

Andrzej RAGANOWICZ<sup>1</sup>

Józef DZIOPAK<sup>2</sup>

## OCENA JAKOŚCI ODNOWY PRZEWODÓW KANALIZACYJNYCH ANALIZĄ KORELACYJNĄ

W artykule opisano badania laboratoryjne parametrów fizyko-mechanicznych 25 próbek rękawów systemu RS CityLiner, które zainstalowano w ramach renowacji sieci kanalizacyjnej gminy Unterhaching. Dla dwóch z badanych parametrów – modułu sprężystości ( $E$ ) i wytrzymałości na zginanie ( $\sigma$ ) przeprowadzono statystyczno-stochastyczną analizę korelacyjną. Badania modelowe wykazały liniową zależność według Pearsona między modulem sprężystości i wytrzymałością na zginanie.

**Słowa kluczowe:** odnowa sieci, rękaw RS CityLiner, moduł sprężystości, wytrzymałość na zginanie, analiza korelacyjna

### 1. Wprowadzenie

Związek Celowy (pn. Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal) eksploatuje rozdzielczą sieć kanalizacyjną bawarskiej gminy Unterhaching. W jej skład wchodzi kolektory betonowe DN 600/1100÷900/1350 mm, kamionkowe przewody kanalizacyjne DN 200÷400 mm oraz kamionkowe przyłącza DN 100÷200 mm. W 2000 r. wykonano pierwszą kompletną inspekcję telewizyjną sieci gminnej. Jej stan techniczno-eksploatacyjny sklasyfikowano według wytycznych ATV-M 149 [2]. Z analizy stanu technicznego wynikało, że dalsza ekonomiczna eksploatacja tego obiektu wymaga realizacji dużego zakresu rehabilitacji technicznej.

Odnową objęto kamionkowe przewody kanalizacyjne oraz kamionkowe przyłącza. W latach 2003÷2006 zainstalowano 5300 m rękawów DN 250 mm według technologii szwajcarskiej „RS CityLiner” [6]. Kilka instalacji obejmowało jednocześnie 3÷5 odcinków sieci, o łącznej długości nie przekraczającej

<sup>1</sup> Autor do korespondencji / corresponding author: Andrzej Raganowicz, Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal, Rotwandweg 16, D-82024 Taufkirchen, tel. +49 89 61559050, e-mail: andreas.raganowicz@azvht.de

<sup>2</sup> Józef Dziopak, Politechnika Rzeszowska, Zakład Infrastruktury i Ekorozwoju, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. +48 17 8651784, e-mail: jdziopak@prz.edu.pl

300 m. W okresie odnowy długość kamionkowej sieci publicznej wynosiła 40000 m.

Rękawy zainstalowane w gminie Unterhaching zaplanowano jako powłoki renowacyjne, które nie są konstrukcjami samonośnymi. Spełniają one warunki drugiego stanu technicznego wg wytycznych ATV A-127 [1]. Stan ten dopuszcza deformację (owalizację) przekroju poprzecznego przewodu nie przekraczającą 6% przy założeniu, że układ rura-podłoże gruntowe jest stabilny.

W przypadku drugiego stanu technicznego wytyczne obligują projektanta do przedstawienia dowodu w postaci sondowań lub badań georadarowych wykazujących, że w najbliższym otoczeniu przewodu kanalizacyjnego nie występują puste przestrzenie (kawerny).

System „RS CityLiner” służy do rehabilitacji technicznej przewodów kanalizacyjnych w zakresie średnic DN 150÷700 mm. Rękaw renowacyjny wykonany jest z filcu poliestrowego o nazwie handlowej „CityLiner”, nasączonego żywicą epoksydową „Max Pox 15”. Żywicę bazową utwardza się komponentem o nazwie „Max Pox 180”. Zewnętrzną powierzchnię rękawa wzmacnia folia poliuretanowa (PU) umożliwiająca nasączenie rękawa. Czynność tą wykonuje się w mobilnej hali przemysłowej bezpośrednio na placu budowy. Dwie precyzyjne pompy odpowiedzialne są za dozowanie żywicy epoksydowej oraz utwardzacza. Nasączony żywicą rękaw zostaje wbudowany inwersyjnie przez studzienkę rewizyjną do odnawianego przewodu kanalizacyjnego za pomocą kilkumetrowego słupa wody. W ramach tego procesu następuje odwrócenie rękawa powodujące, że folia zewnętrzna staje się folią wewnętrzną chroniącą laminat przed negatywnym wpływem ścieków. Przed wbudowaniem rękawa należy wciągnąć do przewodu dodatkową folię (preliner) chroniącą laminat rękawa od strony zewnętrznej. Zastosowanie prelinera jest bezwzględnie konieczne przy odnawianiu przewodów funkcjonujących w strefie wahań zwierciadła wody gruntowej. Wbudowany rękaw utwardza ostatecznie cyrkulująca w nim woda o temperaturze 40÷60°C.

Ostatnią fazą procesu instalacji rękawa jest wykonanie zakończeń. W gminie Unterhaching zakończenia rękawów wykonano stosując szybkowiązącą zaprawę mineralną. Zadaniem zakończenia jest szczelne połączenie rękawa ze studzienką rewizyjną.

