

Algorytm postępowania przy wyborze lokalizacji punktów pomiarowych w kanalizacji grawitacyjnej

Algorithm for selecting the location of measurement points in gravity sewerage

BOŻENA GIL

DOI 10.36119/15.2021.2.5

Monitoring przepływu ścieków ma coraz większe znaczenie w zarządzaniu siecią kanalizacyjną. Wśród urządzeń pomiarowych popularnością cieszą się obecnie urządzenia, które do obliczania przepływu wykorzystują metody pośrednie (tj. jednoczesny pomiar napętnienia i prędkości w kanale), pozwalając na codzienną kontrolę pracy sieci kanalizacyjnej bez konieczności jej przebudowy.

W literaturze można znaleźć wiele publikacji, które opisują właściwe warunki techniczne montażu (np. poprzez wybór kanałów prostych o odpowiedniej długości, z jednolitym przekrojem i spadkiem, bez elementów zakłócających przepływ). Są to istotne zalecenia, ale limitują one wybór punktu pomiarowego do takich odcinków kanalizacji, w których w całym zakresie zmienności przepływów ścieków, panują stabilne warunki hydrauliczne.

W praktyce jednak, bez przebudowy sieci, która nie zawsze jest możliwa, taka sytuacja jest rzadkością. Na istniejącej sieci, na odcinkach, które wymagają opomiarowania, zalecane warunki mogą nie występować.

W rezultacie, będą się tam pojawiać rzadkie i przejściowe zakłócenia przepływu (przepływy ekstremalne – cofki, podtopienia, przepływy turbulentyne etc.), które jednak w istotny sposób wpływają na wyniki pomiarów.

W dodatku, ponieważ wybór miejsca montażu urządzeń oparty jest z reguły na krótkotrwałych pomiarach i analizach, ww. zakłócenia, a w ich następstwie błędy pomiaru, mogą w ogóle nie zostać wykryte.

W rezultacie konieczne jest opracowanie metod (nie wymagających wydłużania okresu pomiarów wstępnych), które umożliwią wykrycie tych zakłóceń.

Aby je wykryć, konieczna jest matematyczna analiza hydrauliczna przepływu. Analiza ta powinna być przeprowadzona na podstawie wykonanych pomiarów kontrolnych.

Wykorzystanie symulacji przepływów ścieków dla różnych scenariuszy pozwala na określenie prawdopodobieństwa wystąpienia warunków hydraulicznych odbiegających od warunków stabilnych. Wyniki tej analizy mogą być wykorzystane do wyboru, innego, lepszego punktu pomiarowego (gdy to możliwe), wskazania i usunięcia z sieci czynników zakłócających, opracowania instrukcji nadzoru i konserwacji punktu pomiarowego lub/i wprowadzenia korekt do algorytmów pomiarowych (redukujących wpływ anomalii na wyniki).

Dzięki zastosowaniu analizy hydraulicznej a następnie podjęciu ww. działań możliwe jest istotne poprawienie wiarygodności wyników pomiarów przepływu ścieków w systemach kanalizacyjnych.

Słowa kluczowe: sieci kanalizacyjne, pomiar przepływu, lokalizacja punktu pomiarowego, analiza hydrauliczna, model hydrauliczny

Wastewater flow monitoring is increasingly important in the management of the sewer network. Among the measuring devices, the devices that are using indirect methods (i.e. simultaneous measurement of the filling and speed in the sewer) to calculate the flow are becoming increasingly popular. This type of equipment allows for everyday control of the operation of the sewage network without the need to rebuild it to install the measuring devices. In such cases, the choice of the location of the measuring point is at least as important as the choice of a device. There are many publications in the literature that focus on the description of technical conditions for the assembly of measuring devices (e.g. by providing appropriate length of straight channels, maintaining a uniform cross-section and slope, elimination of flow disturbing elements). These are very important technical recommendations. They allow for the proper selection of the measurement point, but only when there are stable hydraulic conditions in the sewerage system, both for dry and rainy weather.

In practice, however, when choosing a measurement point, errors are often made by not taking into account temporary phenomena (such as temporary flow disturbances) which appear in the network only under certain conditions. These phenomena can have a significant impact on the overall measurement results. When a measurement point is installed on an existing sewer network, without reconstruction of the sewer, such temporary flow disturbances are highly probable.

To detect these disturbances, a hydraulic flow analysis is necessary. This analysis should be carried out on the basis of test measurements. These measurements should be carried out for short periods of time and, once the anomaly has been detected, the analysis extended to include an analysis of the network's operating conditions over the entire range of flow variations. This serves to determine the probability with which hydraulic conditions, deviating

dr inż. Bożena Gil – <https://orcid.org/0000-0003-0690-8709>; Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Gliwice.
Adres do korespondencji/ Corresponding author: bozena.gil@polsl.pl

from the stable conditions, will occur. This analysis can be performed on the basis of a hydraulic model made for a fragment of a sewer network.

The results of this analysis can be used to: select, another better measurement point, indicate and remove of disturbing factors from the network, introduce corrections to measurement algorithms (taking into account the influence of the anomaly), develop instructions for supervision and maintenance of the measurement point. All these elements are aimed at improving the reliability of sewage flow measurement results in sewage systems.

