

MAŁGORZATA NIEDZIOŁEK*, IZABELA ZIMOCH**,
WOJCIECH DĄBROWSKI*, TADEUSZ ŻABA***, MICAJAH MCGARITY****

WPLYW WYSADZINOWOŚCI GRUNTÓW NA AWARYJNOŚĆ PRZEWODÓW WODOCIĄGOWYCH

EFFECTS OF FROST HEAVE ON WATER PIPELINES FAILURES

Streszczenie

W obliczu awarii, jakie dotyczą systemy zaopatrzenia w wodę i stanowią niebagatelne wydatki, które muszą ponieść przedsiębiorstwa świadczące usługi dostawy wody pitnej podejmowane są liczne próby naukowego odnalezienia powiązań pomiędzy przyczynami utraty niezawodności tych systemów. Niniejszy artykuł podejmuje próbę określenia zależności występujących pomiędzy liczbą awarii, warunkami gruntowymi i atmosferycznymi. Poszukiwanie prostych dwuwymiarowych zależności jest wstępem do przeprowadzenia w przyszłości analizy wielokryterialnej. Obiektem badań jest sieć wodociągowa miasta Krakowa dla danych pochodzących z lat 2004–2005. Porównano awaryjności przewodów żeliwnych w poszczególnych typach gruntów i analogicznie przewodów tworzywowych. Wyniki dodatkowo odniesiono do średnich miesięcznych wysokości opadów wg danych z IMGW dla tych lat. Przeprowadzone analizy pokazały, że wzmożona awaryjność przewodów jest poprzedzana okresami zintensyfikowanych opadów. Ponadto wzmożona awaryjność przewodów w gruntach niestabilnych w okresach jesienno-zimowych może być wiązana ze zjawiskiem wysadzinowości gruntów i utraty jego stabilności.

Słowa kluczowe: analiza dwuwymiarowa i wielokryterialna, awaryjność sieci wodociągowej, system zaopatrzenia w wodę, wysadzinowość gruntów

Abstract

In the face of the failures that affect water supply systems and provide considerable expenses faced by water companies numerous attempts are made to find a scientific link between the causes of loss of reliability of these systems. Article presents attempts to determine the relations between the number of failures, ground conditions and weather. Looking for simple two-dimensional relationships is an introduction to multi-criteria analysis in the future. The research was made based on data for water supply system of the town Kraków from the years 2004 to 2005. Cast iron and plastic pipe failures were compared in different types of soil. The results were also compared to the average monthly amount of precipitation according to data from IMGW for those years. The analysis showed that the increased unreliability of water pipes is preceded by periods of intensified precipitation. In addition, increased unreliability of water pipes in unstable soils in the autumn and winter periods may be related to the phenomenon of frost heave in the ground and further loss of its stability.

Keywords: frost heave, pipeline failure, two dimensional and multivariate analysis, water supply system

* Mgr inż. Małgorzata Niedziółek, doktorantka, prof. dr hab inż. Wojciech Dąbrowski, Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Ochrony Środowiska, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska.

** Dr inż. Izabela Zimoch, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Śląska.

*** Dr inż. Tadeusz Żaba, Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji S.A w Krakowie.

**** Micajah McGarity, John Hopkins University, USA.

1. Wstęp

Zadaniem, jakie stoi przed każdym systemem zaopatrzenia w wodę, jest dostarczenie do odbiorców określonej ilości wody o odpowiedniej jakości i pod wymaganym ciśnieniu [1, 4]. Zatem każde z przedsiębiorstw przez swoich konsumentów jest oceniane na podstawie spełnienia wymienionych wymagań. Wszelkiego rodzaju uszkodzenia sieci wodociągowej pociągają za sobą ogromne wydatki na renowacje, a niekiedy nawet odszkodowania [3].

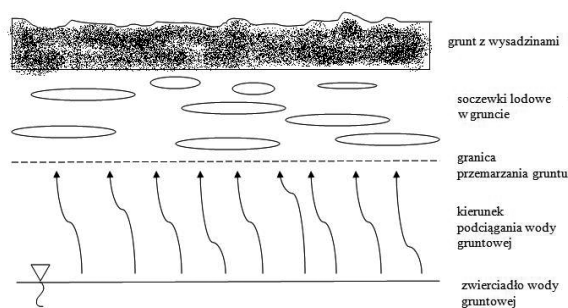
Przewody wodociągowe jako infrastruktura podziemna znajdują się w permanentnej interakcji z gruntem, w którym są posadowione. Są narażone zarówno na reakcje chemiczne występujące w glebie, jak i zjawiska mechaniczne związane z ruchem pionowym i poziomym gruntów [6].