W ramach systemu zarządzania jakością prac renowacyjnych w gminie Unterhaching pobrano 25 próbek rękawów w formie pełnych cylindrów DN 250 mm o długości 0,20÷0,30 m i następnie poddano je badaniom laboratoryjnym parametrów fizyko-mechanicznych. Próbkę rękawów pobrano ze studzienek rewizyjnych, co wymagało wbudowania do nich specjalnych szalunków. Rękawy „RS CityLiner” DN 250 mm powinny zgodnie z wynikami obliczeń statycznych osiągnąć następujące parametry [6]:

- moduł sprężystości krótkotrwałej  $E = 2150 \text{ N/mm}^2$ ,
- współczynnik obciążenia długotrwałego  $A_1 = 1,53$ ,
- grubość ścianki rękawa  $s = 4,0 \text{ mm}$ .

W ramach badań laboratoryjnych przygotowano 25 próbek, dla których wyznaczono: moduł sprężystości przy zginaniu ( $E$ ), wytrzymałość na zginanie ( $\sigma$ ), sztywność obwodową ( $S_r$ ), grubość ścianki rękawa ( $s$ ) oraz moduł pełzania na podstawie modułu sprężystości ( $K_n$ ). Parametry fizyko-mechaniczne wbudowanych rękawów zestawiono w tabeli 1 [6]. Wykorzystując analizę korelacyjną zbadano zależność między modułem sprężystości ( $E$ ) i wytrzymałością na zginanie ( $\sigma$ ). Cechą charakterystyczną zbioru modułów sprężystości jest duże rozproszenie w zakresie wartości od 1400 do 3470 N/mm<sup>2</sup>. Natomiast rozproszenie wytrzymałości na zginanie jest znacznie mniejsze i mieści się w przedziale od 51 do 89 N/mm<sup>2</sup>.

Bazą danych modelowania statystycznego jest próba losowa składająca się z 25 wyników badań laboratoryjnych. Zbiór wartości modułu sprężystości oznaczono  $X$  a wytrzymałości na zginanie  $Y$ .

Z uwagi na małą liczebność bazy danych, nie spełniającej warunku progu statystycznego  $n < 50$ , postanowiono powiększyć ją stochastycznie na podstawie wartości średniej i odchylenia standardowego. Jest to próba uwzględnienia błędu, jaki towarzyszy wyznaczaniu modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie. Wynik każdego pomiaru potraktowano jako wartość średnią, którą następnie symulowano matematycznie na podstawie odchylenia standardowego. Zgodnie z zaproponowaną metodyką badań, wykorzystując liczby losowe o rozkładzie normalnym, powiększono stochastycznie liczebność obydwóch zbiorów do 1000, 2500, 5000, 10000 oraz 15000 elementów. Dokładność pomiaru modułu sprężystości wynosiła 3% a wytrzymałości na zginanie 1%.

## **2. Statystyczna analiza korelacji między modułem sprężystości ( $E$ ) i wytrzymałością na zginanie ( $\sigma$ ) rękawów „RS CityLiner” wykonanych w ramach odnowy sieci w gminie Unterhaching**

Celem analizy korelacyjnej jest wykazanie zależności liniowej według Pearsona między proporcjonalnie skalowanym parametrem modułu sprężystości  $X$  a parametrem wytrzymałości na zginanie  $Y$ . Matematyczna próba losowa ( $X, Y$ ) składa się z  $n = 25$  wyników badań modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie. Modelowanie wyznacznika będącego miarą analizowanej korelacji wymaga przyjęcia dwóch założeń, dotyczących zbioru danych  $X$  i  $Y$ :

- $X$  i  $Y$  są funkcjami przynajmniej częściowo zeskalowanymi, które umożliwiają wyznaczenie wartości średniej i rozproszenia;
- $X$  i  $Y$  można opisać za pomocą rozkładu normalnego, umożliwiającego ustalenie wyznacznika korelacji według Pearsona.

Tabela 1. Wyniki badań laboratoryjnych parametrów fizyko-mechanicznych próbek rękawów RS CityLiner

Table 1. The results of the laboratory tests of the physical-mechanical parameters of RS CityLining

Nr Próbki	Moduł sprężystości $E$ , N/mm <sup>2</sup>	Wytrzymałość na zginanie $\sigma$ , N/mm <sup>2</sup>	Grubość ścianki $s$ , mm	Sztywność obwodowa $S_r$ , N/mm <sup>2</sup>	Moduł pełzania $K_p$ , N/mm <sup>2</sup>
1	2748,00	89,70	3,80	0,008	15,20
2	2647,00	86,50	4,20	0,011	12,90
3	3470,00	88,10	4,55	0,030	11,90
4	2345,00	75,60	4,13	0,012	14,80
5	3028,00	71,40	3,95	0,010	13,50
6	2028,00	69,40	4,48	0,014	14,60
7	1401,00	51,50	4,52	0,009	35,00
8	2547,00	66,20	4,50	0,024	34,40
9	2131,00	69,30	4,28	0,012	18,10
10	2026,00	69,90	4,22	0,011	14,50
11	2146,00	77,10	4,63	0,015	14,30
12	1896,00	72,00	3,86	0,010	15,20
13	2320,00	85,30	4,12	0,011	15,10
14	2083,00	72,80	4,19	0,012	16,50
15	2396,00	72,40	3,85	0,020	17,50
16	2098,00	77,10	4,29	0,011	15,00
17	1988,00	70,90	4,11	0,012	15,10
18	2162,00	55,00	6,38	0,020	15,70
19	2221,00	66,30	4,23	0,009	17,70
20	2259,00	69,30	6,51	0,018	20,10
21	2201,00	69,50	4,67	0,008	19,90
22	2627,00	75,20	6,86	0,016	7,60
23	2259,00	66,50	4,48	0,013	9,10
24	2835,00	80,30	4,46	0,012	9,80
25	3005,00	78,90	4,81	0,015	9,10

