

Modelowanie numeryczne jako narzędzie wspomagające wybór rozwiązania kanalizacji sanitarnej na etapie projektowania

Numerical modelling as a tool supporting selection of a sanitary sewerage solution at the design stage

Bartosz Krasuski, Dariusz Kowalski, Ewa Hołota, Beata Kowalska*

Słowa kluczowe: kanalizacja sanitarna, modelowanie, SWMM, EPANET

Streszczenie

Jednym z głównych problemów, przed jakimi stoją projektanci wiejskich sieci kanalizacji sanitarnych, jest wybór ich typu. W polskich warunkach obszary wiejskie cechują się rozproszoną zabudową, co w efekcie utrudnia budowę tradycyjnej kanalizacji grawitacyjnej i tym samym powoduje konieczność stosowania innych systemów. Często wybór ten dokonywany jest bez odpowiedniej analizy. Projektanci nie zawsze wykorzystują metodę modelowania numerycznego, która ułatwiałaby wybranie najkorzystniejszego wariantu. W artykule zaprezentowano możliwość zastosowania dostępnych bezpłatnie narzędzi informatycznych do projektowania wiejskiej sieci kanalizacji sanitarnej. Dokonane z ich wykorzystaniem symulacje pracy sieci kanalizacji grawitacyjnej zrealizowano w programie EPA SWMM, natomiast kanalizacji ciśnieniowej w programie EPANET.

Keywords: sanitary sewerage, modelling, SWMM, EPANET

Abstract

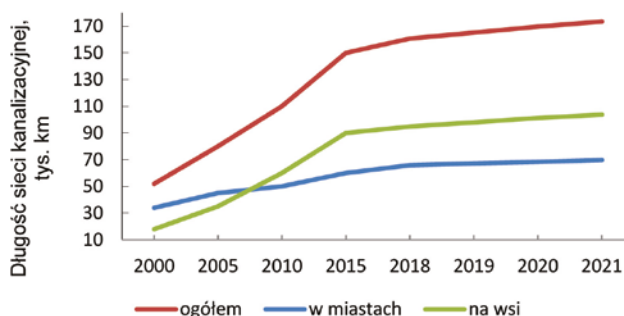
The paper presents the possibility of using free-of-charge IT tools for designing a rural sanitary sewerage network. Simulations of the gravitational sewerage network operation were carried out in the EPA SWMM software, and of the pressure sewerage network in the EPANET software. One of the main problems that designers of rural sanitary sewerage networks face is the choice of their type. In Poland, rural areas are characterized by low-density housing, which makes it difficult to build traditional gravity sewerage, and thus necessitates using other systems. That choice is often made without proper analysis. Designers do not always use the numerical modelling method, which would make it easier to choose the most advantageous variant.

Wstęp

Przystępując do Unii Europejskiej w dniu 1 maja 2004 r. Polska zobowiązała się do stosowania aktów przyjętych przez Instytucje Wspólnot oraz Traktatów założycielskich Unii. Jeszcze przed akcesją Polski do UE, w ramach dostosowania prawa, zostały wprowadzone odpowiednie przepisy regulujące kwestie związane z Dyrektywą Rady z dnia 21 maja 1991 r., dotyczącą oczyszczania ścieków komunalnych (91/271/EWG). Wskazano w nich, że realizacja postanowień dyrektywy wymagać będzie budowy, rozbudowy i/lub modernizacji oczyszczalni ścieków komunalnych i systemów kanalizacji zbiorczej w aglomeracjach. Oznaczało to konieczność poniesienia ogromnych kosztów finansowych przez samorządy.

Bardzo duży wpływ na rozwój systemu gospodarki ściekami komunalnymi w Polsce ma Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. W ciągu 30 lat działalności Fundusz zawarł 3800 umów o dofinansowanie ze środków krajowych i ponad 500 umów finansowanych ze środków zagranicznych, tj. Funduszu Spójności oraz Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2007–2013 i 2014–2020. Sumaryczna kwota przyznana na podstawie podpisanych umów sięgnęła 38 mld zł, z czego 12 mld zł stanowiły środki krajowe. Całkowita wartość obiektów, wybudowanych z udziałem rozdysponowanych kwot, wyniosła 104 mld zł. Dzięki przyznanym środkom możliwa była budowa lub modernizacja ponad 1600 oczyszczalni ścieków oraz budowa 83 tys. km sieci kanalizacyjnych [12].

