INFRASTRUKTURA I EKOLOGIA TERENÓW WIEJSKICH
INFRASTRUCTURE AND ECOLOGY OF RURAL AREAS

Nr 2/I/2012, POLSKA AKADEMIA NAUK, Oddział w Krakowie, s. 163–170
Komisja Technicznej Infrastruktury Wsi

Grzegorz Kaczor, Piotr Bugajski

ZASTOSOWANIE METODY RUCHOMEGO MINIMUM DO OBLICZENIA OBJĘTOŚCI WÓD INFILTRACYJNYCH I PRZYPADKOWYCH W KANALIZACJI SANITARNEJ

THE CALCULATION OF INFILTRATION AND INFLOW VOLUME WITHIN SANITARY SEWER SYSTEMS BY USING THE MOVING MINIMUM METHOD

Streszczenie

Celem badań było ustalenie wielkości dopływu wód infiltracyjnych oraz przypadkowych do wybranej kanalizacji sanitarnej przy wykorzystaniu metody ruchomego minimum. Poddany badaniom system kanalizacyjny zlokalizowany jest w powiecie krakowskim w województwie małopolskim. Dopływ wód obcych do kanalizacji badano w wieloleciu 2008–2011. Na podstawie analizy wyników badań, uzyskanych metodą ruchomego minimum ustalono, że udział wód infiltracyjnych w rocznych dopływach wód zanieczyszczonych do kanalizacji wynosił od 19,0 do 20,7%, natomiast udział wód przypadkowych od 19,5 do 31,4%. Największe dopływy wód przypadkowych w analizowanym wieloleciu wystąpiły w roku 2010 (30 210 m^3). Był to rok, który ze względu na roczną sumę opadów oceniany był jako bardzo wilgotny. Najniższe dopływy do kanalizacji wód przypadkowych (15 053 m^3) wystąpiły w roku 2011 (rok bardzo suchy). Najwyższe dopływy wód infiltracyjnych (20 675 m^3) wystąpiły natomiast w roku 2009 (rok suchy), a najniższe (14 805 m^3) w roku 2011. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że w przypadku analizowanego systemu kanalizacyjnego występuje silna zależność pomiędzy roczną sumą opadów atmosferycznych i roczną objętością wód obcych dopływających do kolektorów ściekowych. Przeprowadzone badania wykazały, że metoda ruchomego minimum może być z powodzeniem stosowana do ustalania objętości wód infiltracyjnych i przypadkowych dopływających do kanalizacji sanitarnej.

Słowa kluczowe: ścieki, kanalizacja, wody infiltracyjne i przypadkowe, metoda ruchomego minimum

Summary

The aim of the study was to determine the volume of infiltration and inflow within a selected sanitary sewer system by using the moving minimum method. The examined sewer system is located in Kraków County, Lesser Poland Voivodeship. Parasite water inflow into the sewer system was studied in the multiannual period of 2008–2011. Based on the analysis of the research results, obtained using the moving minimum method, it was determined that the infiltration fraction in the annual inflow of contaminated water into the sewer system was from 19.0 to 20.7%, while the fraction of extraneous water - from 19.5 to 31.4%. The largest inflows of extraneous water in the analyzed multiannual period occurred in 2010 (30 210 m^3). Due to high total annual precipitation this year was evaluated as very wet. The lowest inflows of extraneous water to the sewer system (15 053 m^3) were observed in 2011 (extreme dry year). On the other hand, the largest inflow of infiltration water (20 675 m^3) occurred in 2009 (dry year) and the lowest (14 805 m^3) - in 2011. The performed research demonstrated a strong correlation between the annual amount of precipitation and the annual volume of parasite water flowing into sewer interceptors in the analyzed sewer system. The study showed that the moving minimum method can be successfully applied to determine the volume of infiltration and inflow within sanitary sewer systems.