Keywords: sewage networks, flow measurement, measuring point location, hydraulic analysis, hydraulic model

Wprowadzenie

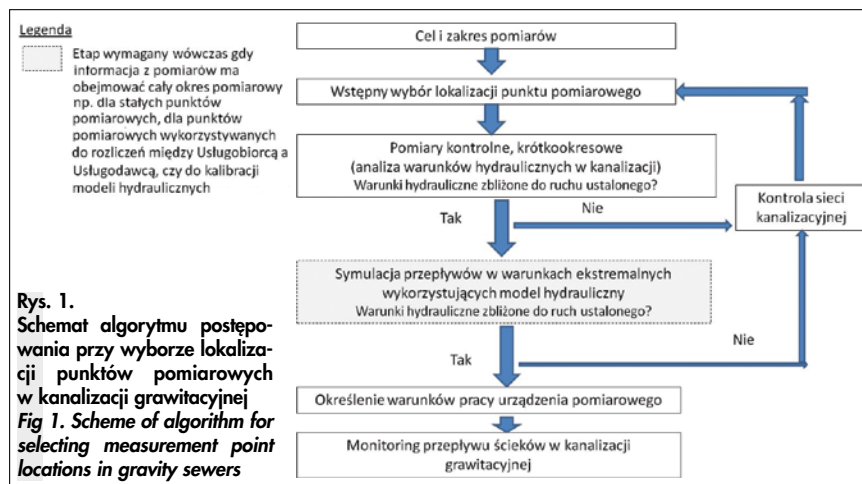
W obliczu zachodzących zmian, zarówno w obrębie tkanki miejskiej (takich jak przenoszenie funkcji z centrum miast na rozrastające się chaotycznie obrzeża) jak i zmian w zakresie klimatu (takich jak wzrost częstotliwości ekstremalnych zjawisk meteorologicznych) zarządzanie kanalizacją wymaga wprowadzenia monitoringu hydraulicznego sieci.

W przypadku kanalizacji grawitacyjnej monitoring parametrów hydraulicznych wiąże się z pomiarem napełnienia lub przepływu. Do tego typu monitoringu można wykorzystać wiele rozwiązań technicznych [1, 2, 3, 4, 5]. Wśród urządzeń pomiarowych, coraz większą popularnością cieszą się urządzenia stosujące do obliczenia przepływu metodę pośrednią (polegającą na równoczesnym pomiarze napełnienia i prędkości w kanale) [4, 7]. W tej grupie urządzeń są zarówno przepływomierze ultradźwiękowe [9, 10, 11, 12, 13], radarowe [14, 15, 16] jak i laserowe [17]. Zastosowanie tego typu przepływomierzy pozwala na bieżącą kontrolę pracy sieci kanalizacji bez konieczności jej przebudowy. W takich przypadkach istotny jest zarówno wybór urządzenia pomiarowego jak i wybór lokalizacji punktu pomiarowego [4, 7, 8, 9].

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie algorytmu weryfikującego lokalizację punktu pomiaru przepływu ścieków w przypadku zastosowania przepływomierzy, które do obliczenia przepływu ścieków wykorzystują równoczesny pomiar napełnienia i prędkości. Artykuł nie skupia się na opisie i charakterystyce urządzeń pomiarowych (co jest przedmiotem wielu publikacji [1, 2, 3, 4, 5, 9]) czy zasadach doboru urządzeń pomiarowych [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19], ale wyłącznie na działaniach służących sprawdzeniu czy wybrany punkt na sieci będzie dawał wiarygodne wyniki pomiarów.

Wstępne warunki lokalizacji punktów pomiarowych

System monitoringu hydraulicznego ma za zadanie dostarczyć informacje



Rys. 1. Schemat algorytmu postępowania przy wyborze lokalizacji punktów pomiarowych w kanalizacji grawitacyjnej
Fig 1. Scheme of algorithm for selecting measurement point locations in gravity sewers

pozwalające ocenić wydajności sieci oraz informacje o warunkach hydraulicznych panujących w kanale.

Ogólny algorytm postępowania podczas lokalizacji punktu pomiarowego można ująć w postaci schematu blokowego, co przedstawia rys. 1.

Pierwszym, kluczowym etapem podczas lokalizacji punktu pomiarowego jest jasne sformułowanie **celu i określenie zakresu pomiaru**. Często ten etap przygotowania do pomiarów jest pomijany, jednak to on pozwala na sprecyzowanie jaki rodzaj informacji chcemy uzyskać. Przykładowo w danym punkcie pomiarowym:

- w **kanalizacji sanitarnej** zarządzającego siecią może interesować zakres przepływów w pogodzie suchej i pogodzie deszczowej, pozwalający na określenie udziału wód przypadkowych a w skrajnych przypadkach szacowanie zagrożenia podtopienia w zależności od dobowej wysokości opadów,
- w **kanalizacji deszczowej** lub **ogólnospławnej** (ze względu na możliwość wystąpienia opadów nawalnych lub ulewnych a tym samym prognozowane zmiany obciążenia) zarządzającego siecią może interesować wyłącznie stopień wypełnienia kanału i możliwość wystąpienia spiętrzeń oraz nadpiętrzeń lub może go interesować lokalizacja punktów na sieci gdzie może wystąpić zagrożenie wylania lub wystąpienia zjawiska cofki,
- w przypadku **rozliczeń pomiędzy gminami / przedsiębiorstwami** kluczowa dla zarządzającego będzie stabilność pomiaru, niepewność pomiaru oraz możliwość weryfikacji pomiarów urządzenia pomiarowego. Dodatkowym zagadnieniem w tym przypadku jest dobór metod pozwalających na szacowanie wartości przepływów w przypadku braków w pomiarach, można w tym przypadku wykorzystać dane historyczne z danego punktu pomiarowego lub określić wartość przepływu na podstawie danych z innych punktów pomiarowych,
- dla potrzeb weryfikacji i kalibracji modelu hydraulicznego konieczny jest wybór referencyjnych punktów pomiarowych uwzględniający nie tylko zmienność przepływów w danym miejscu, ale również zmienność przepływów w układzie przestrzennym. Ważnym elementem jest wtedy również określenie niepewności pomiaru, która będzie miała następnie wpływ na stopień dopasowania modelu, a później na wiarygodność modelu. Stopień dopasowania modelu ma kluczowe znaczenie przy wykorzystaniu symulacji przepływów do podejmowania decyzji związanych z nowymi inwestycjami. Jak wynika z powyższych przykładów, praktycznie nigdy nie oczekujemy od punktu pomiarowego dostarczenia wszystkich możliwych do pomierzenia/ustalenia typów danych. Wybranie rodzajów