Dynamika rozwoju kanalizacji sanitarnej jest obecnie znacznie większa na terenach wiejskich, niż w miastach (rys. 1). Wynika to z faktu, że gminy chcą podłączać do sieci kanalizacyjnej kolejne tereny, nawet jeśli nie ma to uzasadnienia ekonomicznego. Długość sieci kanalizacyjnej na wsi w Polsce w 2021 r. wynosiła prawie 104 tys. km. Jak można zauważyć na rys. 1, tempo kanalizowania wsi wyraźnie zmniejszyło się po 2015 r. Prawdopodobną przyczyną takiego stanu było formalne zakończenie Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych, zadłużenie gmin i inwestowanie w oczyszczalnie ścieków, które wskutek zmiany interpreta-



Rys. 1. Rozwój sieci kanalizacji w Polsce w latach 2000-2021 [7-10]

Fig. 1. Development of the sewage network in Poland in 2000-2021[7-10]

* Bartosz Krasuski, mgr inż., Politechnika Lubelska, absolwent Wydziału Inżynierii Środowiska, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, Dariusz Kowalski, dr hab. inż. prof. PL, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, d.kowalski@pollub.pl, Ewa Hołota, dr inż., Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, e.holota@pollub.pl, Beata Kowalska, prof. dr hab. inż., Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków, Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, b.kowalska@pollub.pl

cji wymagań unijnych należało przystosować do podwyższonego uświelenia substancji biogenych [1, 3, 5, 7-10].

Charakterystyka sieci kanalizacyjnych jest odmienna, w zależności od jej lokalizacji – w miastach na kilometr sieci przypada średnio 400 mieszkańców, natomiast na wsi jedynie 74 mieszkańców [2]. Wpływa to bezpośrednio na ukształtowanie, średnice czy spadki przewodów, warunkujące konieczność uzyskania odpowiednich prędkości przepływu ścieków zapewniających samooczyszczanie przewodów. Na terenach o zabudowie rozproszonej często nie ma ekonomicznego ani technicznego uzasadnienia budowania zbiorczej sieci kanalizacji sanitarnej. Zazwyczaj parametrem determinującym racjonalny wybór systemu kanalizacji, na obszarze o rozproszonej zabudowie, jest długość przewodów przypadająca na 1 mieszkańca. Przyjmuje się, że budowa zbiorowego systemu kanalizacji jest opłacalna wówczas, gdy długość ta jest mniejsza od 12–17 m. Innym wskaźnikiem jest średnia odległość między budynkami, która powinna być niższa niż 20–60 m. W pozostałych przypadkach warto rozważyć przydomowe oczyszczalnie ścieków jako alternatywę dla kanalizacji zbiorowej [6, 13, 14].

Każdorazowo proces projektowania sieci kanalizacyjnych wymaga podejścia indywidualnego. Jednym z pierwszych kroków projektowych jest wybór najlepszego rodzaju kanalizacji dla danego obszaru. Wybór sposobu odprowadzania ścieków z małych jednostek osadniczych uzależniony jest od wielu czynników, m.in. od: lokalnych warunków terenowych i gruntowo-wodnych, lokalizacji odbiornika ścieków i wymaganego stopnia ich oczyszczenia, wielkości jednostki osadniczej i stopnia rozproszenia zabudowy, wpływu na środowisko i przede wszystkim od aspektów ekonomicznych [15, 16]. W Polsce kanalizacja grawitacyjna to najbardziej rozpowszechniony system odprowadzania ścieków. Coraz bardziej powszechna staje się jednak kanalizacja ciśnieniowa, szczególnie w miejscach, gdzie grawitacyjne odprowadzenie ścieków jest niemożliwe lub nieekonomiczne. Ten rodzaj kanalizacji znajduje również zastosowanie na terenach o wysokim poziomie zwierciadła wód gruntowych, o podłożu skalnym oraz na obszarach wykorzystywanych okresowo, np. pola kempingowe i inne miejsca, gdzie odpływ ścieków jest sezonowy [4, 11].

Wybór sposobu odprowadzania ścieków jest niezwykle istotny. Na skutek nietrafnie wybranego wariantu kanalizacji, koszty eksploatacyjne takiego systemu mogą nadmiernie wzrosnąć, co będzie skutkowało podwyższeniem kosztów odprowadzania ścieków. Zazwyczaj koszty te są przerzucane na klienta. Dlatego każdorazowa decyzja o wyborze danego systemu kanalizacyjnego powinna być poparta odpowiednio przeprowadzoną analizą techniczno-ekonomiczną, która stanowi kompleksowy materiał dla oceny celowości podjęcia rozpatrywanych działań i dzięki której możliwe będzie wybranie wariantu inwestycyjnie i eksploatacyjnie najkorzystniejszego [19, 20]. Dodatkowo, na skutek niewłaściwego

