

Dobór odpowiedniej klasy powłok w bezwykopowej odnowie betonowych przewodów kanalizacyjnych

Selection of the appropriate class of liners in trenchless renewal of concrete sewers

EMILIA KULICZKOWSKA

DOI 10.36119/15.2024.5.3

W przypadku długo eksploatowanych przewodów kanalizacyjnych, wymagających zastosowania bezwykopowej odnowy, istotny jest dobór odpowiedniej klasy powłok odnowieniowych, tj. ustalenie, czy powinny to być powłoki konstrukcyjne, częściowo konstrukcyjne czy niekonstrukcyjne. Zaprezentowano najczęściej stosowane w Polsce metody zestawiania obciążeń od ciężaru gruntu oddziałujących na przewody kanalizacyjne o konstrukcji sztywnej. Zaproponowano 5-etapowy sposób postępowania, mający na celu dobór odpowiedniej klasy powłok odnowieniowych. Zamieszczono także przykład obliczeniowy, dotyczący skorodowanych betonowych przewodów kanalizacyjnych, wskazujący jak bardzo istotny jest dobór odpowiedniej metody zestawiania obciążeń oddziałujących na rury, a tym samym jak istotny jest wpływ otoczenia gruntowego rur na wielkość występujących w nich naprężeń. Dyskusja uzyskanych wyników umożliwiła sformułowanie zaleceń, dotyczących doboru odpowiedniej grupy powłok odnowieniowych, dla przewodów kanalizacyjnych wymagających bezwykopowej odnowy.

Słowa kluczowe: kanalizacja, techniki bezwykopowe, powłoki odnowieniowe, bezpieczeństwo konstrukcyjne

In the case of long-used sewers requiring trenchless renewal, it is important to select the appropriate class of renewal liners, i.e. determine whether they should be structural, partially structural or non-structural. The most frequently used methods in Poland for calculating the loads from the weight of the soil acting on sewers with a rigid structure were presented. A 5-step procedure was proposed to select the appropriate class of renewal liners. A specific calculation example regarding corroded concrete sewers is also included, showing how important it is to select the appropriate method of combining the loads acting on the pipes and, therefore, indicating its significance on the influence of the pipes' ground surroundings on the amount of stresses occurring in them. The discussion of the results made it possible to formulate recommendations regarding the selection of an appropriate group of renewal liners for sewers requiring trenchless renewal.

Keywords: sewerage, trenchless techniques, renewal liners, structural safety

Wstęp

Uszkodzenia obserwowane w długo eksploatowanych przewodach kanalizacyjnych kwalifikuje się według normy europejskiej [7], a np. w USA według wytycznych [20]. Aby uzyskać wiedzę o rodzaju uszkodzeń występujących w przewodach kanalizacyjnych, konieczna jest ich diagnostyka [4,22], a podstawową metodą są badania CCTV.

Przykładowo, w długo eksploatowanych betonowych przewodach kanalizacyjnych, które wraz z upływem czasu starzeją się [28], obserwuje się najczęściej korozję ścian wewnętrznych [12], a także szereg innych uszkodzeń wymienionych

m.in. w [11]. Stwarzają one szereg niekorzystnych oddziaływań na środowisko [6], a także ryzyko wystąpienia poważnych awarii [13]. Ryzyko awarii najczęściej wyznacza się jako dwuparametryczne [10], uwzględniające kategorie prawdopodobieństwa awarii przewodów kanalizacyjnych, wynikające z ich stanu technicznego oraz kategorie konsekwencji ich ewentualnej awarii.

Techniki bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych zaczęto stosować w Polsce już na początku lat 90. ubiegłego wieku, a obecnie istnieje duża liczba możliwych do zastosowania technik tego typu [25,27,30]. Mimo to nadal istnieje szereg wyzwań i nierozwiązanych

problemów [17] dotyczących doboru optymalnych technik bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych, a także możliwości bardziej efektywnego ich stosowania [14]. Jednym z takich ważnych problemów jest dobór odpowiedniej klasy powłok odnowieniowych spośród czterech klas ustalonych według polskiej normy [24] czy wytycznych amerykańskich [1].

Istnieją cztery klasy powłok stosowanych w bezwykopowej odnowie przewodów kanalizacyjnych:

a) powłoki niekonstrukcyjne (ang. non structural liners) nazywane często w języku polskim technikami renowacyjnymi, zaliczane według [24] do

klasy I, a według [1] do klasy D, których zadaniem jest:

- zabezpieczenie wewnętrznej powierzchni rur przed korozją,
- uszczelnienie przewodów,
- poprawa parametrów hydraulicznych przepływu ścieków.

Do tej grupy można przykładowo zaliczyć natrysk wewnętrznej powierzchni rur betonowych specjalną zaprawą cementową [25] odporną na pH ścieków w szerokim przedziale np. od 2 do 12. Zaprawy takie oferowane są przez dużą liczbę firm z tzw. branży chemii budowlanej.

