

Raport Badawczy
Research Report

RB/55/2014

**Opracowanie modelu
hydraulicznego zlewni
referencyjnej sieci
kanalizacyjnej w Poznaniu
i wyniki jego kalibracji**

**J. Studziński, A. Służalec,
P. Wójtowicz**

Instytut Badań Systemowych
Polska Akademia Nauk

Systems Research Institute
Polish Academy of Sciences



POLSKA AKADEMIA NAUK

Instytut Badań Systemowych

ul. Newelska 6

01-447 Warszawa

tel.: (+48) (22) 3810100

fax: (+48) (22) 3810105

Kierownik Zakładu zgłaszający pracę:
Dr hab. inż. Jan Studziński

Warszawa 2014

**Opracowanie modelu hydraulicznego zlewni
referencyjnej sieci kanalizacyjnej w Poznaniu
i wyniki jego kalibracji**

Jan Studziński, Agnieszka Służalec, Patryk Wójtowicz

IBS PAN, Warszawa 2014

Spis treści

1. Wprowadzenie
2. Opis zlewni referencyjnej
3. Założenia do obliczeń hydraulicznych sieci kanalizacyjnej
4. Założenia do budowy modelu hydraulicznego zlewni referencyjnej
5. Wyniki kalibracji - charakterystyka danych wybranych do testów modelu hydraulicznego
6. Podsumowanie
7. Literatura

1. Wprowadzenie

W raporcie przedstawiono wyniki kalibracji modelu hydraulicznego sieci kanalizacyjnej dla wybranego obszaru referencyjnego sieci w Poznaniu. Były to pierwsze tego rodzaju prace dotyczące sieci kanalizacyjnych prowadzone w IBS PAN i również pierwsze badania tego typu prowadzone na sieci kanalizacyjnej w Poznaniu.

W badaniach użyto oryginalny software do modelowania, projektowania i optymalizacji systemów kanalizacyjnych MOSKAN, opracowany w IBS PAN, natomiast dane dotyczące sieci kanalizacyjnej w Poznaniu pozyskiwano bezpośrednio z systemu GIS G/Water firmy Integraph, zainstalowanego w wodociągach poznańskich. Taka forma współpracy pomiędzy modelem hydraulicznym i systemem GIS była również po raz pierwszy testowana w warunkach eksploatacyjnych w ramach budowy w IBS PAN zintegrowanego systemu ICT do kompleksowego zarządzania przedsiębiorstwami wodociągowymi.

2. Opis zlewni referencyjnej

Na rys. 1 i kolejnych rysunkach 2-4 przedstawiono wygląd modelowanej zlewni referencyjnej i jej elementów, stanowiących fragment sieci kanalizacyjnej Poznania.

Charakterystyka zlewni referencyjnej jest następująca:

- Powierzchnia ok. 122 ha
- Przewaga terenów przemysłowych (zakłady HCP ok. 37 ha - ponad 30% powierzchni)
- Obszary o dużej koncentracji usług
- Szpital
- Szkoła
- Urzędy (filia US)
- Tereny mieszkaniowe z usługami drobnymi
- Przewaga terenów uszczelnionych.

Identyfikacja elementów charakterystycznych zlewni została wykonana na podstawie przekazanych przez Aquanet danych, bazy GIS oraz danych w portalach Google Maps oraz TarGeo.



Rys. 1. Widok zlewni referencyjnej.



Rys. 2. Tereny zakładów HCP.



Rys. 3. Wejście do zakładów HCP.



Rys. 4. Ulica Hetmańska; dzielnica Dolna Wilda.

3. Założenia do obliczeń hydraulicznych sieci kanalizacyjnej

Model fali dynamicznej stanowi pełne rozwiązanie jednowymiarowych równań Saint-Venanta:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f + gAh_L = 0$$

$$S_f = \frac{n^2 V |V|}{k^2 R^{4/3}}$$

Obliczenia metodą fali dynamicznej uwzględniają takie zjawiska jak:

- a. przepływ ciśnieniowy (przepływ pełnym przekrojem) i praca przewodu pod ciśnieniem
- b. podtapianie w węzłach obliczeniowych (studzienkach)
- c. retencja kanałowa
- d. straty miejscowe na wlocie i wylocie do kanału w studzienkach
- e. zjawisko cofki.

Średni interwał obliczeń wynosi 1.60 s (zmienny od 0.5 s do 3.0 s) - średnia ilość iteracji na krok obliczeniowy jest równa 2.

Obliczenia ruchu podkrytycznego są wykonane na podstawie spadku zwierciadła ścieków oraz liczby Froude'a ($Fr > 1.0$).

