

# Statystyczne prognozowanie stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych

Statistical forecasting of the technical condition of sewage pipes

ANDRZEJ RAGANOWICZ

DOI 10.36119/15.2020.5.8

W artykule przedstawiono statystyczne prognozowanie stanu technicznego kamionkowych przewodów kanalizacyjnych, oparte o rozkład eksponencjalny w połączeniu z operatorem splotu jednostronnego. Kalibrację i walidację modelu przeprowadzono na bazie danych cenzurowanych prawostronnie. Podstawą prognozy były wyniki kompletnej inspekcji optycznej zrealizowanej w 2000 r. Klasyfikację uszkodzeń i stanu technicznego badanych przewodów przeprowadzono wg. niemieckiej wytycznej DWA-M 149-3. Zaproponowana metodyka prognozowania stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych pozwala ustalić konieczny zakres zabiegów renowacyjnych zapewniających pełną dyspozycyjność przewodów kanalizacyjnych w ramach długiej eksploatacji.

*Słowa kluczowe: sieć kanalizacyjna, stan techniczny, prognoza statystyczna*

The article presents statistical forecasting of the technical condition of stoneware pipes based on the exponential distribution in connection with convolution product. The convolution product helps to define the survival functions for cumulative staying times of the sewer pipes in each condition class. The model was calibrated and validated based on right-censored data. The basis for the forecast were the results of a complete camera inspection carried out in 2000. The deterioration states of the sewer pipes were quantified using the DWA-M 149-3 system, on a scale of 1-5. Application of the proposed model and calibration procedure allows to determine the necessary scope of renovation works and the technical life of sewer pipes.

*Keywords: sewage network, technical condition, statistical forecast*

## Wprowadzenie

Publiczne sieci kanalizacyjne są ważnym elementem składowym infrastruktury miejskiej. Te niewidoczne, przebiegające pod powierzchnią terenu obiekty liniowe przedstawiają dużą wartość kapitałową. W wyniku procesów starzeniowych ulegają one ciągłej degradacji technicznej. Uszkodzenia powstają już w momencie produkcji rur, podczas transportu, układania w otwartym wykopie, jak również w czasie eksploatacji. Permanentny progres uszkodzeń prowadzi do awarii sieci powodujących utratę funkcjonalności, szczelności i nośności. Poważne uszkodzenia i niekorzystne uwarunkowania eksploatacyjne mogą doprowadzić do katastrofy budowlanej, mającej tragiczne konsekwencje dla środowiska naturalnego i ludzi. W celu zapewnienia pełnej funkcjonalności sieci kanalizacyjnej należy ją systematycznie konserwować i odnawiać, hamując w ten sposób niekorzystne procesy starzeniowe. Jedną z możliwości kwalifikowanego planowania odnowy są staty-

styczne modele prognozowania stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych. Ich podstawą jest korelacja między stanem technicznym a wiekiem każdego pojedynczego obiektu. Innymi formami prognoz są modele deterministyczne i modele bazujące na sztucznej inteligencji.

W artykule przedstawiono metodykę modelowania procesów starzeniowych obiektów kanalizacyjnych, bazującą na rozkładzie eksponencjalnym i operatorem splotu jednostronnego. Badania modelowe obejmują kamionkowe przewody kanalizacyjne (DN 200-400) znajdującej się powyżej wody gruntowej w bawarskiej gminie Unterhaching. Warunki gruntowo-wodne tworzy jednorodna formacja geologiczna, zbudowana ze żwirów gruboziarnistych. Wybór rozkładu eksponencjalnego był zabiegiem upraszczającym czasochłonne procedury obliczeniowe. Stan techniczny przewodów sklasyfikowano wg niemieckiej wytycznej (DWA M 149-3) [1], przewidującej 5 stanów technicznych. Bazą danych empirycznych były wyniki kompletnej inspekcji optycznej

przeprowadzonej w 2000 r. Uszkodzenia sieci udokumentowano za pomocą kodów wg wytycznej niemieckiej ATV M 143-2 [2]. Następnie przeprowadzono ich konwersję do kodów wg normy europejskiej EN DIN 13508-2 [3].

Wszystkie algorytmy obliczeniowe i symulacje matematyczne zrealizowano na bazie programu EXCEL2016.

## Charakterystyka kamionkowych przewodów kanalizacyjnych

Bazowa próba losowa składa się z 1162 odcinków przewodów kanalizacyjnych (kamionka, DN 200-400), funkcjonujących powyżej wody gruntowej w gminie Unterhaching położonej w pobliżu Monachium. Obiekty te przebiegają z reguły w korpusie dróg gminnych i są eksploatowane przez Związek Celowy (Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal).