- b) powłoki konstrukcyjne (ang. fully structural liners) nazywane często w języku polskim technikami rekonstrukcyjnymi zaliczane według [24] do klasy IV, a według [1] do klasy A, których zadaniem jest zapewnienie przewodowi wszystkich wyżej wymienionych efektów typowych dla powłoki niekonstrukcyjnej, a dodatkowo zastąpienie kanału poddawanego odnowie pod względem spełnienia wszystkich wymaganych dla niego wymogów wytrzymałościowych. Do tej grupy można przykładowo zaliczyć tzw. długi Relining opisany m.in. w [25], polegający na wprowadzeniu do wnętrza istniejącego kanału np. rury polietylenowej, która zastąpi istniejący przewód kanalizacyjny pod względem wytrzymałościowym, spełniając wymóg dopuszczalnych naprężeń, odkształceń i warunek utraty stateczności.
- c) powłoki częściowo konstrukcyjne (ang. semi lub partially structural liners) zaliczane według [24] do klasy II lub III, a według [1] odpowiednio do klasy C lub B, które zapewniają przewodowi wszystkie wyżej wymienione efekty typowe dla odnowy niekonstrukcyjnej, a dodatkowo częściowo zwiększają jego parametry wytrzymałościowe. Przykładowo mogą to być techniki CIPP (ang. cured in place pipe) nazywane w języku polskim technikami utwardzanych powłok żywicznych lub potocznie „rękawami” [18,25], ale o grubości pośredniej między grubością powłok niekonstrukcyjnych i grubością powłok konstrukcyjnych.

Ustalenie, czy kanał należy poddać bezwykopowej odnowie w opcji w pełni konstrukcyjnej, częściowo konstrukcyjnej czy niekonstrukcyjnej, jest niezwykle ważne z uwagi na fakt, iż koszty odnowy niekonstrukcyjnej są znacznie niższe od kosztów odnowy w opcji konstrukcyjnej. Zagadnienie to jest szczególnie istotne

w przypadku przewodów kanalizacyjnych o dużych średnicach poddawanych odnowie na dużych długościach.

W przypadku doboru techniki odnowy z nieodpowiedniej klasy, głównie w przypadku zastosowania powłoki niekonstrukcyjnej zamiast konstrukcyjnej, może dojść do awarii przewodów kanalizacyjnych, co opisano np. w [19].

Celem artykułu jest podanie sposobu postępowania umożliwiającego dobór odpowiedniej klasy powłok stosowanych w bezwykopowej odnowie przewodów kanalizacyjnych, a także zamieszczenie przykładowo obliczeniowego pokazującego, jak ważny jest dobór odpowiedniego schematu obciążeń dla długo eksploatowanego przewodu kanalizacyjnego. Jest on uwarunkowany zaistnieniem lub niezainstnieniem zmian reologicznych w gruncie, polegających na odtworzeniu się naturalnego środowiska gruntowego.

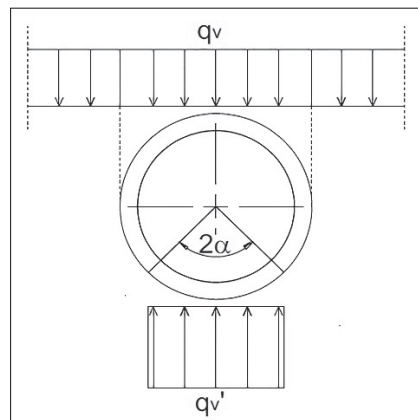
Najczęściej stosowane metody wyznaczania obciążeń oddziałujących na rury

Otoczenie gruntowe wokół przewodów kanalizacyjnych ma bardzo istotny wpływ na wielkość obciążeń oddziałujących na rury, a tym samym na wielkość sił wewnętrznych, tj. momentów zginających i sił osiowych, a ostatecznie na wielkość naprężeń występujących w rurach. W przypadku przewodów kanalizacyjnych długo eksploatowanych dużą trudność sprawia wyznaczenie obciążeń gruntowych oddziałujących na rury.

Przykładowo w rurach betonowych oblicza się wielkość naprężeń rozciągających przy zginaniu i następnie porównuje się je z naprężeniami obliczeniowymi ustalonymi dla konkretnej rury betonowej o określonej nośności. Umożliwia to ustalenie współczynnika bezpieczeństwa konstrukcyjnego rur, a tym samym podjęcie decyzji czy rury te mogą być dalej bezpiecznie eksploatowane, czy należy poddać je bezwykopowej odnowie, a jeśli tak, to przy zastosowaniu jakiej powłoki z trzech możliwych: niekonstrukcyjnej,

konstrukcyjnej czy częściowo konstrukcyjnej. Dobór prawidłowego schematu obciążeń, spośród czterech poniżej zaprezentowanych, ma zatem podstawowe znaczenie. Schematy te dotyczą rur o konstrukcji sztywnej, tj. np. betonowych czy kamionkowych. W dalszej części zamieszczono przykład obliczeniowy bazujący na niżej podanych czterech schematach obciążeń.

Schemat obciążeń pokazany na rys. 1 [8] stosowano dawniej w metodzie Wipro dla nowo projektowanych przewodów



Rys. 1. Schemat obciążeń od gruntu dla rurociągów betonowych budowanych w wykopach według metody Wipro [8]

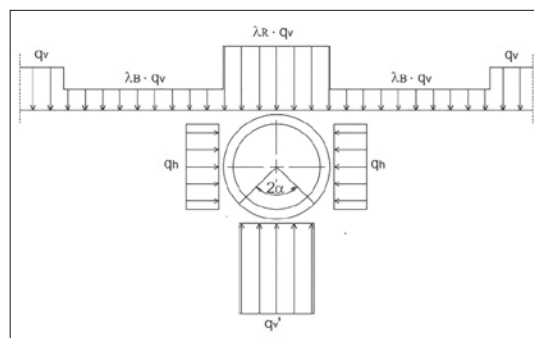
Fig. 1. Soil loads acting on the concrete pipe, according to the Wipro method [8]

kanalizacyjnych budowanych metodą tradycyjną, tj. w wykopie. Rury były projektowane z większym niż obecnie zapasem bezpieczeństwa, z uwagi na np. przyjmowany schemat obciążeń pomijający wpływ parcia poziomego od gruntu, które wpływa na zmniejszenie naprężeń w rurze. Celem wykonania obliczeń według tego schematu jest pokazanie, w jakim stopniu rury były dawniej przewymiarowane konstrukcyjnie w stosunku do obecnie projektowanych, według najczęściej stosowanego schematu obciążeń pokazanego na rys. 2.