danych, które są istotne w danym przypadku pozwala na rozszerzenie puli potencjalnych miejsc pomiaru, lub dopuszczenie takich ułomności punktu, które nie będą miały wpływu na mierzone wartości (lub które da się skorygować obliczeniowo).

Kolejnym etapem postępowania jest **wstępny wybór lokalizacji punktu pomiarowego**. Na tym etapie wykorzystywane są ogólne zalecenia dotyczące lokalizacji urządzeń pomiarowych w korytach otwartych, wynikające z warunków hydraulicznych. Najkorzystniejsze warunki pomiaru są wówczas gdy przepływ w punkcie pomiarowym zbliżony jest do przepływu ustalonego, czyli gdy zwierciadło ścieków jest równoległe do dna kanału [4, 6, 18]. W tym przypadku należy zwrócić szczególną uwagę na [1, 4, 5, 8, 19]:

- wybór prostoliniowego odcinka kanalizacji grawitacyjnej o jednolitym, symetrycznym przekroju poprzecznym, zarówno przed jak i za punktem pomiarowym (długości tych odcinków określone są indywidualnie przez producentów urządzeń pomiarowych [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17]) tak, aby ograniczyć do minimum zaburzenia rozkładu prędkości w kanale,
- wszystkie elementy, które mogą zaburzać przepływ. Na odcinku pomiarowym niedopuszczalne są np.: zmiany spadku, montaż czujnika bezpośrednio przed lub za uskokami dna, lub przed i za elementami wbudowanymi lub bocznymi dopływami;
- konieczność unikania koryta o dużym spadku (liczba Frouda nie powinna przewyższać wartości 0,5)].

Powyższe uwarunkowania są jak widać szeroko opisywane w literaturze przedmiotu. Należy zaznaczyć że przy wyborze lokalizacji punktu pomiarowego wymagania związane z warunkami hydraulicznymi nie są jedynym kryterium wyboru. Ważnym aspektem są warunki związane z bezpieczeństwem montażu, konserwacji i demontażu urządzeń pomiarowych (wynikające np. z lokalizacji punktu w pasie drogi lub występowania problemów z odorami w kanalizacji). Dodatkowym aspektem analizy, który należy uwzględnić podczas lokalizacji punktu pomiarowego, jest sposób zasilania urządzeń pomiarowych oraz możliwość transmisji danych.

Pomiary kontrolne krótkookresowe w celu oceny poprawności lokalizacji punktu pomiarowego

Następnym etapem lokalizacji pomiaru jest wykonanie **pomiarów kontrolnych**

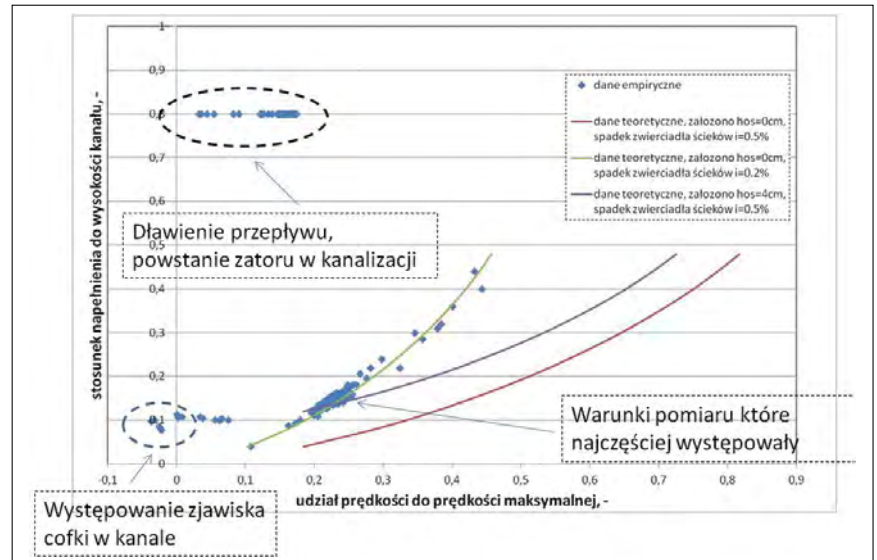
krótkookresowych. Zadaniem pomiarów kontrolnych jest:

- określenie zakresu pomiaru napętnienia, prędkości i tym samym przepływu w kanalizacji, co pozwala zweryfikować poprawność doboru urządzenia pomiarowego,
- zweryfikowanie warunków hydraulicznych panujących w sieci na podstawie analizy związku pomiędzy natężeniem przepływu ścieków a napętnieniem w kanale [7, 18, 22, 23].

Analiza podstawowych parametrów statystycznych (wartość minimalna, maksy-

na, w której przedstawiona jest zależność pomiędzy prędkością (lub natężeniem przepływu ścieków) a napętnieniem w kanale (w hydrologii zależność ta jest powszechnie stosowana jako krzywa przepływu), co przedstawia rys. 2.