Key words: *sewage, sewer system, infiltration and inflow, moving minimum method*

WSTĘP

Głównym celem kanalizacji sanitarnej jest zebranie i odprowadzenie z jednostki osadniczej ścieków powstałych w wyniku czynności życiowych i bytowania mieszkańców, oraz ścieków przemysłowych i przetwórczych. W trakcie eksploatacji do sieci kanalizacyjnej przedostają się często także wody, które nie powinny się w niej znaleźć. Są to głównie wody infiltracyjne i przypadkowe, nazywane „ściekami pozornymi" lub „wodami obcymi" [Erb 1999]. Wody infiltracyjne to przede wszystkim wody gruntowe, dopływające do kanalizacji poprzez uszkodzenia ścian kanałów, studni kanalizacyjnych oraz nieszczelności połączeń przewodów [Łomotowski , Szpindor 1999, Heidrich, Witkowski 2005, Franz i in. 2007, Kaczor , Przebinda 2009, Kuliczkowski , Lisowska 2009]. Dopływ wód infiltracyjnych do kanalizacji następuje wtedy, gdy przewody ułożone są w gruncie poniżej zwierciadła wody gruntowej. Intensywność infiltracji jest wprost proporcjonalna do wysokości słupa wody gruntowej nad osią przewodu kanalizacyjnego [Madryas i in. 2010]. Infiltracja wód gruntowych do kanalizacji nasila się po intensywnych opadach deszczu i jest największa wczesną wiosną i późną jesienią ze względu na wysokie położenie zwierciadła wód gruntowych [Błażejewski 2003].

Wody przypadkowe to najczęściej wody opadowe, przelewające się przez otwory włazowe lub wentylacyjne do wnętrza studni kanalizacyjnych [Kotowski

2006, Kaczor 2009] oraz nielegalnie odprowadzane ze spustów rynien dachowych i wpustów podwórzowych do kanalizacji bytowej lub przemysłowej [Suligowski 2000]. Do wód przypadkowych zalicza się także, kierowane do kanalizacji w sposób zamierzony lub niezamierzony, wody odprowadzane podczas wykonywanych prac budowlanych lub remontowych, wody chłodnicze, a także wody przedostające się do kanalizacji przez otwory we włazach studzienek po spłukiwaniu nawierzchni ulic lub myciu pojazdów.

Wody infiltracyjne i przypadkowe wywierają podobny wpływ na funkcjonowanie sieci kanalizacyjnej oraz oczyszczalni ścieków. Po opadach deszczu lub intensywnych roztopach śniegu wywołują one przeciążenia hydrauliczne kanalizacji, przepompowni oraz oczyszczalni ścieków, rozcieńczają zanieczyszczenia w ściekach surowych, powodują przechłodzenie ścieków w bioreaktorach w okresie wiosennym, zagrażają wynoszeniem osadu z reaktorów biologicznych oraz osadników wtórnych przy podwyższonych przepływach [Michalska , Pecher 2000, Kaczor , Satora 2003, Pecher i in. 2004, Kaczor , Bergel 2008].

Poprawne oszacowanie ilości wód obcych dopływających do kanalizacji sanitarnej nie jest zadaniem prostym. Szczególne trudności występują przy określaniu natężenia dopływu do kanalizacji wód infiltracyjnych. Najczęściej ilość ścieków pozornych ustalana jest na podstawie rocznego bilansu zużytej wody oraz ilości ścieków odpływających z kanalizacji. W bilansie tym roczne zużycie wody pomniejszane jest zwykle o 10% na cele bezzwrotne, takie jak podlewanie roślin, mycie pojazdów, spłukiwanie podwórek i chodników, w wyniku których woda nie trafia do kanalizacji sanitarnej.

W literaturze naukowej opisane jest 12 metod ilościowych oraz 3 metody chemiczne, wykorzystywane do szacowania objętości wód obcych w kanalizacji [De Bénédittis 2004]. Najbardziej rozpowszechnioną oraz najczęściej stosowaną metodą obliczania ilości wód infiltracyjnych i przypadkowych w Niemczech, Holandii oraz we Francji jest metoda ruchomego minimum. Metoda ta została opracowana na Uniwersytecie Karlsruhe, a opisana w literaturze przez Weissa, Brombacha i Hallera [2002] w ramach badań dopływu wód obcych do kanalizacji ogólnospławnej. W metodzie tej, podobnie jak pozostałych metodach ilościowych, zastosowane są pewne uproszczenia, jednak uzyskane wyniki, według badań różnych autorów, są w dużym stopniu bliskie rzeczywistym.