Obliczenia przepływów ciśnieniowych ze wzoru Darcy-Weisbacha.

4. Założenia do budowy modelu hydraulicznego zlewni referencyjnej

Założenia do budowy modelu zlewni są omówione w podziale na główne jego elementy:

- a. Zlewnie jednostkowe
- b. Kanały
- c. Węzły obliczeniowe
- d. Obiekty specjalne (przelew).

• Model zlewni referencyjnej

Dane ogólne:

- liczba zlewni jednostkowych - 110
- liczba węzłów obliczeniowych - 275
- liczba odcinków obliczeniowych - 285
- liczba przelewów - 1
- wypływ poza zlewnię referencyjną został zamodelowany za pomocą wylotów niezatapionych (wg danych przekazanych przez Aquanet).



Rys. 5. Zlewnia referencyjna – podział na zlewnie jednostkowe.

- ***Przepływy pogody suchej***
 - Przepływy pogody suchej (odpływ ścieków bytowo-gospodarcze i przemysłowe) zostały określone na podstawie danych billingowych przekazanych przez Aquanet z systemu GIS.
 - Ze względu na brak danych dotyczących obszarów (w szczególności przemysłowych) przyjęto 100% odpływ ścieków bg-p.
 - Odbiorcy wody identyfikowani poprzez przyłącza wodociągowe zostali zgrupowani w promieniu 25 m od odnośnych kanałów.
 - Histogram odpływu ścieków (rozkład czasowy) określony został na podstawie danych kalibracyjnych przekazanych przez Aquanet.

- ***Kluczowe parametry zlewni***
 - Udział procentowy powierzchni nieprzepuszczalnej.
 - Szerokość hydrauliczna (W).
 - Współczynnik szorstkości powierzchni przepuszczalnej/nieprzepuszczalnej.
 - Retencja terenowa powierzchni przepuszczalnej/nieprzepuszczalnej.
 - Średni spadek zlewni.
 - Przestrzenna lokalizacja punktu odpływu ze zlewni.

- ***Podział na zlewnie jednostkowe***
 - Dyskretyzacja zlewni na zlewnie jednostkowe została dokonana ze względu na dopływy ścieków komunalnych pochodzących z sieci wodociągowej do kanałów sieci kanalizacyjnej.
 - Udział powierzchni nieprzepuszczalnej został określony na podstawie danych z bazy GIS oraz danych o powierzchniach szczelnych przekazanych przez Aquanet.



Rys. 6. Zlewnia referencyjna – podział na powierzchnie przepuszczalne.

- **Modelowanie wybranych parametrów zlewni jednostkowej**

Szerokość zlewni (W) - testowane modele:

- $W = k (A)^{0.5}$
- $W = (A)^{0.5}$
- $W = A/L$

A - powierzchnia zlewni jednostkowej, L długość trasy spływu ścieków deszczowych.

Wybrano metodę, w której wyznaczono indywidualnie dla każdej zlewni średnią długość spływu do kanału (L) a następnie obliczano szerokość hydrauliczną W jako iloraz powierzchni całkowitej do długości $W = A/L$.

Współczynnik szorstkości powierzchni przepuszczalnej/nieprzepuszczalnej określony został indywidualnie dla każdej zlewni jednostkowej na podstawie analizy zdjęć satelitarnych.

Do zidentyfikowanych obszarów przypisane zostały odpowiednie wartości współczynników szorstkości.

Retencja terenowa powierzchni przepuszczalnej/nieprzepuszczalnej określona została na podstawie danych literaturowych.

Średni spadek zlewni określony został indywidualnie dla każdej zlewni jednostkowej na podstawie algorytmu obliczeniowego z wykorzystaniem danych GIS.

Przestrzenna lokalizacja punktu odpływu ze zlewni jednostkowej określona została na podstawie mapy systemu kanalizacyjnego (GIS) oraz danych przekazanych przez Aquanet.

- **Odcinki i węzły obliczeniowe**

- Sieć kanalizacyjna z przewagą przewodów wykonanych z betonu oraz kamionki z okresu 1900 – 1972.
- Kształt przekroju poprzecznego, średnicę oraz długość odcinków obliczeniowych określono na podstawie danych w bazie GIS. Wprowadzono indywidualne korekty połączeń kanałów.
- Ze względu na brak danych dotyczących stanu hydraulicznego i technicznego (np. wyniki inspekcji CCTV) eksploatowanych kanałów przyjęto literaturową wartość współczynnika szorstkości (n) do wzoru Manninga w zależności od wieku i rodzaju materiału kanału.
- Średnia wartość współczynnika szorstkości kanałów wyniosła $n = 0.015$.