W celu określenia warunków, jakie panują w punkcie pomiarowym, niezbędne jest porównanie wartości empirycznych z wartościami teoretycznymi określonymi na podstawie formuły Chezy-Manninga [6, 18, 23]. W przypadku przedstawionym na rys. 2, porównanie wartości empirycznych z wartościami teoretycznymi wykazało



Rys. 2.

Przykład 1 analizy hydraulicznej dla wybranego punktu pomiarowego w kanalizacji sanitarnej, dla kanału betonowego DN 500, spadek dna kanału 0,5%, spadek zwierciadła ścieków 0,2%, pomiary od 1.08.2019 do 21.08.2019 r.

Fig 2. Example 1 of hydraulic analysis for a selected measurement point in a sanitary sewer, for a concrete channel DN 500, slope of channel bottom 0.5%, wastewater table slope 0.2%, measurements from 1.08.2019 to 21.08.2019 r.

malna, współczynnik zmienności oraz skośność) pozwala w pierwszej kolejności na weryfikację poprawności wyboru urządzeń pomiarowych. Każde urządzenie pomiarowe ma bowiem określony zakres wartości pomiaru, w którym zalecane jest wykonanie pomiarów [10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17].

Na tym etapie ważne jest zwrócenie uwagi, aby przez większą część czasu pomiarów występował w kanale swobodny przepływ ścieków (stopień wypełnienia kanału powinien być mniejszy niż 80% całkowitej wysokości kanału). W przypadku występowania znacznego wypełnienia kanału [7] może wystąpić dławienie przepływu ścieków w przewodzie. Jest to związane z nagłym i gwałtownym przejściem z przepływu grawitacyjnego do przepływu ciśnieniowego.

Do oceny warunków hydraulicznych panujących w danym punkcie pomiarowym można wykorzystać metodę graficz-

różnicę między spadkiem zwierciadła ścieków a spadkiem dna kanału. W tym przypadku mniejszy spadek zwierciadła ścieków w porównaniu do spadku dna kanału wskazuje na problemy związane z dławieniem przepływu ścieków, a ujemne wartości prędkości wskazują na występowanie zjawiska cofki w kanale. Podczas weryfikacji przyjętych założeń formuły Chezy-Manninga [20, 23] analiza pozwala również na zweryfikowanie przyjętych wartości współczynnika szorstkości Manninga, który określa stan techniczny kanału.

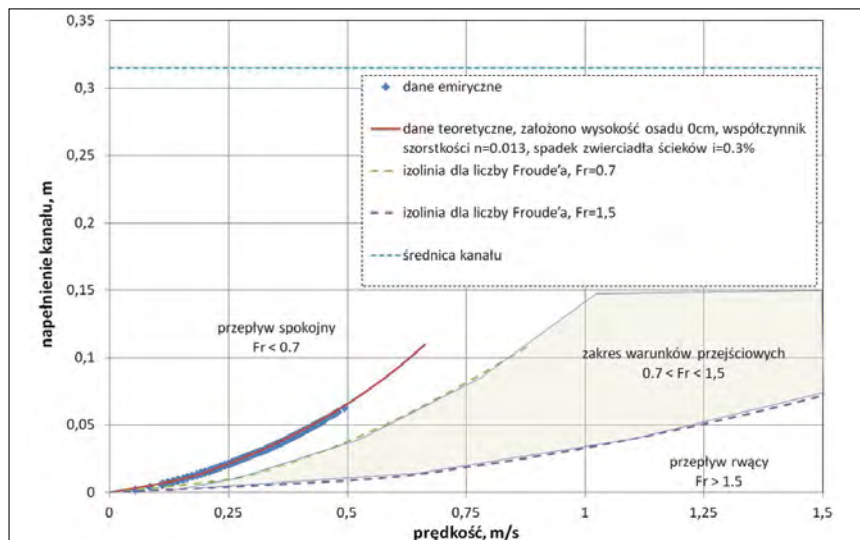
Porównanie wartości empirycznych z wartościami teoretycznymi pozwala na identyfikację wartości odstających (duża różnica pomiędzy wartościami), dla których występują problemy z pomiarami przepływu ścieków (indykatorem może być stała wartość pomiaru napętnienia lub stała wartość pomiaru prędkości) lub problemy z warunkami przepływu (dławienie przepływu, zatory w kanalizacji, podpiętrzenie,

dotatkowy dopływ boczny, występowanie cofki lub odskoku hydraulicznego etc.).

Informacje o warunkach hydraulicznych, panujących w punkcie pomiarowym, są istotnym krokiem podczas weryfikacji lokalizacji punktu pomiarowego i doboru urządzeń pomiarowych. Należy zaznaczyć, iż w przypadku występowania problemów z zaburzeniami przepływów ścieków wymagane jest zastosowanie przepływomierzy mających możliwość wyznaczenia rzeczywistego profilu prędkości w kanale. Profil prędkości powstaje w oparciu o równoczesny pomiar w kilku lub kilkunastu punktach w przekroju hydrometrycznym (przykłady urządzeń: przepływomierz PCM 4 firmy NIVUS [12], przepływomierz Q Eye M II firmy HydroVision GmbH [13]). Liczba warstw, w których wykonywany jest pomiar prędkości oraz ich wysokość (wysokość każdej z warstw wynosi od 0,01 do 0,10m), jest cechą charakterystyczną danego urządzenia pomiarowego, przy czym minimalne napełnienie w kanale, przy którym wykonywany jest pomiar wynosi około 0,04m [12] [13]. Dlatego zastosowanie przepływomierza profilującego wymaga minimalnego napełnienia w kanale około 0,08m – 0,10m. Przepływomierze tego typu mają szczególne zastosowanie w przypadku „trudnych” sytuacji pomiarowych – występowaniu cofki, ograniczeniu odpływu, itp.