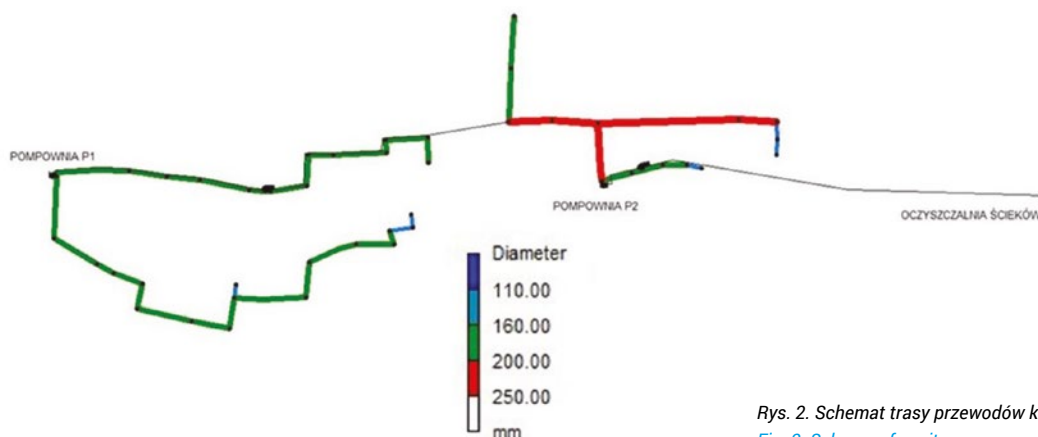
wyboru systemu kanalizacyjnego, istnieje prawdopodobieństwo, że kanalizacja nie będzie poprawnie działała. Sprawdzenie tego staje się możliwe jeszcze na etapie projektowania, dzięki wykorzystaniu odpowiednich narzędzi. W procesie projektowania kanalizacji sanitarnej tradycyjnie wykonuje się obliczenia natężenia przepływów w poszczególnych odcinkach kanałów, w celu doboru średnic przewodów oraz sprawdzenia ich napełnienia oraz prędkości przepływu transportowanych przez nie ścieków. Dzięki modelowaniu komputerowemu możliwe jest przeanalizowanie pracy sieci, jeszcze przed podjęciem decyzji o wyborze konkretnego wariantu.

Celem artykułu jest prezentacja możliwości zastosowania dostępnych bezpłatnie narzędzi informatycznych do projektowania wiejskiej sieci kanalizacji sanitarnej. W ramach prezentowanej pracy przedstawiono zastosowanie programów EPA SWMM i EPANET do symulowania warunków hydraulicznych pracy sieci kanalizacyjnej.