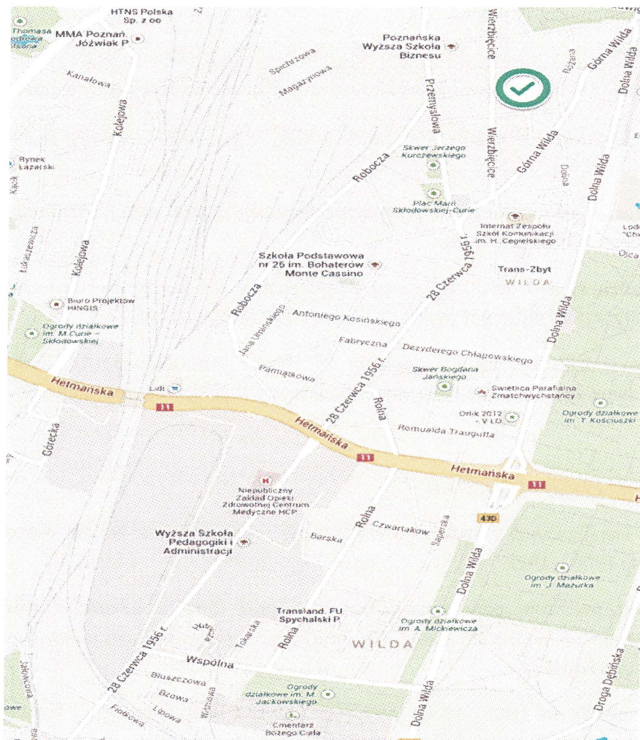
- Współrzędne geodezyjne, rzędne dna kanału oraz zagłębienie w węzłach obliczeniowych określone zostały na podstawie bazy GIS.

- **Deszcz rzeczywisty**

Deszcz rzeczywisty utworzono na podstawie serii opadowych z okresu 23 listopada - 3 grudnia 2012, przekazanych przez Aquanet.

Wykorzystano również dane opadowe z portalu WU (www.weatherunderground.com) dla stacji meteorologicznej **Poznań Wilda** (Lat: N 52° 23' 49", Lon: E 16° 55' 21") zlokalizowanej na skrzyżowaniu ulic świętego Czesława i Poplińskich.

Z portalu WU uzyskano szeregi czasowe w interwałach 5 min.



Rys. 7. Lokalizacja stacji meteorologicznej.

Deszcz rzeczywisty z dnia 29.11.2012 (dane Aquanet)

Dane deszczowe udostępnione przez Aquanet:

29.11.2012 3:12 - 29.11.2012 16:54

15.12.2012 11:59 - 15.12.2012 12:56

24.12.2012 1:37 - 24.12.2012 2:43

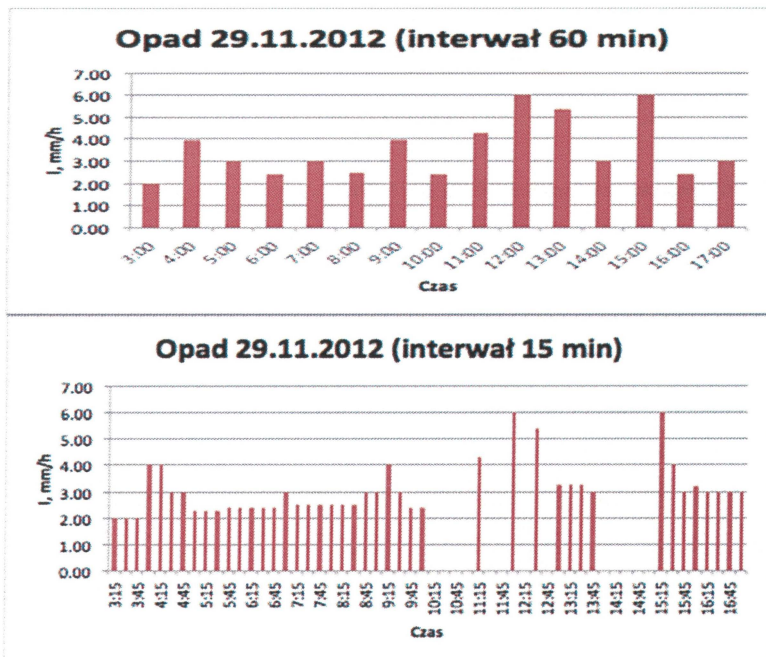
26.12.2012 19:21 - 26.12.2012 19:55

27.12.2012 8:19 - 27.12.2012 14:43

3.1.2013 7:39 - 3.1.2013 19:46

4.1.2013 16:56 - 4.1.2013 17:22

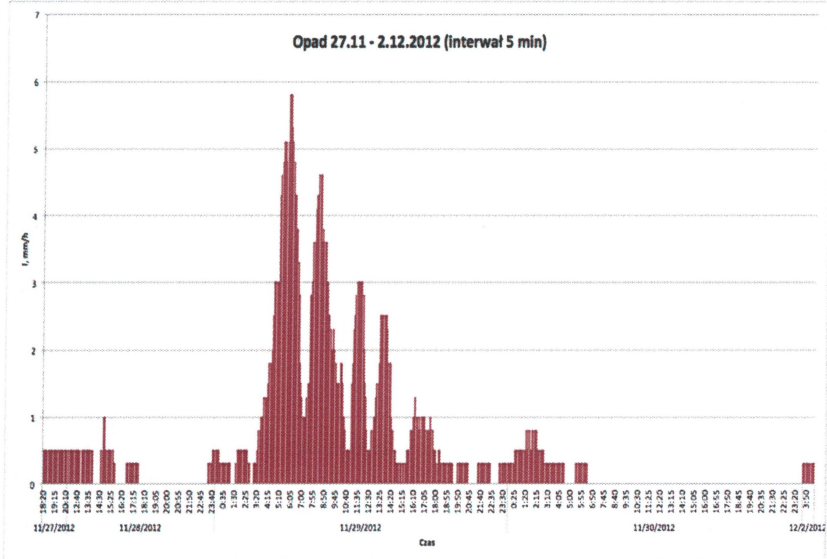
8.1.2013 11:45 - 8.1.2013 13:07.



Rys. 8. Wykresy danych deszczowych dla 29.11.2012.

Deszcz rzeczywisty z okresu 23.11 - 2.12.2012 (dane z portalu WU)

Stworzono szeregi czasowe o interwale 5 min dla całego okresu opadów (27.11-2.12.2012).



Rys. 9. Wykresy danych deszczowych dla 27.11.2012.

- **Dane pomiarowe do wstępnej kalibracji modelu hydraulicznego zlewni referencyjnej**

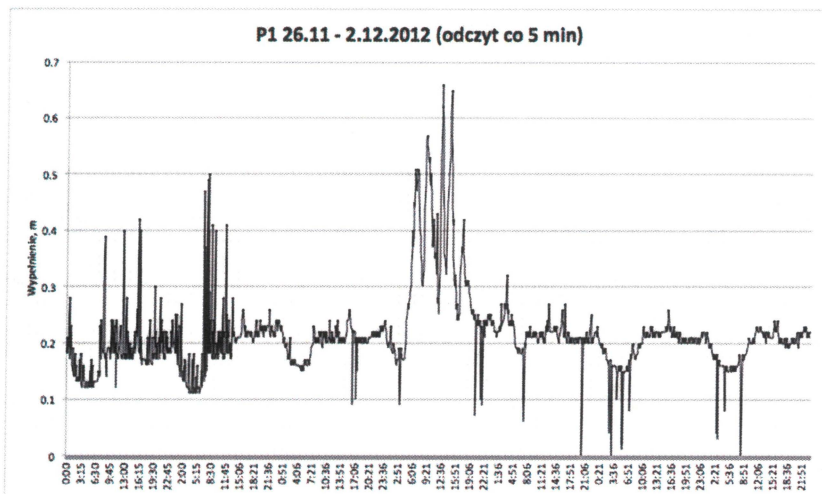
Udostępniono wyniki pomiarów wysokości wypełnienia w kanale dla 4 punktów (P1-P4) z okresów:

- P1 dane z okresu: 23.11.2012 - 28.12.2012
- P2 dane z okresu: 15.11.2012 - 4.1.2013
- P3 dane z okresu: 15.11.2012 - 20.11.2012 oraz 27.11.2012 - 4.1.2013
- P4 dane z okresu: 4.1.2013 - 7.1.2013

Punkt pomiarowy P3 zlokalizowany został na kanale deszczowym - zarejestrował stały odczyt 0.15 m (kanał ma średnicę K0.3 m) - został wyłączony z rozważań.