CEL, ZAKRES I METODYKA BADAŃ

Celem badań było ustalenie wielkości dopływu wód infiltracyjnych oraz przypadkowych do wybranej kanalizacji sanitarnej przy wykorzystaniu metody ruchomego minimum. Poddany badaniom system kanalizacyjny zlokalizowany jest w powiecie krakowskim w województwie małopolskim. Sieć kanalizacyjna wykonana jest z rur kamionkowych o średnicach od 200 do 300 mm. Łączna długość kolektorów ściekowych oraz sięgaczy (bez przykanalików) wynosi 10

km. Do kanalizacji podłączonych jest 330 budynków zamieszkałych przez 1485 mieszkańców. Ścieki z kanalizacji odprowadzane są do zbiorczej mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków o przepustowości hydraulicznej 225 $m^3 \cdot d^{-1}$. Układ biologiczny oczyszczalni oparty jest na reaktorze przepływowym typu A2O. Podczas pogody bezdeszczowej średni dobowy dopływ ścieków do oczyszczalni wynosił 189 $m^3 \cdot d^{-1}$, zatem obiekt w okresie badań obciążony był hydraulicznie w 84 procentach.

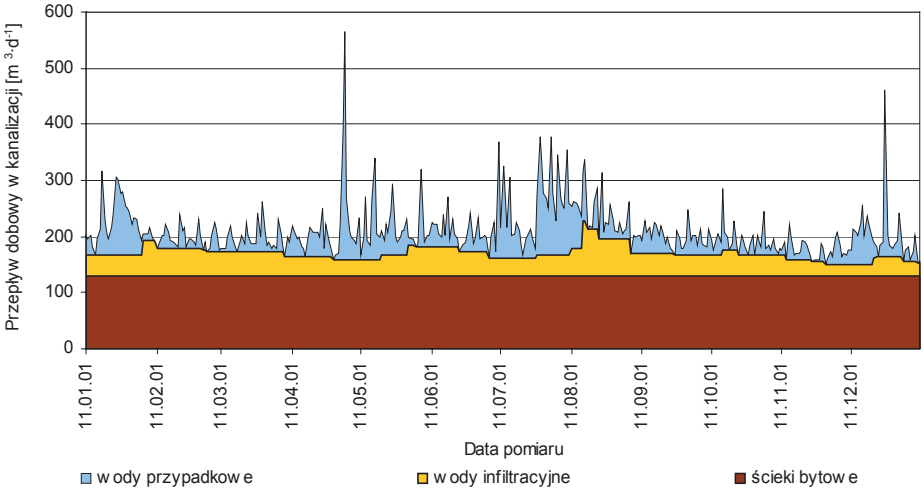
Wstępna analiza przepływów ścieków wykazała, że przy intensywnych opadach deszczu natężenie ich dopływu do kanalizacji oraz oczyszczalni ścieków ulega znacznemu podwyższeniu. Do badań wykorzystano zarchiwizowane wartości dobowych odpływów ścieków z oczyszczalni w terminie od 01.01.2008 do 31.12.2011r. Przepływy mierzono za pomocą sondy ultradźwiękowej, zainstalowanej nad przelewem trójkątnym, w korycie ścieków oczyszczonych. Rzeczywistą objętość ścieków bytowych, odprowadzanych do kanalizacji, ustalono na podstawie rocznego zużycia wody przez użytkowników sieci w latach 2008–2011. Po uwzględnieniu zużycia bezzwrotnego średnie jednostkowe zużycie wody, w analizowanym okresie, wynosiło 84,3 $dm^3 \cdot M^{-1} \cdot d^{-1}$. W metodzie ruchomego minimum przyjmuje się, że dobowa ilość ścieków bytowych odprowadzana do kanalizacji jest stała w ciągu całego roku, czyli nie podlega wahaniom sezonowym.