Badanie telewizyjne 1162 odcinków sieci kanalizacyjnej o łącznej długości 40.000 m przeprowadzono kamerami

Dr hab. inż. Andrzej Raganowicz - Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal, Rotwandweg 16 D-82024 Taufkirchen; Adres do korespondencji/Corresponding author: a-raganowicz@t-online.de

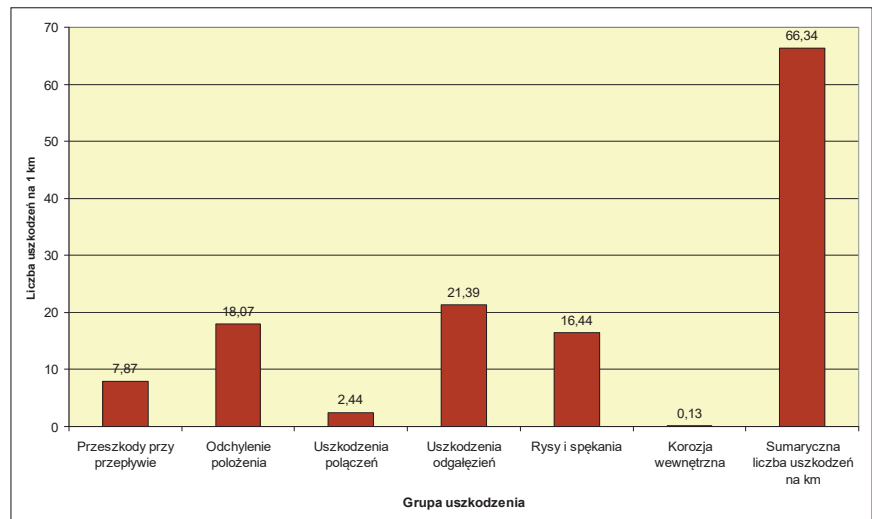
firmy niemieckiej RAUSCH w 2000 r. Udokumentowane uszkodzenia oraz stan techniczny przewodów kanalizacyjnych sklasyfikowano wg wytycznej DWA M 143-3 [1], ustalając 5 stanów technicznych (ST5, ST4, ST3, ST2, ST1). Najlepszym stanem jest ST5, a najgorszym ST1. Uszkodzenia stanu ST5 mają marginalne znaczenie, albo w ogóle nie występują. Stan ST1 jest stanem krytycznym wymagającym natychmiastowej interwencji w formie rehabilitacji technicznej. W celu dalszego uproszczenia procedur obliczeniowych połączono stan ST5 ze stanem ST4, tworząc stan ST<sub>3</sub>, obiektom stanu ST3 nadano status stanu ST<sub>2</sub>, a obiekty stanów ST2 i ST1 weszły w skład stanu ST<sub>1</sub>.

Na podstawie trzystopniowej skali stanu technicznego ustalono następującą populację badanych prób losowych:

- stan ST<sub>3</sub>: 996 przewodów,
- stan ST<sub>2</sub>: 125 przewodów,
- stan ST<sub>1</sub>: 41 przewodów.

We wstępnej fazie badań przyjęto założenie, że przejście przewodów od stanu ST<sub>2</sub> do stanu ST<sub>1</sub> ma istotne znaczenie eksploatacyjne. Opisuje ono granicę między strefą zarezerwowaną dla zabiegów konserwacyjnych a strefą zarezerwowaną dla zabiegów renowacyjnych. Innym ważnym parametrem prognozowania procesów starzeniowych obiektów kanalizacyjnych jest ich wiek odniesiony do roku inspekcji optycznej. Na rys. 1 przedstawiono strukturę wieku badanych obiektów [4]. Z analizy tego rozkładu wynika, że najliczniejszą grupę tworzą 30 i 35-letnie przewody obejmujące 61% całej populacji.

Wyniki analizy liczby uszkodzeń na 1000 m sieci przedstawiono na rys. 2 [4]. Najczęściej udokumentowanymi uszkodze-



Rys. 2. Liczba uszkodzeń/1000 m badanych przewodów kanalizacyjnych [4]  
Fig. 2. The distribution of the observed defects [4]

niami, typowymi dla sztywnych rur kamionkowych, są rysy (16 uszkodzeń/1000 m), przemieszczenia połączeń rur (18 uszkodzeń/1000 m) i uszkodzone przyłącza (21 uszkodzeń/1000 m). Na podstawie rozkładu liczby uszkodzeń ustalono ważny wyznacznik stanu technicznego, jakim jest zsumowana liczba uszkodzeń. Wartość tego wyznacznika dla badanej próby losowej wynosi 66 uszkodzeń na 1000 m. Wynik ten przekracza o 32% powszechnie znany wyznacznik eksploatacyjny wynoszący ca. 50 uszkodzeń na 1000 m. Z charakterystyki badanych przewodów wynika, że obiekty te po 45-cioletniej eksploatacji wykazują ogólnie dobry stan techniczny, a udokumentowane uszkodzenia są typowe dla sztywnych rur kamionkowych. Najstarsze przewody zostały zbudowane w połowie lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Jest to okres powojennej

odbudowy charakteryzujący się szybką i nie zawsze fachową realizacją liniowych obiektów kanalizacyjnych. Począwszy od 1965 r. niemieckie rury kamionkowe były wyposażane w fabrycznie montowane systemy uszczelniające z tworzyw sztucznych.