## 2.1. Test według Kolmogoroffa i Smirnoffa (KS)

Drugi warunek analizy korelacyjnej, który dotyczy rozkładu danych empirycznych, można zweryfikować analitycznie na podstawie testu sformułowanego przez Kolmogoroffa i Smirnoffa (KS) [3]. Jego celem jest analityczna ocena posiadanego materiału badawczego w odniesieniu do konkretnego rozkładu. Ideą przewodnią testu KS jest sprawdzenie, czy prawdziwe są dwie hipotezy:  $H_0: (F^*(x) = F(x))$  i  $H_1: (F^*(x) \neq F(x))$ . W praktyce oznacza to porównanie funkcji rozkładu empirycznego  $F^*(x)$  z funkcją teoretyczną zastosowanego rozkładu, przykładowo eksponencjalnego o następującej formule:

$$F(x) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x) \quad (1)$$

gdzie:  $\lambda$  – parametr intensywności rozkładu;  
 $x$  – wartości modułu sprężystości, N/mm<sup>2</sup>.

Przeprowadzenie testu KS polega na analizie różnic (dystansów) między rozkładem empirycznym i teoretycznym. Jeżeli wartość największego dystansu nie przekracza dopuszczalnej (krytycznej) wartości, która jest zależna od liczebności badanej próby losowej, to prawdziwa jest hipoteza zerowa  $H_0: (F^*(x) = F(x))$ . Dowodzi to, że funkcja teoretyczna z dostateczną dokładnością odwzorowuje wyniki badań empirycznych. Natomiast prawdziwość hipotezy  $H_1: (F^*(x) \neq F(x))$  wykazuje, że zastosowany rozkład teoretyczny niedokładnie opisuje dane empiryczne. Test Kolmogoroffa-Smirnoffa ma uniwersalny charakter i dlatego może być zastosowany do analizy każdego rozkładu teoretycznego.

Metodyka wykonania testu Kolmogoroffa-Smirnoffa, zastosowanego w celu oceny przydatności danych empirycznych dla potrzeb analizy zależności między modułem sprężystości i wytrzymałością na zginanie rękawów „RS CityLiner”, sprowadza się do realizacji siedmiu etapów obliczeniowych, które przedstawiono poniżej w uporządkowanej kolejności [3].

1. Estymacja parametru  $\lambda$ .
2. Posortowanie danych empirycznych zgodnie z rosnącą kolejnością.
3. Wyznaczenie wartości empirycznej funkcji rozkładu, zgodnie z formułą (2):

$$F^*(x) = i + 0,3/n + 0,4 \quad (2)$$

gdzie:  $i = 1, 2, \dots, n$ ;  
 $n$  - liczba zdarzeń empirycznych.

4. Wyznaczenie wartości teoretycznej funkcji eksponencjalnej, ujmującej dane  $X$  i  $Y$  zgodnie z formułami (3) i (4):

$$F(x_i) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot x_i) \quad (3)$$

$$F(y_i) = \lambda \cdot \exp(-\lambda \cdot y_i) \quad (4)$$

5. Ustalenie różnic (dystansów) dla zbiorów  $X$  i  $Y$  między funkcją empiryczną i teoretyczną rozkładu, zgodnie ze wzorami (5)÷(8):

$$D_{F^*-F}^- = |F(x_i) - F^*(x_{i-1})| \quad (5)$$

$$D_{F^*-F}^- = |F(y_i) - F^*(y_{i-1})| \quad (6)$$

$$D_{F^*-F}^+ = |F(x_i) - F^*(x_i)| \quad (7)$$

$$D_{F^*-F}^+ = |F(y_i) - F^*(y_i)| \quad (8)$$

6. Ustalenie maksymalnej różnicy (dystansu) między funkcjami - empiryczną i teoretyczną, według wzoru (9):

$$D_{\max} = \max(D_{F^*-F}^-; D_{F^*-F}^+) \quad (9)$$

7. Ustalenie krytycznej różnicy między funkcją empiryczną i teoretyczną  $D_{kryt}$ .

Jeżeli spełniony jest warunek  $D_{\max} < D_{kryt}$ , tzn. że wyniki doświadczeń empirycznych można opisać za pomocą rozkładu eksponencjalnego, przy zdefiniowanym błędzie prawdopodobieństwa  $\alpha$ . Jeżeli jednak maksymalny dystans między tymi dwoma funkcjami będzie większy od jego wartości krytycznej  $D_{\max} < D_{kryt}$ , to należy wyjść z założenia, że posiadane wyniki badań laboratoryjnych nie mają wystarczająco dokładnego charakteru rozkładu eksponencjalnego, przy założonej wartości błędu prawdopodobieństwa.

