

**Dr inż. Małgorzata Iwanek, Dr hab. inż. Beata Kowalska, Prof. PL**

Katedra Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków  
Wydział Inżynierii Środowiska  
Politechnika Lubelska  
ul. Nadbystrzycka 40 B, 20-816 Lublin, Poland  
E-mail: M.Iwanek@wis.pol.lublin.pl  
B.Kowalska@pollub.pl

**Elżbieta Hawryluk, Kamil Kondraciuk**

absolwenci  
Politechnika Lubelska

## **Odległość i czas wypływu wody na powierzchnię terenu po awarii podziemnego wodociągu. Badania laboratoryjne i analizy statystyczne**

**Słowa kluczowe:** *wodociąg, awaria, eksploatacja, wypływ wody*

**Abstract:** Jedną z propozycji ograniczenia uciążliwości spowodowanych zjawiskami sufozyjnymi po awarii wodociągu jest zachowanie w pobliżu przewodów tzw. stref ochronnych, o zagospodarowaniu których decydowałby eksploatacator sieci. Określenie wymiarów takich stref jest bardzo trudnym zadaniem, dlatego stosowne analizy powinny odbywać się stopniowo, na bazie kolejnych etapów badań terenowych, laboratoryjnych i numerycznych.

W ramach niniejszej pracy przedstawiono wyniki pierwszego etapu badań laboratoryjnych, których ostatecznym celem jest wyznaczenie strefy ochronnej wokół ewentualnej nieszczelności rury wodociągowej. Pierwszy etap badań objął określenie przeciętnej odległości wypływu wody na powierzchnię terenu od miejsca awarii podziemnego wodociągu dla 4 różnych powierzchni nieszczelności przewodu oraz 11 wysokości ciśnień w przewodzie, wstępne oszacowanie wielkości strefy ochronnej dla analizowanych warunków gruntowych oraz analizę zależności między czasem wypływu wody na powierzchnię terenu po awarii podziemnego wodociągu a powierzchnią nieszczelności i wysokością ciśnienia w przewodzie. Zakres pracy obejmował badania laboratoryjne i analizy statystyczne. Badania przeprowadzono z zachowaniem podobieństwa geometrycznego i kinematycznego. Uzyskane wyniki należy więc traktować jako wstępne, ukierunkowujące dalsze etapy badań laboratoryjnych, uwzględniające również podobieństwo dynamiczne.

### **1. Wstęp**

Eksploatacji przewodów wodociągowych na całym świecie towarzyszą awarie i związane z nimi wycieki. Dzięki sprawnemu zarządzaniu systemem wodociągowym i podejmowaniu właściwych czynności eksploatacyjnych, można ograniczyć liczbę awarii, nie można ich jednak całkowicie wyeliminować, ponieważ najczęściej mają charakter losowy [5, 7, 24]. Ich skutkiem są straty finansowe i społeczne [7, 8, 25, 28]. Ponadto wycieki mogą stanowić zagrożenie bezpieczeństwa ludzi i mienia, zwłaszcza w aglomeracjach miejskich, gdzie wodociągi zlokalizowane są w pasach drogowych jako element licznego uzbrojenia podziemnego oraz gdzie występuje zwarta zabudowa [13]. Niebezpieczeństwo wynika z możliwości wymywania przez wodę cząstek ze szkieletu gruntowego podczas awarii podziemnego przewodu, co może doprowadzić do powstawania pustych przestrzeni pod powierzchnią gruntu i tworzenia zapadlisk terenu (zjawiska sufozyjne) [1, 4, 9]. Przypadki takie niejednokrotnie miały miejsce na całym świecie, niosąc za sobą straty społeczne i ekonomiczne [22]. W Polsce czynnikiem zwiększającym ryzyko wystąpienia

rozpatrywanego problemu jest występowanie gleb podatnych na zjawisko sufozji, zwłaszcza w pasie wyżyn lessowych [2] oraz wysoki w porównaniu z innymi krajami wskaźnik jednostkowej intensywności uszkodzeń sieci wodociągowych [15, 16, 18, 19].

Jedną z propozycji ograniczenia negatywnych skutków zjawisk sufozyjnych po ewentualnej awarii wodociągu jest zachowanie w pobliżu przewodów tzw. stref ochronnych, w obrębie których decyzje odnośnie zagospodarowania byłyby podejmowane wyłącznie za zgodą eksploatatora wodociągu [11, 14]. Określenie wymiarów takich stref jest trudnym zadaniem ze względu na złożoność rozpatrywanego zjawiska [3, 10, 27]. Podczas awarii podziemnego wodociągu występują trzy powiązane ze sobą podstawowe procesy: ciśnieniowy przepływ wody w przewodzie zamkniętym, wypływ wody przez otwór oraz przepływ wody w ośrodku porowatym. Procesy te charakteryzowane są dużą liczbą parametrów, wśród których są wielkości niezależne (np. średnica wodociągu), wzajemnie zależne w jednym procesie (np. zależność między natężeniem przepływu wody w wodociągu a wysokością ciśnienia w tym wodociągu), a także wpływające na siebie w różnych procesach (np. prędkość wypływu wody przez otwór w wodociągu wpływa na prędkość przepływu wody w gruncie). Kolejną trudnością jest to, że niektóre parametry są zmienne w przestrzeni lub w czasie (np. współczynnik filtracji gruntu) albo zależą od czynników zewnętrznych (np. współczynnik lepkości wody zależny od temperatury). Ponadto związki między parametrami w obrębie procesów opisane są złożonymi zależnościami – przykładowo ruch wody w gruncie charakteryzuje równanie Richardsa [23], które jest równaniem różniczkowym rzędu drugiego o pochodnych cząstkowych. Dodatkowym problemem jest możliwość wymywania i przemieszczania się cząstek gruntu wraz wodą wypływającą z podziemnego wodociągu po awarii. Z powodu wymienionych trudności analizy zmierzające do określenia wymiarów stref ochronnych powinny odbywać się stopniowo, na bazie kolejnych etapów badań terenowych, laboratoryjnych i numerycznych.

