wroc.pl, monika.nowakowska@pwr.wroc.pl

ekstremalnych [10]. Jednak dotychczasowe modele statystyczne mogą jedynie opierać się na danych historycznych, a więc na założeniu, że przeniesienie wyników z predyktorów do predyktandów nie wpłynie znacząco na dokładność opisu zmieniających się warunków klimatycznych w przyszłości. Stosowanie statystycznego zmniejszenia rozdzielczości powoduje więc dodatkową niepewność co do wyniku wpływu zmian klimatu, zwłaszcza w dłuższym czasie ( $\geq 50$  lat) [11]. Niepewność tę można zmniejszyć wykorzystując m.in. prawo skalowania deszczów [12], stochastyczne generatory deszczów [13, 14], kwantyle perturbacji zdarzeń [10] czy też tzw. funkcje przesły, które są uzależnione od rodzaju deszczów niestacjonarnych [15].

Biorąc pod uwagę obecną wiedzę na temat trendów zmian klimatu do 2100 r., dostosowanie typowych deszczów projektowych do wymiarowania odwodnień terenów (tab. 1) można dokonać poprzez korektę ich intensywności (krzywych IDF o danej częstotliwości występowania) lub zmieniając częstotliwość występowania współczesnych deszczów projektowych. Oznaczałoby to w pierwszym przypadku, że przy tzw. wysokim scenariuszu zmian klimatu, według pracy [10], dzisiejszą intensywność deszczów (z lat pomiarowych 1960–1990) należałoby zwiększyć od ok. 1,2 przy  $C=1$  rok do ok. 1,5 przy  $C=10$  lat. W drugim przypadku częstotliwość występowania dzisiejszych deszczów należałoby zmniejszyć około 2-krotnie. Podobne trendy zmian stwierdzono także w wielu innych regionach Europy [16–18]. Na tej podstawie zostały już zmienione wytyczne do projektowania zbiorników retencyjnych i identyfikacji przecięcia hydraulicznych miejskich systemów kanalizacyjnych w regionie Flandrii w Belgii [10] czy Nadrenii Północnej-Westfalii w Niemczech [6, 19].

Przyjmowanie częstotliwości deszczu obliczeniowego odpowiada dotychczasowej koncepcji wymiarowania systemów kanalizacyjnych w Europie i w Polsce [2, 3, 20–22]. Wymiarowany przekrój rozpatrywanego kanału należy dobierać tak, aby jego przepustowość całkowita ( $Q_0$ ) była większa od obliczonego odpływu miarodajnego ( $Q$ ). U podstaw tej zasady leży domniemanie, że przy założonej częstotliwości deszczu obliczeniowego i całkowitym wypełnieniu kanału, zalecane w normie PN-EN 752:2008 częstotliwości wylania nie zostaną przekroczone (tab. 1). Jednakże związku między częstotliwością przyjętego deszczu a wynikowym obciążeniem danego systemu nie da się uogólnić, ponieważ hydrauliczny opis przepływu w kanałach jest nieliniowy. Po osiągnięciu całkowitego wypełnienia kanałów i przy dalszym wzroście spiętrzenia ścieków do poziomu terenu, możliwy jest wzrost ich przepustowości, w zależności od średnicy, spadku dna i zagłębienia kanału. Także przy wystąpieniu ścieków z kanalizacji, stan wylania nie zachodzi bezpośrednio i nieuchronnie. Zależy to głównie od lokalnych uwarunkowań na powierzchni terenu (wysokość krawężników, położenie posesji w stosunku do rzędnej nawierzchni ulicy itp.). Przez to nie jest możliwe ustalenie zależności pomiędzy częstotliwością deszczu obliczeniowego i częstotliwością wylania, zwłaszcza na etapie projektowania kanalizacji. Pomocne mogą być tutaj zalecenia niemieckie

DWA-A118:2006 [20], wprowadzające pojęcie częstotliwości nadpiętrzenia do poziomu terenu (tab. 2) do obliczeń sprawdzających działanie kanalizacji przy pomocy modelowania hydrodynamicznego. Wówczas w pośredni sposób można wyznaczyć stan przecięcia, który jest najbliższy występującemu w dalszej kolejności wylaniu.

Tabela 2. Zalecenia niemieckich wytycznych DWA-A118:2006 [20]

Table 2. Recommendations according to the German standard DWA-A118:2006 [20]

Rodzaj zagospodarowania terenu	Częstotliwość nadpiętrzenia
Tereny wiejskie	1 na 2 lata
Tereny mieszkaniowe	1 na 3 lata
Centra miast, tereny usług i przemysłu	rzadziej niż 1 na 5 lat
Podziemne obiekty komunikacyjne, przejścia i przejazdy pod ulicami itp.	rzadziej niż 1 na 10 lat

W pracy [18] wskazano na praktyczny sposób uwzględnienia zmian typowych opadów projektowych, przyjmowanych do identyfikacji przecięcia (nadpiętrzeń i wylewów) w systemach odwodnień terenów wg obecnego standardów (EN 752:2008 i DWA-A118:2006), wynikający z badań trendów modeli klimatycznych. Ponieważ intensywność opadów atmosferycznych w przyszłości wzrośnie, dzisiejsze zdarzenia deszczu o powtarzalności statystycznej, np.  $C=5$  lat, będą prawdopodobnie w przyszłości zdarzeniami o częstotliwości występowania  $C=2$  lata – wymaganej do projektowania kanalizacji na terenach mieszkaniowych (tab. 1), przy której obecnie przyjmowana projektowa częstotliwość nadpiętrzenia wynosi  $C=3$  lata (tab. 2). Zaproponowano więc scenariusz deszczów o  $C=5$  lat zamiast  $C=3$  lata do weryfikacji występowania przyszłych nadpiętrzeń na terenach mieszkaniowych oraz dodatkowo scenariusz deszczów ekstremalnych o  $C=100$  lat w celu zapewnienia wymaganej obecnie dopuszczalnej częstotliwości wylewów 1/20 lat. Na tej podstawie Krajowy Urząd ds. Środowiska w Bawarii (BLFU) wydał zalecenie [19] zwiększenia częstotliwości obecnych deszczów do identyfikacji przecięcia kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej w Nadrenii Północnej-Westfalii, co przedstawiono w tabeli 3.