W niniejszym artykule przedstawiona zostanie analiza zarejestrowanych przez Krakowskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji S.A. danych dotyczących awarii przewodów i elementów sieci wodociągowej w latach 2004–2005.

2. Mechanizm powstawania wysadzin

Najogólniej można zdefiniować wysadzinowość jako zwiększanie się objętości gruntu na skutek zjawisk kapilarnego podciągania wody w porach gruntu do strefy przemarzania. Choć rurociągi są układane zawsze poniżej normatywnej strefy przemarzania, to jednak pozostają pod wpływem naprężeń powstałych w gruncie podczas tworzenia się soczewek lodowych. Na wiosnę lód topnieje i w gruntach związłych wilgotność może przekroczyć granicę płynności, a to oznacza utratę stabilności gruntu.

Soczewki lodowe w gruncie, powyżej poziomu jego przemarzania, tworzą się na skutek przyciągania wody z porów i z powierzchni cząstek gruntu w ich pobliżu. W wyniku tego zjawiska i krystalizacji następuje osuszenie gruntu w okolicy takiej soczewki. Równocześnie powstaje podciśnienie, które podciąga wodę z głębszych, wilgotniejszych warstw gruntu. To tłumaczy, dlaczego wysadziny potrafią występować na skalę dużo większą niż mogłoby się wydawać, biorąc pod uwagę jedynie zwiększanie objętości zamarzającej wody. Gdyby nie występowało przemieszczanie pionowe cząsteczek wody w gruncie, to wysadziny nie przekraczałyby wysokości 5 cm [2, 7]. Rysunek 1 schematycznie przedstawia opisywane zjawisko.



Rys. 1. Ilustracja do mechanizmu powstawania wysadzin wg [5, 7]

Fig. 1. Frost heave mechanism

3. Warunki powstawania wysadzin i klasyfikacja gruntów

Zgodnie z kryteriami wysadzinowości profesora Wiłuna [7] wyselekcjonowano trzy główne przyczyny powstawania zjawiska wysadzinowości gruntu:

- rodzaj gruntu jest wysadzinowy,
- płytki poziom zwierciadła wody gruntowej,
- długotrwałość występowania niskiej temperatury.

Im grunt jest bardziej drobnoziarnisty, tym pory mają mniejsze wymiary, a zatem rozrastające się soczewki lodowe odpychają się od położonych poniżej cząstek gruntu i powodują wypiętrzanie ku górze. To tłumaczy, dlaczego takie zjawisko nie zachodzi w gruntach gruboziarnistych, gdzie przestrzenie międzyporowe są znaczne. Również wysadzinowość iltów jest niewielka, co tłumaczy się bliską zeru wartością współczynnika filtracji, a więc bardzo dużym utrudnieniem podciągania wody do strefy przemarzania, pomimo dużej wysokości podciągania kapilarnego. Według kryterium francuskiego o wysadzinowości gruntów świadczy wartość iloczynu wysokości podciągania kapilarnego i współczynnika filtracji. Praktyczni Brytyjczycy po prostu zamrażają próbę gruntu według precyzyjnie określonej procedury i mierzą wielkość wysadzin. Kryterium Korpusu Inżynierów Amerykańskich opiera ocenę wysadzinowości na krzywych uziarnienia, Szwedzi prowadzą ocenę w oparciu o geologiczne pochodzenie i budowę gruntu, a prof. Wiłun wiązał również prognozowanie wysadzinowości z warunkami klimatycznymi.

Mając na uwadze powyższe informacje, wysadzinowość klasyfikuje się w oparciu o uziarnienie gruntu. W tabeli 1 przedstawiono klasyfikację według A. Casagrande gruntów wysadzinowych [5].

Tabela 1

Kryterium wysadzinowości gruntów wg Casagrande'a

Uziarnienie gruntu wysadzinowego (U – stopień różnoziarnistości = d_{60}/d_{10})	Zawartość procentowa cząstek od 0,02 mm
bardzo różnoziarnisty $U > 15$	powyżej 3%
różnoziarnisty $U < 5$	powyżej 10%

Według Wiłuna poza uziarnieniem gruntu za znaczący uważa się wpływ jego cech adsorbcyjno-kapilarnych. W tabeli 2 przedstawiono tę klasyfikację [5].