W ramach niniejszej pracy przedstawiono wyniki pierwszego etapu badań laboratoryjnych, których ostatecznym celem jest wyznaczenie strefy ochronnej wokół ewentualnej nieszczelności rury wodociągowej. W zakres pierwszego etapu weszło określenie przeciętnej odległości wypływu wody na powierzchnię terenu od miejsca awarii podziemnego wodociągu dla 4 różnych powierzchni nieszczelności przewodu oraz 11 wysokości ciśnień w przewodzie, wstępne oszacowanie wielkości strefy ochronnej dla analizowanych warunków gruntowych oraz analizę zależności między czasem wypływu wody na powierzchnię terenu po awarii podziemnego wodociągu a powierzchnią nieszczelności i wysokością ciśnienia w przewodzie. Zakres pracy obejmował badania laboratoryjne i analizy statystyczne. Badania przeprowadzono z zachowaniem podobieństwa geometrycznego i kinematycznego [12]. Uzyskane wyniki należy więc traktować jako wstępne, ukierunkowujące dalsze etapy badań laboratoryjnych, uwzględniające również podobieństwo dynamiczne.

## 2. Metodyka

Badania prezentowane w ramach niniejszej pracy składają się z dwóch części. Pierwsza z nich polegała na wykonaniu eksperymentu – fizycznej symulacji awarii sieci wodociągowej na stanowisku laboratoryjnym odzwierciedlającym rzeczywiste warunki pracy wodociągu w skali 1:10. Druga część obejmowała analizy statystyczne uzyskanych w trakcie badań laboratoryjnych wyników pomiarów odległości miejsca wypływu wody na powierzchnię terenu od nieszczelności przewodu oraz czasu, po którym ten wypływ następuje.

Przeprowadzenie fizycznej symulacji awarii wodociągu poprzedzone było budową stanowiska badawczego (Rys.1). W jego skład wchodzi przewód wodociągowy 1 zakopany

w skrzyni 2 o wymiarach 1,5 m × 1,5 m × 0,5 m wypełnionej piaskiem średnim. Piasek zagęszczany był ręcznie 2-centymetrowymi warstwami według ściśle ustalonych stałych procedur. W ramach badań laboratoryjnych określone zostały następujące parametry piasku (tab.1 i 2):

- skład granulometryczny – metodą analizy sitowej według normy [21],
- wskaźnik zagęszczenia – za pomocą aparatu Proctora według procedur opisanych w normie [21] dla metody I (mały cylinder, 3 warstwy gruntu, 25 uderzeń ubijaka lekkiego),
- porowatość – za pomocą kolby Le Chateliera [22],
- współczynnik filtracji – za pomocą przepuszczalnościomierza GeoN – Sondy BAT (Geonordic AB, Szwecja),
- wilgotność – mierzona przed każdą symulacją awarii miernikiem TDR (EASY-TEST, Lublin, Polska).

Tab.1. Zestawienie wyników analizy sitowej

Średnica ziaren $d$ , mm	Zawartość, %
$4 < d$	8,97
$3,15 < d \leq 4$	2,17
$2 < d \leq 3,15$	4,2
$1,4 < d \leq 2$	3,66
$1 < d \leq 1,4$	3,63
$0,8 < d \leq 1$	3,83
$0,5 < d \leq 0,8$	17,74
$0,25 < d \leq 0,5$	35,67
$0,125 < d \leq 0,25$	15,06
$d \leq 0,125$	5,03