Schemat obciążeń pokazany na rys. 2 stosuje się obecnie dla rurociągów budowanych w wykopach. Jest on zalecany

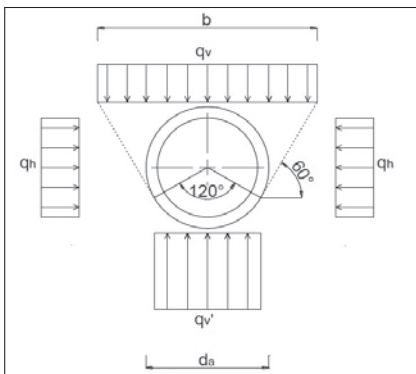
Rys. 2. Schemat obciążeń od gruntu dla rurociągów betonowych budowanych w wykopach według metody ATV-DVWK-A127 [2,26]

Fig. 2. Soil loads acting on the concrete pipe, according to the ATV-DVWK-A127 method [2,26]



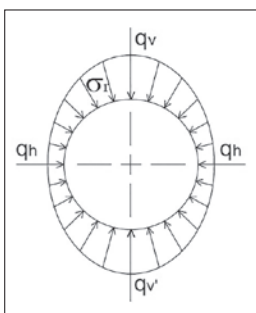
w wytycznych niemieckich [2] szwajcarskich [26] czy austriackich [23]. W toku obliczeń uwzględniana jest technologia budowy rur, parcie poziome gruntu, a także tzw. współczynnik koncentracji obciążeń występujących bezpośrednio nad rurą. Naprężenia uzyskiwane w tej metodzie są, jak to zostanie wykazane w przykładowym obliczeniowym, mniejsze od uzyskiwanych w metodzie Wipro.

Schemat obciążeń pokazany na rys. 3 [3] stosuje się dla nowo budowanych przewodów kanalizacyjnych metodami bezwykopowymi. Z uwagi na niewykonywanie wykopu, naprężenia w rurze są w tym przypadku znacznie mniejsze od tych uzyskiwanych w dwu poprzednich metodach. Celem obliczeń według tego schematu jest pokazanie, iż uzyskane w ten sposób wartości naprężeń w niewielkim stopniu różnią się od tych, jakie uzyskiwane są według schematu pokazanego na rys.4, który to schemat przyjmowany jest dla rur dawno ułożonych w gruncie z zaistniałymi już zmianami reologicznymi.



Rys.3. Schemat obciążeń od gruntu dla rurociągów betonowych budowanych metodami bezwykopowymi według metody ATV-161 [3]
Fig.3. Soil loads acting on the concrete pipe according to the ATV-161 method [3]

Schemat obciążeń pokazany na rys. 4 [5] według metody Budzianowskiego i Lessaera (dalej oznaczanej jako metoda B-L) stosuje się w przypadku kanałów długo eksploatowanych, przy założeniu zaistnienia zmian reologicznych w otaczającym ich gruncie. Podobnie jak w przypadku poprzedniego schematu ob-



Rys.4. Schemat obciążeń od gruntu dla rurociągów betonowych dawno wbudowanych wg metody B-L [5]
Fig.4. Soil loads acting on the concrete pipe according to the B-L method [5]

ciążeń, naprężenia w rurze są w tym przypadku znacznie mniejsze od tych uzyskiwanych w pierwszych dwu metodach.

Sposób postępowania przy doborze odpowiedniej klasy powłok stosowanych w bezwykopowej odnowie przewodów kanalizacyjnych

Kolejność etapów

Aby dobrać odpowiednią klasę powłok stosowanych w bezwykopowej odnowie przewodów kanalizacyjnych należy:

- wykonać badania CCTV przewodów kanalizacyjnych oraz ich ekspertyzę konstrukcyjną,
- dobrać odpowiedni schemat obciążeń oddziałujących na rury,
- wyznaczyć naprężenia rozciągające przy zginaniu w trzech najbardziej wyciężonych przekrojach rur tj. w wierzchołku, boku i dnie,
- ustalić obliczeniową wartość naprężeń rozciągających dla rur o określonej katalogowo nośności,
- wyznaczyć współczynnik bezpieczeństwa konstrukcyjnego rur umożliwiający dobór odpowiedniej klasy powłok odnowieniowych.