## Metody badawcze

Do wymiarowania systemów kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej w Polsce stosowano najczęściej dwie metody obliczeniowe – uproszczoną tzw. metodę stałych natężeń (MSN) w zlewniach do 50 ha, bądź metodę granicznych natężeń (MGN), która należy do tzw. metod czasu przepływu, zwanych też stacjonarnymi [2]. Obie metody wykorzystują model deszczów W. Błaszczyka z 1954 r., który został oparty na natężeniach deszczów zarejestrowanych w Warszawie na przełomie XIX i XX w. Wzór W. Błaszczyka zaniża wartości maksymalnego natężenia obecnych deszczów o ok. 40%, co wykazano m.in. w pracy [23] na

Tabela 3. Scenariusze występowania deszczów do weryfikacji nadpiętrzeń, jako skutku zmian klimatu [6, 19]

Table 3. Rainfall scenarios for verification of floodings as a result of climate change [6, 19]

Rodzaj zagospodarowania terenu	Deszcz projektowy o częstotliwości $C \leq 10$ lat	Deszcz ekstremalny o częstotliwości $C > 10$ lat
Tereny wiejskie	1 na 3 lata zamiast 1 na 2 lata	1 na 50 lat zamiast 1 na 10 lat
Tereny mieszkaniowe	1 na 5 lat zamiast 1 na 3 lata	1 na 100 lat zamiast 1 na 20 lat
Centra miast, tereny usług i przemysłu	1 na 10 lat zamiast 1 na 5 lat	1 na 100 lat zamiast 1 na 30 lat

przykładzie deszczów zmierzonych we Wrocławiu w czasie ostatnich 50 lat (1960–2009). Ponadto założenia wyjściowe obu metod odnośnie retencji kanałowej i terenowej obniżają strumień spływu wód deszczowych w stosunku do metody współczynnika opóźnienia (MWO), stosowanej m.in. w Niemczech, w której pomija się retencję terenową i kanałową, ze względu na bezpieczeństwo działania sieci podczas serii występujących po sobie intensywnych deszczów. Ma to negatywne skutki przy weryfikacji działania sieci i obiektów kanalizacyjnych w Polsce odnośnie zalecanych normą PN-EN 752:2008 (tab. 1) dopuszczalnych częstości wylewów z kanałów, co wykazano m.in. w pracach [2, 4, 24–27]. MWO, pod nazwą metoda maksymalnych natężeń (MMN) – dostosowana do polskich modeli deszczów maksymalnych (IDF i DDF) z lat pomiarowych 1960–1990–2009, jako dająca bezpieczne wyniki – zalecana jest obecnie do wymiarowania odwodnień terenów w Polsce [2].

Zarówno w modernizowanych, jak i nowoprojektowanych systemach kanalizacyjnych zaleca się obecnie weryfikację przepustowości hydraulicznej kanałów i obiektów, w tym nadpiętrzeń do poziomu terenu i wylewów, na drodze modelowania hydrodynamicznego, przy różnych scenariuszach obciążenia zlewni deszczami stacjonarnymi lub niestacjonarnymi, zmiennymi w czasie i przestrzeni. Scenariuszami tymi mogą być deszcze modelowe Eulera typ II, tworzone z lokalnych krzywych IDF i DDF lub rzeczywiste serie intensywnych deszczów [2, 20, 22, 25], bądź też deszcze syntetyczne generowane losowo [28]. Modelowanie działania systemów kanalizacyjnych, zalecane normą PN-EN 752:2008, a nawet wymagane prawem wg rozporządzenia Ministra Środowiska z 2006 r. odnośnie weryfikacji częstości działania przelewów burzowych, jest w Polsce dotychczas rzadko stosowane.

Pierwszym krokiem na drodze identyfikacji obecnego obciążenia hydraulicznego kanałów i obiektów powinna być symulacja działania istniejącego czy rozbudowywanego systemu odwodnienia. Dalsze symulacje powinny dotyczyć potencjalnych (przyszłych) scenariuszy obciążania systemu kanalizacyjnego. Po dokonaniu oceny wyników takich symulacji (obecna sytuacja, przyszłe scenariusze) może być stwierdzona potrzeba adaptacji systemu, zgodnie z oczekiwanymi zmianami spływu wód deszczowych w przyszłości.

Do wykazania konieczności dostosowania systemów odwadniania terenów do skutków zmian klimatycznych, w oparciu o omówione scenariusze deszczów, celowe jest usystematyzowanie podstawowych danych o obecnym obciążeniu tych systemów. Pomocne w tym mogą być następujące parametry [6]: stopień wykorzystania kanałów (SWK), stopień zatopienia studzienek (SZS) i objętość właściwa wylewów (OWW).

Parametr SWK pozwala na ocenę średniego (ważonego) stopnia wykorzystania sieci całego systemu odwadniającego lub jego części (pojedynczych kanałów), zgodnie z zależnością:

$$SWK = \frac{\sum_{x=1}^n \frac{Q_{maks, x}}{Q_{proj, x}} l_x}{\sum l} \quad (1)$$

w której:

$Q_{maks}$  – maksymalny obliczony strumień odpływu,  $m^3/s$   
 $Q_{proj}$  – maksymalny projektowy strumień odpływu,  $m^3/s$   
 $l$  – długość sieci kanalizacyjnej, m

Stopień zatopienia studzienek (SZS) ujmuje stosunek liczby zalanych studzienek (NZ) do ogólnej liczby studzienek (N). Parametr ten może dotyczyć oceny całego systemu lub tylko powiązanych wzajemnie jego części:

$$SZS = \sum NZ / \sum N \quad (2)$$

Objętość właściwa wylewów (OWW) dotyczy obliczonej objętości wylewów ( $V$ ,  $m^3$ ) z kanałów na obszarze uszczelnionej powierzchni danej zlewni ( $F$ , ha):