Tabela 2

Podział gruntów wg Wiłuna

Grupa gruntów	Kapilarność bierna	Zawartość cząstek < 0,05 mm	Zawartość cząstek < 0,02 mm	Typ gruntu
A – niewysadzinowe bezpieczne w każdych warunkach wodno-gruntowych i klimatycznych	< 1 m	< 20%	< 3%	czyste żwiry, pospółki i piaski

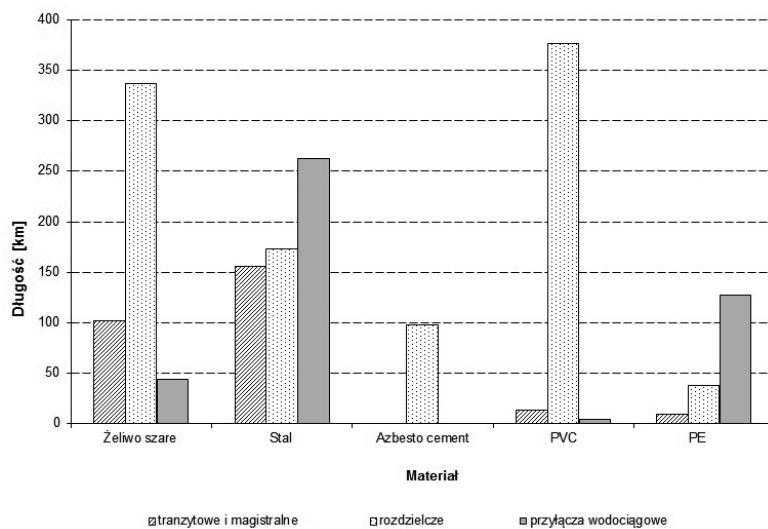
B – mało wysadzinowe (wątpliwe)	< 1,3 m	20–30%	3–10%	bardzo drobne piaski, piaski pyliste i próchnice
C – wysadzinowe	> 1,3 m	> 30%	> 10%	grunty spoiste i namuły organiczne

Kapilarność bierną definiuje się jako różnicę wysokości wody w kapilarach przed oraz po gwałtownym obniżeniu wysokości zwierciadła wody gruntowej.

4. Opis badanego systemu

Sieć wodociągowa miasta Krakowa to system pierścieniowy o łącznej długości przewodów ponad 1940 km. Jest podzielona na trzy rejony zasilania: Centrum, Podgórze oraz Nowa Huta. Woda pochodzi w ujęć na Rabis, Rudawie, Dłubni i Sance oraz z podziemnego ujęcia Mistrzejowice. Ponadto 11 zbiorników zapasowo-wyrównawczych zapewnia wygodną eksploatację sieci wodociągowej [8].

Pod względem wieku przewodów zestawienie wygląda następująco: przewody ponad 50-letnie stanowią 7% całkowitej długości, przewody w wieku 25–50 lat to 36%, przewody w wieku 10–25 to 33%, a te z ostatnich 10 lat to 24% [8]. Strukturę materiałową przedstawiono na rys. 2 [8].



Rys. 2. Struktura materiałowa sieci wodociągowej miasta Krakowa wg MPWiK

Fig. 2. Piping system materials in city of Krakow

5. Badania

Dane do przeprowadzonych badań uzyskano dzięki uprzejmości Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji S.A. w Krakowie. Jest to zestaw szczegółowych danych dotyczących awarii, które wystąpiły w sieci wodociągowej na przestrzeni lat 2004–2005. Dodatkowo w analizie wyników wykorzystane zostały zapisy średniej wysokości miesięcznych opadów w poszczególnych miesiącach tego okresu – tabela 3.

Tabela 3

Średnie miesięczne opady dla Krakowa wg IMGW [9]

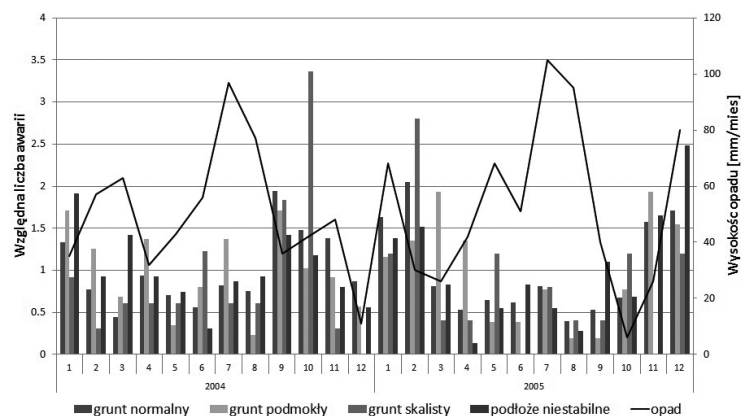
Miesiąc	Opad średni [mm]	
	rok 2004	rok 2005
styczeń	35	68
luty	57	30
marzec	63	26
kwiecień	32	42
maj	43	68
czerwiec	56	51
lipiec	97	105
sierpień	77	95
wrzesień	36	40
październik	42	6
listopad	48	26
grudzień	11	80

Podjęto próbę określenia zależności występujących pomiędzy liczbą awarii, warunkami gruntowymi i atmosferycznymi. Poszukiwanie prostych dwuwymiarowych zależności jest wstępem do przeprowadzenia w przyszłości analizy wielokryterialnej.