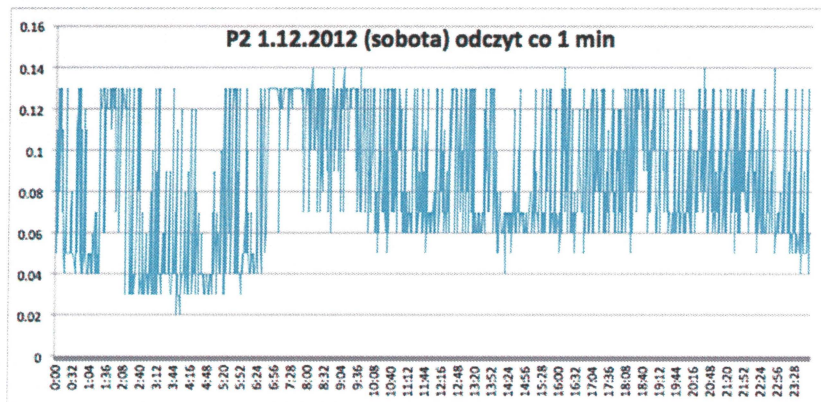
Punkt pomiarowy P4 zlokalizowany na połączeniu z kanałem prowadzącym ścieki spoza zlewni referencyjnej - został wyłączony z rozważań.

- *Analiza danych z punktu pomiarowego - P1*



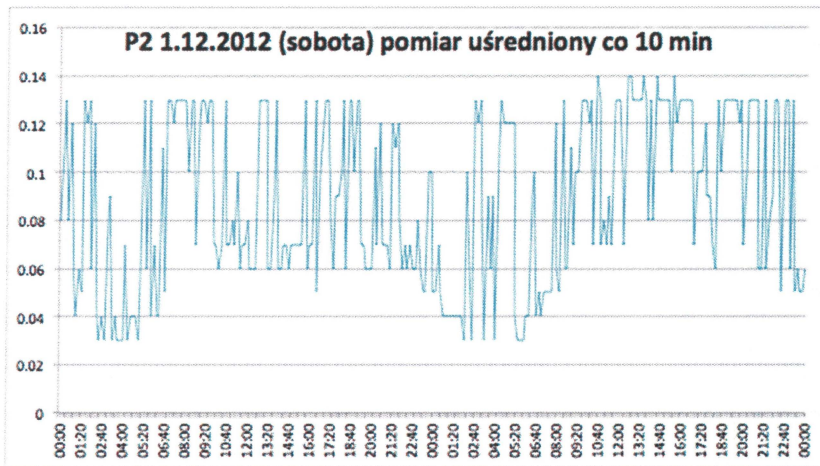
Rys. 11. Punkt pomiarowy P1.

- *Analiza danych z punktu pomiarowego - P2*



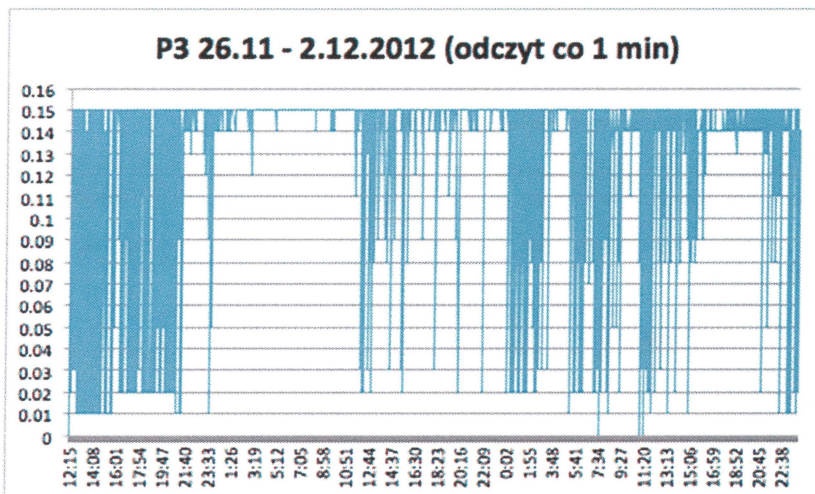
Rys. 12. Punkt pomiarowy P2.

Znaczna część wyników pomiarów w P2 została odrzucona ze względu na zarejestrowane zakłócenia i ewidentne błędy odczytów. Zdecydowano wykorzystać (najbardziej stabilne) wyniki pomiarów w warunkach pogody suchej z 1 grudnia 2012 (sobota).