$$OWW = \sum V / \sum F \quad (3)$$

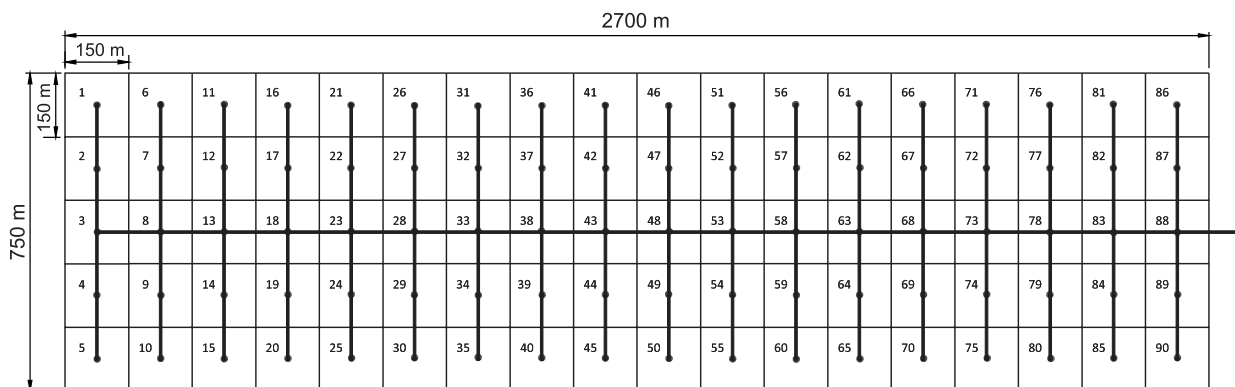
Objętość właściwa  $10 m^3/ha$  odpowiada opadowi deszczu o wysokości 1 mm, tj.  $1 dm^3/m^2$ . Wartości graniczne parametrów SWK, SZS i OWW powinny być ustalone indywidualnie, w każdym analizowanym przypadku zlewni. W pracy [6] podano przykładowe wyniki analizy podstawowych danych trzech systemów kanalizacyjnych w Nadrenii Północnej-Westfalii, co przedstawiono w tabeli 4. Badane zlewnie znajdowały się wewnątrz obszarów miejskich lub centrów miast. Do symulacji nadpiętrzeń i wylewów, jako obciążenie zlewni, przyjęte zostały opady deszczu o częstości występowania 5 lat zamiast 3 lata (deszcze projektowe) i 100 lat zamiast 30 lat (deszcze ekstremalne).

W przypadku braku wystąpienia przeciążenia systemu podczas symulacji projektowego zdarzenia deszczów i ekstremalnego zjawiska deszczu (wg scenariuszy z tab. 3) środki zapobiegawcze nie są potrzebne. Jeżeli jednak są zidentyfikowane lokalne przeciążenia, wówczas najczęściej konieczne są dalsze analizy. Można tego dokonać na podstawie metody GIS i oceny na miejscu (in-situ), a w przypadku stwierdzenia rozległych przeciążeń niezbędna staje się dodatkowa symulacja systemu odwadniającego w połączeniu z cyfrowym modelem terenu, który opiera się na laserowym skanie powierzchni zlewni z lotu ptaka (o szerokości siatki do 1 m). Zalecane jest to zwłaszcza w przypadku identyfikacji przeciążenia systemu odwodnienia, gdy (zgodnie z tab. 4) co najmniej dwa podstawowe kryteria wskazują na dużą potrzebę adaptacji systemu. Umożliwia to m.in. zlokalizowanie obszarów zagrożonych w szczególny sposób [29]. Szczegółowa analiza wyników symulacji pozwala więc nie tylko na wytyczenie granic terenów narażonych na zalanie, ale także na określenie wysokości warstwy, prędkości i strumienia objętości ścieków deszczowych. Dalsze kroki planowania powinny polegać na rozgraniczeniu obszarów przepełnień (wylewów) i wskazaniu rezerwarów (zagłębień terenu, zbiorników

Tabela 4. Przykładowe dane do oceny konieczności adaptacji kanalizacji do zmian klimatu [6]  
 Table 4. Example figures to assess the need for drainage system adaptation to climate change [6]

Parametr	Wartość											
Stopień wykorzystania kanałów	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2	>2
Stopień zatopienia studzienek	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5	>0,5
Objętość właściwa wylewów, $m^3/ha$	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	>20
Potrzeba dostosowania	brak				średnia				duża			





Rys. 1. Schemat ideowy modelowej zlewni deszczowej (F=202,5 ha)  
Fig. 1. Schematic diagram of the model rainwater drainage basin (F=202.5 ha)

retencyjnych) do przetrzymania fali powodzi na miejscu lub ewentualnie kierowania spływu powierzchniowego na tereny słabiej zagospodarowane (ogrody działkowe, boiska sportowe, nieużytki).

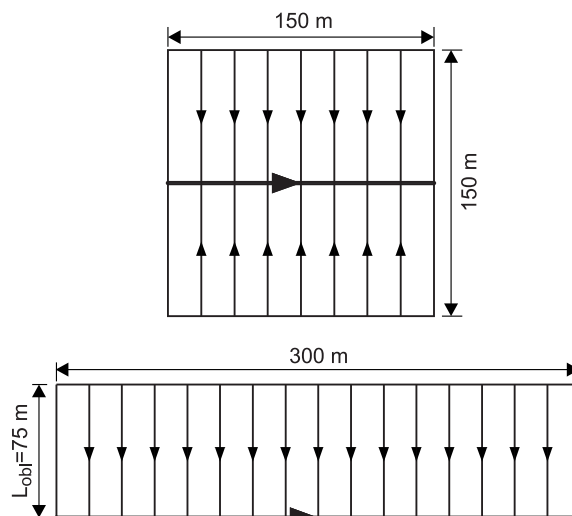
W celu zilustrowania proponowanej w pracy metodyki badawczej, w odniesieniu do zasad projektowania systemów odwodnień terenów wg obecnych standardów (PN-EN 752:2008 i DWA-A118:2006) i przy uwzględnieniu trendu zmian klimatu, zaproponowano modelową zlewnię deszczową o powierzchni 2 km<sup>2</sup> w zabudowie mieszkaniowej Wrocławia. Przyjęta zlewnia w płaskim terenie była ostrym kryterium do oceny działania kanalizacji, ponieważ wszystkie węzły obliczeniowe były zarazem punktami krytycznymi sieci. Zgodnie z zaleceniami [2, 30] wielkość zintegrowanych powierzchni cząstkowych powinna być ograniczona do kilku hektarów. Przyjęto zatem zlewnie cząstkowe o powierzchni 2,25 ha (150 m × 150 m) i średni ważony współczynnik spływu równy  $\psi=0,25$ . Schemat ideowy zlewni przedstawiono na rysunku 1.