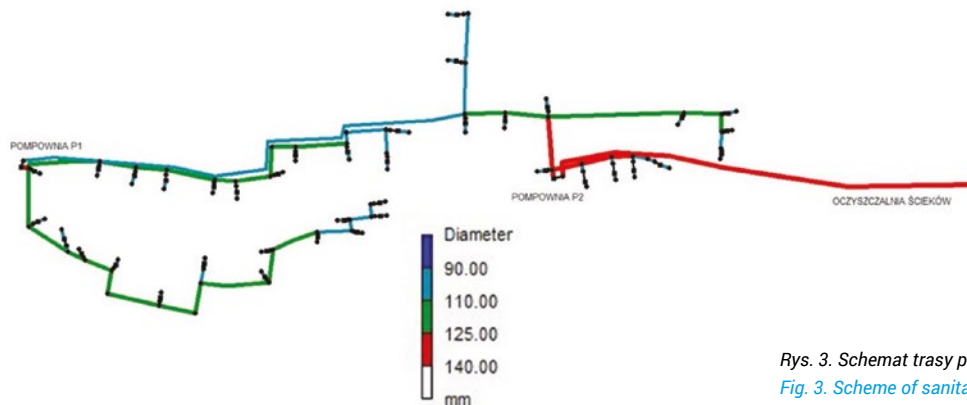
2. Metodologia i opis obiektu

Dla celów prezentacji możliwości wykorzystania symulacji komputerowej pracy sieci kanalizacyjnej wybrano wiejską jednostkę osadniczą, zlokalizowaną w województwie lubelskim. Według Narodowego Spisu Powszechnego Ludności i Mieszkań z 2021 roku liczba ludności rozpatrywanej wsi wynosiła 795 osób. Zabudowa terenu składa się przede wszystkim z domów jednorodzinnych i budynków gospodarczych. Najniższa rzędna terenu wynosi tam 164,24 m n.p.m., natomiast najwyższa rzędna to 174,66 m n.p.m. W założeniach projektowych ścieki bytowo-gospodarcze będą transportowane do istniejącej gminnej oczyszczalni ścieków, znajdującej się w najwyższym rejonie tego terenu. Dodatkowym problemem jest wysoki poziom wód gruntowych, które miejscami występują już na głębokości 1,5 m. Możliwość zastosowania kanalizacji grawitacyjnej została odrzucona, ze względu na konieczność prowadzenia przewodów „pod górę”, co skutkowało by znacznym zagłębieniem sieci, szczególnie trudnym do wykonania w warunkach płytko występujących wód gruntowych. Z tego względu konieczne było opracowanie koncepcji projektu kanalizacji sanitarnej, pracującej zarówno w systemie hybrydowym (grawitacyjno-ciśnieniowym), jak i ciśnieniowym.

Jako pierwszy rozważono wariant hybrydowy. Ścieki z gospodarstw domowych odprowadzane są w nim w sposób grawitacyjny do zbiornika sieciowego, skąd, z uwagi na ukształtowanie terenu, są przepompowywane na wyższy poziom. Następnie transport ścieków odbywa się grawitacyjnie do drugiej pompowni, skąd ścieki są tłoczone do oczyszczalni ścieków. W projekcie założono, że przewody pracujące grawitacyjnie wykonane zostaną z rur PVC, zaś przewody ciśnieniowe z PEHD. Zestawienie projektowanych przewodów w zależności od średnicy i długości przedstawiono



Rys. 2. Schemat trasy przewodów kanalizacji sanitarnej – wariant 1
Fig. 2. Scheme of sanitary sewerage network – variant 1



Rys. 3. Schemat trasy przewodów kanalizacji sanitarnej – wariant 2
Fig. 3. Scheme of sanitary sewerage network – variant 2

w tab. 1. Na rys. 2 przedstawiono schemat kanalizacji hybrydowej z zaznaczonymi średnicami przewodów.

Tabela 1. Zestawienie długości przewodów w zależności od średnicy – wariant 1
Table 1. List of the pipe lengths due to the diameter – variant 1

materiał i średnica [mm]	długość [m]
PVC 160x4,7	149
PVC 200x5,9	1586,5
PVC 250x7,3	414,5
PEHD DN90	660
PEHD DN110	500
Razem	3310

Wykorzystując wstępnie dobrane trasy i średnice przewodów, zbudowano model numeryczny, pozwalający na zasymulowanie pracy powyższej sieci. Model zbudowano w dostępnym bezpłatnie programie EPA SWMM [17].

W drugim wariantcie zaprojektowano sieć kanalizacyjną w systemie ciśnieniowym, z przydomowymi przepompowniami ścieków oraz z dwoma pompowniami sieciowymi. Przydomowe przepompownie ścieków dobrano jako gotowe zintegrowane pompownie ze zbiornikiem o średnicy 0,67 m. Jako pompownie główne sieciowe dobrano zbiorniki z kręgów betonowych o średnicy 2,0 m. Na rys.3 przedstawiono schemat prowadzenia przewodów w wariantcie ciśnieniowym, z zaznaczonymi średnicami przewodów, natomiast w tab. 2 zestawienie długości przewodów w zależności od średnicy.