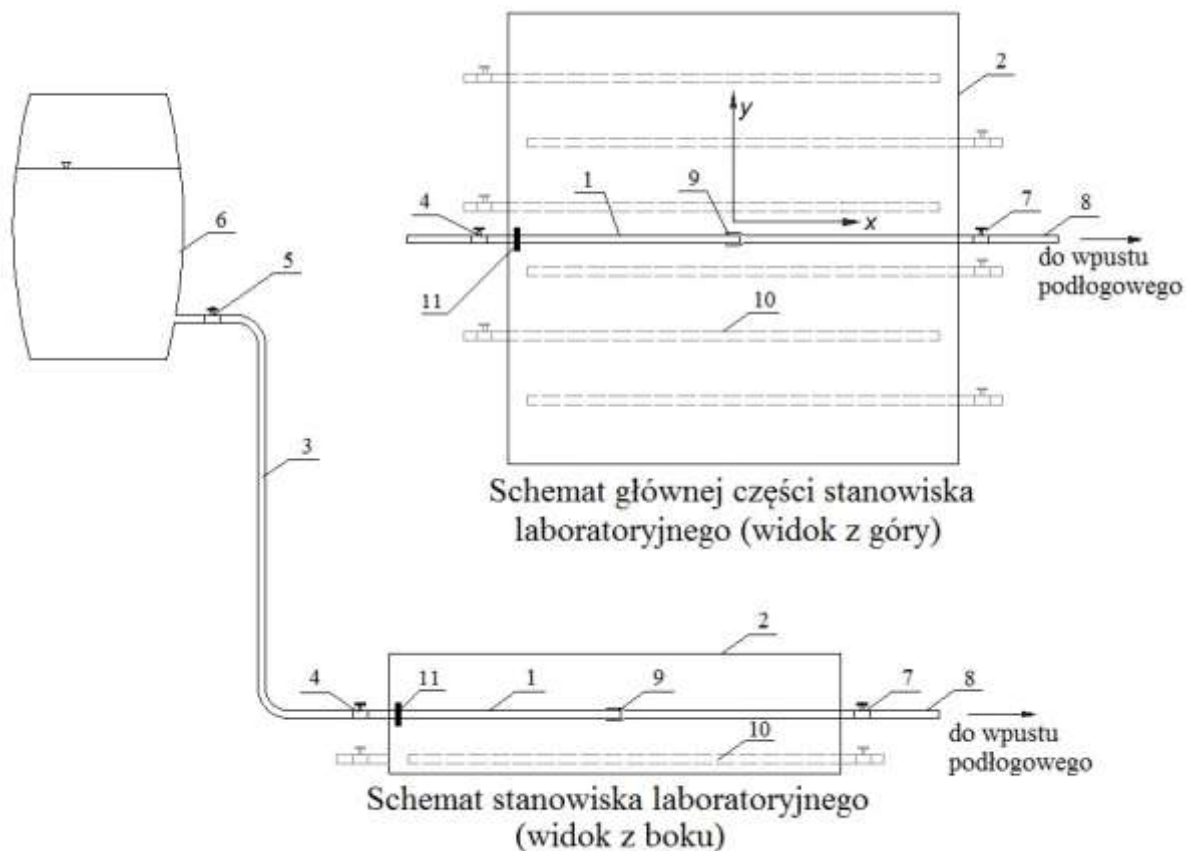
Tab.2. Parametry piasku zagęszczonego

Parametr	Wartość parametru
Wskaźnik zagęszczenia	0,93÷0,94
Porowatość	0,26
Współczynnik filtracji, m/s	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Wilgotność, % obj.	3,89÷5,20

Jeden koniec rury 1 wystający ze skrzyni 2 jest połączony za pomocą węża gumowego 3 ze zbiornikiem zasilającym 6 ustawionym na założonej wysokości. Z drugiego końca rury 1 poprzez wąż gumowy 8 woda jest odprowadzana do wpustu podłogowego. Rura 1 składa się z dwóch części jednakowej długości, połączonych ze sobą kielichowo (9). Odpływ nadmiaru wody pozostałej po doświadczeniach umożliwia zainstalowany w części dolnej skrzyni 2 drenaż 10.

Eksperyment polegał na wprowadzeniu wody pod ciśnieniem do uszkodzonego przewodu wodociągowego i spowodowaniu kontrolowanego wycieku. Na początku eksperymentu, przy zamkniętych wszystkich zaworach, zbiornik 6 jest napełniany wodą powyżej założonego poziomu, po czym otwierane są wszystkie zawory i następuje odpowietrzenie instalacji. Gdy woda w zbiorniku 6 osiągnie założony poziom, zawór 7 jest zamykany, po czym koniec rury 1 od strony zasilającej jest pociągnięty w kierunku „od skrzyni”, w wyniku czego następuje rozszczelnienie połączenia kielichowego 9. Po pojawieniu się wody na powierzchni piasku zawór 4 jest zamykany. Następnie określone są wymiary powstałego w gruncie otworu i jego lokalizacja względem miejsca nieszczelności na przewodzie wodociągowym. Ważnym elementem stanowiska jest

obejma 11 zamontowana na rurze 1 od strony zasilania za zaworem 4 po stronie wewnętrznej skrzyni (Rys. 2). Zapewnia ona jednakową szerokość szczeliny w każdym powtórzeniu doświadczenia.



Rys. 1. Schemat stanowiska laboratoryjnego do fizycznej symulacji awarii wodociągu [11]: 1 – przewód wodociągowy, 2 – skrzynia wypełniona piaskiem, 3 – wąż gumowy od strony zasilającej, 4, 5 – zawory odcinające po stronie zasilającej, 6 – zbiornik z wodą, 7 – zawór odcinający po stronie odpływu, 8 – wąż gumowy wprowadzony do wpustu podłogowego, 9 – połączenie kielichowe, 10 – drenaż, 11 – obejma



Rys. 2. Obejma zapewniająca jednakową szerokość szczeliny po każdym rozszczelnieniu przewodu

Badania zostały przeprowadzone dla 4 różnych powierzchni otworów powstałych po rozszczelnieniu przewodu –  $4,71 \text{ cm}^2$ ,  $5,58 \text{ cm}^2$ ,  $9,42 \text{ cm}^2$  oraz  $12,25 \text{ cm}^2$ . Szerokość szczeliny w każdym przypadku była taka sama – 15 mm między bosym końcem rury a kielichem, zmieniała się natomiast średnica przewodu (10 mm, 13 mm, 20 mm i 26 mm). Ciśnienie wody wewnątrz rury wynosiło od 31,9 do 58,8 kPa (od 3,25 do 6,0 m  $\text{H}_2\text{O}$ ) w zależności od wysokości, na jakiej ustawiony był zbiornik 6 oraz od poziomu wody w tym zbiorniku.

Po każdym eksperymencie wilgotny piasek w pobliżu nieszczelności i w obszarze między nieszczelnością a miejscem wypływu wody na powierzchnię był wymieniany na suchy i zagęszczany. Ponadto przy każdej zmianie średnicy przewodu następowała wymiana piasku w całej skrzyni.

Cały eksperyment od momentu odpowietrzenia do momentu wypływu wody na powierzchnię gruntu był nagrywany kamerą video i udokumentowany fotograficznie. W sumie wykonano 105 udanych prób.

Uzyskane wyniki badań laboratoryjnych posłużyły do wyznaczenia oczekiwanych wartości odległości miejsca wypływu wody na powierzchnię terenu od nieszczelności przewodu po awarii przewodu wodociągowego, w oparciu o obliczenia statystyczne przeprowadzone w programie Statistica 10 (StatSoft, Inc.). Pierwszym krokiem analizy była statystyka opisowa [17, 26], obejmująca miary średnie (średnia arytmetyczna, moda i mediana) oraz miary rozproszenia i kształtu rozkładu (odchylenie standardowe, współczynnik skośności, kurtoza). Jeśli uzyskane w badaniach laboratoryjnych wartości nie miały rozkładu zbliżonego do normalnego, sprawdzono, czy taki rozkład mają logarytmny wyników laboratoryjnych. Normalność rozkładów wyników lub ich logarytmów potwierdzano za pomocą testu normalności Kołmogorowa-Smirnowa z modyfikacją Lillieforsa oraz testu Shapiro-Wilka [6]. Obliczenia przeprowadzone zostały dla wszystkich danych uzyskanych w badaniach laboratoryjnych (po odrzuceniu wartości skrajnych) bez podziału oraz dla danych podzielonych według powierzchni otworów w rozszczelnionych przewodach i ciśnień hydraulicznych w przewodach.