Do wymiarowania kanalizacji deszczowej przyjęto  $C=2$  lata (wg tab. 1) i MMN z modelem deszczów maksymalnych we Wrocławiu, jako bezpieczną metodę sprawdzoną w warunkach wrocławskich [2, 25, 26]. W MMN miarodajny czas trwania deszczu ( $t \geq 15$  min przy spadku terenu  $\leq 1\%$  i stopniu uszczelnienia  $\psi \leq 50\%$  [2]) przyjmuje się równy czasowi przepływu ścieków ( $t_p$ ) w kanale. Zastosowano sformułowany w pracy [23] probabilistyczny model na maksymalną wysokość opadów we Wrocławiu ( $h$ , mm) przy czasie trwania  $t \in [5; 4320]$  min i prawdopodobieństwie wystąpienia  $p=1/C \in [1; 0,01]$ , w postaci:

$$h = -4,58 + 7,41t^{0,242} + (97,11t^{0,0222} - 98,68)(-\ln p)^{0,809} \quad (4)$$

Do projektowania zagłębień kanałów jako minimalne przykrycie ziemią kanałów bocznych przyjęto 1,4 m, a kolektora 1,9 m. Zastosowano kanały o przekroju kołowym (D), ułożone z minimalnym spadkiem dna, dobieranym z formuły  $1/D$ . Wypełnienia kanałów przyjęto jako  $\leq 0,75D$  ( $\leq 0,9Q_0$  [2]). Połączenia kanałów w studzienkach zaprojektowano zgodnie z zasadą wyrównywania poziomów zwierciadeł ścieków. Przy tak przyjętych założeniach projektowych przeprowadzono obliczenia hydrauliczne kanalizacji deszczowej podane szczegółowo w pracy [2]. Kanały boczne składały się z dwóch odcinków obliczeniowych o średnicach K0,4 m i K0,6 m, a kolektor składał się z 18 odcinków obliczeniowych o średnicach od K0,8 m do K2,2 m. Zagłębienia kanałów wynosiły od 1,80 m p.p.t. do 5,33 m p.p.t. Obliczeniowy czas przepływu wyniósł 43,3 min, a strumień objętości ścieków deszczowych był równy  $Q=3,70 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Do hydrodynamicznej symulacji działania przykładowej kanalizacji zastosowano program SWMM 5.0 (Storm Water Management Model). W programie tym zlewnia cząstkowa jest reprezentowana przez prostokąt o zadanej powierzchni i szerokości hydraulicznej (W). W przypadku zlewni symetrycznych względem kanału odprowadzającego ścieki deszczowe przyjmuje się, że szerokość hydrauliczna jest dwukrotnie większa od długości kanału [31]. Ponieważ zintegrowane powierzchnie cząstkowe zlewni miały kształt kwadratu (150 m × 150 m), a kanał odprowadzający ścieki deszczowe był położony centralnie, dlatego określono szerokość hydrauliczną zlewni na  $W=300 \text{ m}$  (rys. 2).



Rys. 2. Graficzna interpretacja metody określania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowej

Fig. 2. Graphical representation of the hydraulic width determination method for a partial drainage basin

Do obliczeń odpływu zlewnia jest dzielona formalnie na trzy rodzaje powierzchni – przepuszczalną (na której występuje infiltracja) oraz dwie nieprzepuszczalne – z retencją i bez retencji. Odpływ liczony był oddzielnie z każdej z powierzchni, a następnie został zsumowany. Strumień objętości ścieków deszczowych spływających do węzła obliczeniowego sieci obliczono stosując model zbiornika nieliniowego w postaci zależności:

$$\begin{cases} Q_m = W \frac{(h-h_r)^{5/3}}{n_s} i^{1/2} \\ \frac{dV}{dt} = F \frac{dh}{dt} = FI_e - Q_m \end{cases} \quad (5)$$

w której:

$Q_m$  – modelowy strumień objętości wód deszczowych odpływający ze zlewni,  $m^3/s$

$W$  – szerokość hydrauliczna zlewni, m

$h$  – wysokość opadu deszczu, m

$h_r$  – wysokość retencji powierzchniowej, m

$n_s$  – zastępczy współczynnik szorstkości (Manninga) powierzchni zlewni,  $s/m^{1/3}$

$i$  – zastępczy spadek powierzchni zlewni

$V$  – objętość wód deszczowych,  $m^3$

$t$  – czas, s

$F$  – uszczelniona powierzchnia zlewni,  $m^2$

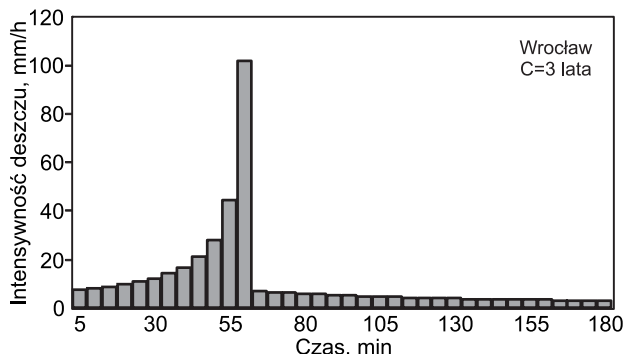
$I_e$  – rzeczywista intensywność deszczu (z uwzględnieniem strat),  $m/s$

Napełnienie zbiornika odpowiadało objętości ścieków deszczowych ( $V$ ), które znalazły się na terenie zlewni, pomniejszonej o straty na parowanie, infiltrację i na wypełnienie nierówności terenu ( $h_r$ ). Parametry  $W$ ,  $i$ , a także  $n_s$  reprezentują właściwości hydrauliczne zintegrowanej zlewni cząstkowej.

### Deszcz modelowy Eulera (typ II) o $C=3$ lata

Deszcze modelowe są syntetycznymi hietogramami tworzonymi na podstawie lokalnych krzywych wysokości (DDF) bądź intensywności (IDF) deszczu. Przykładem deszczu modelowego może być model Eulera (typ II), który jest zalecany do modelowania kanalizacji w Niemczech [20, 22, 32], a obecnie także w Polsce [2, 25, 26].