Wykonanie badania CCTV oraz ekspertyzy konstrukcyjnej przewodu kanalizacyjnego

Aby dobrać do obliczeń odpowiedni schemat obciążeń od gruntu oddziałujących na przewód kanalizacyjny, należy wykonać badania diagnostyczne przewodów kanalizacyjnych, w tym głównie inspekcję CCTV [22,25], a także ekspertyzę konstrukcyjną kanału. Należy także wykonać badania szczelności kanału, a następnie po jego odkopaniu wykonać, w zależności od jego długości, w kilku miejscach badania parametrów gruntu potwierdzające, w przypadku szczelnych kanałów, zaistnienie zmian reologicznych w gruncie, umożliwiającymi zaakceptowanie do obliczeń schematu obciążeń pokazanego na rys. 4. Konieczne jest także pozyskanie dodatkowych danych niezbędnych do wykonania obliczeń statycznie – wytrzymałościowych. Informacje dotyczące zakresu badań w trakcie realizacji ekspertyz konstrukcyjnych przewodów kanalizacyjnych zamieszczono m.in. w [16].

Dobór odpowiedniego schematu obciążeń oddziałujących na przewody kanalizacyjne

W przypadku, gdy badania potwierdzą, że kanał jest szczelny (brak infiltracji wód gruntowych do wnętrza i brak eksfiltra-

cji ścieków do gruntu), i długo eksploatowany oraz zaistniały w nim zmiany reologiczne gruntu, odpowiednim schematem obciążeń jest schemat pokazany na rys. 4. Poprawność obliczeń wykonanych metodą B-L według schematu obciążeń pokazanego na rys.4 można zweryfikować wykonaniem obliczeń według schematu obciążeń pokazanego na rys.3, stosowanego przy bezwykopowej budowie przewodów kanalizacyjnych. W przypadku bezwykopowej budowy środowisko gruntowe jest naturalne i zbliżone swymi parametrami do środowiska gruntowego, jakie powstaje po wykonaniu wykopu i wypełnieniu go gruntem, a następnie zaistnieniu zmian reologicznych po wielu latach eksploatacji przewodów kanalizacyjnych. Uzyskane wyniki obliczeń w oparciu o te dwie metody są bardzo podobne.

W pozostałych przypadkach należy przyjąć obciążenia według schematu pokazanego na rys.2 biorąc pod uwagę rzeczywiste parametry gruntu otaczającego przewód kanalizacyjny. W przypadku, gdy istnieją wskutek nieszczelności pustki powietrzne wokół przewodów kanalizacyjnych ułożonych w gruntach spoistych, uniemożliwiające zastosowanie schematu obciążeń pokazanego na rys.2 (udokumentowane np. badaniem kanału georadarem przemieszczającym się jego wnętrzu), należy rozważyć jedną z następujących opcji:

- zastosowanie schematu obciążeń pokazanego na rys.1, głównie w przypadku pustek powietrznych po bokach kanału,
- zastosowanie metody elementów skończonych dla najbardziej niekorzystnego schematu obciążeń,
- zastosowanie schematu obciążeń pokazanego na rys.2 po dokonaniu iniekcji np. zaprawą cementową obszaru pustek powietrznych lub po jego odkopaniu i ponownym wypełnieniu wykopu gruntem eliminującym pustki powietrzne.

Wyznaczenie naprężeń rozciągających przy zginaniu od obciążeń rur gruntem

W przypadku wymiarowania sztywnych rur kanalizacyjnych, a takimi są rury betonowe, oblicza się występujące w nich naprężenia. Naprężenia skrajne od wpływu momentu zginającego M i siły osiowej N oblicza się ze wzoru (1):

$$\sigma_{a(i)} = \frac{N}{10^3 \cdot A} \pm \frac{M}{10^3 \cdot W} \alpha_{Ka(Ki)} \quad (1)$$

gdzie:

$\sigma_{a(i)}$ – naprężenia skrajne w konstrukcji kanałowej w przypadku indeksu

α – po stronie zewnętrznej kanału, indeksu i – po stronie wewnętrznej, $[N/mm^2]$;

- M – moment zginający, $[kNm/m]$;
- N – siła osiowa, $[kN/m]$;
- A – pole przekroju poprzecznego ściany konstrukcyjnej kanału, $[m^2/m]$;
- W – wskaźnik zginania $[m^3/m]$,
- $\alpha_{Ka(Ki)}$ – współczynniki określające wpływ krzywizny konstrukcji kanałowej na wielkość naprężeń skrajnych przy zginaniu konstrukcji kolejno po jej zewnętrznej i wewnętrznej stronie [-]

Momenty zginające i siły osiowe obliczane są w najbardziej wyężonych przekrojach rur, tj. w wierzchołku, boku i dnie według metod zamieszczonych np. w opracowaniach [15,21]. Pozostałe parametry podane we wzorze (1) oblicza się ze wzorów (2-5):

$$A = 1,0 \cdot s \quad (2)$$

$$W = \frac{1,0 \cdot s^2}{6} \quad (3)$$

$$\alpha_{Ka} = 1 - \frac{1}{3} \cdot \frac{s}{r_m} = \frac{3d_i + s}{3d_i + 3s} \quad (4)$$

$$\alpha_{Ki} = 1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{s}{r_m} = \frac{3d_i + 5s}{3d_i + 3s} \quad (5)$$

gdzie:

- s – grubość konstrukcji kanałowej, $[m]$;
- d_i – średnica wewnętrzna kanału, $[m]$;
- r_m – średni promień krzywizny kanału, $[m]$

Ustalenie obliczeniowej wartości naprężeń rozciągających dla rur o określonej katalogowo nośności

Obliczeniowe naprężenia rozciągające przy zginaniu σ_R ustala się dla analizowanego kanału według poniższego toku obliczeń [9].

$$\sigma_R = \frac{1}{I} \cdot \bar{F} \cdot \frac{d_i + s}{2} \cdot \frac{6}{s^2} \cdot \alpha_{Ki} \quad (6)$$

$$\bar{F} = 0,07 \cdot G + 0,30 \cdot F_N \quad (7)$$

gdzie:

- G – ciężar rury, $[kN/m]$;
- F_N – siła niszcząca, $[kN/m]$;
- l – długość rury $[m]$.