W takich sytuacjach nie jest wskazane wykorzystywanie przepływomierzy ultradźwiękowych wykorzystujących zjawisko Dopplera lub przepływomierzy radarowych. Tego typu przepływomierze określają prędkość średnią na podstawie teoretycznego rozkładu prędkości określonego dla ruchu ustalonego, w oparciu, albo o zmierzoną wartość prędkości, która najczęściej występuje w profilu hydrometrycznym (dopplerowskie przepływomierze ultradźwiękowe), albo w oparciu o zmierzoną prędkość powierzchniową (przepływomierze radarowe). W sytuacji występowania zaburzeń przepływów rzeczywisty rozkład prędkości w profilu hydrometrycznym odbiega znacznie od rozkładu teoretycznego, co może prowadzić do istotnych błędów pomiarowych.

W celu weryfikacji warunków panujących w kanalizacji korzystne jest obliczenie liczby Froude'a. Jeśli jej wartość mieści się (wg W.H. Hager [6]) pomiędzy 0,7 i 1,5 to w miejscu pomiaru występuje obszar przepływu przejściowego (pomiędzy przepływem podkrytycznym a nadkrytycznym), gdzie mogą być obserwowane niestabilne warunki takie, jak: odskok hydrauliczny, falowanie zwierciadła ścieków, dławienie przepływu.



Rys. 3.

Przykład 2 analizy hydraulicznej dla wybranego punktu pomiarowego, dla kanalizacji sanitarnej kanału DN 315, spadek dna kanału 0,3%, spadek zwierciadła ścieków 0,3%, pomiary od 20.07.2019 do 2.08.2019 r.

Fig 3. Example 2 of hydraulic analysis for a selected measurement point, for sanitary sewer DN 315, sewer bottom slope 0.3%, wastewater table slope 0.3%, measurements from 20.07.2019 to 2.08.2019 r.

Przykład pomiarów kontrolnych, które potwierdzają możliwości wykorzystania w danym punkcie przepływomierzy przedstawia rys. 3. W tym przypadku porównanie danych empirycznych z danymi teoretycznymi wskazuje, że spadek zwierciadła ścieków jest zbliżony do spadku kanału. Potwierdza to również analiza lokalizacji punktów pomiarowych względem izolinii, określonych wobec liczby Froude'a (będącej poza zakresem przejściowym), co w analizowanym okresie pomiarów nie wskazuje na występowanie zaburzeń w przepływie ścieków.

Na etapie prowadzenia krótkookresowych pomiarów kontrolnych, niezbędne jest określenie czasu trwania pomiarów, częstotliwości wykonywania pomiarów oraz niezawodności pomiaru (wg starszej nomenklatury – błędowi pomiaru).

Czas trwania pomiarów, w przypadku kanalizacji sanitarnej i kanalizacji ogólnospławnej, powinien uwzględniać zarówno pogodę suchą jak i pogodę deszczową. Niezbędne jest bowiem uchwycenie statystycznie istotnej różnicy pomiędzy przepływami w pogodzie suchej w ciągu doby, tygodnia jak i w ciągu całego sezonu. W celu skrócenia okresu pomiarowego korzystnie jest skorzystać z analizy testów ANOVA (test RIR Tykeya, test Scheffe [21]), która pozwala na sprawdzenie czy występują istotne statystycznie różnice pomiędzy przepływami godzinowymi w dobie, przepływami dobowymi w tygodniu. Również wykorzystując testy statystyczne można sprawdzić czy występują istotne statystycznie różnice między przepływami godzinowymi w pogodzie suchej i w pogodzie deszczowej [21].

W przypadku kanalizacji deszczowej i kanalizacji ogólnospławnej, istotne jest określenie wpływu wód opadowych na pracę sieci. W tym celu niezbędne jest wykonanie pomiarów dla różnych rodzajów opadów (korzystne jest jeżeli pomiary wykonane są dla deszczy ulewnych lub deszczy nawalnych wg skali Chomicza [22]). Oznacza to, że wybór punktu pomiarowego łatwiej przeprowadzić w tych okresach roku, w których takie zjawiska występują często.

Wybór częstotliwości pomiarów powinien zapewnić minimalną utratę informacji z uzyskanych wyników pomiarów. Najczęściej stosuje się zasadę pomiaru w odstępach czasu, które są co najmniej dwa razy mniejsze niż najkrótszy czas, w którym mógłby nastąpić istotny przyrost przepływu, tak aby uchronić się przed utratą informacji [20]. W praktyce część przepływomierzy ma możliwość rejestracji danych zdarzeniowo, tzn. w sytuacjach pracy sieci kanalizacyjnej w warunkach normalnych rejestracja danych jest rzadsza (odzwierciedlająca znany przebieg krzywej zmienności przepływów), a w sytuacjach nadzwyczajnych – częstotliwość rejestracji danych jest zwiększana. Taki sposób rejestracji danych ma szczególne znaczenie na etapie pomiarów kontrolnych gdzie wykorzystywane są przepływomierze przenośne, zasilane bateryjnie.