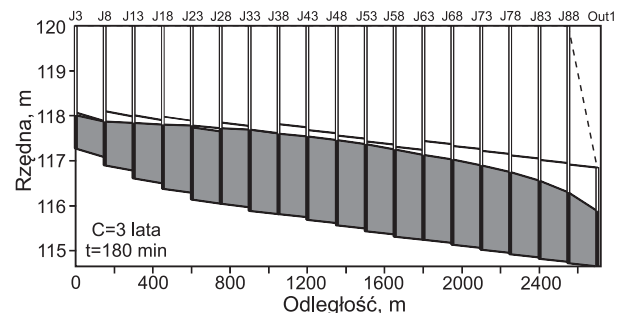
W celu weryfikacji występowania nadpiętrzeń w zaprojektowanej kanalizacji należy, zgodnie z dotychczasowymi zaleceniami (wg DWA-A118:2006), obciążyć zlewnię w zabudowie mieszkaniowej deszczem o częstotliwości występowania  $C=3$  lata (tab. 2) i czasie trwania co najmniej dwukrotnie przewyższającym czas przepływu w sieci ( $t_p$ ). Z badań symulacyjnych przeprowadzonych w pracy [25] wynika, że w warunkach hydrologicznych Wrocławia, dopiero po około czterokrotnym wydłużeniu czasu trwania deszczu modelowego, objętość wylewów z kanałów uległa stabilizacji. Ponieważ w zaprojektowanej kanalizacji czas przepływu wyniósł ok. 45 min, opracowano na podstawie wzoru (4) deszcz modelowy Eulera o czasie trwania  $t=4t_p=180$  min i  $C=3$  lata, charakteryzujący się maksymalną intensywnością 101,7 mm/h, występującą pomiędzy 55. a 60. minutą jego trwania (rys. 3).



Rys. 3. Histogram deszczu modelowego Eulera (typ II)  
Fig. 3. Histogram of Euler's model rainfall (type II)

W celu weryfikacji przepustowości hydraulicznej zwymiarowanej kanalizacji deszczowej obciążono zlewnię opracowanym deszczem modelowym. Z sumarycznej wysokości opadu deszczu – 32,6 mm – czwarta jego część

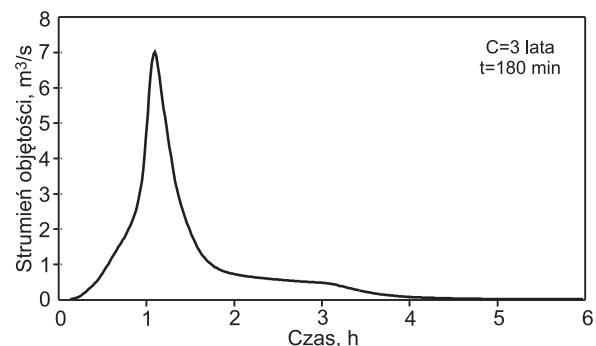
( $\psi=0,25$ ) przekształcana była w spływ powierzchniowy i trafiała do kanalizacji ( $h_r=0$ ). Zastępcze wartości parametrów hydraulicznych zintegrowanych zlewni cząstkowych ( $W=300$  m,  $i=0,025$  oraz  $n_s=0,015$   $s/m^{1/3}$ ) przyjęto na podstawie danych literaturowych [2, 25, 27, 30–33]. W wyniku przeprowadzonych symulacji hydrodynamicznych otrzymano informacje o strumieniu objętości ścieków deszczowych i wypełnieniach w poszczególnych odcinkach sieci kanalizacyjnej. Profil kolektora (na trasie J3-out), w czasie wystąpienia największych wypełnień (w 65. min.), przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Profil kolektora w 65. minucie trwania deszczu modelowego

Fig. 4. Interceptor profile in the 65<sup>th</sup> minute of the model rainfall

Jak wynika z rysunku 4, praktycznie cały kolektor pracował ze swobodnych lustrem ścieków (poza odcinkiem J23-J28, gdzie wystąpiły kilkucentymetrowe nadpiętrzenia powyżej sklepienia kanału). W przypadku wszystkich kanałów bocznych nadpiętrzenia do poziomu terenu również nie wystąpiły. Hydrogram przepływu ścieków na ostatnim odcinku kolektora (J88-out) przedstawiono na rysunku 5.



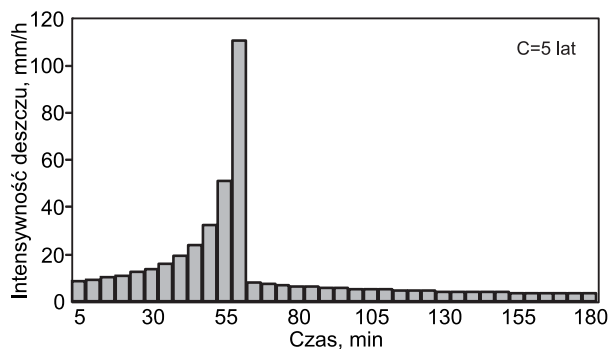
Rys. 5. Hydrogram przepływu ścieków deszczowych na ostatnim odcinku kolektora

Fig. 5. Hydrograph of storm water flow in the last interceptor section

Maksymalny modelowy strumień objętości wód deszczowych wyniósł  $Q_m=7,0$   $m^3/s$ . Symulowany czas ich spływu oraz opróżniania kanałów wyniósł praktycznie ok. 4,5 h od chwili rozpoczęcia deszczu modelowego – wówczas wypełnienie w kolektorze spadło do wartości  $\leq 0,05D$  (poziom infiltracji).

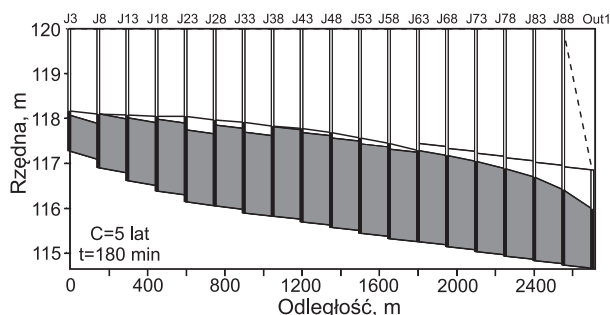
### Deszcz modelowy Eulera (typ II) o $C=5$ lat

Do oceny skutków hydraulicznych wzrostu intensywności deszczów w przyszłości, do symulacji obciążenia kanalizacji zastosowano deszcz modelowy Eulera (typ II) o  $C=5$  lat (na podstawie tab. 3) i  $t=180$  min, charakteryzujący się maksymalną intensywnością 110,9 mm/h (między 55. a 60. min.), przedstawiony na rysunku 6.