Z charakterystyki badanej sieci wynika, że bazowa próba losowa przewodów kanalizacyjnych jest jednorodna z uwagi na materiał roboczy, średnicę, warunki gruntowo-wodne oraz obciążenie ruchem kołowym. Jednorodność próby losowej zapewnia uzyskanie miarodajnych wyników podjętych badań.

### Statystyczne prognozowanie stanu technicznego kamionkowych przewodów kanalizacyjnych

Podstawowym instrumentem matematycznym badań modelowych jest rozkład eksponencjalny ( $\lambda$ ). Ocena statystyczna próby losowej obejmuje z reguły analizę empirycznej funkcji rozkładu  $F_e(t)$  i empirycznej funkcji gęstości rozkładu  $f_e(t)$ . Na podstawie tych dwóch funkcji dokonuje się wyboru najbardziej odpowiedniego rozkładu teoretycznego.

Funkcja eksponencjalna  $F(t)$  jest jednoparametrowa i przyjmuje postać wzoru (1.1):

$$F(t) = 1 - \exp(-\lambda \cdot t) \quad (1.1),$$

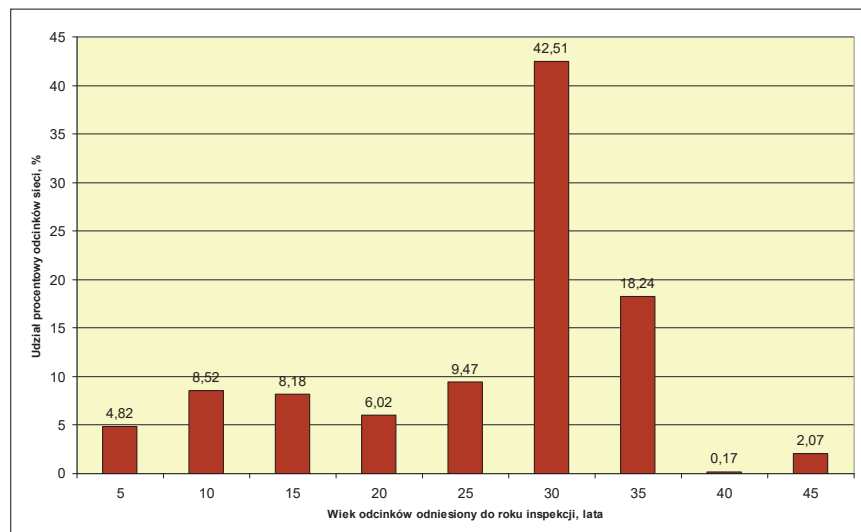
gdzie:

$\lambda$  - parametr rozkładu eksponencjalnego,  
 $t$  - wiek przewodów, lata.

Funkcję gęstości rozkładu  $f(t)$  uzyskuje się przez zróżniczkowanie funkcji rozkładu  $F(t)$  względem zmiennej  $t$ :

$$f(t) = dF(t):dt = \lambda \exp(-\lambda \cdot t) \quad (1.2)$$

Funkcja niezawodności (survival) jest



Rys. 1. Struktura wieku badanych przewodów kamionkowych odniesiona do roku inspekcji optycznej [4]  
Fig. 1. The age structure of the sewer pipes [4]

komplementarna w stosunku do funkcji rozkładu:

$$S(t) = 1 - F(t) = \exp(-\lambda \cdot t) \quad (1.3).$$

Parametry rozkładów teoretycznych dla poszczególnych stanów technicznych ustalono metodą Maximum-Likelihood:

$$\lambda_{3,2,1} = 1/\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (1.4),$$

gdzie:

$n$  - populacja próby losowej,  
 $t_i$  - wiek przewodów, lata.

Wstępną kalibrację modelu eksponencjalnego przeprowadzono, stosując test Kolmogorowa-Smirnowa (K-S). W przypadku pozytywnego wyniku tego testu prawdziwa jest hipoteza zerowa ( $H_0$ ), wykazująca, że teoretyczna funkcja rozkładu z wystarczającą dokładnością opisuje dane empiryczne. Miarą tej dokładności jest dystans krytyczny ( $D_{kryt}$ ). Jego wartość musi być większa od wartości największego bezwzględnego dystansu między funkcją empiryczną i teoretyczną [5]:

$$D_{kryt} = \sqrt{|\ln(\frac{2}{n})|} \cdot \sqrt{n} > \max(|+D|; |-D|) \quad (1.5),$$

gdzie:

$n$  - populacja próby losowej.

Jeżeli hipoteza zerowa ( $H_0$ ) jest prawdziwa, to funkcja empiryczna jest równa w przybliżeniu funkcji teoretycznej:

$$F_e(t_i) \approx F(t_i) \quad (1.6),$$

gdzie:

$F_e(t_i)$  - funkcja empiryczna,  
 $F(t_i)$  - funkcja teoretyczna.