Dane pochodzące z pomiarów kontrolnych pozwalają zarządzającemu najczęściej ocenić istniejącą wydajność sieci kanalizacyjnej w danym punkcie pomiarowym lub do prognozowania zmian wydajności sieci w rezultacie pojawienia się

Tab. 1. Wybrane wskaźniki wydajności sieci kanalizacyjnej [24]
Tab. 1. Selected indicators of sewerage performance [24]

symbol	definicja	wzór	Ocena wydajności		
			dobry	średni	zły
Pl ₁	Stosunek przepływu minimalnego w pogodzie suchej (Q _{min dw}) do przepływu maksymalnego w przewodzie kanalizacyjnym (Q _{całk})	$\frac{Q_{min\ dw}}{Q_{całk}}; \%$	< 25	25–50	> 50
Pl ₂	Stosunek przepływu maksymalnego w pogodzie suchej (Q _{max dw}) do przepływu maksymalnego w przewodzie kanalizacyjnym (Q _{całk})	$\frac{Q_{max\ dw}}{Q_{całk}}; \%$	< 50	50–75	> 75
Pl ₃	Stosunek przepływu minimalnego w pogodzie suchej (Q _{min dw}) do długości sieci kanalizacyjnej (L)	$\frac{Q_{min\ dw}}{L}; m^3/(d \cdot km)$	< 40	40–80	> 80
Pl ₄	Stosunek przepływu maksymalnego w pogodzie deszczowej (Q _{max ww}) do przepływu maksymalnego w przewodzie kanalizacyjnym	$\frac{Q_{max\ ww}}{Q_{całk}}; \%$	< 75	75–100	> 100

dotaddkowego obciążenia wynikającego z działań inwestycyjnych. W literaturze proponowane jest zastosowanie różnych wskaźników wydajności sieci [24], co przedstawia tab. 1.

Wykorzystanie modeli hydraulicznych do weryfikacji lokalizacji punktu pomiarowego

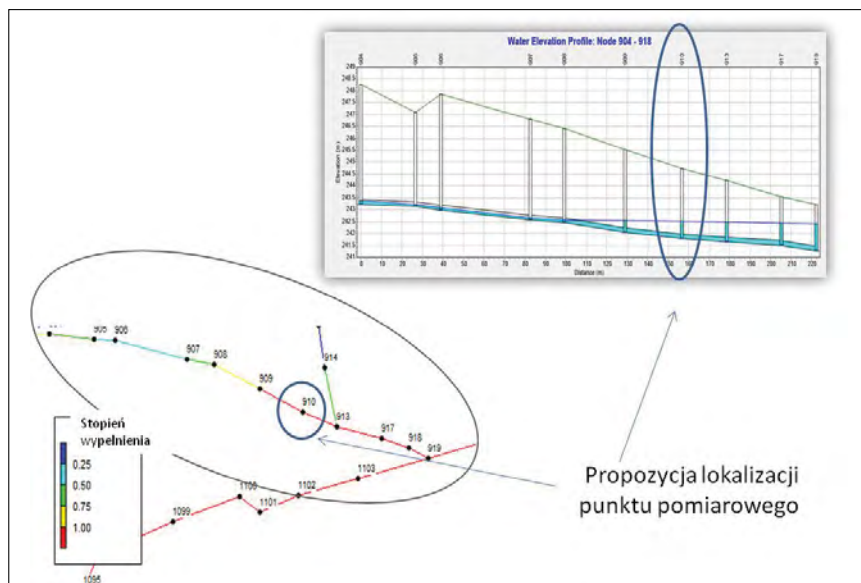
Pomiary przepływów ścieków w krótkim okresie obejmują zazwyczaj pomiary w typowych warunkach pracy sieci kanalizacyjnej. Najczęściej pomiary te nie obejmują okresów kiedy występują przepływy ponadnormatywne. W kanalizacji przepływy ponadnormatywne związane są z występowaniem opadów ulewnych i nawałnych czy dużo rzadziej opadów długotrwałych (gdy zostanie wyczerpana zdolność retencyjna terenu).

W takich przypadkach, w celu oceny warunków pracy punktu pomiarowego, korzystne jest opracowanie modelu hydraulicznego dla fragmentu sieci kanalizacyjnej. Ważne jest, aby model uwzględniał te elementy sieci, które w istotny sposób mogą wpłynąć na warunki pracy sieci w danym punkcie pomiarowym. Takimi elementami mogą być zarówno połączenia kanałów jak i zastawki kanałowe, kolizje z innymi sieciami czy studnie rozprężne doprowadzające ścieki z przepompowni ścieków.

Ocena pracy sieci kanalizacyjnej poprzez wykorzystanie modelu hydraulicznego wymaga jego kalibracji, przynajmniej na podstawie pomiarów kontrolnych. Przykładowo, wg pracy Siegrist J. [25], średni, bezwzględny błąd procentowy przy dopasowaniu modelu hydraulicznego w kanalizacji powinien wynosić maksymalnie (odpowiednio):

- w pogodzie suchej dla średniego dobowego przepływu $\pm 10\%$, a dla średniej dziennej objętości ścieków $\pm 10\%$,
- w pogodzie z opadami dla przepływu chwilowego od $+25\%$ do -15% , a dla objętości ścieków od $+25\%$ do -15% .

zlewnia została podzielona na zlewnie cząstkowe zakończone punktami pomiarowymi. Dzięki informacjom uzyskanym z systemu monitoringu przepływu ścieków możliwe było zawężenie obszaru poszukiwań do zlewni cząstkowych najbardziej obciążonych. Model został opracowany w programie SWMM5 EPA. Symulacja pracy sieci dla pogody deszczowej, w godzinie maksymalnego obciążenia wodami przypadkowymi, wykazała wysokie prawdopodobieństwo wystąpienia napiętnienia w wstępnie wybranej lokalizacji punktu pomiarowego przedstawione-