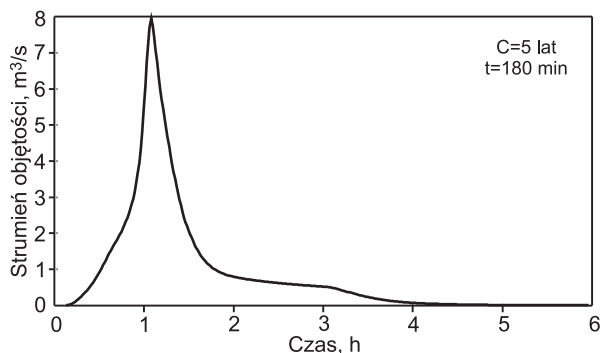
Rys. 6. Histogram deszczu modelowego Eulera (typ II)  
Fig. 6. Histogram of Euler's model rainfall (type II)

Wypełnienia kolektora w wybranym czasie trwania deszczu (65. min.) przedstawiono na rysunku 7. W przypadku deszczu modelowego Eulera o  $C=5$  lat i  $t=180$  min kolektor na około 2/3 długości działał już pod niewielkim ciśnieniem (do kilkunastu centymetrów). We wszystkich kanałach bocznych kolektora napięcia do poziomu terenu również nie wystąpiły. Nie wystąpiły więc wylewy z kanałów w żadnym z węzłów obliczeniowych. Świadczyło to m.in. o tym, że badany system kanalizacyjny, zmiarowany bezpieczną metodą (MMN), sprawdzi się w działaniu także w przyszłości. Nie będzie więc potrzeby stosowania środków dostosowawczych w zlewni (wg kryteriów podanych w tab. 4).



Rys. 7. Profil kolektora w 65. minucie trwania deszczu modelowego  
Fig. 7. Interceptor profile in the 65<sup>th</sup> minute of the model rainfall

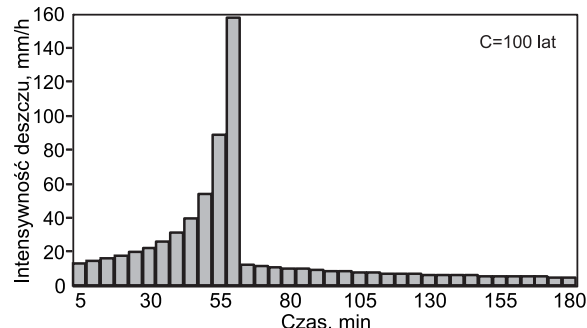
Maksymalny modelowy strumień objętości wód deszczowych wynosił  $Q_m=8,0$  m<sup>3</sup>/s. Jego zmienność w czasie na ostatnim odcinku kolektora została przedstawiona na rysunku 8.



Rys. 8. Hydrogram przepływu ścieków deszczowych na ostatnim odcinku kolektora  
Fig. 8. Hydrograph of storm water flow in the last interceptor section

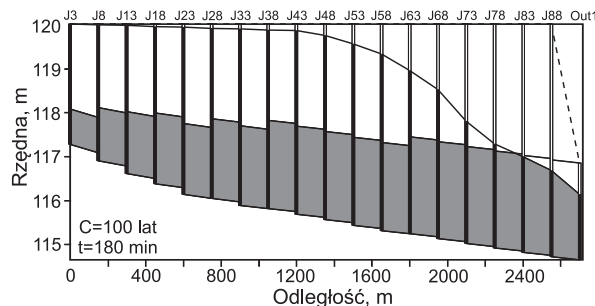
## Deszcz modelowy Eulera (typ II) o $C=100$ lat

Do symulacji ekstremalnego obciążenia kanalizacji zastosowano deszcz modelowy Eulera (typ II) o  $C=100$  lat (na podstawie tab. 3) i  $t=180$  min, charakteryzujący się maksymalną intensywnością 157,3 mm/h, przedstawiony na rysunku 9.



Rys. 9. Histogram deszczu modelowego Eulera (typ II)  
Fig. 9. Histogram of Euler's model rainfall (type II)

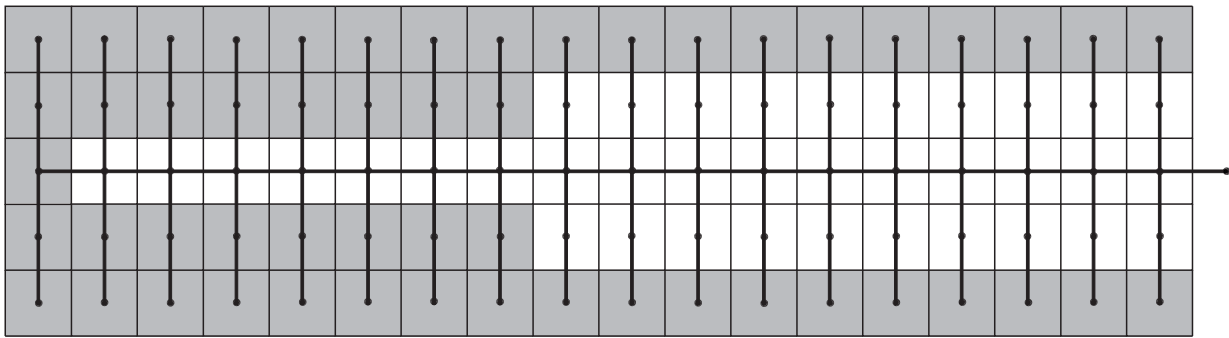
Jak pokazano na rysunku 10, praktycznie cały kolektor (poza dwoma ostatnimi odcinkami) działał pod ciśnieniem w 60. minucie symulacji. Kilkunastometrowe napięcia, w tym do powierzchni terenu i wylania, wystąpiły w początkowych węzłach obliczeniowych kolektora i kanałów bocznych. W przypadku dalszych kanałów bocznych, gdzie kolektor był już na większej głębokości, napięcia do poziomu terenu wystąpiły tylko na początkowych odcinkach tych kanałów.



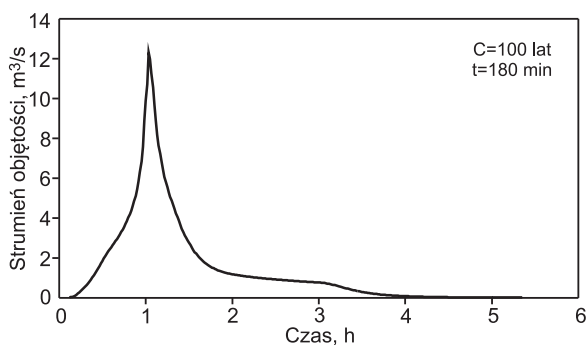
Rys. 10. Profil kolektora w 60. minucie trwania deszczu modelowego  
Fig. 10. Interceptor profile in the 60<sup>th</sup> minute of the model rainfall

Łącznie wylania zanotowano w 53 węzłach obliczeniowych. W przypadku 37 z 90 zlewni cząstkowych napięcia nie osiągnęły poziomu terenu w żadnej chwili czasu trwania opadu modelowego o  $C=100$  lat i  $t=180$  min (rys. 11). Sumaryczna objętość wylewów wyniosła 1305 m<sup>3</sup>. Większa część z tej objętości to ścieki deszczowe, które nie zmieściły się lub wylały się z sieci w początkowych odcinkach kanałów bocznych i kolektora. Największe symulowane wylania wystąpiły w węzłach J1 i J5 (po 60 m<sup>3</sup>). Maksymalny, modelowy strumień objętości ścieków deszczowych wynosił  $Q_m=12,3$  m<sup>3</sup>/s (rys. 12).