Wynik testu K-S dla bazowej próby losowej był negatywny, ponieważ maksymalna wartość dystansu między funkcją teoretyczną i empiryczną wynosząca 0,283 zdecydowanie przekroczyła wartość dystansu krytycznego  $D_{kryt} = 0,061$ . Dlatego też nie został spełniony warunek hipotezy zerowej. W przypadku prawdziwej hipotezy zerowej problem czasów pobytów przewodów w poszczególnych

stanach technicznych mógłby być rozwiązany w oparciu o liczby losowe. Dane z inspekcji optycznej, mówiące, że przewód wykazuje drugi stan techniczny ( $ST_2$ ) i jest eksploatowany od 20 lat, nie informuje o czasach jego pobytu w stanie  $ST_3$  i  $ST_2$ . Badania telewizyjne rejestrują jedynie aktualny stan techniczny obiektu w kontekście jego wieku. W takiej sytuacji uzasadnione jest przyjęcie założenia o losowości czasów pobytów przewodów w kolejnych stanach [6]. Czasy te można generować metodą Monte-Carlo na bazie liczb losowych o równomiernym rozkładzie. W tym celu należy z funkcji rozkładu utworzyć funkcję odwrotną i generować czasy pobytów przewodów w kolejnych stanach. Ze względu na negatywny wynik testu K-S niemożliwe było prognozowanie destrukcji sieci w oparciu o rozkład eksponencjalny i metodę Monte-Carlo. W celu „obejścia” tego problemu zastosowano funkcję splotu jednostronnego. Realizacja tej procedury wymaga wyznaczenia parametru  $\lambda$  dla dwóch najlepszych stanów technicznych, zgodnie z formułą (1.4)  $\lambda_3 = 0,0402$ ,  $\lambda_2 = 0,0316$ .

Przebiegi funkcji gęstości prawdopodobieństwa  $f_3(t)$  i  $f_2(t)$  przedstawiono na rys. 3.

Operację splotu jednostronnego opisuje formuła (1.7):

$$f_{3-2}(t) = f_3^* \cdot f_2(t) = \int_{m=0}^t f_3(m) \cdot f_2(t-m) dm = \int_{m=0}^t \lambda_3 \exp(-\lambda_3(t-m)) \lambda_2 \exp(-\lambda_2 m) dm = \frac{\lambda_3 \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_2} \exp(-\lambda_3 t) (\exp((\lambda_3 - \lambda_2)t) - 1)$$

, gdzie:

\* - produkt splotu,

$m$  - czas pobytu przewodów w stanie  $ST_3$ ,  
 $t$  - łączny czas pobytu przewodów w stanie  $ST_3$  i  $ST_2$ .

Całkując iloczyn funkcji gęstości kolejno względem czasu  $m$  i  $t$  uzyskano wynik zgodny ze wzorem (1.8). Funkcja  $S_{3-2}$  (survival) opisuje przejście przewodów od stanu  $ST_2$  do stanu  $ST_1$  wyznaczające gra-

nicę między obszarem zarezerwowanym dla zabiegów konserwacyjnych i renowacyjnych. Funkcja  $S_{3-2}$  podaje również prawdopodobieństwo, że przewód przeżywa w czasie  $t$  w stanie  $ST_3$  lub  $ST_2$  (1.8):

$$S_{3-2}(T) = \int_{t=T}^{\infty} f_{3-2}(t) dt = 1 - \int_{t=0}^T f_{3-2}(t) dt = 1 - \int_{t=0}^T \frac{ab}{a-b} \exp(at) (\exp(a-b)t - 1) dt$$

, gdzie:

$a = \lambda_3 = 0,0402$ ,

$b = \lambda_2 = 0,0316$ ,

$t$  wiek przewodów, lata.

Funkcja  $S_3$  opisuje zgodnie z wzorem (1.9) przejście przewodów od stanu  $ST_3$  do stanu  $ST_2$

$$S_3 = \exp(-a \cdot t) \quad (1.9),$$

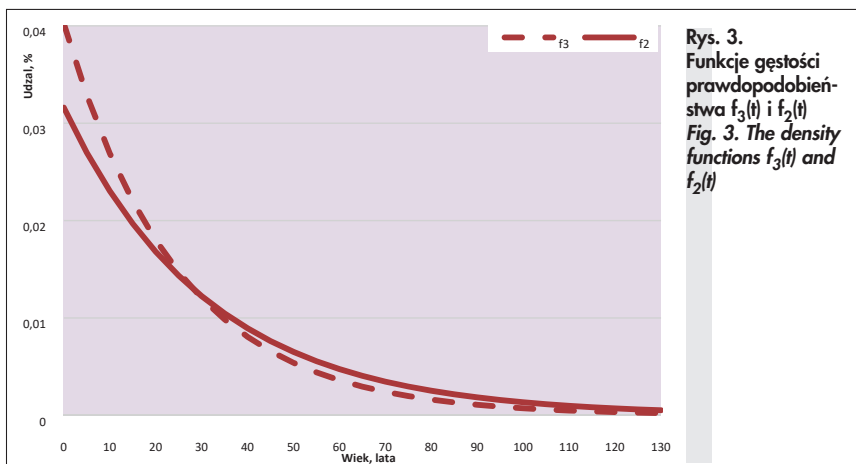
gdzie:

$t_i$  - czasy pobytów przewodów w stanie  $ST_3$ .