Tabela 2. Zestawienie długości przewodów w zależności od średnic – wariant 2

Table 2. List of the pipe lengths due to the diameter – variant 2

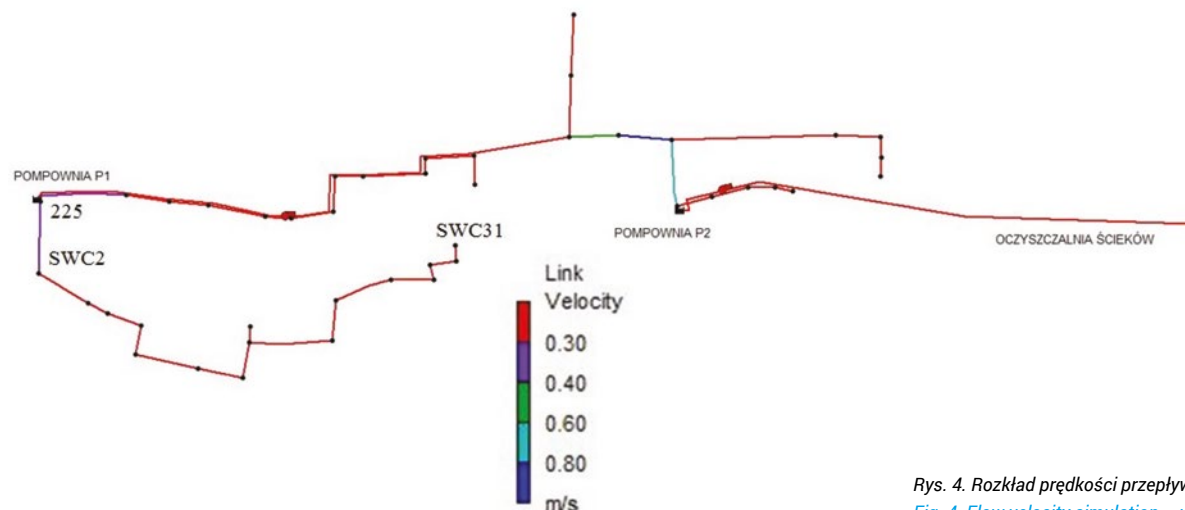
materiał i średnica [mm]	długość [m]
PEHD DN90	1105
PEHD DN110	1510
PEHD DN125	705
Razem	3310

Ze względu na ciśnieniowy typ pracy kanalizacji do odwzorowania jej parametrów hydraulicznych wykorzystano model komputerowy, zbudowany w bezpłatnie dostępnym programie EPANET [18]. Choć program ten przeznaczony był pierwotnie do modelowania sieci wodociągowych, to okazało się, że po drobnych modyfikacjach (wprowadzenie ujemnych poborów w węzłach reprezentujących miejsca zrzutu ścieków) może on być zastosowany do odwzorowania pracy sieci kanalizacji ciśnieniowej.

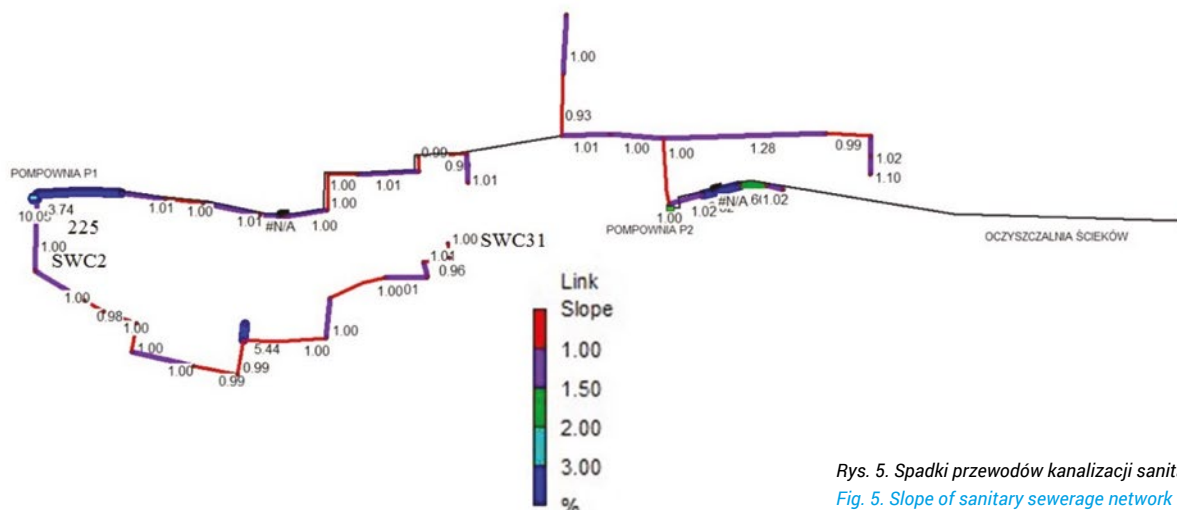
W dalszej kolejności wykonano symulacje funkcjonowania obu wariantów sieci. Dokonanie porównania wyników przeprowadzonych symulacji pozwoliło na wybór wariantu docelowego.