Wyznaczenie współczynnika bezpieczeństwa konstrukcyjnego rur umożliwiające dobór odpowiedniej grupy technik bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych

Współczynnik bezpieczeństwa konstrukcyjnego rur betonowych γ [-] jako iloraz naprężeń obliczeniowych σ_R uwarun-

kowanych głównie nośnością rury F_N określonej przez producenta do naprężeń $\sigma_{a(i)}$ występujących w rurze od obciążeń ciężarem gruntu wyznacza się ze wzoru (8):

$$\gamma = \frac{\sigma_R}{\sigma_{a(i)}} \quad (8)$$

Gdy współczynnik bezpieczeństwa konstrukcyjnego rur jest większy od wymaganego, a kanał jest nieuszczelny, obserwuje się w nim procesy korozyjne (co powinno być potwierdzone ekspertyzą konstrukcyjną wykazującą m.in. że nie wystąpiły w nim pęknięcia oraz że korozja nie spowodowała zmniejszenia wytrzymałości betonu), starcie dna lub gdy istnieje konieczność poprawy jego parametrów hydraulicznych, należy zastosować powłokę niekonstrukcyjną, a gdy żaden z tych czynników nie występuje, kanał może być dalej eksploatowany bez potrzeby jego bezwykopowej odnowy. Gdy współczynnik bezpieczeństwa konstrukcyjnego rur jest znacząco mniejszy od wymaganego, należy kanał poddać konstrukcyjnej odnowie, a gdy jest on niewiele mniejszy od wymaganego, należy go poddać odnowie częściowo konstrukcyjnej. Istnieje duża liczba możliwych do zastosowania w takiej sytuacji bezwykopowych technik odnowy przewodów kanalizacyjnych, a ich opisy są zamieszczone m.in. w pracy [25].

Tabela 1. Parametry rury betonowej o średnicy 800 mm, gruntu i dotyczące jej wbudowania [29]

Table 1. Pipe, soil and installation parameters for concrete pipes with an internal diameter of 800 mm [29]

Zestawienie parametrów	
Parametry rury:	
– średnica wewnętrzna	800 mm
– średnica zewnętrzna	980 mm
– grubość ścianki	90 mm
– ciężar objętościowy betonu	24 kN/m ³
– moduł sprężystości	34 000 N/mm ²
– klasa betonu	C35/45
– współczynnik bezpieczeństwa	$\gamma_1 = 2,2$ dla klasy bezpieczeństwa A [2] o prawdopodobieństwie awarii 10^{-5} i $\gamma_2 = 1,8$ dla klasy bezpieczeństwa B o prawdopodobieństwie awarii 10^{-3}
Parametry gruntu:	
– grupa gruntu	G3 zgodnie z [2] (grunty spoiste mieszane)
– kąt tarcia wewnętrzznego gruntu	25°
– kąt tarcia gruntu o rurę	8,33°
– ciężar objętościowy gruntu	20 kN/m ³
– poziom zwierciadła wody gruntowej	poniżej dna rury
Parametry realizacyjne:	
– wysokość nadsypki gruntu	3,0 m
– szerokość wykopu	1,85 m
– kąt posadowienia	90°
– sposób zasypywania wykopu	A2 zgodnie z [2], (pionowe deskowanie ścian wykopu za pomocą lekkich dyli wyciąganych po zasypaniu wykopu i zagęszczeniu gruntu)
	B2 zgodnie z [2]; opis jak dla A2
– sposób posadowienia	
– moduł odkształcenia gruntu:	2 N/mm ²
– nad rurą	0,85 N/mm ²
– obok rury w wykopie	2 N/mm ²
– obok rury poza wykopem	20 N/mm ²
– pod rurą	
– współczynnik parcia poziomego gruntu	0,5
– obciążenie taborem samochodowym	300 kN (SLW zgodnie z [2])

Przykład obliczeniowy

Analizy wpływu rodzaju przyjętego schematu obciążeń na wielkość naprężeń rozciągających przy zginaniu oraz pozostałych parametrów niezbędnych do wykonania obliczeń statyczno-wytrzymałościowych dokonano dla czterech schematów obciążeń wcześniej opisanych. W tabeli 1 zamieszczono przykładowo dane niezbędne do wykonania obliczeń według schematu obciążeń pokazanego na rys.2. Obliczenia wykonano dla różnych wielkości ubytku grubości ścian rur począwszy od 10% do 50%. Przyjęto założenie, że parametry materiałowe pozostałego nieskorodowanego betonu nie uległy zmianie wskutek zaistniałej korozji. Założenie to powinno być zawsze zweryfikowane w trakcie wykonywania ekspertyzy konstrukcyjnej kanału. W przypadku pogorszenia się parametrów wytrzymałościowych betonu, powinno być to uwzględnione w obliczeniach wytrzymałościowych.