Na podstawie próby losowej wyników badań laboratoryjnych modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie ( $X$ ,  $Y$ ) składającej się z 25 danych przeprowadzono obliczenia według testu Kolmogoroffa-Smirnoffa. W tabeli 2 przedstawiono algorytm obliczeniowy dla zbioru wyników badań modułu sprężystości ( $X$ ), a w tabeli 3 dla zbioru wyników badań wytrzymałości na zginanie ( $Y$ ). Z analizy statystyki obydwóch testów (tabele 2 i 3) wynika, że  $D_{\max} = \max(D_{F^*-F}^-; D_{F^*-F}^+) = 0,972$ . Natomiast krytyczną wartość dystansu  $D_{kryt}$  można wyznaczyć na podstawie przybliżonej formuły:

$$D_{kryt} = (-0,5 * \ln(\alpha/2))^{0,5} \quad (10)$$

gdzie  $\alpha$  jest wartością błędu prawdopodobieństwa.

Tabela 2. Algorytm testu według KS dla zbioru modułu sprężystości ( $E$ )Table 2. The algorithm according to the KS-Test for the sample of the modulus of elasticity ( $E$ )

$i$	$x_i, \text{N/mm}^2$	$F^*$	$F$	$D^+$	$D^-$
1	2748	0,028	0,00013	0,027	0,027
2	2647	0,067	0,00014	0,067	0,067
3	3470	0,106	0,00010	0,106	0,106
4	2345	0,146	0,00016	0,146	0,146
5	3028	0,185	0,00012	0,185	0,185
6	2028	0,224	0,00018	0,224	0,224
7	1401	0,264	0,00023	0,264	0,264
8	2547	0,303	0,00014	0,303	0,303
9	2131	0,343	0,00017	0,342	0,342
10	2026	0,382	0,00018	0,382	0,382
11	2146	0,421	0,00017	0,421	0,421
12	1896	0,461	0,00019	0,460	0,461
13	2320	0,500	0,00016	0,500	0,500
14	2083	0,539	0,00018	0,539	0,539
15	2396	0,579	0,00015	0,579	0,579
16	2098	0,618	0,00017	0,618	0,618
17	1988	0,657	0,00018	0,657	0,657
18	2162	0,697	0,00017	0,679	0,697
19	2221	0,736	0,00017	0,736	0,736
20	2259	0,776	0,00016	0,775	0,776
21	2201	0,815	0,00017	0,815	0,815
22	2627	0,854	0,00014	0,854	0,854
23	2259	0,894	0,00016	0,894	0,894
24	2835	0,933	0,00013	0,933	0,933
25	3005	0,972	0,00012	<b>0,972</b>	<b>0,972</b>

Dla przyjętego błędu prawdopodobieństwa  $\alpha = 5\%$  (0,05) krytyczna wartość dystansu wynosi zgodnie ze wzorem (10)  $D_{kryt} = 1,358$  i jest większa od wartości  $D_{max} = 0,972$  uzyskanej ze statystyk testu KS. W związku z tym prawdziwe są hipotezy zerowe  $H_0: (F^*(x) = F(x))$  oraz  $H_0: (F^*(y) = F(y))$ , będące

warunkiem zgodności funkcji empirycznych i teoretycznych. Na tej podstawie można opisać dane empiryczne wchodzące w skład badanej próby losowej  $(X, Y)$  teoretycznym rozkładem eksponencjalnym.

## 2.2. Wyznacznik korelacji według Pearsona

Zależność liniową między danymi zbiorów  $X$  i  $Y$  przedstawia wyznacznik korelacji [3]:

$$\varrho(X, Y) = \text{Cov}(X, Y) / [(\text{Var}(X) \cdot \text{Var}(Y))^{0.5}] \quad (11)$$

gdzie:  $\text{Cov}(X, Y)$  – kowariancja między  $X$  i  $Y$ ;

$\text{Var}(X)$  – wariancja  $X$ ;

$\text{Var}(Y)$  – wariancja  $Y$ .

Zgodnie z [3] można przyjąć następujące przedziały wartości wyznacznika korelacji:

- $\varrho(X, Y) = 0$ , zbiory  $X$  i  $Y$  nie są skorelowane,
- $\varrho(X, Y) \neq 0$  i  $|\varrho(X, Y)| \leq 0,5$ , zbiory  $X$  i  $Y$  są słabo skorelowane,
- $0,5 < |\varrho(X, Y)| \leq 0,8$ , zbiory  $X$  i  $Y$  są skorelowane,
- $0,8 < |\varrho(X, Y)| \leq 1,0$ , zbiory  $X$  i  $Y$  są bardzo dobrze skorelowane.