Następnie wyznaczony został orientacyjny zasięg wspomnianej we wstępie strefy ochronnej wokół nieszczelności, poprzez określenie przedziałów tolerancji na poziomie ufności 95% i 99%, biorąc pod uwagę wszystkie wyniki odległości między miejscem wypływu wody na powierzchnię piasku a miejscem na powierzchni piasku zlokalizowanym bezpośrednio nad nieszczelnością. Z punktu widzenia obliczeń statystycznych dolna granica przedziału tolerancji może być liczbą ujemną. Jest to jednak niezgodne z definicją odległości, dlatego w obliczeniach jako dolną granicę przedziału tolerancji narzucono wartość 0, co oznacza (zgodnie z rzeczywistością), że miejscem na powierzchni terenu, gdzie woda może wypłynąć jak najbliżej nieszczelności, jest obszar zlokalizowany bezpośrednio nad tą nieszczelnością. Obliczona górna granica przedziału tolerancji odpowiada długości promienia strefy ochronnej w kształcie koła o środku położonym bezpośrednio nad miejscem wycieku.

Kolejnym krokiem badań była analiza wyników pomiarów czasu, jaki upłynął od momentu rozszczelnienia przewodu do chwili wypływu wody na powierzchnię piasku. Podobnie jak w przypadku odległości sprawdzono rozkłady uzyskanych danych wykorzystując testy normalności Kołmogorowa-Smirnowa z modyfikacją Lillieforsa oraz test Shapiro-Wilka. Następnie określono zależność między czasem wypływu a powierzchnią nieszczelności i wysokością ciśnienia w przewodzie przyjmując model regresji liniowej, wykładniczej i potęgowej.

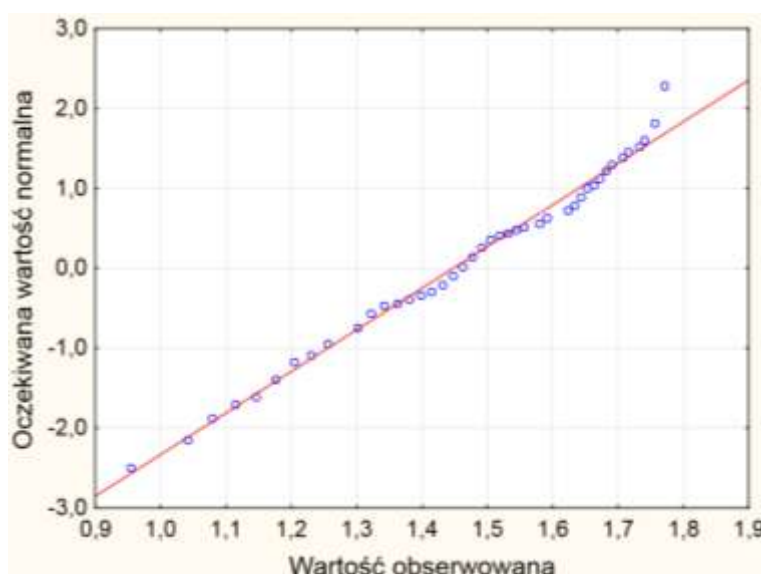
### 3. Wyniki badań i dyskusja

Miary rozkładu odległości między miejscem wypływu wody na powierzchnię piasku a miejscem na powierzchni piasku zlokalizowanym bezpośrednio nad nieszczelnością, uzyskanych jako wynik badań laboratoryjnych, zestawiono w tabelach 3 – 5.

Tab. 3. Miary rozkładu wszystkich odległości zmierzonych na powierzchni gruntu między miejscem wypływu wody a miejscem awarii

Liczba prób $n$	Odległość			Moda	Mediana	Odch. stand.	Wsp. skośności	Kurtoza
	max	średnia	min					
-	cm	cm	cm	cm	cm	cm	-	-
105	59,00	30,60	9,00	Wielokr.	29,00	12,64	0,52	-0,60

Miary zestawione w tabeli 3 wskazują, że wszystkie uzyskane w badaniach laboratoryjnych wartości analizowanej odległości, rozpatrywane razem, bez żadnych podziałów, mają rozkład nieodpowiadający rozkładowi normalnemu. Jednak zlogarytmowane wartości odległości mają rozkład zbliżony do normalnego (Rys. 3), co z 95-procentowym poziomem ufności potwierdzają testy normalności. Przeciętna odległość wypływu wody na powierzchnię terenu od miejsca awarii uzyskana w badaniach laboratoryjnych nie wynosi więc 30,60 cm, jak wynikałoby to z tab. 1, lecz 28,18 cm – jako wynik podniesienia liczby 10 do potęgi równej średniej arytmetycznej logarytmów zmierzonych odległości.



Rys. 3. Wykres normalności rozkładu logarytmów wartości zmierzonych odległości

Żaden z rozkładów, których miary przedstawione zostały w tab. 4, nie okazał się rozkładem normalnym. Zależności między średnią, medianą i modą oraz dodatnie wartości współczynnika skośności wskazują, że dla wszystkich analizowanych powierzchni nieszczelności przewodów uzyskane wyniki mają rozkład prawostronnie asymetryczny. Oznacza to, że jako przeciętne wartości odległości uzyskanych w badaniach dla poszczególnych powierzchni nieszczelności należy przyjąć wartość mody, a nie – jak ma to miejsce w przypadku rozkładu normalnego – średniej arytmetycznej. W badaniach

laboratoryjnych nie zaobserwowano prawidłowości w relacji między powierzchnią nieszczelności w przewodzie a odległością miejsca wypływu na powierzchni gruntu od wycieku z rury.