3. Wyniki

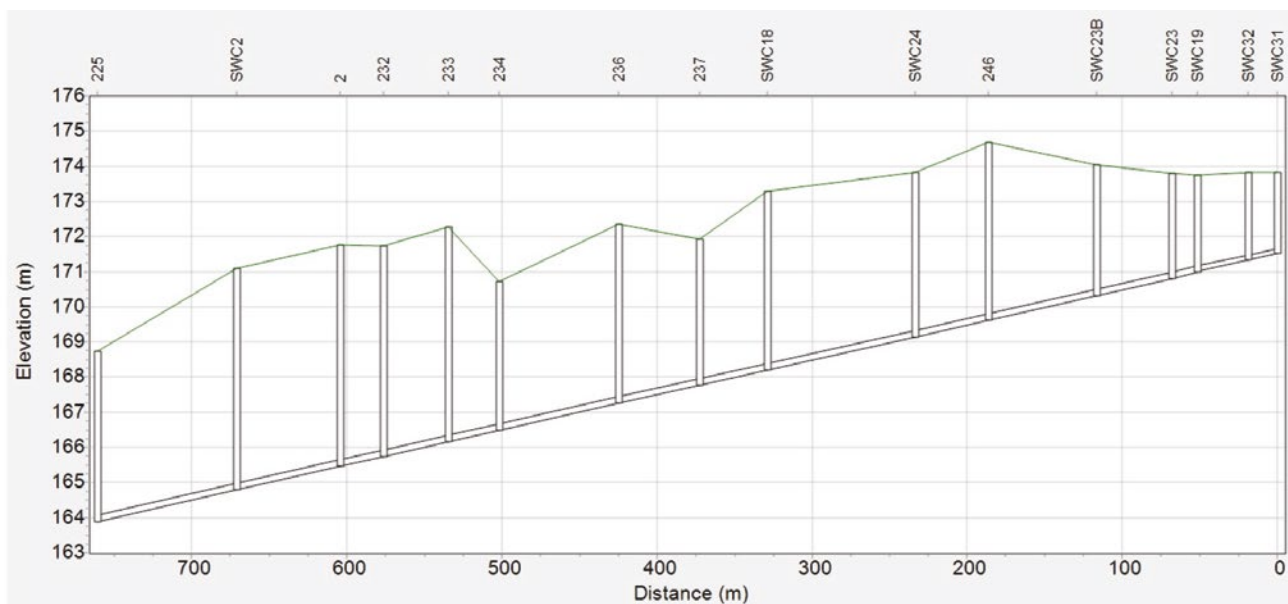
Przeprowadzone badania symulacyjne wykazały, że w wariantcie 1 nie udało się uzyskać prędkości samooczyszczania kanałów, pomimo osiągnięcia znacznych zagłębień przewodów. Na rys. 4 przedstawiono rozkład prędkości przepływu ścieków w przewodach sieciowych w godzinie największego przepływu ścieków.



Rys. 4. Rozkład prędkości przepływu – wariant 1
Fig. 4. Flow velocity simulation – variant 1



Rys. 5. Spadki przewodów kanalizacji sanitarnej – wariant 1
Fig. 5. Slope of sanitary sewerage network – variant 1



Rys. 6. Profil fragmentu sieci kanalizacyjnej
Fig. 6. Profile of a fragment of the sewerage network

Prędkości gwarantujące samooczyszczanie kanałów zostały osiągnięte tylko w przewodach znajdujących się w pobliżu pompowni P1 i P2. Prędkości te nie przekroczyły 1,0 m/s. Niskie prędkości wynikają z konieczności zachowania minimalnej dopuszczalnej średnicy przewodu, jak również z niewielkich spadków przewodów – większość przewodów prowadzona jest ze spadkiem 10‰ (rys. 5). Na rys. 6 przedstawiono profil sieci kanalizacji grawitacyjnej, stanowiącej dolny fragment sieci od studni SWC31 do węzła 225 przed pompownią P1. Maksymalne zagłębienie przewodów wyniosło 6,30 m (węzeł SWC2). Pobór mocy pompy zainstalowanej w pompowni P1 wyniósł 0,2 kWh, a w pompowni P2 0,15 kWh.