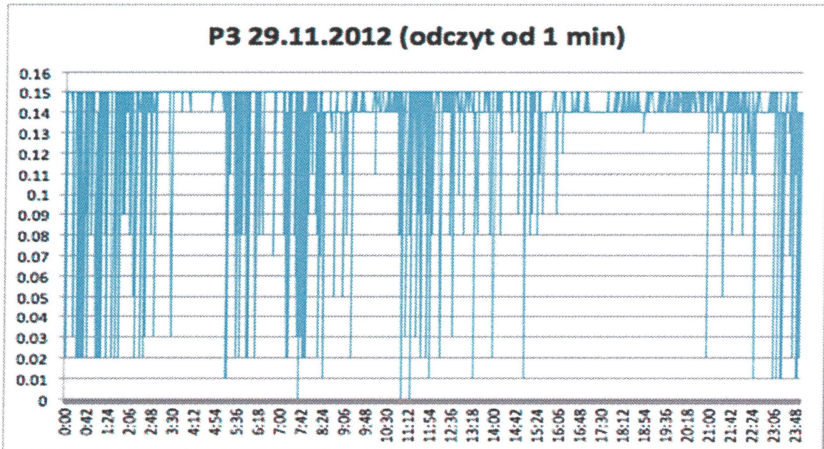


Rys. 13. Punkt pomiarowy P2.

- *Analiza danych z punktu pomiarowego - P3*



Rys. 14. Punkt pomiarowy P3.



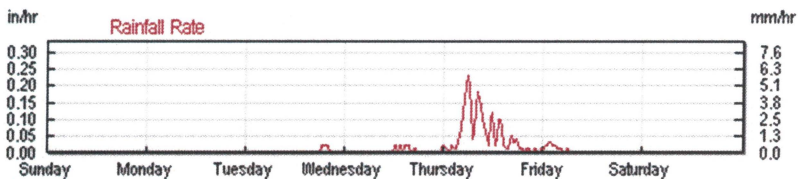
Rys. 15. Punkt pomiarowy P3.

5. Wyniki kalibracji - charakterystyka danych wybranych do testów modelu hydraulicznego

Do testów modelu hydraulicznego i kalibracji wybrano okres od **26 listopada do 2 grudnia 2012** (pełny tydzień od poniedziałku do niedzieli).

W okresie testowym wystąpił deszcz ("silny deszcz" wg skali Chomicza) o maksymalnej intensywności ok. 6.5 mm trwający od godz. 23.25 (28 listopada) do 6.25 (30 listopada).

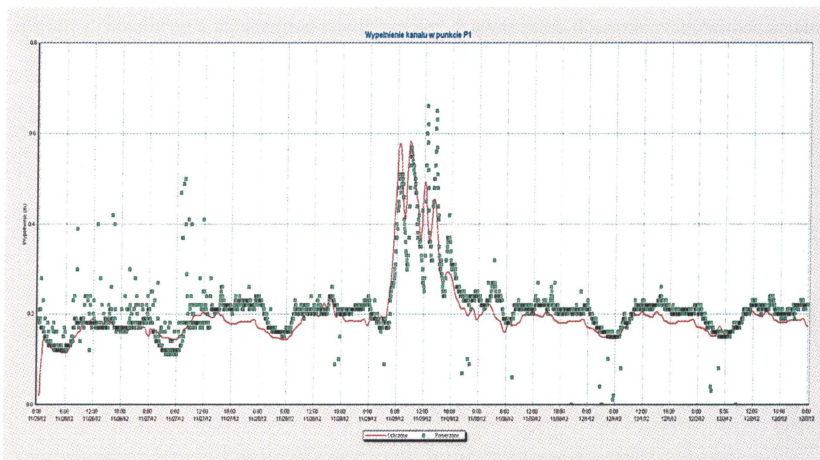
W wybranym okresie deszcz padał również we wtorek (27 listopada) oraz w niedzielę (2 grudnia).



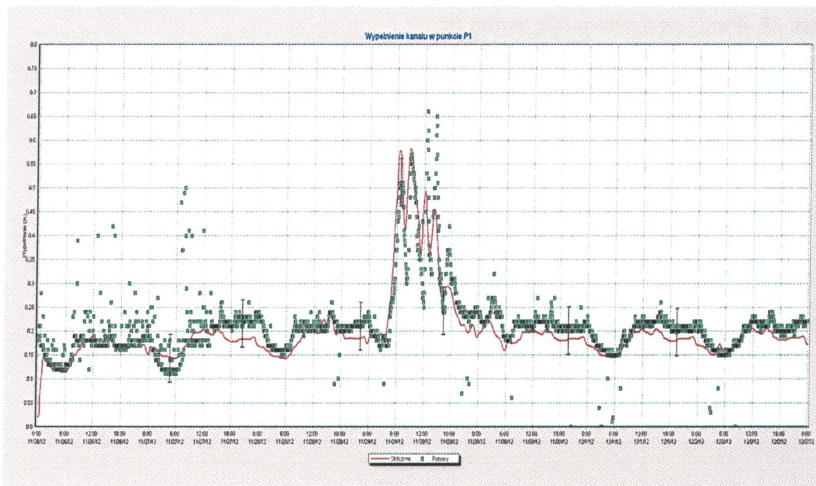
Rys. 16. Pomiary deszczowe uwzględnione w kalibracji modelu.