Do analiz wykorzystano dane dotyczące 1400,23 km przewodów magistralnych i rozdzielczych.

Podział gruntów zachowano jak w oryginalnym dokumencie, czyli wyłącznie na: grunty normalne, skaliste, podmokłe i niestabilne.

Na rysunku 3 przedstawiono zależność względnej liczby awarii dla przewodów żeliwnych zestawioną ze średnimi opadami przypadającymi na dany miesiąc wg danych IMGW. Przez awaryjność względną uważa się tutaj awaryjność odniesioną do wartości średniej.

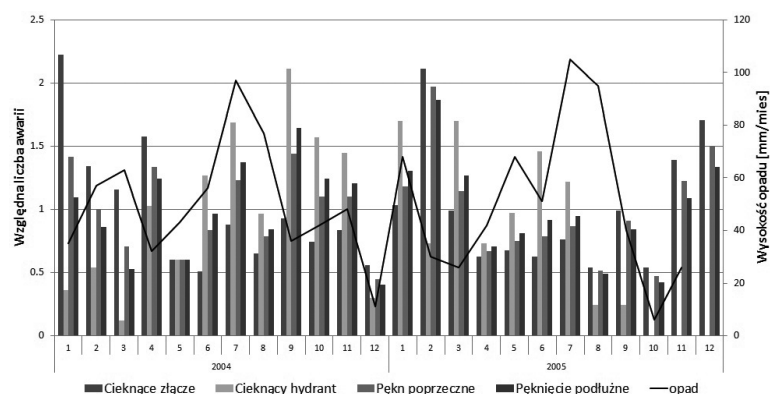


Rys. 3. Zmienność awaryjności względnej przewodów żeliwnych z uwzględnieniem rodzaju gruntu na tle zmian wysokości opadów

Fig. 3. Variation of the relative failure of cast iron pipes with land type and precipitation taken into account

Zauważalny jest wzrost awaryjności przewodów w okresach bezpośrednio następujących po miesiącach wzmożonych opadów. Zależność ta dotyczy każdego rodzaju podłoża, ale szczególnie wyraźnie zaznacza się dla gruntu podmokłego, a także dla skalistego. Można to zjawisko tłumaczyć pogorszeniem warunków nośnych w podłożu podmokłym.

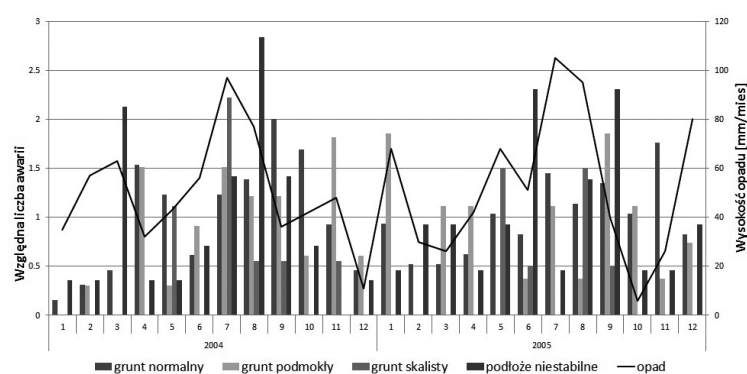
Jeżeli zwrócimy uwagę, jaki rodzaj awarii dominuje w tych okresach (rys. 4), to są to przecieki złączy oraz hydrantu oraz pęknięcia poprzeczne. To może świadczyć o tym, że przewód na skutek utraty stabilności namokniętego długotrwałym opadem gruntu, podlega naprężeniom powodującym jego rozszczelnianie oraz występowanie momentu zginającego prowadzącego do pęknięć.