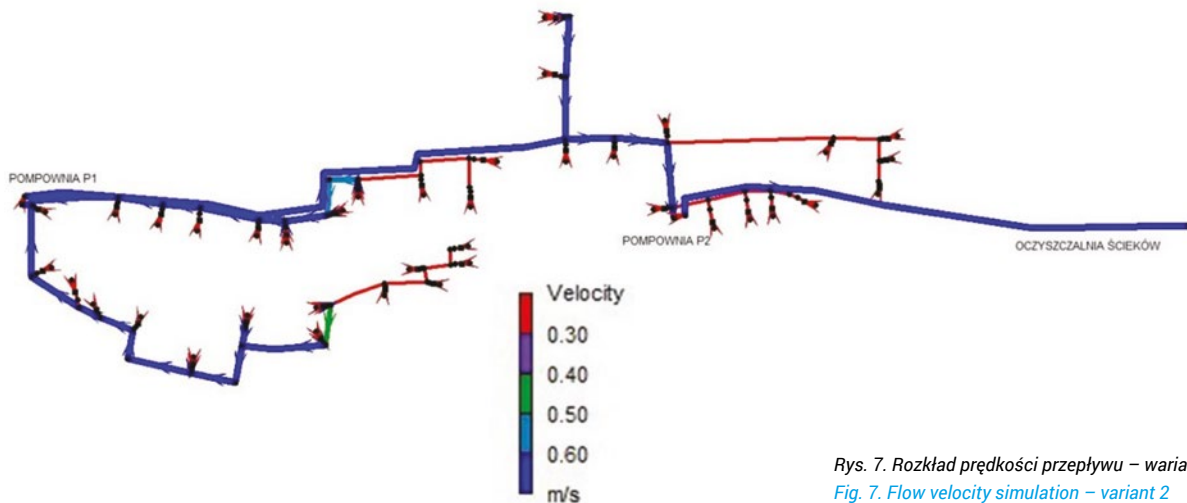
Zgoła odmiennie przedstawiają się wyniki symulacji zrealizowanych dla wariantu drugiego. Na podstawie przeprowadzonych symulacji stwierdzono, że we wszystkich przewodach kanalizacyjnych, przynajmniej raz na dobę, prędkość przepływu ścieków przekracza 0,6 m/s, zapewniając samooczyszczanie sieci (rys. 7). Niższe od 0,6 m/s wartości prędkości przepływu widoczne na rys. 7 wynikają z faktu niejednoczesności występowania przepływów maksymalnych w poszczególnych odcinkach sieci. Udało się także znacząco ograniczyć zagłębienie sieci, co jest szczególnie istotne w warunkach płytko występujących wód gruntowych. Obliczony pobór mocy przez pompownie, zapewniające funkcjonowanie analizowanej sieci, wyniósł 0,62 kWh, zaś sumaryczny chwilowy maksymalny

pobór mocy wyniósł ok. 7,5 kW. Tak niskie wartości wynikają z krótkiego czasu pracy pomp, zarówno przydomowych, jak i sieciowych.

Wybór wariantu docelowego oparto o wyniki prowadzonych symulacji oraz wskaźniki charakteryzujące analizowane systemy (tab. 3). Długość sieci w obu wariantach była taka sama. Ze względu na wymuszenie przepływu ścieków w wariantcie 2 udało się jednak znacząco zmniejszyć średnice projektowanej sieci i zapewnić prędkości przepływu ścieków, gwarantujące samooczyszczanie kanałów. Dodatkowo, ze względu na możliwość układania przewodów kanalizacji ciśnieniowej równoległe do terenu, zmniejszyło się maksymalne zagłębienie kanału.

Tabela 3. Zestawienie wskaźników opisujących przeanalizowane warianty
Table 3. List of indicators describing the analysed variants

Wskaźnik	wariant 1	wariant 2
długość przewodów [m]	3310	3310
maksymalna średnica przewodu [mm]	250	125
maksymalne zagłębienie przewodów [m]	6,30	< 2,0
uzyskanie prędkości przepływu powyżej prędkości samooczyszczania	NIE	TAK
wielkość dobowego poboru mocy [kWh]	0,35	0,62



Rys. 7. Rozkład prędkości przepływu – wariant 2
Fig. 7. Flow velocity simulation – variant 2

Biorąc pod uwagę powyższe zestawienie, autorzy opracowania za korzystniejszy uznali wariant 2, czyli sieć kanalizacyjną ciśnieniową.

4. Wnioski

Bardzo ważnym etapem projektowania sieci kanalizacji sanitarnej na terenach wiejskich jest prawidłowy wybór jej rodzaju. Od niego bowiem zależy prawidłowa praca sieci. Dokonanie tego wyboru może być ułatwione w przypadku wykorzystania odpowiednich narzędzi informatycznych. Wykonanie modelu komputerowego, nie tylko usprawnia sam proces projektowania, skracając czas jego trwania, ale również umożliwia przeprowadzenie symulacji pracy sieci kanalizacyjnej w szerszym zakresie, niż w typowych obliczeniach projektowych. Dzięki temu możliwa jest weryfikacja założeń projektowych oraz sprawdzenie, jaki wariant w danych warunkach będzie działał prawidłowo. Do modelowania kanalizacji grawitacyjnej można użyć programu EPA SWMM, który jest dedykowany takim sieciom. Program EPANET, choć opracowany pierwotnie do modelowania sieci wodociągowych, może być także stosowany do modelowania pracy kanalizacji ciśnieniowej.