Zastosowana do obliczeń metoda ruchomego minimum uwzględnia roczne wahania dopływu do kanalizacji wód infiltracyjnych, wynikające z prognozowanych zmian wysokości położenia zwierciadła wody gruntowej. Wahania te wywołane są opadami deszczu oraz występują z pewnym opóźnieniem w odniesieniu do doby, w której faktycznie wystąpił opad. Dane wyjściowe niezbędne dla omawianej metody obejmują dobowe przepływy ścieków oraz roczne zużycie wody przez mieszkańców korzystających z kanalizacji. We wstępnej analizie danych, należy z ciągu obserwacji wykluczyć przepływy dobowe mniejsze od ustalonego dobowego zużycia wody przez użytkowników kanalizacji. Należy przyjąć, że odrzucone przepływy niskie mogą być następstwem czynników losowych takich jak: awarie pomp, przerwy w dostawie energii elektrycznej, prace konserwacyjne lub remontowe.

Autorzy omawianej metody założyli, że w ciągu roku, w dowolnie wybranym przedziale czasowym wynoszącym 21 następujących po sobie kolejnych dób, wystąpi przynajmniej raz okres bezdeszczowy. Podczas pogody bezdeszczowej dopływy do kanalizacji będą wyłącznie mieszaniną ścieków bytowych oraz ewentualnie wód infiltracyjnych. W założeniach teoretycznych omawianej metody przyjęto, że warunek ten będzie spełniał przepływ minimalny z przedziału 21 dobowego.

W metodzie ruchomego minimum (rys. 1) linia obrazująca dobowe dopływy do kanalizacji wód infiltracyjnych, powstaje przez połączenie wartości minimalnych z kolejnych przedziałów 21-dobowych. Pierwszy przedział rozpo-

czyna się 01.01.2011 a kończy 21.01.2012. Dla tego przedziału ustala się wartość minimalną dobowego przepływu ścieków, która daje początek omawianej linii. Przedział kolejny musi być przesunięty o jedną dobę, czyli rozpoczyna się 02.02.2012, a kończy 22.01.2012, wartość minimalna przepływu z tego przedziału wyznacza kolejny punkt linii. Czynności te powtarza się, aż do włączenia do przedziału ostatniego dnia analizowanego roku. Na rysunku 1 różnymi kolorami zaznaczono pola wykresu obrazujące roczne dopływy do analizowanej kanalizacji wód infiltracyjnych, przypadkowych oraz ścieków bytowych.



Rysunek 1. Dobowe przepływy w kanalizacji w roku 2011 wód infiltracyjnych, przypadkowych oraz ścieków bytowych ustalone metodą ruchomego minimum
Figure 1. Daily flows of infiltration, inflow and domestic sewage within the sewer system in 2011, determined using the moving minimum method

Na podstawie obliczonych metodą ruchomego minimum rocznych objętości wód infiltracyjnych i przypadkowych ustalono ich udział w rocznej objętości wód zanieczyszczonych dopływających do kanalizacji według wzorów:

$$U_{\inf} = \frac{Q_{\inf}}{Q} \cdot 100 \tag{1}$$

$$U_{przyp} = \frac{Q_{przyp}}{Q} \cdot 100 \tag{2}$$

gdzie:

U_{inf} – udział wód infiltracyjnych w rocznej objętości wód zanieczyszczonych dopływających do kanalizacji, %,

U_{przyp} – udział wód przypadkowych w rocznej objętości wód zanieczyszczonych dopływających do kanalizacji, %,

Q_{inf} – roczna objętość wód infiltracyjnych dopływających do kanalizacji, m^3,

Q_{przyp} – roczna objętość wód przypadkowych dopływających do kanalizacji, m^3,

Q – roczna objętość wód zanieczyszczonych (ścieków bytowych i wód obcych) dopływających do kanalizacji, m^3.

Dopływy do kanalizacji wód obcych zależne są od opadów atmosferycznych. W niniejszej pracy wykorzystano sumy roczne opadów atmosferycznych, mierzone na terenie zlewni kanalizacyjnej, za pomocą korytkowego czujnika opadu połączonego z rejestratorem danych. Wilgotność poszczególnych lat sklasyfikowano na podstawie kryterium Kaczorowskiej [1962]. Rok 2008 oceniono jako normalny, 2009 – wilgotny, 2010 – skrajnie wilgotny, 2011 – bardzo suchy.

ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Przykładowe wyniki obliczeń wód obcych metodą ruchomego minimum przedstawiono w postaci graficznej na rysunku 1. Rok 2011 ze względu na roczną sumę opadów, według wg kryterium Kaczorowskiej, można zaliczyć do lat bardzo suchych. Zmierzona suma opadów dla analizowanej zlewni kanalizacyjnej wyniosła 492 mm. Szczególnie suchym miesiącem w tym roku był listopad. Dopływy do kanalizacji wód infiltracyjnych, ustalone za pomocą metody ruchomego minimum, są najniższe właśnie w tym miesiącu. Można zatem stwierdzić, że zachodzi zgodność prognozowania ze stanem rzeczywistym. Najwyższe dopływy wód przypadkowych miały miejsce 25 kwietnia oraz w okresie od 18 lipca do 7 sierpnia. Widoczny jest także wzrost dopływu wód przypadkowych 16 grudnia, kiedy wystąpił intensywny opad i natychmiastowe topnienie śniegu.

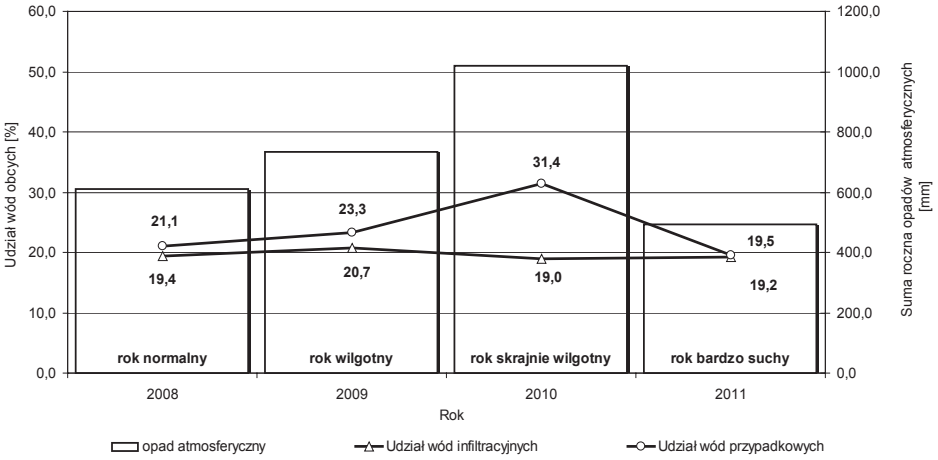
Na podobnej zasadzie wykonano obliczenia dla roku 2010, 2009 i 2008. Obliczone, za pomocą metody ruchomego minimum, objętości poszczególnych strumieni wód dopływających do kanalizacji w latach 2008–2012 zestawiono w tabeli 1. Największe dopływy wód przypadkowych w analizowany wieloleciu wystąpiły w roku 2010 (30 210 m^3). Był to rok, który ze względu na roczną sumę opadów oceniany był jako skrajnie wilgotny. Najniższe dopływy do kanalizacji wód przypadkowych (15 053 m^3) wystąpiły w roku 2011 (rok bardzo suchy). Najwyższe dopływy wód infiltracyjnych (20 675 m^3) wystąpiły natomiast w roku 2009 (rok wilgotny), a najniższe (14 805 m^3) w roku 2011.

Tabela 1. Roczne objętości ścieków bytowych, wód infiltracyjnych oraz wód przypadkowych dopływających do badanej kanalizacji w latach 2008–2009 obliczone metodą ruchomego minimum

Table 1. The annual volume of domestic sewage, infiltration and inflow within the studied sewer system in 2008–2009 calculated using the moving minimum method

Parametr	Jednostka	Wartość parametru w roku			
		2008	2009	2010	2011
Objętość wód zanieczyszczonych (ścieków i wód obcych łącznie)	m^3	79554	84176	95087	77014
Objętość ścieków bytowych	m^3	45655	43904	46072	47156
Objętość wód infiltracyjnych	m^3	17101	20675	18805	14805
Objętość wód przypadkowych	m^3	16798	19597	30210	15053