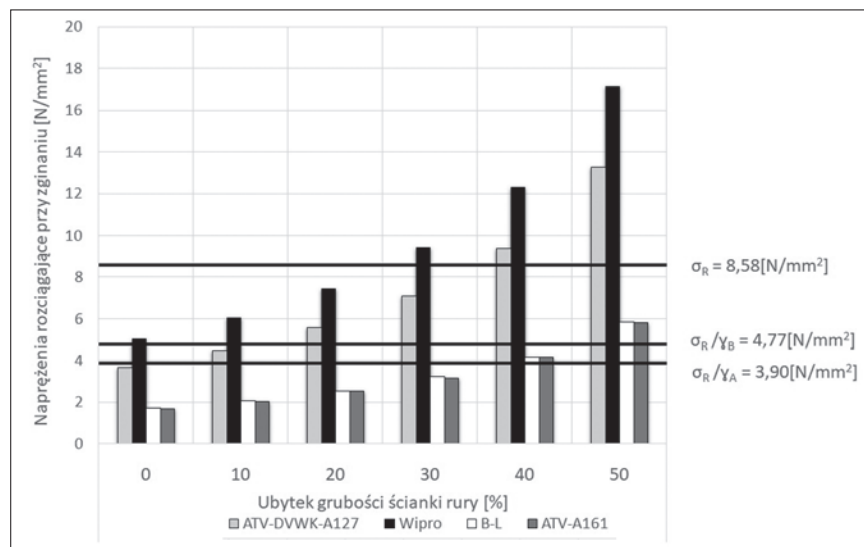
W tabeli 2 zamieszczono maksymalne naprężenia rozciągające przy zginaniu występujące w rurze i uzyskane dla każdej z czterech metod wcześniej opisanych.

W powyższym przykładzie (tab. 2) założono, iż mimo zaistniałych ubytków grubości ścian rury, spowodowanych korozją, parametry wytrzymałościowe nieskorodowanego betonu w rurze nie uległy

Tabela 2. Maksymalne naprężenia rozciągające przy zginaniu w rurze betonowej o średnicy wewnętrznej 800 mm dla różnych ubytków grubości ścian rur spowodowanych korozją, obliczone według czterech różnych metod [29]

Table 2. Maximum ring bending tensile strengths of concrete sewer pipes with an internal diameter of 800 mm at different corrosion-induced losses of the pipe wall determined with the four static calculation methods [29]

Maksymalne naprężenia rozciągające przy zginaniu w N/mm ²						
Metoda	Ubytek grubości ścian rury w %					
	0	10	20	30	40	50
ATV-DVWK-A127	3.69	4.51	5.58	7.11	9.41	13.28
Wipro	5.03	6.06	7.46	9.43	12.31	17.19
B-L	1.75	2.11	2.56	3.24	4.20	5.87
ATV-A161	1.71	2.07	2.55	3.19	4.18	5.84



Rys.5.

Maksymalne naprężenia rozciągające przy zginaniu w kanale betonowym o średnicy 800 mm dla różnych wielkości ubytków korozyjnych ścian rur, wyznaczone czterema metodami obliczeń statycznie – wytrzymałościowych, z zaznaczeniem naprężeń niszczących i dopuszczalnych dla klas bezpieczeństwa A i B

Fig.5. Maximum ring bending tensile strengths of the sewer pipe with a diameter of 800 mm versus corrosion-induced losses of the pipe walls determined with the four static calculation methods, with the destructive and permissible strengths used as reference values for safety classes A and B

zmianie. Założenie to potwierdzają niektóre ekspertyzy wykonane przez Politechnikę Świętokrzyską.

Wyniki obliczeń podane w tabeli 2 zilustrowano na rys. 5, na którym dodatkowo zaznaczono obliczeniową wartość naprężeń na rozciąganie przy zginaniu σ_R obliczoną ze wzoru (6) i wynoszącą 8,58 N/mm² oraz dopuszczalne wartości tych naprężeń obliczone ze wzoru (8) $\sigma_R/\gamma_B = 4,77$ dla klasy bezpieczeństwa B i $\sigma_R/\gamma_A = 3,90$ N/mm² dla klasy bezpieczeństwa A (obliczone dla $G = 6,04$ kN/m i $F_N = 80$ kN/m). Klasy bezpieczeństwa różnią się prawdopodobieństwem wystąpienia ich awarii (patrz tab.1).

Dyskusja

Uzyskane w przykładzie obliczeniowym duże różnice pomiędzy wartościami wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu obliczonymi różnymi metodami (tabela 2) wskazują, jak ważny jest wybór odpowiedniego schematu obciążeń rur w celu

sprawdzenia ich współczynnika bezpieczeństwa i doboru odpowiedniej metody odnowy. Założenia dla każdego z tych schematów pokazane na rys. 1-4 różnią się znacząco między sobą i w największym stopniu uzależnione są od parametrów gruntu otaczającego przewód kanalizacyjny. Przykładowo różnica wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu pomiędzy największymi wartościami naprężeń obliczonymi metodą Wipro, a najmniejszymi uzyskanymi metodą ATV-A161 dla 10-procentowego ubytku ściany rur jest 2,93 razy (6,06 N/mm² / 2,07 N/mm²) większa od wartości uzyskanej w oparciu o metodę ATV-A161.

Obliczenia te potwierdzają, jak ważnym jest w przypadku długo eksploatowanych rur przyjęcie w toku obliczeń, rzeczywistych parametrów gruntu, uwarunkowanych m.in. zaistnieniem w nim procesów reologicznych.