Rys. 4. Rozkład awaryjności względnej przewodów żeliwnych z uwzględnieniem rodzaju awarii na tle zmian wysokości opadów

Fig. 4. Distribution of the relative failure of cast iron pipes with type of failure and precipitation taken into account

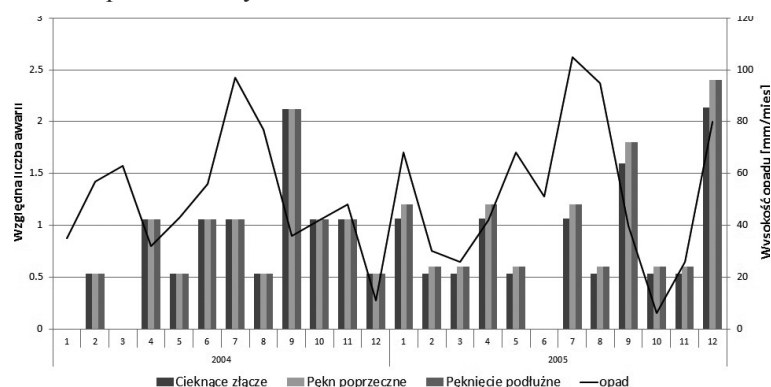
Jeżeli podobny typ rozumowania przeprowadzimy dla przewodów tworzywowych z PVC oraz PE, które właściwościami, jak i wiekiem znacząco się różnią od przewodów żeliwnych, możemy zauważyć na rys. 5, że po okresach wzmożonych opadów następuje nasilenie liczby awarii w gruntach niestabilnych oraz – podobnie jak dla żeliwa – zauważalny wzrost dla gruntu skalistego. Należy tutaj mieć na uwadze jednak fakt, że na podstawie rys. 2 widać, że przewodów PVC jest ponad 2 razy więcej, zatem rozważania w szczególnej mierze dotyczą tych właśnie rurociągów.



Rys. 5. Zmienność awaryjności względnej przewodów tworzywowych z uwzględnieniem rodzaju gruntu na tle zmian wysokości opadów

Fig. 5. Variation of the relative failure of plastic pipes with land type and precipitation taken into account

Analizując typy awarii, jakie miały w tym okresie miejsce, widzimy na rys. 6, że nie ma wyraźnego zróżnicowania na typ awarii następujący po okresie wzmożonych opadów, ale zdecydowanie zaznacza się tendencja do wzrostu awaryjności każdego wymienionego rodzaju uszkodzeń po deszczowym okresie.



Rys. 6. Rozkład awaryjności względnej przewodów tworzywowych z uwzględnieniem rodzaju awarii na tle zmian wysokości opadów

Fig. 6. Distribution of the relative failure of plastic pipes with type of failure and precipitation taken into account

6. Wnioski

1. Z przeprowadzonej analizy wynika, że zmiany awaryjności na przestrzeni badanego okresu miały związek z rozkładem średnich opadów miesięcznych. Po intensywnych opadach wzrastała liczba awarii.
2. W okresach jesieni i zimy widać wzmożoną awaryjność na przewodach posadowionych w gruntach niestabilnych. Biorąc pod uwagę opisywane mechanizmy zjawiska wysadzinowości – i co za tym idzie – utraty stabilności gruntu i występowanie w nim ruchów pionowych, można ze sobą łączyć ten fakt, interpretując otrzymane wyniki. Jak zostało wspomniane we wstępie, wzmożone topnienie pokrywy lodowej lub śniegowej może prowadzić do przekraczania granicy płynności gruntu.

Obydwa te spostrzeżenia wymagają potwierdzenia w modelu wieloparametrycznym, albowiem poszukiwanie dwuparametrycznych zależności może być niewystarczające i prowadzić do mylnych wniosków.

Literatura

- [1] Bajer J., Iwanejko R., Kapcia J., *Niezawodność systemów wodociagowych i kanalizacyjnych w zadaniach*, Politechnika Krakowska, Kraków 2006.
- [2] Bronfenbrenner L., *A non-instantaneous kinetic model for freezing in porous media*, Chemical Engineering and Processing, 47, 2008, 1631-1646.
- [3] Hong H.P., Allouche E.N., Trivedi M., *Optimal scheduling of replacement and rehabilitation of water distribution systems*, Journal of Infrastructure Systems ASCE, 2006, 12: 3, 184-191.
- [4] Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczkiewicz H., *Niezawodność wodociągów i kanalizacji*, Arkady, Warszawa 1993.
- [5] Pisarczyk S., *Mechanika gruntów*, Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, 1991.
- [6] Rajani B., Kleiner Y., *Comprehensive review of structural deterioration of water mains: physically based models*, Urban Water, 3, 2001, 177-190.
- [7] Wiłun Z., *Zarys geotechniki*, WKŁ, Warszawa 1987.
- [8] Strona Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji S.A. w Krakowie (www.mpwik.krakow.pl/).
- [9] Strona IMGW (www.imgw.pl/wl/internet/zz/pogoda/tempsred.html).