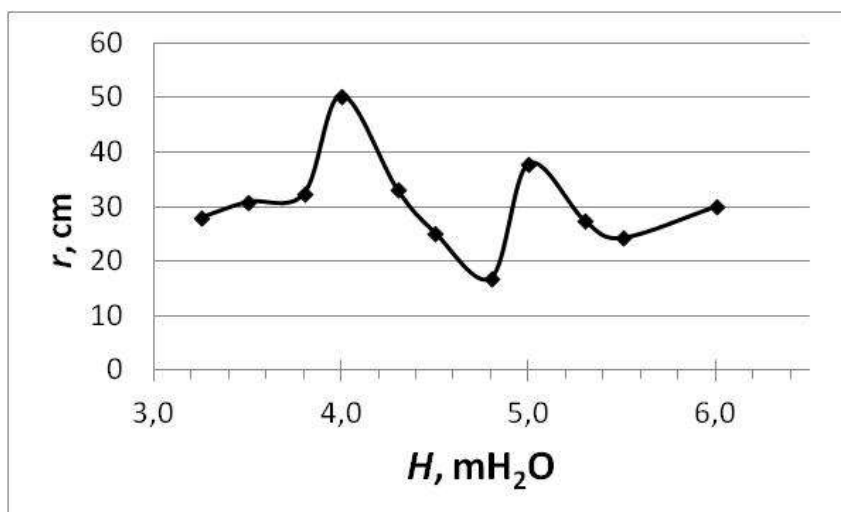
Tab. 4. Miary rozkładu odległości zmierzonych na powierzchni gruntu między miejscem wypływu wody a miejscem awarii dla różnych powierzchni nieszczelności  $F$

$F$	Liczba prób $n$	Odległość			Moda	Mediana	Odch. stand.	Wsp. skośności	Kurtoza
		max	średnia	min					
cm <sup>2</sup>	-	cm	cm	cm	cm	cm	cm	-	-
4,71	25	48,90	28,28	16,00	21,00	25,10	10,34	0,72	-0,74
5,58	25	35,20	20,92	9,00	17,90	17,90	8,57	0,14	-1,38
9,42	27	58,80	38,74	18,10	27,00	38,00	10,34	0,09	-0,78
12,25	24	59,00	33,41	15,80	20,00	28,50	13,41	0,73	-0,80

Tab. 5. Miary rozkładu wszystkich odległości zmierzonych na powierzchni gruntu między miejscem wypływu wody a miejscem awarii dla różnych wysokości ciśnień  $H$  w przewodzie

$H$	Liczba prób $n$	Odległość			Moda	Mediana	Odch. stand.	Wsp. skośności	Kurtoza
		max	średnia	min					
m H <sub>2</sub> O	-	cm	cm	cm	cm	cm	cm	-	-
3,25	6	36,10	28,00	17,10	Wielokr.	28,40	6,46	-0,78	1,27
3,50	7	21,00	32,28	46,80	21,00	28,20	10,39	0,30	-1,73
3,80	7	49,10	33,71	21,00	30,00	31,90	8,74	0,57	1,25
4,00	7	62,00	50,43	39,30	42,00	51,70	9,29	-0,03	-2,23
4,30	7	44,00	33,14	18,00	44,00	34,00	4,00	-0,59	-1,27
4,50	7	44,50	25,29	15,00	Wielokr.	22,30	10,86	0,09	0,90
4,80	8	27,00	17,00	9,00	Wielokr.	16,00	6,46	0,24	-0,82
5,00	10	55,00	37,90	18,00	Wielokr.	45,50	14,73	-0,41	-1,98
5,30	11	35,30	27,45	20,00	27,00	27,80	4,35	-0,22	0,39
5,50	10	31,90	24,30	13,20	Wielokr.	26,00	6,49	-0,67	-1,02
6,00	11	44,00	30,00	20,00	Wielokr.	28,00	9,42	0,60	-1,22

Wśród 11 rozkładów, których miary zostały przedstawione w tab. 5, tylko 2 są zbliżone do normalnego (dla  $H = 3,25$  m H<sub>2</sub>O i  $H = 5,30$  m H<sub>2</sub>O), natomiast 2 są zbliżone do normalnego po zlogarytmowaniu danych (dla  $H = 3,50$  m H<sub>2</sub>O i  $H = 3,80$  m H<sub>2</sub>O). Przeciętna odległość wypływu wody na powierzchnię terenu od miejsca awarii wodociągu podczas badań laboratoryjnych przy ciśnieniach  $H = 3,25$  m H<sub>2</sub>O i  $H = 5,30$  m H<sub>2</sub>O odpowiada więc średniej podanej w tab. 3 (odpowiednio 28,00 cm i 27,45 cm), natomiast przy ciśnieniach  $H = 3,50$  m H<sub>2</sub>O i  $H = 3,80$  m H<sub>2</sub>O – odpowiednio wartościom 30,90 cm i 32,36 cm, wynikającym z logarytmowania danych. Dla pozostałych ciśnień można przyjąć, że przeciętna odległość wypływu odpowiada średniej arytmetycznej, ale ponieważ wyniki uzyskane dla tych ciśnień nie mają rozkładów zbliżonych do normalnego (we wszystkich przypadkach były nieregularne), należy pamiętać, że średnia ta nie będzie estymatorem efektywnym [17]. Podobnie jak w przypadku analizy wpływu powierzchni nieszczelności w przewodzie na odległość miejsca wypływu wody na powierzchnię po ewentualnej awarii, nie stwierdzono prawidłowości w zależności między ciśnieniem wody w przewodzie a tą odległością (Rys. 4).