W przypadku symulacji ekstremalnego obciążenia zlewni deszczem modelowym Eulera (typ II) o  $C=100$  lat zidentyfikowano znaczne przeciążenie badanego systemu, bowiem dwa podstawowe parametry oceny (2) i (3) wskazały na dużą potrzebę jego adaptacji do zmian klimatu w przyszłości:  $SZS=0,59$  i  $OWW=25,8$  m<sup>3</sup>/ha (wg tab. 4). Należałoby więc wykonać dodatkowe analizy, na podstawie map GIS i ocen in-situ bądź symulacji komputerowych, w połączeniu z cyfrowym modelem terenu, przy uwzględnieniu kosztów proponowanych wariantów zabezpieczeń.



Rys. 11. Miejsca nadpiętrzeń ścieków deszczowych ponad poziom terenu (C=100 lat, t=180 min)  
 Fig. 11. Sites where storm water dams up above the ground level (C=100 years, t=180 min)



Rys. 12. Hydrogram przepływu ścieków deszczowych na ostatnim odcinku kolektora  
 Fig. 12. Hydrograph of storm water flow in the last interceptor section

## Podsumowanie

Budowa miejskich sieci kanalizacyjnych, zwłaszcza deszczowych, należy do najdroższych inwestycji infrastrukturalnych wciąż rozwijających się aglomeracji. Sieci te są zwykle projektowane na perspektywę co najmniej 50÷100 lat. Kanalizacja deszczowa powinna zabezpieczać przed skutkami ekstremalnych opadów, podtopień czy powodzi, powodujących znaczne straty gospodarcze i społeczne. Podkreśla to wagę i znaczenie cywilizacyjne problemu. Nie jest jednak możliwe osiągnięcie w pełni niezawodnego jej działania, zarówno obecnie, jak i w przyszłości, ze względu na losowy charakter opadów. Wylania z kanałów są więc nieuchronne, nawet przy zastosowaniu właściwych metod ich wymiarowania i weryfikacji hydrodynamicznych. Ważne jest zatem ograniczenie częstości wylewów (do wymagań PN-EN 752:2008), co można osiągnąć jedynie w przypadku bezpiecznie zaprojektowanych sieci kanalizacyjnych. Wymiarując kanały nie można lekceważyć prognozowanych scenariuszy zmian klimatycznych w perspektywie do 2100 r.

W celu bezpiecznego wymiarowania systemów kanalizacji deszczowej w Polsce, wg obecnych standardów (PN-EN 752:2008, DWA-A118:2006) i wzorców opadów maksymalnych (IDF, DDF), należy zmienić częstość występowania deszczów stosowanych do symulacji nadpiętrzeń do poziomu terenu. Proponuje się sprawdzać sieci na obecne deszcze o C=3, 5 i 10 lat, odpowiednio do rodzaju zagospodarowania terenu zlewni (tab. 3). Wówczas prawdopodobnie zachowane zostaną dopuszczalne obecnie częstości wylewów (tab. 1) także w przyszłości. Z uwagi na niepewność obecnych prognoz co do wysokości przyszłych opadów atmosferycznych, proponuje się dodatkowo

sprawdzać sieci na obecne deszcze ekstremalne o C=50, 100 i 100 lat, odpowiednio do zagospodarowania terenu (tab. 3). Ustalenia te są obecnie zalecane do projektowania kanalizacji deszczowej i ogólnospławnej w wielu krajach Europy (Belgia, Niemcy, Szwecja). Niezbędne są jednak dalsze badania, w tym zwłaszcza dotyczące uprawdopodobnienia się scenariusza znacznego wzrostu intensywności deszczów w przyszłości. Badania takie podjęto w Zakładzie Usuwania Ścieków w Politechnice Wrocławskiej.

*Badania zrealizowano ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność statutową Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej w 2012 r.*

## LITERATURA

1. M. KWIETNIEWSKI, J. RAK: Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z Zakresu Inżynierii nr 67, Warszawa 2010.
2. A. KOTOWSKI: Podstawy bezpiecznego wymiarowania odwodnień terenów. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2011.
3. PN-EN 752:2008: Drain and sewer systems outside buildings. PKN, Warszawa 2008.
4. W. DĄBROWSKI, B. DĄBROWSKA: Przewidywany wpływ zmian klimatu na dysfunkcję systemów odprowadzania ścieków. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2012, nr 1, ss. 17–20.
5. European Commission: Combating Climate Change: the EU leads the way. Europe on the Move Series, 2007.
6. M. SIEKMANN, J. PINNEKAMP: Indicator based strategy to adapt urban drainage systems in regard to the consequences caused by climate change. Proc of 12th International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre (Brazil) 2011.
7. F. GERSTENGARBE: Klimawandel in Ballungsräumen: Das Beispiel Ruhrgebiet. Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK). Vortrag im Bildungszentrum für die Entsorgungs- und Wasserwirtschaft GmbH, Essen, Germany 2009.
8. ExUS: Extremwertstatistische Untersuchung von Starkniederschlägen in NRW (ExUS) – Veränderung in Dauer, Intensität und Raum auf Basis beobachteter Ereignisse und Auswirkungen auf Eintretenswahrscheinlichkeit. Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen, Essen (Germany) 2010.
9. S. SOLOMON, D. QIN, M. MANNING, Z. CHEN, M. MARQUIS, K.B. AVERYT, M. TIGNOR, H.L. MILLER [Eds.]: IPCC. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Inter-governmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge (United Kingdom) and New York (USA) 2007.