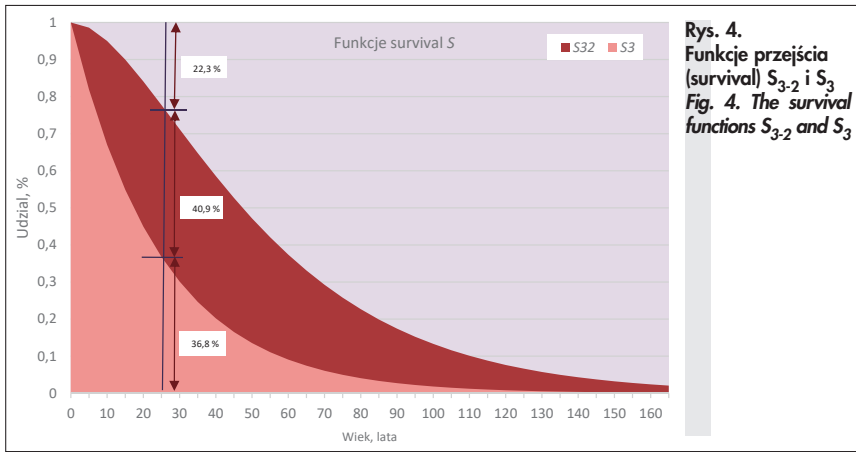
Graficzną interpretację funkcji  $S_{3-2}$  i  $S_3$  przedstawia rys. 4. Powierzchnia powyżej krzywej  $S_{3-2}$  obejmuje przewody kamionkowe wymagające zabiegów renowacyjnych a powierzchnia poniżej przewody bez uszkodzeń lub z uszkodzeniami o charakterze konserwacyjnym. Renowację (odnowę) odcinka sieci należy rozumieć jako naprawę wykonaną na całej jego długości między dwoma studzienkami rewizyjnymi. Typowym przykładem takiego zabiegu jest samonośna lub współpracująca z przewodem powłoka z tworzywa sztucznego. Na podstawie rys. 4 można ustalić kilka istotnych informacji eksploatacyjnych. Przykładowo odsetek 25-letnich przewodów w stanie  $ST_3$  wynosi 36,8%, w stanie  $ST_2$  40,9%, a w stanie  $ST_1$  22,3%. Tak więc 25-letnich przewodów należy poddać zabiegom renowacyjnym. W analogiczny sposób ustalono zakresy renowacji dla pozostałych grup wiekowych. Suma tych zakresów jest bazą do planowania koniecznych inwestycji renowacyjnych. Realizacja prognozowanego zakresu odnowy gwarantuje bezawaryjną długoterminową eksploatację infrastruktury kanalizacyjnej. Zaniedbanie tego obowiązku eksploatacyjnego może doprowadzić do wystąpienia niebezpiecznych awarii sieci, a w przypadku niekorzystnych uwarunkowań nawet do katastrofy budowlanej. Zaproponowany model prognozowania stanu technicznego sieci kanalizacyjnej poddano następnie procesowi kalibracji i walidacji.

### Kalibracja i walidacja przyjętego modelu

Kalibrację modelu eksponencjalnego dla funkcji  $S_3$  przeprowadzono w oparciu



**Rys. 3.** Funkcje gęstości prawdopodobieństwa  $f_3(t)$  i  $f_2(t)$   
**Fig. 3.** The density functions  $f_3(t)$  and  $f_2(t)$



Rys. 4. Funkcje przejścia (survival)  $S_{3,2}$  i  $S_3$   
Fig. 4. The survival functions  $S_{3,2}$  and  $S_3$

Tab. 1. Parametry  $\lambda$  funkcji survival  $S_3$  na podstawie danych cenzurowanych prawostronnie  
Tab. 1. The  $\lambda$ -parameters of the survival function  $S_3$  based of right-censored data

$\lambda$	$T_{tr}(50)$	$T_{tr}(100)$
1	0,0352	0,0328
2	0,0319	0,0356
3	0,0336	0,0378
4	0,0334	0,0337
5	0,0356	0,0318
6	0,0323	0,0327
7	0,0355	0,0342
8	0,0366	0,0332
9	0,0346	0,0337
10	0,0317	0,0351

o dane cenzurowane prawostronnie. Metodyka cenzurowania jest stosowana w przypadku studiów i badań, kiedy tylko ograniczona liczba zjawisk może być zaobserwowana. Przyczynami cenzurowania danych są:

- krótki czas obserwacji nie uwzględniający wszystkich zjawisk,
- przerwanie obserwacji spowodowane pewnymi uwarunkowaniami obiektywnymi,
- przerwanie obserwacji spowodowane innymi przyczynami.