Jeżeli wyznacznik ma wartość dodatnią, to jest to pozytywna korelacja liniowa, a w przeciwnym wypadku korelacja negatywna. Ustalenie wyznacznika korelacji liniowej wymaga zastosowania schematu obliczeniowego, zapisanego w postaci zależności (12)÷(16):

$$\bar{x} = 1/n \sum x_i \quad (12)$$

$$\bar{y} = 1/n \sum y_i \quad (13)$$

$$S_x^2 = 1/n-1 \sum (x_i - \bar{x})^2 \quad (14)$$

$$S_y^2 = 1/n-1 \sum (y_i - \bar{y})^2 \quad (15)$$

$$\varrho_r = 1/n-1 \sum (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y}) / (S_x^2 \cdot S_y^2)^{0.5} \quad (16)$$

gdzie:  $\varrho_r$  – statystyczny wyznacznik korelacji;

$n$  – liczebność próby losowej;

$x_i$  – wartości modułu sprężystości według badań laboratoryjnych, N/mm<sup>2</sup>;

$y_i$  – wytrzymałość na zginanie według badań laboratoryjnych, N/mm<sup>2</sup>.



Tabela 3. Algorytm testu według KS dla zbioru wytrzymałości na zginanie ( $\sigma$ )Table 3. The algorithm according to the KS-Test for the sample of the flexural modulus ( $\sigma$ )

$i$	$y_i, \text{N/mm}^2$	$F^*$	$F$	$D^+$	$D^-$
1	89,7	0,028	0,00401	0,0247	0,027
2	86,5	0,067	0,00041	0,067	0,067
3	88,1	0,106	0,00041	0,106	0,106
4	75,6	0,146	0,00041	0,145	0,146
5	71,4	0,185	0,00041	0,185	0,185
6	69,4	0,224	0,00041	0,224	0,224
7	51,4	0,264	0,00042	0,263	0,264
8	66,2	0,303	0,00014	0,303	0,303
9	69,3	0,343	0,00041	0,342	0,342
10	69,9	0,382	0,00041	0,381	0,382
11	77,1	0,421	0,00041	0,421	0,421
12	72,0	0,461	0,00041	0,460	0,461
13	85,3	0,500	0,00041	0,500	0,500
14	72,8	0,539	0,00041	0,539	0,539
15	72,4	0,579	0,00041	0,578	0,579
16	77,1	0,618	0,00041	0,618	0,618
17	70,9	0,657	0,00041	0,657	0,657
18	55,0	0,697	0,00041	0,696	0,697
19	66,3	0,736	0,00041	0,736	0,736
20	69,3	0,776	0,00041	0,775	0,776
21	69,5	0,815	0,00041	0,815	0,815
22	75,2	0,854	0,00041	0,854	0,854
23	66,5	0,894	0,00041	0,893	0,894
24	80,3	0,933	0,00041	0,933	0,933
25	78,9	0,972	0,00041	<b>0,972</b>	<b>0,972</b>

Przy małej liczebności próby losowej ( $n < 50$ ) Sachs [4] proponuje formułę korygującą:

$$\varrho_{r-s} = \varrho_r(X, Y) \cdot [1 + (1 - \varrho_r(X, Y)^2 / 2(n - 3))] \quad (17)$$

gdzie  $\varrho_{r-s}$  jest wyznacznikiem korelacji ustalany formułą Sachsa.

W ramach statystycznego modelowania zależności między modulem sprężystości i wytrzymałością na zginanie uzyskano następujące wartości średnie, wariancje oraz wyznaczniki korelacji:

$$\bar{x} = 2354,80 \text{ N/mm}^2 \quad \bar{y} = 73,05 \text{ N/mm}^2,$$

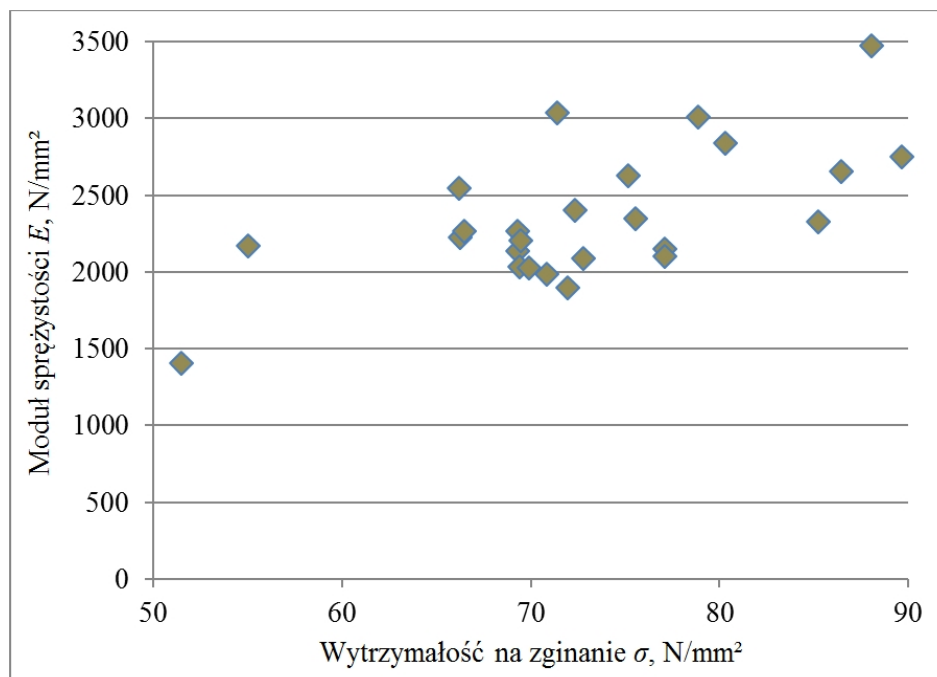
$$S_x^2 = 187\,688,23 \quad S_y^2 = 81,83,$$