- **Wyniki obliczeń modelu hydraulicznego w punkcie P1 (26.11 - 2.12.2012)**

Pomiary w całym okresie testowym co 5 min (oryginalnie - bez uśredniania).



Rys. 17. Wyniki modelowania dla punktu P1.



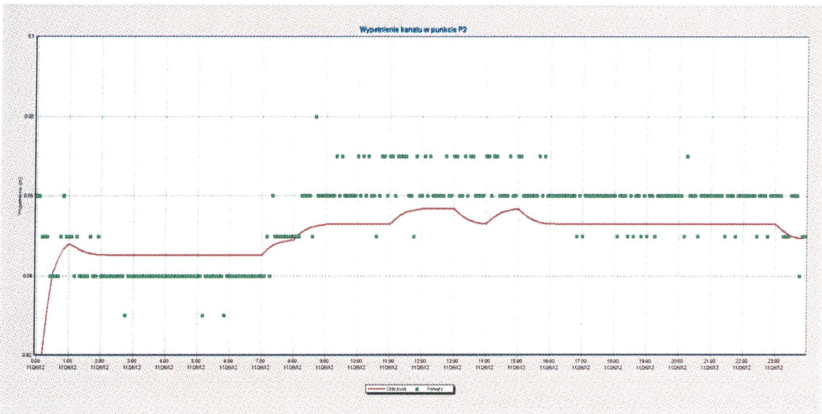
Rys. 18. Wyniki modelowania dla punktu P1 - niepewność pomiarowa ± 5 cm.

- **Wyniki obliczeń modelu hydraulicznego w punkcie P2 w dniu 1.12.2012 (sobota)**

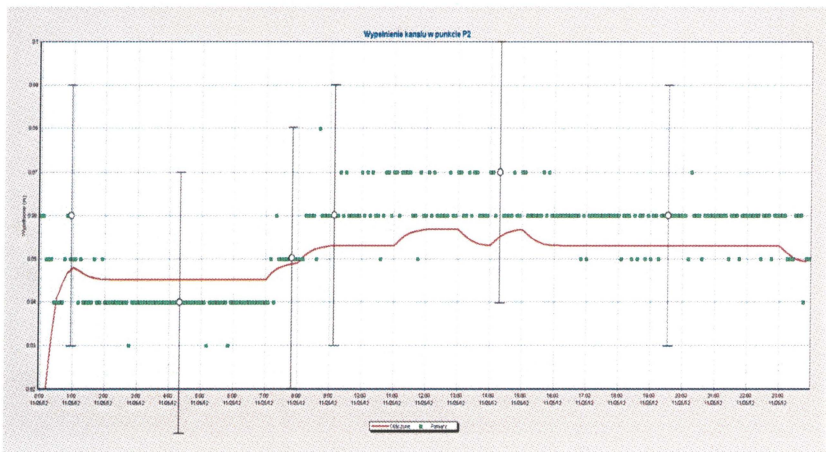
Analizy przeprowadzono w warunkach pogody suchej.

Wyniki odczytów uśredniono co 10 min (oryginalnie co pomiar wypełnienia był co minutę).

Jakość pomiarów w okresach deszczowych uniemożliwiła porównanie z wynikami symulacji.



Rys. 19. Wyniki modelowania dla punktu P2.



Rys. 20. Wyniki modelowania dla punktu P1 - niepewność pomiarowa ± 3 cm.

- ***Przyjęte uproszczenia danych wejściowych i założeń do modelu hydraulicznego***
 - Ze względu na brak danych dotyczących poziomu wód gruntowych pominięto zjawisko infiltracji/eksfiltracji w kanałach.
 - Pominięty został dopływ wód obcych podczas deszczu (np. przez włazy kanalizacyjne).
 - Przestrzenna lokalizacja dopływów ścieków bytowo-gospodarczych i przemysłowych (pogody suchej) określona została na podstawie lokalizacji punktów odbiorów wody.
 - Nie uwzględniono lokalnej retencji/infiltracji (bio-retencja, porowate chodniki, rowy infiltracyjne, zbiorniki na deszczówkę, systemy infiltracji wymuszonej).
 - W okresie testowym pominięto akumulację opadów śniegu oraz zjawiska roztopów (w tym temperaturę przy której dochodzi do opadów śniegów, dane dotyczące wiatru etc.). Według danych meteorologicznych od ok. 5 grudnia padał śnieg.
 - W okresie testowym pominięto zjawisko parowania ze zlewni jednostkowych.
 - Założono że deszcz obejmuje swoim zasięgiem całą zlewnię i w danym momencie ma stałą intensywność na całym obszarze.