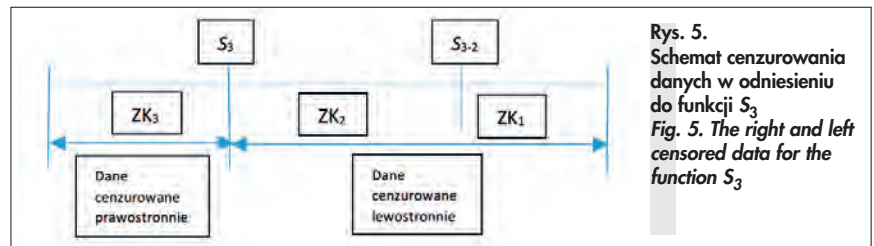
Możliwe są trzy rodzaje cenzurowania danych:

- cenzurowanie prawostronnie: zjawisko występuje w nieokreślonym czasie po przeprowadzeniu obserwacji,
- cenzurowanie lewostronnie: zjawisko występuje w nieokreślonym czasie jeszcze przed przeprowadzeniem obserwacji,
- cenzurowanie interwałowe: informacje o wystąpieniu badanego zjawiska mają miejsce w stałych interwałach czasowych.

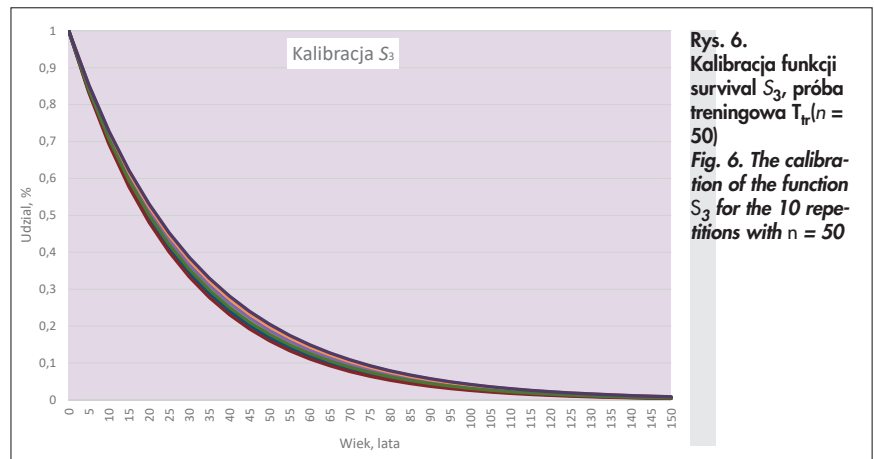
W przypadku trzech klas stanu technicznego danymi cenzurowanymi prawostronnie w odniesieniu do funkcji  $S_3$  są przewody klasy  $ZK_3$ , a danymi cenzurowanymi lewostronnie są przewody klasy  $ZK_2$  i  $ZK_1$ . Schemat cenzurowania danych przedstawiono na rys. 5.

Kalibrację funkcji eksponencjalnej  $S_3$  oparto o dane cenzurowane prawostronnie. W tym celu utworzono testową próbę losową ( $T_{ts}$ ) i treningową próbę losową ( $T_{tr}$ ). Jako próbę testową wybrano bazową próbę losową składającą się z 1162 przewodów. Próby treningowe o populacji 50 i 100 przewodów formowano w sposób losowy z próby wyjściowej ( $T_{ts}$ ). Estymację parametru  $\lambda$  funkcji  $S_3$ , w oparciu o funkcję likelihood i dane cenzurowane prawostronnie, przeprowadzono w ramach 10 serii obliczeniowych zgodnie ze wzorem (1.10):

$$L(\lambda) = \prod_{i=1}^m \lambda \exp(-\lambda t_i) \prod_{i=1}^{n-m} \exp(-\lambda t_i^+)$$



Rys. 5. Schemat cenzurowania danych w odniesieniu do funkcji  $S_3$   
Fig. 5. The right and left censored data for the function  $S_3$



Rys. 6. Kalibracja funkcji survival  $S_3$ , próba treningowa  $T_{tr}(n = 50)$   
Fig. 6. The calibration of the function  $S_3$  for the 10 repetitions with  $n = 50$

, gdzie:

$L(\lambda)$  - funkcja likelihood,

$t_i$  - wzrastający wiek przewodów od 1 do  $m$ ,  
 $t_i^+$  - wiek przewodów cenzurowany prawostronnie od 1 do  $n-m$ .

Realizacja procedury maximum likelihood (1.10) prowadzi do ustalenia formuły (1.11):

$$\hat{\lambda} = m / \left( \sum_{i=1}^m t_i + \sum_{i=1}^{n-m} t_i^+ \right) \quad (1.9),$$

Wyniki symulacji parametru  $\lambda$  przedstawiono w tab. 1, a przebiegi funkcji  $S_3$ , w zależności od populacji próby treningowej, na rys. 6 i 7. Funkcje przejścia przebiegają w niedalekiej odległości od siebie, co świadczy o dużej koncentracji krzywych survival i o dobrym wyniku kalibracji krzywej  $S_3$ . Bardziej reprezentatywne wyniki kalibracji są możliwe w przypadku większych populacji próby treningowej i większej liczby serii obliczeniowych.