$$\varrho_r = 0,6508 \quad \varrho_{r-s} = \mathbf{0,6593}.$$

Wartość wyznacznika korelacji ( $\varrho_{r-s} = \mathbf{0,6593}$ ) dla próby losowej ( $x_i, y_i$ ) pozwala stwierdzić, że zależność między modulem sprężystości i wytrzymałością na zginanie rękawów systemu „RS-CityLiner” można opisać za pomocą linii prostej o dodatnim nachyleniu. Rozproszenie danych empirycznych przedstawiono na rysunku 1.

### 3. Symulacje matematyczne próby losowej ( $X, Y$ )

Celem modelowania stochastycznego jest wykazanie wpływu liczebności próby losowej ( $X, Y$ ) na wartość wyznacznika korelacji między modulem sprężystości i wytrzymałością na zginanie. Podstawą stochastycznego powiększania prób losowych jest uwzględnienie dokładności, z jaką realizowane są badania laboratoryjne parametrów fizyko-mechanicznych rękawów renowacyjnych. Wynik każdego badania laboratoryjnego jest obarczony błędem (niedokładnością), który jest wypadkową dokładności pomiaru, skalowania urządzenia badawczego i innych. Publikując wyniki jakichkolwiek badań lub pomiarów należy zawsze podać ich dokładność. Punktem wyjścia do symulacji wyników badań i powiększania wyjściowych prób losowych jest właśnie ich dokładność. Wykorzystując liczby losowe o rozkładzie normalnym, można każdy wynik badań laboratoryjnych w ramach przyjętej dokładności dowolnie symulować matematycznie i w ten sposób uzyskać zbiory o dużych liczebnościach. Podstawami matematycznymi przyjętej metodyki symulacyjnej są wartość średnia i odchylenie standardowe. Ponieważ wynik każdego badania nie jest dokładnym parametrem badanego materiału tylko jego przybliżeniem, dlatego przyjęto wynik badania jako wartość średnią o określonym odchyleniu standardowym i przystąpiono do jej symulacji wykorzystując liczby losowe o rozkładzie normalnym [5].



Rys. 1. Rozproszenie wartości modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie

Fig. 1. Dispersion of the modulus of elasticity and of flexural strength

Odchylenie standardowe wyznacza się zgodnie z podanymi formułami (18) i (19):

$$U_x = S_x/n^{0.5} = [1/n - 1 \sum (x_i - \bar{x})^2]^{0.5}/n^{0.5} \quad (18)$$

$$U_y = S_y/n^{0.5} = [1/n - 1 \sum (y_i - \bar{y})^2]^{0.5}/n^{0.5} \quad (19)$$

gdzie:  $U_x$  – odchylenie standardowe dla zbioru  $X$ ;

$U_y$  – odchylenie standardowe dla zbioru  $Y$ .

Do symulacji matematycznej próby losowej ( $X$ ,  $Y$ ) wykorzystano algorytmy programu EXCEL 2010 w wersji niemieckiej:

$$\text{NORMINV}(\text{ZUFALLSZAHL}(); \bar{x}_i; U_x) \quad (20)$$

$$\text{NORMINV}(\text{ZUFALLSZAHL}(); \bar{y}_i; U_y) \quad (21)$$

Zgodnie z algorytmami (20) i (21) wykonano 1000, 2500, 5000, 10000 oraz 15000 serii symulacji matematycznych modułu sprężystości i wytrzymałości na zginanie. Następnie ustalone wartości  $x_i$  oraz  $y_i$  wprowadzono do wzorów

(12)÷(16) w celu ustalenia wyznacznika korelacji dla każdej z pięciu serii symulacji matematycznych. Wyniki stochastycznego modelowania wyznacznika korelacji między modułem sprężystości i wytrzymałością na zginanie w zależności od liczby symulacji przedstawiono w tabeli 4, a ich graficzną interpretację na rysunku 2.

Tabela 4. Wartości wyznacznika korelacji między modułem sprężystości i wytrzymałością na zginanie w zależności od liczby symulacji