Rys. 4. Zależność między ciśnieniem wody w przewodzie  $H$  a odległością  $r$  na powierzchni terenu między miejscem wypływu wody a nieuszczelnnością przewodu

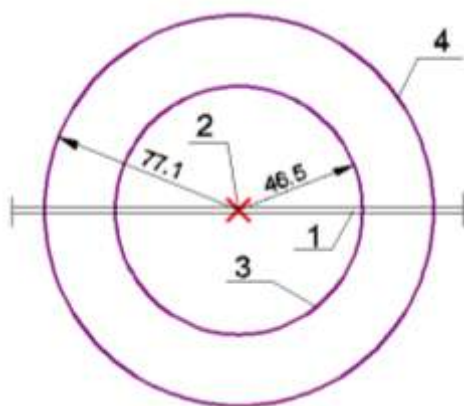
W 105 przeprowadzonych w laboratorium fizycznych symulacjach awarii wodociągu ani razu woda nie wypłynęła na powierzchnię terenu bezpośrednio nad miejscem nieuszczelnności. Kolejnym etapem badań było więc wyznaczenie strefy na powierzchni gruntu, gdzie prawdopodobny byłby wypływ wody po ewentualnej awarii podziemnego wodociągu, poprzez obliczenie górnej granicy tolerancji. Ponieważ wcześniejsze analizy wykazały, że zlogarytmowane wartości wszystkich odległości uzyskanych w badaniach laboratoryjnych, rozpatrywane bez podziału, mają rozkład normalny, przedziały tolerancji zostały wyznaczone dla logarytmów tych wartości (tab. 6).

Tab. 6. Górna granica tolerancji dla odległości zmierzonych na powierzchni gruntu między miejscem wypływu wody a miejscem awarii

Poziom tolerancji [%]	70	75	80	85	90	95
Poziom ufności [%]	95					
Logarytm górnej granicy tolerancji [log cm]	1,66	1,69	1,72	1,75	1,80	1,86
Górna granica tolerancji [cm]	46,5	49,2	52,5	56,7	62,7	73,2
Poziom ufności [%]	99					
Logarytm górnej granicy tolerancji [log cm]	1,68	1,70	1,73	1,77	1,81	1,89
Górna granica tolerancji [cm]	47,8	50,73	54,3	58,9	64,6	77,1

Przeprowadzone obliczenia wykazały, że promień strefy ochronnej, w zależności od przyjętych założeń statystycznych, mieści się w przedziale od 46,5 cm do 77,1 cm w warunkach laboratoryjnych (Rys. 5), co oznacza, że strefa o promieniu 46,5 cm (4,46 m w warunkach rzeczywistych) pokryje z 95-procentową ufnością 70% miejsc wypływu wody na powierzchnię terenu, natomiast strefa o promieniu 77,1 cm (7,71 m w warunkach rzeczywistych) pokryje z 99-procentową ufnością 95% miejsc wypływu. Zwiększenie poziomu ufności z 95% na 99% skutkuje zwiększeniem promienia strefy o około 1 ÷ 4 cm dla warunków laboratoryjnych, przy czym różnica ta wzrasta wraz ze wzrostem poziomu tolerancji. Większy wpływ na wartość promienia strefy ma zmiana poziomu tolerancji – po zwiększeniu tego parametru z 70% na 95% promień strefy wzrasta o 26,7 cm przy poziomie ufności 95% i o 29,3 cm przy poziomie ufności 99%.





Rys. 5. Minimalny i maksymalny (w zależności od założeń statystycznych) zasięg strefy ochronnej: 1 – wodociąg, 2 – nieszczelność, 3 – zasięg strefy ochronnej dla 95-procentowego poziomu ufności i poziomu tolerancji 70%, 4 – zasięg strefy ochronnej dla 99-procentowego poziomu ufności i poziomu tolerancji 95%

Analiza wyników pomiaru czasu wypływu wody na powierzchnię piasku od momentu wystąpienia awarii wykazała, że wartości te w żadnym przypadku – ani dla danych rozpatrywanych bez podziału, ani z podziałem na ciśnienia, ani z podziałem na powierzchnie nieszczelności, nie tworzą rozkładu normalnego. Tylko w nielicznych przypadkach – przy podziale na powierzchnie nieszczelności dla  $F = 4,71 \text{ cm}^2$  i  $F = 9,42 \text{ cm}^2$  oraz przy podziale na ciśnienia dla  $H = 4,30 \text{ m H}_2\text{O}$  i  $H = 5,50 \text{ m H}_2\text{O}$ , uzyskano normalny rozkład zlogarytmowanych danych.

Średnie arytmetyczne wartości pomiarów czasu wypływu wody dla różnych wysokości ciśnień i powierzchni nieszczelności zestawiono w tabeli 7. Ze względu na nieregularność rozkładów średnie te nie są estymatorami efektywnymi, dlatego należy traktować je wyłącznie orientacyjnie.

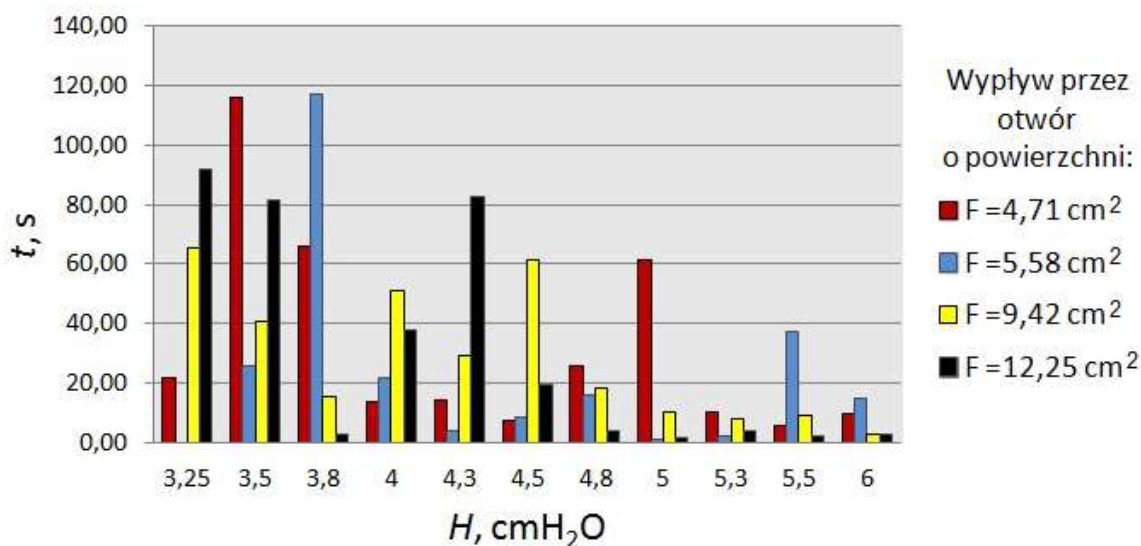
Tab. 7. Czas wypływu wody na powierzchnię piasku od momentu wystąpienia awarii w zależności od powierzchni nieszczelności i wysokości ciśnienia