Ostatnim etapem badań jest walidacja

skrzyżowana przyjętego modelu zgodnie z formułami (1.12, 1.13, 1.14):

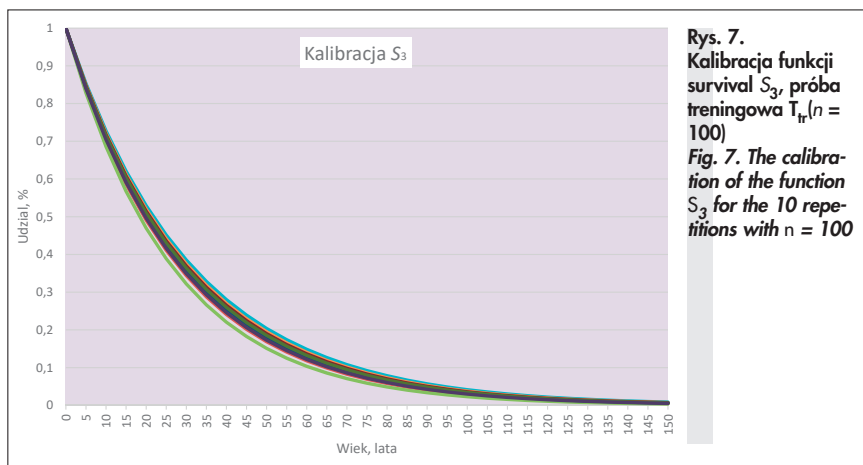
$$RMSE_i = \left( \frac{1}{nt} \sum_{i=1}^{nt} (s_{ij} - o_i)^2 \right)^{0,5} \quad (1.12),$$

$$RMSE_{moy} = \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^{nr} RMSE_i \quad (1.13),$$

$$RMSE_{stdev} = \left( \frac{1}{nr} \sum_{i=1}^{nr} (RMSE_i - RMSE_{moy})^2 \right)^{0,5}$$

, gdzie:

$RMSE_i$  - kwadratowy błąd wartości średniej empirycznej i symulowanej dla  $i$ -tego powtórzenia walidacji skrzyżowanej,  
 $RMSE_{moy}$ ,  $RMSE_{stdev}$  - odchylenie standardowe błędów średniego kwadratu pierwiastkowego,  
 $nr$  - liczba powtórzeń (10),  
 $nt$  - liczba wieków przewodów wchodzących w skład każdej próby treningowej.



Rys. 7. Kalibracja funkcji survival  $S_3$ , próba treningowa  $T_r(n=100)$   
 Fig. 7. The calibration of the function  $S_3$  for the 10 repetitions with  $n = 100$

Dla prób treningowych  $T_r(50)$  ustalono 6 ( $nt = 6$ ) a dla prób  $T_r(100)$  7 ( $nt = 7$ ) powtarzających się wieków przewodów. Wyniki walidacji skrzyżowanej funkcji  $S_3$  w formie standartowego odchylenia błędu średniego kwadratu pierwiastkowego w oparciu o dwie próby treningowe, przedstawiono w tab. 2.

Tab. 2. Wyniki walidacji skrzyżowanej funkcji survival  $S_3$   
 Tab. 2. The results of the cross-validation for the function  $S_3$

$T_r$	RMSE <sub>moy</sub>	RMSE <sub>stdev</sub>
( $n = 50$ )	0,038	0,0125
( $n = 100$ )	0,025	0,0118

Wyniki walidacji funkcji  $S_3$  wykazują, że odchylenie standartowe błędu średniego kwadratu pierwiastkowego przyjmuje małą wartość  $RMSE_{stdev} = 0,012$ . Dowodzi to, że przyjęty model statystycznego prognozowania stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych jest stabilny i zapewnia miarodajne wyniki badań. Populacja próby treningowej ma wpływ na wynik walidacji skrzyżowanej – im większa populacja, tym mniejsza wartość odchylenia standartowego.

## Konkluzja

Opisana w artykule metodyka badań modelowych bazuje na rozkładzie eksponencjalnym i operacji splotu jednostronnego. Umożliwia ona efektywne prognozowanie stanu technicznego kamionkowych przewodów kanalizacyjnych. W celu uproszczenia procedur obliczeniowych zredukowano klasyfikację stanu technicznego z pięcio- do trzystopniowej skali i zastosowano jednoparametrowy rozkład eksponencjalny. Realizacja badań modelowych, w oparciu o operację splotu jednostronnego, była konsekwencją negatywnego wyniku testu Kołmogorowa-Smirnowa. Kalibrację i walidację modelu eksponencjalnego oparto o dane utworzone prawotronnie. W tym celu utworzono z próby testowej w sposób losowy 10 prób treningowych o populacji 50 i 100 przewodów

i na ich podstawie szacowano średnie parametry  $\lambda$  funkcji  $S_3$ . Wszystkie krzywe przejścia przebiegały w przypadku obydwóch populacji w minimalnej odległości od siebie. Tak duża koncentracja krzywych wskazuje na bardzo dobry wynik kalibracji modelu eksponencjalnego.