Rys. 4. Warunki pracy sieci kanalizacji sanitarnej w czasie pogody deszczowej (dla opadu o częstotliwości występowania 10%) dla wybranego fragmentu sieci kanalizacyjnej
Fig. 4. Working conditions of sanitary sewer network, in the selected part of the sewer network, during rainy weather (for precipitation with frequency of occurrence of 10%)

Wykorzystanie symulacji przepływów dla różnych ich wartości pozwala na rozszerzenie analizy hydraulicznej prowadzonej podczas pomiarów kontrolnych. Korzystając więc z modelu hydraulicznego można określić te zakresy wartości przepływu, w przypadku których mogą nastąpić jego zaburzenia w kanalizacji. W tym przypadku należy oszacować prawdopodobieństwo wystąpienia takich przepływów w kanalizacji, co pozwoli na weryfikację lokalizacji punktu pomiarowego również w skrajnych sytuacjach.

Przykład weryfikacji lokalizacji punktu pomiarowego, za pomocą modelu hydraulicznego, przedstawia rys. 4. Dane wykorzystane w tym przykładzie zaczerpnięte z wcześniejszych prac badawczych, dotyczących zlewni zurbanizowanych zlokalizowanych na terenie Górnego Śląska, gdzie występowały problemy z wodami przypadkowymi [21]. W celu wytypowania obszaru gdzie występowały największe problemy z wodami przypadkowymi

go na rysunku 4. Wynik wskazał na istotne ograniczenie możliwości wykonania pomiarów w tym punkcie, w czasie występowania opadów. Wyniki takich pomiarów byłyby niewiarygodne.

Rozszerzenie analizy hydraulicznej podczas pomiarów kontrolnych o analizę przepływów dla najbardziej niekorzystnych warunków pracy sieci kanalizacyjnej pozwala na kolejną weryfikację lokalizacji punktu pomiarowego. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wyznaczenia punktu pomiarowego jako punktu stałego, do pomiarów ciągłych. Taka sytuacja ma często miejsce w przypadku wykorzystania danych z punktu pomiarowego do rozliczenia pomiędzy przedsiębiorstwami lub gminami. Opomiarowanie sieci kanalizacyjnych do celów rozliczeniowych, nie jest objęte regulacjami normatywnymi i aktami prawnymi (w odróżnieniu do analogicznej sytuacji w przypadku obiektów lub sieci wodociągowych). Dlatego w takich sytuacjach, konieczne jest dochowanie każdorazowo

szczególnej staranności przy wyborze lokalizacji i kontroli pracy punktu pomiarowego, opisanie ich w dokumentach oficjalnych oraz precyzyjne określenie zasad rozliczenia.

- W przypadku wyznaczenia stałego punktu pomiarowego, ostatnim etapem jest określenie **procedur utrzymania, konserwacji i kontroli punktu pomiarowego**. Te zasady należy określać indywidualnie, dla konkretnego punktu, zgodnie z wymaganiami stawianymi przez zainteresowane strony (nie gorszymi jednak niż wymagania producenta urządzenia pomiarowego). Podczas kontroli urządzenia pomiarowego można wprowadzić procedury kontroli bieżącej, oparte o ustalenie poziomów alarmowych, takich jak: minimalna prędkość przepływów / napełnienie w godzinach nocnych (minimalne przepływy w ciągu doby),
- minimalna siła sygnału w przypadku przepływomierzy ultradźwiękowych, analiza jakości sygnału radarowego w przypadku przepływomierzy radarowych,
- minimalne napięcie akumulatorów w przypadku przepływomierzy zasilanych akumulatorowo.

Podsumowanie

Monitoring przepływu ścieków ma coraz większe znaczenie w zarządzaniu siecią kanalizacyjną. Wiedza pochodząca z systemu monitoringu może pozwolić na podjęcie działań eksploatacyjnych lub inwestycyjnych w celu dostosowania systemu do zmieniających się dynamicznie warunków zewnętrznych.

Wśród urządzeń pomiarowych, coraz większą popularnością cieszą się urządzenia stosujące do obliczenia przepływu ścieków czy wód opadowych, metodę pośrednią. W tej metodzie należy równocześnie, dla tych samych warunków hydraulicznych, określić zarówno napełnienie jak i prędkość.

W literaturze można odnaleźć wiele publikacji, które skupione są na opisie technicznych warunków montażu urządzeń pomiarowych (np. poprzez zapewnienie odpowiednich odcinków prostych kanałów, utrzymanie jednolitego przekroju i spadku, eliminację elementów zaburzających przepływ). Są to istotne informacje techniczne. Pozwalają one na właściwy wybór punktu pomiarowego, **ale jedynie gdy w kanalizacji, z punktu widzenia hydrauliki, panują warunki ustalone** zarówno dla pogody suchej jak i pogody deszczowej.

W praktyce jednak, przy doborze punktów pomiarowych często popełniane są błędy, poprzez nie uwzględnienie zjawisk, które pojawiają się w sieci tylko w określonych warunkach, a które mają istotny wpływ na wyniki późniejszych pomiarów. Gdy punkt pomiarowy lokalizowany jest na istniejącej sieci kanalizacyjnej, bez jej przebudowy, takie chwilowe zaburzenia przepływów są wysoce prawdopodobne. Do wykrycia tych zaburzeń konieczna jest analiza hydrauliczna przepływu. Analiza ta powinna być przeprowadzona na podstawie pomiarów kontrolnych. Pomiarów te wykonywane są dla krótkich okresów, a po wychwyceniu anomalii, rozszerzane o analizę warunków pracy sieci w całym zakresie zmienności przepływów. Służy to określeniu prawdopodobieństwa z jakim wystąpią warunki hydrauliczne odbiegające od warunków ustalonych. Analizę tę można przeprowadzić w oparciu o model hydrauliczny, wykonany dla fragmentu sieci kanalizacyjnej.