$H$ [m H <sub>2</sub> O]	Czas wypływu $t$ [s] przy powierzchni nieszczelności			
	4,71 cm <sup>2</sup>	5,58 cm <sup>2</sup>	9,42 cm <sup>2</sup>	12,25 cm <sup>2</sup>
3,3	22,10	-	65,67	91,67
3,5	116,03	26,15	41,08	81,25
3,8	65,98	117,23	15,50	3,01
4,0	13,51	21,50	51,11	37,98
4,3	14,49	4,07	29,18	82,53
4,5	7,50	8,57	61,50	19,50
4,8	26,00	15,89	18,51	4,00
5,0	61,55	1,00	10,00	1,54
5,3	10,01	1,99	8,12	3,87
5,5	5,50	37,20	9,03	2,06
6,0	9,47	15,00	2,52	2,50

Analizując uzyskane wyniki (tab. 7), zgodnie z oczekiwaniami można zauważyć, że wraz ze wzrostem wysokości położenia zbiornika zasilającego, czas wypływu wody

na powierzchnię piasku ma tendencję spadkową. Wyraźniej widać to na wykresie pokazanym na Rys. 6. Należy jednak podkreślić, że trudno jednoznacznie określić rodzaj linii trendu. Współczynnik determinacji w przypadku wszystkich rozpatrywanych modeli (liniowego, wykładniczego i potęgowego) był niski (tab. 8.).

Analizując dane z tabeli 7 i Rys. 6. nie zaobserwowano prawidłowości między czasem wypływu wody a powierzchnią otworu w rozszczelnionym przewodzie.



Rys. 6. Zależność między czasem wypływu wody na powierzchnię terenu po rozszczelnieniu przewodu a wysokością ciśnienia wody w przewodzie H dla różnych powierzchni nieszczelności F

Tab. 8. Współczynnik determinacji  $R^2$  dla liniowego, wykładniczego i potęgowego modelu regresji określającego zależność  $t(H)$

Powierzchnia nieszczelności	$R^2$ dla modelu regresji		
	liniowego	wykładniczego	potęgowego
4,71 cm <sup>2</sup>	0,23	0,32	0,25
5,58 cm <sup>2</sup>	0,15	0,13	0,20
9,42 cm <sup>2</sup>	0,56	0,68	0,52
12,25 cm <sup>2</sup>	0,53	0,57	0,53

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Awarie i nieszczelności, nierozłącznie związane z eksploatacją systemów wodociągowych, oprócz strat ekonomicznych, powodują ryzyko wystąpienia niebezpiecznych zjawisk sufozycznych w gruncie. Aby ograniczyć skutki tych zjawisk, proponuje się zachowanie wokół elementów wodociągu szczególnie narażonych na wystąpienie nieszczelności tzw. stref ochronnych z ograniczonym zagospodarowaniem. Obecnie nie ma żadnych wytycznych umożliwiających określenie zasięgu tych stref, choć przedsiębiorstwa eksploatujące sieci wodociągowe są takimi informacjami zainteresowane.

Złożoność zjawisk towarzyszących awarii podziemnego wodociągu sprawia, że określenie wymiarów stref ochronnych jest trudnym i czasochłonnym zadaniem. Duża liczba parametrów wpływających na kierunek i prędkość przemieszczania się wody w gruncie, a także wzajemne powiązania między tymi parametrami, powodują konieczność

etapowania badań, począwszy od najbardziej uproszczonych. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy jako pierwszy etap okazały się bardzo wartościowe z punktu widzenia przyszłych, kolejnych badań. Umożliwiły rozpoznanie trudności, jakie należy pokonać podczas fizycznej symulacji awarii wodociągu i ukierunkowały dalsze prace.

Analiza statystyczna wyników uzyskanych w pierwszym etapie badań laboratoryjnych z zachowaniem podobieństwa geometrycznego i kinematycznego również dała obiecujące rezultaty, pozwalając na wstępne oszacowanie zasięgu strefy ochronnej. Zasięg ten zależy głównie od uzyskanych w eksperymencie odległości miejsca wypływu wody na powierzchnię terenu od miejsca awarii, a także – choć w mniejszym stopniu – od założeń statystycznych. Ponadto przeprowadzone analizy potwierdziły wyraźną zależność między czasem wypływu wody na powierzchnię terenu po awarii a ciśnieniem panującym w przewodzie, choć uzyskane z pomiarów wartości nie dały rozkładu normalnego i należy traktować je wyłącznie orientacyjnie. Chcąc więc osiągnąć jak najlepsze wyniki zarówno oszacowania zasięgu strefy ochronnej, jak i określenia parametrów wpływających na czas wypływu wody na powierzchnię terenu, należy przede wszystkim skoncentrować się na jakości badań laboratoryjnych. W związku z tym w dalszych pracach proponuje się powtórzenie analizy wymiarowej poprzedzającej badania laboratoryjne pod kątem zwiększenia liczby parametrów wpływających na rozpatrywany proces, a także zwiększenie liczby powtórzeń symulowanych awarii w tych samych warunkach, by osiągnąć normalne rozkłady wyników.