Parametry gruntu otaczającego przewód kanalizacyjny mogą mieć, wraz z wpływem czasu zarówno negatywny jak

i pozytywny wpływ na ich bezpieczeństwo konstrukcyjne. Pogorszenie bezpieczeństwa przewodów kanalizacyjnych może mieć miejsce wówczas, gdy są one nieszczelne. Wtedy w gruntach spoiстых tworzą się pustki powietrzne wokół kanału, a w gruntach niespoistych rozluźnienia gruntu. Przykładowo dla kanału zaprojektowanego w oparciu o metodę ATV-DVWK-127 maksymalne naprężenia rozciągające przy zginaniu wynoszą 3,69 N/mm² (tab. 2). Jeżeli nie zaistniałyby zmiany reologiczne w gruncie (umożliwiające zastosowanie metody B-L), a przyjęto by metodę ATV-DVWK-127, to np. już przy wystąpieniu 10% ubytku grubości ścian rur ich współczynnik bezpieczeństwa konstrukcyjnego byłby mniejszy od wymaganego ponieważ 4,51 N/mm² > 3,90 N/mm² są to dopuszczalne naprężenia na rozciąganie przy zginaniu dla klasy A bezpieczeństwa rur. Gdyby jednak wystąpiły zmiany reologiczne w gruncie umożliwiające zastosowanie metody B-L, to wtedy nawet przy 30% ubytku grubości ścian rur występujące w nich naprężenia równe 3,19 N/mm² byłyby mniejsze od 3,90 N/mm² tj. dopuszczalnych naprężeń na rozciąganie przy zginaniu dla klasy A bezpieczeństwa rur.

Bazując na powyższych analizach można sformułować poniższe zalecenia. W zależności od wielkości ubytku grubości ścianki rury (w przypadku, gdy wytrzymałość betonu w pozostałej, nieskorodowanej części ścianki nie zmniejszyła się) oraz zaistniałych w gruncie z upływem czasu zmianach reologicznych należy w przypadku analizowanego kanału betonowego podjąć jedną z następujących decyzji:

- **decyzja nr 1:** kanał należy dalej eksploatować bez podejmowania jakichkolwiek działań w przypadku braku ubytku grubości ścianki rury i niezależnie od zaistnienia z mian reologicznych w gruncie. Naprężenia obliczone według metody ATV-DVWK-A127 i B-L są mniejsze od dopuszczalnych, zarówno dla klasy bezpieczeństwa rur A jak i B,
- **decyzja nr 2:** kanał należy poddać niekonstrukcyjnej odnowie celem powstrzymania procesów korozyjnych na wewnętrznej ścianie rury gdy:
 - a) zaszyły w gruncie zmiany reologiczne (stosuje się wtedy metodę B-L), a ubytek grubości ścian rur nie jest większy od 30% dla klasy bezpieczeństwa rur A ($3,19$ N/mm² \leq $3,90$ N/mm²) lub 40% dla klasy bezpieczeństwa B ($4,20$ N/mm² \leq $4,77$ N/mm²),

- b) nie zaszły zmiany reologiczne gruntu, np. kanał jest nieuszczelny (stosuje się wtedy metodę ATV-DVWK-A127 z uwzględnieniem rzeczywistych parametrów gruntu potwierdzonych wynikami ekspertyzy konstrukcyjnej), a ubytek grubości ścian nie jest większy od 10% i tylko dla klasy B bezpieczeństwa rur ($4,51 \text{ N/mm}^2 \leq 4,77 \text{ N/mm}^2$),
- **decyzja nr 3:** kanał należy poddać konstrukcyjnej odnowie celem zagwarantowania wymaganego dla niego współczynnika bezpieczeństwa konstrukcyjnego rury, gdy:
- a) zaszły w gruncie zmiany reologiczne, a ubytek grubości ścian rur jest większy od 30% dla klasy bezpieczeństwa rur A (dla 40%: $4,20 \text{ N/mm}^2 \geq 3,90 \text{ N/mm}^2$) lub 40% dla klasy bezpieczeństwa B (dla 50%: $5,87 \text{ N/mm}^2 \geq 4,77 \text{ N/mm}^2$),
- b) nie zaszły zmiany reologiczne gruntu, a ubytek grubości ścian jest większy od 10% w przypadku klasy B bezpieczeństwa rur (dla 20%: $5,58 \text{ N/mm}^2 \geq 4,77 \text{ N/mm}^2$) a w przypadku klasy A kilkuprocentowy (dla 0%: $3,69 \text{ N/mm}^2$ jest nie wiele mniejszy od $3,90 \text{ N/mm}^2$).

Wnioski końcowe

Wyniki przeprowadzonych rozważań i analiz pozwalają na sformułowanie poniższych wniosków końcowych.

1. Stosując zaproponowany 5-etapowy sposób postępowania można dobrać najbardziej odpowiedni rodzaj powłoki (konstrukcyjna, częściowo konstrukcyjna czy niekonstrukcyjna) do odnowy przewodów kanalizacyjnych za pomocą technologii bezwykopowej
2. Zamieszczone w tabeli 2 wielkości naprężeń rozciągających na zginanie dla czterech zaprezentowanych metod obliczeniowych wskazują na niezwykle istotne znaczenie odpowiedniego doboru schematu obciążeń kanału gruntem dla wyników uzyskiwanych tymi metodami. Przykładowo naprężenia obliczone metodą Wipro są 2,87 razy ($5,03/1,75$) większe od naprężeń uzyskanych w metodzie B-L

w przypadku założenia braku korozji ścian rur. Podobne różnice uzyskuje się także w przypadkach, gdy ma miejsce korozja ścian rur.