- ***Ograniczenia danych wejściowych wpływające na niepewność obliczeń numerycznych modelu hydraulicznego***
 - Otwarty bilans przepływu ścieków w zlewni referencyjnej.
 - Grupowanie i dyskretyzacja punktów odpływu ścieków bg-p na podstawie punktów poboru wody.
 - 100 % odpływ ścieków z terenów przemysłowych (brak informacji o stratach wody).
 - Brak danych dotyczących zużycia wody przez zakłady przemysłowe.
 - Brak informacji dotyczących terenów HCP - w szczególności miejsca i ilości odprowadzanych ścieków deszczowych i bg-p.
 - Brak informacji na temat stanu technicznego i hydraulicznego kanałów.
 - Konieczność weryfikacji danych przekazanych przez Aquanet (1:1) dotyczących głównie połączeń i przebiegu kanałów w profile.

6. Podsumowanie

- Możliwość pozyskania aktualnych danych z bazy GIS (topologiczny graf sieci, przyłącza wodociągowe, kanalizacyjne, numeryczny model terenu - powierzchnie przepuszczalne zlewnie/podzlewnie, powierzchnie przepuszczalne, spadki zlewni).
- Możliwość wizualizacji wyników obliczeń poprzez aplikację internetową (MOSKAN) oraz system GIS.
- Integracja z istniejącym systemem GIS Intergraph - zachowanie aktualności struktury topologicznej modelu hydraulicznego.
- Możliwość dopasowania interfejsu i funkcji programu do potrzeb użytkownika.
- Interdyscyplinarny zespół naukowo-techniczny.
- Kompleksowy zakres usług:
 - a. budowa i weryfikacja modelu numerycznego
 - b. telemetria (SCADA)
 - c. sterowanie (automatyzacja pracy obiektów)
 - d. kalibracja i walidacja modelu numerycznego
 - e. algorytmy optymalizacyjne do wspomaganie zarządzania siecią kanalizacyjną.

7. Literatura

1. Służalec A.: *Komputerowo wspomaganie optymalizacja i projektowanie miejskich sieci kanalizacyjnych*. W: Analiza systemowa w finansach i zarządzaniu, Monografia IBS PAN, Tom 14, Warszawa 2012.
2. Służalec A.: *Projektowanie sieci kanalizacyjnych*. Studia i Materiały Informatyki Stosowanej SIMIS, Tom 4, Nr 9, Bydgoszcz 2012, 17-28.
3. Służalec A., Studzinski J., Ziolkowski A.: *Optimization of sewage structure in the integrated system for sewage design, management and revitalization – MOSKAN*. In: Simulation in Umwelt- und Geowissenschaften (J. Wittmann, M. Mueller, Hrsg.), ASIM-Mitteilung AM 146, Shaker Verlag, Aachen 2013, 203-210.
4. Służalec A., Ziolkowski A.: *Revitalization of sewage networks by means of MOSKAN system*. International Simulation Conference ISC 2013, Ghent, 22-24.05.2013 (Veronique Limere, El-Houssaine Aghezaf, eds.), EUROSIS-ETI Publication, Ghent 2013, 39-43.
5. Studzinski J., Wójtowicz P.: *Simulation von Abwassersystemen mit der MOSKAN Software*. ASIM 2014, 22. Symposium Simulationstechnik, Tagungsband, ASIM

Mitteilung AM 151 (Jochen Wittmann, Christina Deatcu, Hrsg.), HTW Berlin, 03-05.09.2014, 181-185.

6. Służalec A., Studzinski J., Wójtowicz P., Ziółkowski A.: *Erstellung des hydraulischen Modells eines kommunalen Abwassernetzes und dessen Kalibrierung anhand echter Daten*. In: *Modelierung und Simulation von Ökosystemen*, Reihe: Umweltinformatik, Workshop Kölpinsee 2013 (Nguyen Xuan Thinh, Hrsg.), Rhombos-Verlag Berlin, 2014, 35-50.
7. Studzinski J., Służalec A., Ziółkowski A.: *Wspomagane komputerowo kompleksowe zarządzanie miejskimi sieciami wodociągowo-kanalizacyjnymi*. W: *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód* (Z. Dymaczewski, J. Jeż-Walkowiak, M. Nowak, red.) PZITS Poznań 2014, 1153-1165.