Wyznacznikiem walidacji skrzyżowanej jest odchylenie standartowe błędu średniego kwadratu pierwiastkowego  $RMSE_{stdev}$  (standard deviation of the root mean square error). Ustalono wartości tego odchylenia wyniosły dla próby treningowej  $T_r(50)$  0,0125 a dla próby  $T_r(100)$  0,0118.

Zasadniczym celem zaprezentowanej metodyki prognozowania stanu technicznego kamionkowych przewodów kanalizacyjnych jest renowacja badanych obiektów. Wyniki prognozy odpowiadają na dwa istotne pytania eksploatacyjne – jaki jest zakres koniecznej renowacji i jak długi jest okres żywotności technicznej badanej sieci. Pierwsza informacja jest podstawą racjonalnego planowania zabiegów renowacyjnych. Realizacja ustalonego w ten sposób zakresu inwestycji zapewnia pełną dyspozycyjność sieci w aspekcie jej szczelności i funkcjonalności dla odległego horyzontu czasowego. Wiedza ta ma praktyczne znaczenie przy planowaniu zasobów finansowych, personalnych i technik renowacyjnych. Często niedocenianym komponentem eksploatacyjnym jest personel. Realizacja zabiegów renowacyjnych wymaga dobrze wykwalifikowanego personelu prowadzącego nadzór inwestorski, odpowiedzialnego za management jakości inwestycji i odbiory techniczne. Na szczególną uwagę zasługuje nadzór inwestorski czy projektancki, gdyż roboty renowacyjne są realizowane in-situ. Pomimo korzystnych uwarunkowań wykonawczych może dojść do imperfekcji renowacyjnych, mających poważne konsekwencje techniczne i finansowe. W „korzystnych” sytuacjach konieczna jest też renowacja renowacji, a niejednokrotnie – jedynym możliwym wariantem – jest wymiana całego obiektu. Istotnym aspektem inwestycji renowacyjnych jest

dobór odpowiedniej techniki renowacyjnej. Dzisiejszy rynek oferuje szeroką paletę systemów, a wybór tego najbardziej korzystnego rozwiązania wymaga dużej wiedzy i bogatego doświadczenia w zakresie projektowania odnowy, jak również eksploatacji odnowionych przewodów. Na szczególną uwagę zasługuje realizacja robót renowacyjnych w strefie wahań poziomu wody gruntowej. Przed wykonaniem planowanej renowacji należy obiekt obowiązkowo doszczelnić temporalnie. W przypadku rękawa konieczne jest wbudowanie dodatkowej folii uniemożliwiającej wypłukanie żywy przez wodę gruntową.

Eksploatacja infrastruktury kanalizacyjnej – opartej o prognozę jej stanu technicznego – zapewnia duże oszczędności. Badania amerykańskie wykazują, że możliwa jest 2÷30-krotna redukcja kosztów inwestycji renowacyjnych. Zakres oszczędności jest zależny od charakterystyki badanego obiektu i lokalnych uwarunkowań. Statystyczne prognozowanie stanu technicznego sieci kanalizacyjnej jest standardem technicznych w niewielu krajach europejskich i Stanach Zjednoczonych Ameryki Północnej. Jedną z przyczyn tego stanu jest problem posiadania realnych danych eksploatacyjnych o dużych populacjach. Dodatkowym problemem są koszty opracowania takiej prognozy. Doświadczenia amerykańskie wskazują na celowość realizacji takiej formy eksploatacji zapewniającej optymalizację inwestycji renowacyjnych, będących obecnie najdroższym komponentem budżetów przedsiębiorstw wodno-kanalizacyjnych.

## LITERATURA:

- [1] Merkblatt DWA-M 149-3 - Zustandserfassung und -beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 3: Beurteilung nach optischer Inspektion - April 2015.
- [2] Merkblatt ATV-M 143-2 Inspektion, Instandsetzung, Sanierung und Erneuerung von Entwässerungskanälen und -leitungen, 1991.
- [3] EN DIN 13508-2 Untersuchung und Beurteilung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Kodiersystem für die optische Inspektion, 2011.
- [4] Raganowicz A.: Nutzen statistisch-stochastischer Modelle in der Kanalzustandsprognose, Springer Vieweg, 2017.
- [5] Hedderich J., Sachs L., Angewandte Statistik, Springer 2012.
- [6] Kleiner Y.: Scheduling inspection and renewal of large infrastructure assets, Journal of Infrastructure Systems, v. 7, no. 4, 2001, pp. 136-143.
- [7] Duchesne S., Beardsell G., Villeneuve J.-P., Toumbo B. & Bouchard K., A Survival Analysis Model for Sewer Pipe Structural Deterioration, Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering 28 (2013), 146-160.