**Podziękowania:** Praca została sfinansowana z działalności statutowej Katedry Zaopatrzenia w Wodę i Usuwania Ścieków na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej.

## Literatura

1. Bendahmane F., Marot D., Rosquoët F., Alexis A. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion. *International Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2008; 134 : 57-67.
2. Bernatek A. Rola sufozji w rozwoju rzeźby – stan i perspektywy badań. *Przegląd Geograficzny* 2014; 86: 53–76.
3. Błazejewski R., Maćkowski S. Eksfiltracja, infiltracja i sufozja przez szczeliny uszkodzonych kanałów ściekowych. W: J. Dziopak, D. Słyś, A. Stec (red.): *Materiały II Ogólnopolskiej Konferencji Naukowo-Technicznej Infrastruktura Komunalna a Rozwój Zrównoważony Terenów Zurbanizowanych*. INFRAEKO 2009: 19-31.
4. Bonelli S., Marot D. On the modelling of internal soil erosion. The 12<sup>th</sup> International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 1–6 October, Goa, India 2008.
5. Denczew S. The reliability, safety and risks of water supply system operation versus critical infrastructure. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2007; 2: 15-21.
6. Dobosz M. *Wspomagana komputerowa analiza statystyczna wyników badań*. Warszawa: Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, 2001.

7. Hotłoś H. Analiza uszkodzeń i kosztów naprawy przewodów wodociągowych w okresie zimowym. *Ochrona Środowiska* 2009; 31: 41-48.
8. Hotłoś H. Metodyka i przykłady prognozowania kosztów naprawy przewodów wodociągowych. *Ochrona Środowiska* 2006; 28: 49-54.
9. Indraratna B., Nguyen V. T., Rujikiatkamjorn C. Assessing the Potential of Internal Erosion and Suffusion of Granular Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 2011; 137: 550-554.
10. Iwanek M. Zjawisko sufozji jako skutek awarii infrastruktury wodociągowej lub kanalizacyjnej. *Przegląd literatury*. W: K. Kuś, F. Piechurski F. (red.): *Nowe Technologie w Sieciach i Instalacjach Wodociągowych i Kanalizacyjnych*. Gliwice 2014, 57-78.
11. Iwanek M., D. Kowalski D., Kowalska B., Hawryluk E., Kondraciuk K. Experimental investigations of zones of leakage from damaged water network pipes. W: C. A. Brebbia, S. Mambretti (red.): *Urban Water II. WIT Transactions on the Built Environment* 2014; 139; Southampton, Boston, UK: WIT Press: 257-268.
12. Iwanek M., Malesińska A. Zastosowanie teorii podobieństwa w modelowaniu awarii sieci wodociągowych. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna* 2015; 3: 82-86.
13. Khomenko V. P. Suffosion hazard: today's and tomorrow's problem for cities. W: Culshaw, M. G., Reeves, H. J., Jefferson, I. & Spink, T. W. (red.) *Engineering geology for tomorrow's cities*, Geological Society, London: *Engineering Geology Special Publication*, 2009.
14. Kowalski D., Jaromin K. Metoda wyznaczania zasięgu strefy ochrony wodociągowych przewodów tranzytowych. *Proceedings of ECOpole* 2011; 4: 419-424.
15. Kowalski D., Kowalska B., Kwietniewski M., Sygacz – Adamska J. Analiza bilansu wody oraz awaryjności wybranego systemu dystrybucji wody. W: Z. Dymaczewski, J. Jeż – Walkowiak (red.): *Zaopatrzenie w wodę, jakość i ochrona wód*, tom 2, *Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Oddział Wielkopolski*, Poznań 2012: 77-92.
16. Kowalski D., Miszta-Kruk K. Failure of water supply networks in selected Polish towns based on the field reliability tests. *Engineering Failure Analysis* 2013; 35: 736-742
17. Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K., Wasilewski M. *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach, cz. II Statystyka matematyczna*. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2011
18. Kutylowska M., Hotłoś H. Failure analysis of water supply system in the Polish city of Głogów. *Engineering Failure Analysis* 2014; 41: 23-29.

19. Kwietniewski M. Awaryjność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce w świetle badań eksploatacyjnych. XXV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarynie Budowlane, 24-27 maja 2011: 127-140.
20. Myślińska E. Laboratoryjne Badania Gruntów. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
21. PN-88/B-04481 Grunty budowlane. Badania próbek gruntu.
22. Ragozin A. L. Basic principles of natural hazard risk assessment and management. W: R. Oliveira, L. F. Rodrigues, A. G. Coehlo, A. P. Cunha (red.): Proceedings of the 7<sup>th</sup> International Congress of the International Association of Engineering Geology 3, Lisbon, Portugal, A. A. Balkema, Rotterdam 1994: 1277-1286
23. Richards L.A. Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics 1931; 1: 318-333.
24. Romano M., Kapelan Z. Geostatistical techniques for approximate location of pipe burst events in water distribution systems. Journal of Hydroinformatics 2013; 15.3: 634-635.
25. Siwoń Z., Cieżak W., Cieżak J. Praktyczne aspekty badań strat wody w sieciach wodociągowych. Ochrona Środowiska 2004; 26/4: 25-30.
26. Sobczyk M. Statystyka. Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014.
27. Vlahovič M. Dispersion of results during determination of possibilities of internal erosion phenomenon using the empirical methods. Proceedings of 5th International Congress International Association of Engineering Geology 2, Buenos Aires 1986: 1037-1040.
28. Żaba T., Langer A. Monitoring strat wody elementem ograniczenia kosztów działalności przedsiębiorstwa. Napędy i sterowanie 2012; 4:100-103.