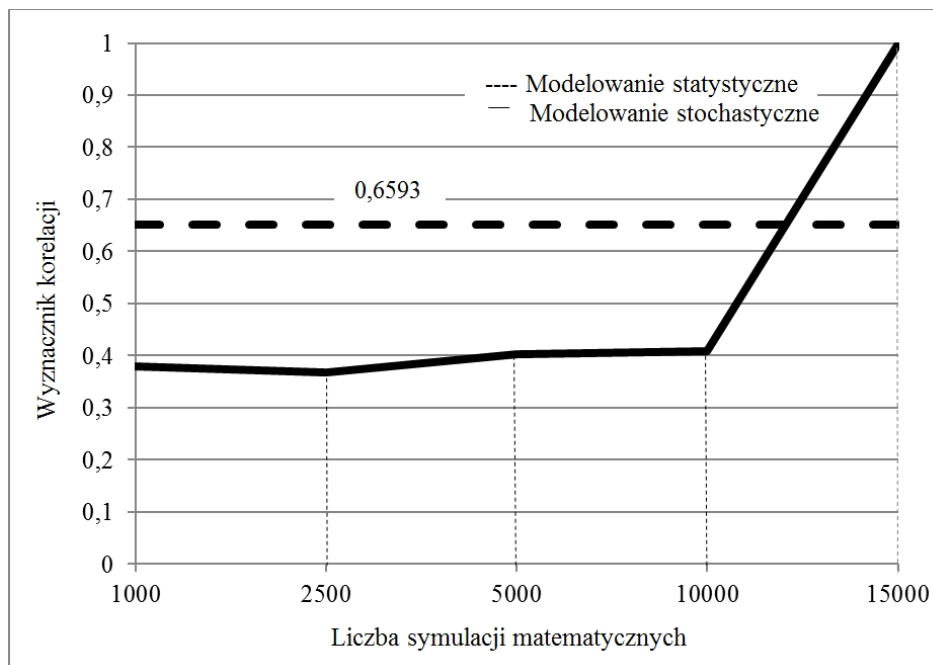
Table 4. Correlation coefficient between modulus of elasticity and flexural strength, depending on the population of simulations

<b>Wyznacznik korelacji</b>	0,3791	0,3674	0,4025	0,4081	1,0000
<b>Liczba symulacji</b>	1000	2500	5000	10000	15000

Z analizy wyników modelowania stochastycznego wynika, że wraz ze wzrostem liczby symulacji (liczebności próby losowej) wzrasta wartość wyznacznika korelacji. Dla prób losowych o liczebnościach od 1000 do 10000 wyników badań, wyznacznik przyjmuje wartości w zakresie 0,3674÷0,4081, wskazujące na słabą korelację liniową o nachyleniu dodatnim. Natomiast wyznacznik statystyczny osiągnął wartość  $\varrho_r = 0,6593$  wskazującą na dobre skorelowanie badanych zbiorów. Istotne znaczenie dla modelowania stochastycznego miała seria 15000 symulacji, zapewniająca osiągnięcie maksymalnej wartości wyznacznika  $\varrho_{r-Stoch} = 1,0000$ .

#### 4. Dyskusja wyników badań modelowych

Z porównania modelowania statystycznego i stochastycznego wyznacznika korelacji między modułem sprężystości ( $E$ ) i wytrzymałością na zginanie ( $\sigma$ ) rękawów „RS CityLiner” wynika, że jego wartość statystyczna  $\varrho_r > 0,5$ , natomiast stochastyczna dla liczby symulacji do 10000  $\varrho_{r-Stoch} \leq 0,5$ . Wykonanie 15000 serii symulacji ma istotne znaczenie dla badań stochastycznych, ponieważ powoduje nagły wzrost wyznacznika korelacji od wartości 0,4 do wartości równej 1,0. W fazie modelowania statystycznego zbiory danych empirycznych  $X$  i  $Y$  wykazują dobre skorelowanie, a w fazie stochastycznej przy zastosowaniu od 1000 do 10000 symulacji słabe skorelowanie. Jedną z możliwych interpretacji tego zjawiska jest fakt dużego rozproszenia zbioru modułu sprężystości. W badaniach statystycznych rozproszenie nie odgrywa tak dużej roli, ponieważ próba losowa danych empirycznych ma małą liczebność ( $n = 25$ ). Natomiast symulowanie modułu sprężystości do 10000 serii powoduje zwiększenie liczby wyników badań laboratoryjnych zdecydowanie odbiegających od wartości średniej, prowadzące do redukcji wyznacznika korelacji do wartości  $\varrho_{r-Stoch} \leq 0,5$ .



Rys. 2. Statystyczno-stochastyczne modelowanie wyznacznika korelacji

Fig. 2. Statistical-stochastic modeling of the correlation coefficient

Istnienie zależności między modulem sprężystości i wytrzymałością na zginanie jest oczywistym zjawiskiem, ponieważ obydwa parametry ustala się w ramach jednego badania laboratoryjnego. W pierwszej fazie badania określa się maksymalną siłę, przy której materiał rękawa ulega jeszcze odkształceniu sprężystemu. Dalszy wzrost siły prowadzi do przegięcia krzywej odkształcenia, po którym następuje płynięcie i ostatecznie zniszczenie materiału. Wartość siły niszczącej próbkę materiału odniesiona do powierzchni próbki jest miarą stanu naprężenia odpowiadającego wytrzymałości na zginanie.

Statystyczno-stochastyczne modelowanie wyznacznika korelacji wykazało istnienie liniowej zależności według Pearsona między modulem sprężystości i wytrzymałością na zginanie rękawów instalowanych w technologii „RS CityLiner”. Technologia renowacji w tym systemie polega na nasączeniu rękawa filcowego żywicą epoksydową i wbudowaniu go metodą inwersji do przewodu kanalizacyjnego. Gorąca woda cyrkulująca w rękawie powoduje ostateczne utwardzenie dwufazowego kompozytu.