3. Z przeprowadzonej w rozdziale „Dyskusja” analizy danych zaprezentowanych na rys.5 wynika, że nawet w przypadku znaczącej korozji ścian rur, o ile ekspertyza potwierdzi zaistnienie zmian reologicznych w gruncie, może być zastosowana niekonstrukcyjna powłoka rehabilitacyjna, co przyczynia się w takim przypadku do uzyskania znaczących korzyści ekonomicznych.

LITERATURA

- [1] American Water Works Association: Manual M 28, Rehabilitation of Water Mains, 2 Edition, Denver, Colorado, 2001.
- [2] ATV-DVWK-A127: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen, GFA e.V. Hennef, 2000.
- [3] ATV-Regelwerk. Arbeitsblatt A161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren, St. Augustin, 1990.
- [4] Böлке K-P.:13. Kanalspektion: Zustände erkennen und dokumentieren, Springer Verlag, 2013.
- [5] Budzianowski Z., Lessaer S.: O możliwości obciążenia terenu nad dawnym ułożonym rurociągiem podziemnym, Inżynieria i Budownictwo, 1970,4,130-135.
- [6] Dąbrowski W.: Oddziaływanie sieci kanalizacyjnych na środowisko, Politechnika Krakowska, Kraków, 2004.
- [7] EN 13508-2. 2006: Conditions of drain and sewer systems outside buildings – Part 2, Visual inspection coding system.
- [8] Energopol: Tymczasowa instrukcja projektowania i budowy przewodów kanalizacyjnych z rur Wipro, Warszawa, 1978.
- [9] Hornung K., Kittel D.: Statik erdüberdeckter Rohre, Bauverlag GmbH, Wiesbaden und Berlin, 1989.
- [10] Królikowska J.: Niezawodność funkcjonowania i bezpieczeństwa sieci kanalizacyjnej, monografia 382, Politechnika Krakowska, Kraków, 2010.
- [11] Kuliczowska E.: Wyniki badań betonowych przewodów kanalizacyjnych, Gaz, Woda i Technika Sanitarna, 2007,10,23-30.
- [12] Kuliczowska E.: Risk of structural failure in concrete sewers due to internal corrosion, Engineering Failure Analysis, 2016,66,110-119. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1350630716301972>.
- [13] Kuliczowska E.: The interaction between road traffic safety and the condition of sewers laid under roads, Transportation Research Part D-Transport and Environment, 2016,48,203-213. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.025>
- [14] Kuliczowska E., Kuliczowski A.: Możliwość bardziej efektywnego stosowania technik bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych, INSTAL, 2021,3,37-40.
- [15] Kuliczowski A.: Rury kanalizacyjne, t II, Projektowanie konstrukcji, monografia 42, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce, 2004.
- [16] Kuliczowski A.: Renowacja czy rekonstrukcja na przykładzie przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych, INSTAL, 2012,1,46-49.
- [17] Kuliczowski A. 2018. „Wyzwania dotyczące bezwykopowej odnowy przewodów wodociągowych i kanalizacyjnych”. *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*. (2) : 50-56.
- [18] Kuliczowski A., Kuliczowska E.: Niektóre problemy dotyczące stosowania powłok poliestrowych i szklanych w bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych, INSTAL, 2023,7-8,49-54.
- [19] Kuliczowski A., Kuliczowska E.: Uszkodzenia i awarie rur i powłok z tworzyw sztucznych w bezwykopowej rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych, INSTAL, 2023,10,21-26.
- [20] NASSCO: Appendix C-PACP Condition Grading System, Pipeline Assessment and Certification Program, Version 7.0.0. Owings Mills, 2015.
- [21] Madryas C., Kolonko A., Wysocki L.: Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2002.
- [22] Madryas C., Przybyła B., Wysocki L.: Badania i ocena stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław, 2010.
- [23] ÖNORM B2538: Teil 2, Rohrleitungen mit genormten Querschnitten, Statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen mit genormten Querschnitten, 1981.
- [24] PN-EN ISO 11295:2022-07: Systemy przewodów rurowych z tworzyw sztucznych stosowane przy rehabilitacji technicznej rurociągów – Klasyfikacja i przegląd działań strategicznych, taktycznych i operacyjnych, 2022.
- [25] Praca zbiorowa pod redakcją Andrzeja Kuliczowskiego: Technologie bezwykopowe w Inżynierii Środowiska, Wydawnictwo Seidel-Przywiecki, 2010.
- [26] SIA 190: Kanalisationen (Leitungen, Normal- und Sonderbauwerke), Norm Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, 1977.
- [27] Stein D.: Instandhaltung von Kanalisationen, Ernst & Sohn, A Wiley Verlag, Berlin 2001.
- [28] Younis R., Knight M.: A probability model for investigating the trend of structural deterioration of wastewater pipelines, Tunnelling and Underground Space Technology, 2010,25,670-680. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0886779810000982>.
- [29] Walas I.: Obliczenia statyczno-wytrzymałościowe skorodowanych rur betonowych z zastosowaniem czterech różnych metod, praca magisterska, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2016.
- [30] Water Authorities Association: Sewerage Rehabilitation Manual, Water Research Centre, Swindon, 1990.