10. P. WILLEMS: Revision of urban drainage design rules based on extrapolation of design rainfall statistics. Proc. of 12th Int. Conference on Urban Drainage, Porto Alegre (Brazil) 2011.
11. K. ARNBJERG-NIELSEN: Quantification of climate change impacts on extreme precipitation used for design of sewer systems. Proc of 11th International Conference on Urban Drainage, Edinburgh (Scotland) 2008.
12. V.T.V. NGUYEN, N. DESRAMAUT, T.D. NGUYEN: Estimation of urban design storms in consideration of GCM-based climate change scenarios. Proc. of International Conference on Water & Urban Development Paradigms: Towards an integration of engineering, design and management approaches, Leuven 2008, CRC Press, Taylor & Francis, pp. 347–356.
13. C. ONOF, K. ARNBJERG-NIELSEN: Quantification of anticipated future changes in high resolution design rainfall for urban areas. *Atmospheric Research* 2009, Vol. 92, No. 3, pp. 350–363.
14. M.A. SUNYER, H. MADSEN: A comparison of three weather generators for extreme rainfall simulation in climate change impact studies. Proc. of 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, St. Moritz (Switzerland) 2009.
15. J. OLSSON, U. WILLEN: Downscaling extreme RCA3-precipitation for urban hydrological applications. MISTRA-SWECIA 2010 (<http://www.mistra-swecia.se/>).
16. A.N. LARSEN, I.B. GREGORSEN, O.B. CHRISTENSEN, J.J. LINDE, P.S. MIKKELSEN: Potential future increase in extreme one-hour precipitation events over Europe due to climate change. *Water Science Technology* 2009, Vol. 60, pp. 2205–2216.
17. J. OLSSON, K. BERGGREN, M. OLOFSSON, M. VIKLANDER: Applying climate model precipitation scenarios for urban hydrological assessment: A case study in Kalmar City Sweden. *Atmospheric Research* 2009, Vol. 92, pp. 364–375.
18. P. STAUFER, G. LECKEBUSCH, J. PINNEKAMP: Die Ermittlung der relevanten Niederschlags-charakteristik für die Siedlungsentwässerung im Klimawandel. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2010 (Jg. 57), H. 12.
19. BLFU: Bemessung von Misch- und Regenwasserkanälen. Teil 1: Klimawandel und möglicher Anpassungsbedarf. Referat 66 des Bayerischen Landesamtes für Umwelt, Merkblatt Nr. 4.3/3, 2009.
20. Arbeitsblatt DWA-A118: Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. DWA, Hennef 2006.
21. A. BERNE, G. DELRIEU, J.D. CREUTIN, C. OBLÉD: Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. *Journal of Hydrology* 2004, Vol. 299, pp. 166–179.
22. T.G. SCHMITT: Kommentar zum Arbeitsblatt A 118 „Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen“. DWA, Hennef (Germany) 2000, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2007.
23. A. KOTOWSKI, B. KAŹMIERCZAK, A. DANCEWICZ: Modelowanie opadów do wymiarowania kanalizacji. Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Studia z Zakresu Inżynierii nr 68, Warszawa 2010.
24. Z. SULIGOWSKI: Zagospodarowanie wód opadowych. Szczególne problemy. *Forum Eksploatora* 2004, nr 3–4, ss. 24–27.
25. B. KAŹMIERCZAK, A. KOTOWSKI: Weryfikacja przepustowości kanalizacji deszczowej w modelowaniu hydrodynamicznym. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
26. B. KAŹMIERCZAK, A. KOTOWSKI, M. NOWAKOWSKA: Kanalizacja ogólnospławna w modelowaniu SWMM. *Inżynieria Morska i Geotechnika* 2012, nr 4, ss. 534–542.
27. M. SKOTNICKI, M. SOWIŃSKI: Analiza wpływu parametrów deszczu syntetycznego na maksymalny przepływ w kanałach deszczowych. Mat. III konf. „Infrastruktura Komunalna i Gospodarka Wodna INFRAEKO’2012”, Kraków 2012, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012, ss. 259–268.
28. P. LICZNAK, J. ŁOMOTOWSKI, D.E. RUPP: Random cascade driven rainfall disaggregation for urban hydrology: An evaluation of six models and a new generator. *Atmospheric Research* 2011, Vol. 99, pp. 563–578.
29. T.G. SCHMITT: Risikomanagement statt Sicherheitsversprechen. *Korrespondenz Abwasser, Abfall* 2011, (Jg. 58), H. 1, S. 40–49.
30. M. ZAWILSKI: Integracja zlewni zurbanizowanej w symulacji spływu ścieków opadowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2010, nr 6, ss. 28–32.
31. M. SKOTNICKI, M. SOWIŃSKI: Weryfikacja metody wyznaczania szerokości hydraulicznej zlewni cząstkowej na przykładzie wybranej zlewni miejskiej. W: Współczesne problemy Inżynierii i Ochrony Środowiska, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2009.
32. T.G. SCHMITT, M. THOMAS: Rechnerischer Nachweis der Überstauhäufigkeit auf der Basis von Modellregen und Starkregenserien. *Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall* 2000 (Jg. 47), Nr. 1, S. 63–69.
33. D. SŁYŚ, A. STEC: Hydrodynamic modeling of the combined sewage system for the city of Przemyśl. *Environment Protection Engineering* 2012, Vol. 38, No. 4, pp. 99–112.

**Kotowski, A., Kaźmierczak, B., Nowakowska, M. Analysis of the Drainage System Load in Case of the Predicted Increase in Frequency and Intensity of Rain due to Climate Change. *Ochrona Środowiska* 2013, Vol. 35, No. 1, pp. 25–32.**

**Abstract:** This paper presents hydraulic consequences of storm water drainage overload related to the so called high scenario of increase in rainfall intensity in the future. The storm water drainage was dimensioned using delay factor method (DFM) against the model of maximum precipitation for Wrocław. The simulations conducted using SWMM program led to conclusions that projected climate change scenarios until the year 2100 need to be taken into consideration while dimensioning the drains existing today.

In order to dimension safe storm water drainage system, according to PN-EN 752:2008 and DWA-A118:2006 standards as well as current maximum precipitation standards (IDF, DDF), it is necessary to increase rainfall frequencies to simulate maximum backwater occurrence to ground level. Then, the acceptable drain outflow frequencies will be observed also in the future. However, on account of uncertainty of current forecasts of future precipitations it is recommended to additionally test the systems for extreme rainfalls (C=50 and 100 years). The above arrangements are currently recommended for designing storm water drainage and combined sewage system in many European countries.

**Keywords:** Rainfall, stormwater drainage, climate change, hydrodynamic modeling, SWMM.