W przypadku możliwości występowania okresowych zaburzeń przepływów ścieków należy wybierać urządzenia wyznaczające rzeczywiste rozkłady prędkości w kanalizacji (czyli ultradźwiękowe mające możliwość wyznaczenia rzeczywistych profili prędkości) pozwala to na zwiększenie wiarygodności pomiaru przepływu, jednocześnie należy wtedy zwrócić uwagę na stałe kontrolowanie miejsca pomiaru i czyszczenie czujnika.

Należy zaznaczyć, że analiza statyczna i analiza hydrauliczna oparte o tymczasowe pomiary krótkookresowe są często wykorzystywane przez eksploatatorów do oceny istniejącej i prognozowanej wydajności sieci kanalizacyjnej. Analizy te są również wystarczające do określenia i sprawdzenia warunków jakie panują w punktach pomiarowych do modelu hydraulicznego.

Natomiast w przypadku wyznaczenia punktów pomiarów stałych, w szczególności gdy wykorzystywane będą one jako punkty rozliczeniowe pomiędzy gminami lub przedsiębiorstwami, kluczowe jest przeprowadzenie analizy hydraulicznej rozszerzonej o wyniki symulacji modelu hydraulicznego. Takie stałe punkty pomiarowe mogą być również wykorzystywane do kalibracji modeli hydraulicznych.

LITERATURA

- [1] MICHALSKI A. 2004. „Pomiary przepływu wody w kanałach otwartych”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- [2] DĄBROWSKI W. 2003. „Oddziaływanie sieci kanalizacyjnych na środowisko”. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.

- [3] Dąbrowski W. 2003. „Pomiary natężenia przepływu ścieków w świetle przepisów”. Instal, 11, 28-35.
- [4] ERB, H. G. 1999. „Technika pomiarów przepływu wody i ścieków”. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Szczecin.
- [5] KWIECINIEWSKI M., GĘBSKI W., WRONOWSKI N., 2005. „Monitorowanie sieci wodociągowej i kanalizacyjnych”. Wydawnictwa Zarządu Głównego Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, Warszawa.
- [6] HAGER W. H., 2010. „Wastewater Hydraulics. Theory and Practice. Springer”.
- [7] GIL B., 2015. „Diagnostyka warunków pomiaru przepływu ścieków na podstawie prostych analiz statystycznych”. Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 89 nr 6, s. 235-240.
- [8] GIL B., KORAL W. 2018. „Błąd pomiaru jako wskaźnik oceny rozwiązania opomiarowania sieci kanalizacyjnej”. INSTAL, 11, 34-40
- [9] pod redakcją PIOTROWSKIEGO J. 2009. „Pomiary. Czujniki i metody pomiarowe wybranych wielkości fizycznych i składu chemicznego”. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [10] Instrukcja obsługi i konserwacji. 2004. „Przepływomierz modułowy ISCO seria 2100”. TELEDYNE ISCO, OMC ENVAG
- [11] Instrukcja obsługi przenośnego przepływomierza PCM F wraz z należnymi do niego czujnikami. 2004. NIVUS, Eppingen
- [12] Instrukcja obsługi przenośnego przepływomierza PCM 4 wraz z należącymi do niego czujnikami. 2008. NIVUS GmbH.
- [13] Instrukcja: Warunki montażu przepływomierza Q-Eye PSC MT 2019. BMsonic Biotechnika
- [14] FLO-DAR™. 2000. Radarowy, bezkontaktowy przepływomierz dla kanałów otwartych. Instalowanie i obsługa. Marsh-McBirney, Welkenraedt.
- [15] FLOW SIREN. Dokumentacja techniczno-ruchowa. Instrukcja obsługi. 2015 Blue Siren. BMsonic Biotechnika
- [16] Stacja monitorowania natężenia przepływu Aqua Logger. 2019. FLOW. PM Ecology
- [17] TIENET™ 360 LaserFlow™ Velocity Sensor Installation and Operation Guide. 2015. TELEDYNE ISCO
- [18] SZYMKIEWICZ R. 2000. „Modelowanie matematyczne przepływów w rzekach i kanałach”. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa
- [19] PN-ISO 1100-1 Pomiary przepływu w korytach otwartych. Część 1: Zakładanie i użytkowanie stacji pomiarowych. 2002
- [20] SCHILPEROORT T. 1986. „General considerations on hydrological networks”. Design Aspects of Hydrological Networks. TNO Committee on Hydrological Research Publ. 35: 5-13
- [21] Gil B. 2018. „Wykorzystanie modelu hydrodynamicznego do oceny problemów z wodami przypadkowymi”. GWiTS, 2018r, nr3, 78-84
- [22] DĘBSKI K. 1965: „Hydrologia”. Arkady, Warszawa
- [23] KEVIN L. ENFINGER, P.E. AND PATRICK L. STEVENS, P.E. 2014. „Scattergraph Principles and Practice Practical Application of the Froude Number to Flow Monitor Data”. ADS
- [24] CARRIÇO N. J. G., BRITO R., BAPTISTA M.. 2017. “A case study of rainfall-derived infiltration and inflow of a separate sanitary sewer system”. Drinking Water Engineering and Science, March
- [25] VALLABHANENI S., LAI F., CHAN C., BURGESS E. H.. 2002. “SSOAP – A USEPA Toolbox for Sanitary Sewer Overflow Analysis and Control Planning” Journal of Water Management Modeling