LITERATURA

- [1] Błaszczak P., Nowakowska-Błaszczak A., 2016. „Rozwój i kształtowanie systemów kanalizacyjnych w Polsce w dostosowaniu do warunków określonych w Traktacie o akcesji Polski do Unii Europejskiej,” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (1):22-28.
- [2] Błażejowski R., 2012, „Kanalizacja terenów niezurbanizowanych” *Wodociągi – Kanalizacja* 1/2012 (95).
- [3] Błażejowski R., 2012, „Stan i możliwości rozwoju infrastruktury wodociągowo-kanalizacyjnej w Polsce,” *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* (2): 49-51.
- [4] Błażejowski R., Matz R., 2018, Jak wybrać i zaprojektować najlepszy system kanalizacyjny na obszarach wiejskich? Ośrodek Informacji "Technika instalacyjna w budownictwie" Tom 1, 45-49.
- [5] Błażejowski R., Murat-Błażejowska S., 2020, Gospodarka ściekowa na terenach wiejskich. Monografia Komitetu Inżynierii Środowiska vol.166, Ocena gospodarki ściekowo-osadowej w Polsce. Wydawnictwo PAN, Lublin, 77-86.
- [6] Brand N., Ostfeld A., 2011, Optimal design of regional wastewater pipelines and treatment plant systems. *Water Environment Research*, 83/1, 53-64.
- [7] GUS Infrastruktura komunalna w 2018 roku. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/infrastruktura-komunalna-nieruchomosci/nieruchomosci-budynki-infrastruktura-komunalna/infrastruktura-komunalna-w-2018-roku,10,2.html>.
- [8] GUS Infrastruktura komunalna w 2019 roku. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/infrastruktura-komunalna-nieruchomosci/nieruchomosci-budynki-infrastruktura-komunalna/infrastruktura-komunalna-w-2019-roku,10,3.html>.
- [9] GUS Infrastruktura komunalna w 2020 roku. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/infrastruktura-komunalna-nieruchomosci/nieruchomosci-budynki-infrastruktura-komunalna/infrastruktura-komunalna-w-2020-roku,10,4.html>.
- [10] GUS Infrastruktura komunalna w 2021 roku. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/infrastruktura-komunalna-nieruchomosci/nieruchomosci-budynki-infrastruktura-komunalna/infrastruktura-komunalna-w-2021-roku,10,5.html>.
- [11] Kalenik M., Siwiec T., Wichowski P., 2012. „Kanalizacja ciśnieniowa i podciśnieniowa obszarów wiejskich” *Rynek Instalacyjny* 11/2012.
- [12] Kamińska E., Zakrzewski A., 2020, Rola i udział Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) w budowie krajowego systemu oczyszczania ścieków komunalnych. Monografia Komitetu Inżynierii Środowiska vol.166, Ocena gospodarki ściekowo-osadowej w Polsce. Wydawnictwo PAN, Lublin, 54-76.
- [13] Kanclerz A., 2003. „Wybór systemu kanalizacji”. *Rynek Instalacyjny* (5): 30-35
- [14] Lomotowski J., Szpindor A. 1999. Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków, Arkady, Warszawa .
- [15] Matz R., 2007. „Sieci kanalizacji podciśnieniowej, ciśnieniowej, i grawitacyjnej oraz ich efektywność w danym terenie”, *Wodociągi-Kanalizacja*, Nr 11/2007, 194.
- [16] Olszewski W., Rytel J., 2007, „Próba zdefiniowania kryteriów wyboru systemu odprowadzania ścieków komunalnych”, *Instal* (9):66-68.
- [17] Rossman A. L., 2015, Storm Water Management Model User’s Manual Version 5.1 <https://www.epa.gov/water-research/storm-water-management-model-swmm>.
- [18] Rossman A. L., Woo H., Tryby M., Shang., Janke., Haxton T., Epanet 2.2 User Manual <https://www.epa.gov/water-research/epanet>.
- [19] Suchorab P., Iwanek M., Głowacka A., 2015, Ocena efektywności ekonomicznej wybranych systemów kanalizacji sanitarnej, *Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska I Architektury Journal Of Civil Engineering, Environment And Architecture JCEEA*, T. XXXII, z. 62 (3/i/15), lipiec-wrzesień 2015, s. 447-456.
- [20] Widomski M., Iwanek M., Musz A., Ścibior A., 2012, Metody oceny efektywności ekonomicznej inwestycji w projektowaniu gminnej sieci kanalizacji sanitarnej, *Polska Inżynieria Środowiska: prace*. T. 1, [Red:] Dudzińska Marzenna, Pawłowski Artur , Lublin, Politechnika Lubelska, 289-298.