Badania stochastyczne próby losowej ( $X$ ,  $Y$ ) w przedziale od 1000 do 10000 symulacji wykazują systematyczny wzrost wyznacznika korelacji między modulem sprężystości i wytrzymałością na zginanie w przedziale słabej zależności liniowej. Natomiast w zakresie symulacji 5000–10000 wyznacznik ten jest sta-

bilny i osiąga wartość  $\varrho_{r-s} = 0,4$ . Istotne znaczenie dla modelowania stochastycznego ma wykonanie 15000 symulacji, które powoduje skokowy wzrost wskaźnika do wartości równej 1. Dopiero w przedziale 10000÷15000 symulacji matematycznych wyznacznik osiąga wartość ustaloną w ramach statystycznej analizy korelacyjnej. Na podstawie stochastycznych badań modelowych można sformułować wniosek, że analiza korelacji między modułem sprężystości i wytrzymałością na zginanie rękawów wykonanych w technologii „RS CityLiner” wymaga przeprowadzenia od 10000 do 15000 serii symulacji matematycznych w celu uzyskania wiarygodnych wyników badań.

Publikacja niniejsza ma oprócz aspektów teoretycznych również duże znaczenie praktyczne. System zarządzania jakością odgrywa w fazie realizacji inwestycji renowacyjnych kluczową rolę. W przypadku renowacji sieci kanalizacyjnej należącej do gminy Unterhaching rękawy były wykonywane (nasączone żywicą) na placu budowy i następnie wbudowywane do przewodów. Realizacja tych dwóch procesów jest związana z dużym ryzykiem techniczno-technologicznym. Ostateczną jakość wykonanych rękawów można ocenić na podstawie inspekcji telewizyjnych, badań szczelności i laboratoryjnych badań parametrów fizyko-mechanicznych. Realizacja takiego pakietu badań powinna być elementem składowym odbioru końcowego, jak również odbioru gwarancyjnego robót renowacyjnych.

Doświadczenia zebrane w gminie Unterhaching wskazują jednoznacznie na potrzebę pobierania i badania próbek zainstalowanych rękawów. Przykładowo, w zakresie modułu sprężystości nie wszystkie pobrane próbki spełniły kryteria wynikające z obliczeń statycznych. Nieszczelny i nienośny rękaw stanowi poważny problem dla inwestora oraz wykonawcy. Renowacja sieci kanalizacyjnej jest kompleksowym zadaniem wymagającym precyzyjnego zdefiniowania techniczno-wykonawczych celów planowanych zabiegów. Dlatego system zarządzania jakością odnowy musi być nieodłącznym elementem nadzoru inwestorskiego. Tylko w obecności inwestora powinny być pobierane próbki zainstalowanych rękawów i przekazywane bezpośrednio do jego rąk. Następnie inwestor zleca renomowanemu instytutowi wykonanie badań laboratoryjnych i decyduje o ich zakresie.

Przejęcie przez inwestora kontroli jakości robót renowacyjnych zapewnia uzyskanie wiarygodnych wyników badań laboratoryjnych. Inwestor powinien kontrolować także ważne fazy procesu technologicznego, do których należy zaliczyć nasączenie rękawa żywicą oraz jego utwardzanie gorącą wodą. Czas utwardzania i temperatura cyrkulującej w rękawie wody oraz schładzanie mają decydujące znaczenie dla jego przyszłych parametrów fizyko-mechanicznych. Kompleksowość i wysokie ryzyko związane z wykonawstwem robót renowacyjnych wymagają prowadzenia bardzo rzetelnego nadzoru inwestorskiego.

Firmie wykonującej odnowę nie należy powierzać zadań wynikających z zarządzania jakością, ponieważ nie będzie ona krytyczna w stosunku do wy-

konanych przez siebie robót renowacyjnych. Natomiast wyniki badań nie zawsze będą odzwierciedlały rzeczywistą jakość wykonanej odnowy.

## Literatura

- [1] ATV-A 127, Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen, 2. Auflage 1988.
- [2] ATV-M 149, Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, 1999.
- [3] Grabowski B.: Lexikon der Statistik, Elsevier GmbH, München 2004.
- [4] Hedderich J., Sachs L.: Angewandte Statistik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012.
- [5] Pesch B.: Bestimmung der Messunsicherheit nach GUM, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2003.
- [6] Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal, Dokumentation der Kanalsanierung in Unterhaching, 2003–2006.

## QUALITY ASSESSMENT OF THE RENOVATION OF SEWAGE PIPES USING CORRELATION ANALYSIS

### Summary

The article describes the laboratory testing of physical-mechanical parameters of 25 samples of RS CityLining, which are installed as part of the renovation of the sewerage system municipality Unterhaching. For two parameters - the modulus of elasticity ( $E$ ) and the flexural modulus ( $\sigma$ ) - the statistical-stochastic correlation analysis was performed. The results of modeling showed a linear relationship by Pearson between the modulus of elasticity and the flexural modulus.

**Keywords:** rehabilitation of the sewerage network, RS CityLining, modulus of elasticity, flexural modulus, correlation analysis

DOI: 10.7862/rb.2016.173

*Przesłano do redakcji: 01.05.2016 r.*

*Przyjęto do druku: 28.06.2016 r.*