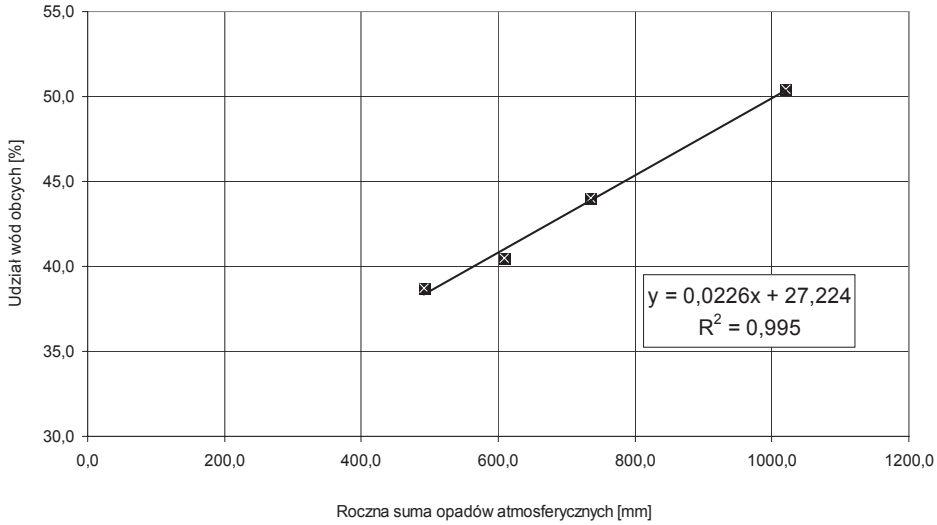
Na rysunku 2 zobrazowano udziały wód infiltracyjnych oraz wód przypadkowych na tle sum rocznych opadów atmosferycznych. Udział wód infiltracyjnych w rocznej objętości wód zanieczyszczonych dopływających do kanalizacji zawierał się w przedziale od 19,0 do 20,7% w zależności od wilgotności roku. Zmiany udziału tych wód w poszczególnych latach nie przekraczały 2%. Udział wód przypadkowych w większym stopniu był związany z wilgotnością roku i zmieniał się w zakresie od 19,5% w roku 2011 do 31,4% w roku 2010. Wartość udziału wód przypadkowych, w zależności od sumy rocznej opadów, różniła się maksymalnie o blisko 12%.



Rysunek 2. Udział wód infiltracyjnych oraz przypadkowych w rocznych dopływach wód zanieczyszczonych do kanalizacji w poszczególnych latach na tle sumy rocznej opadów atmosferycznych

Figure 2. Fraction of infiltration and inflow in the annual amount of contaminated water within the sewer system in each year compared to the annual amount of precipitation

Dla potwierdzenia tezy, że roczna objętość wód obcych, dopływających do analizowanej kanalizacji, zależna jest od rocznej sumy opadów atmosferycznych, wykonano wykres regresji przedstawiony na rysunku 3. Zależność pomiędzy badanymi parametrami doskonale opisuje funkcja liniowa w postaci $y = 0{,}0226 \cdot x + 27{,}224$ (współczynnik determinacji r^2 dla analizowanej zależności wyniósł 0,995). Uzyskany w analizie wysoki stopień skorelowania pomiędzy analizowanymi parametrami wskazuje, że głównym źródłem wód obcych w badanym systemie kanalizacyjnym są wody przypadkowe, pochodzące najprawdopodobniej z nielegalnych podłączeń rynien dachowych do kolektorów sanitarnych oraz infiltracja wód gruntowych do przewodów ułożonych w gruncie nawodnionym.



Rysunek 3. Wpływ rocznej sumy opadów atmosferycznych na procentowy udział wód obcych w rocznych dopływach wód zanieczyszczonych do analizowanego systemu kanalizacyjnego

Figure 3. The effect of total annual precipitation on the percentage of parasite water in the annual contaminated water inflow into the studied sewer system

Uzyskane wyniki wskazują, że niezbędne jest zbadanie analizowanej sieci kanalizacyjnej pod kątem nielegalnych włączeń wylotów rynien dachowych. Wiele takich nieprawidłowości można zidentyfikować metodą zadymiania przyłączy kanalizacyjnych. W przypadku nie uzyskania satysfakcjonujących rezultatów, należy przeprowadzić przegląd sieci metodą video. Raport z prze-