

Wyznaczanie oddziaływania bezwykopowych technik odnowy przewodów kanalizacyjnych na środowisko

Determining of the environmental impact of sewer trenchless renewal techniques

EMILIA KULICZKOWSKA, ANDRZEJ KULICZKOWSKI

DOI 10.36119/15.2022.3.5

Analiza wpływu bezwykopowych technik odnowy przewodów kanalizacyjnych na środowisko umożliwiła ustalenie łącznie 15 interdyscyplinarnych czynników wpływających na atmosferę, hydrosferę, biosferę, litosferę i antroposferę. Niektóre z tych czynników są mierzalne, a inne niemierzalne. Zaproponowano podejście ilościowe, które w procesie decyzyjnym może łączyć czynniki mierzalne i niemierzalne. Umożliwia ono ilościową ocenę wpływu na środowisko różnych bezwykopowych technik odnowy i pozwala na uszeregowanie ich w kolejności od najkorzystniejszych do najmniej korzystnych pod względem ich wpływu na środowisko.

Słowa kluczowe: techniki bezwykopowe, odnowa, oddziaływanie środowiskowe, kryterium oceny

Research on the impact of trenchless renewal techniques for the environment allowed determining a total of 15 multidisciplinary factors affecting atmosphere, hydrosphere, biosphere, lithosphere and antroposphere. Some of these values are measurable and others are not-measurable. A quantitative approach that can combine measurable and not-measurable factors in the decision making process has been proposed. It concerns the quantitative assessment of the environmental impact of different trenchless renewal techniques and allows them to be ranked in order from the most favourable to the least favourable in terms of their impact on the environment.

Keywords: trenchless techniques, renewal, environmental impact, evaluation criterion

Wstęp

Sieci kanalizacyjne zaczęto budować na dużą skalę głównie w dużych miastach w drugiej połowie XIX wieku. Wraz z upływem czasu w wielu z nich, z różnych przyczyn, wystąpiły uszkodzenia wymagające ich odnowy tj. ich napraw, rehabilitacji lub wymian. Dawniej uszkodzone przewody kanalizacyjne odkopywano i wymieniano na nowe. Nie było to bardzo uciążliwe i kosztowne, z uwagi na małe natężenie ruchu ulicznego oraz wykonywanie nawierzchni ulicznych z kostek brukowych, które po ich rozbiórce przed wykonaniem wykopu były następnie ponownie układane. Ostatnie dekady XX wieku cechował dynamiczny rozwój motoryzacji oraz powszechne stosowanie nowych nie rozbieralnych bardzo kosztownych nawierzchni drogowych. Dalsze stosowanie metod wykopowych w tych warunkach stawało się wyso-

ce kosztowne i coraz bardziej uciążliwe dla środowiska. Stąd też zaczęto stosować techniki bezwykopowe. Szczególnie ostatnie trzy dekady XX wieku cechował intensywny rozwój tych technik. Stosowano je do bezwykopowej budowy przewodów podziemnych [12], ale także do ich bezwykopowej odnowy, tj. ich naprawy, rehabilitacji lub wymiany [4,11].

Przewody kanalizacyjne najczęściej badane są metodą CCTV (ang. Closed Circuit Television) [4]. Występujące w przewodach kanalizacyjnych uszkodzenia mogą mieć niekorzystny wpływ na środowisko, np. eksfiltrujące przez nieszczelności kanałowe ścieki [6], w tym szczególnie ścieki sanitarne, zanieczyszczają grunt i wodę gruntową [2]. Nieszczelne przewody kanalizacyjne są także przyczyną zapadania się nawierzchni ulicznych z poruszającymi się po nich samochodami [5], stanowiąc zagrożenie dla bezpieczeństwa osób nimi podróżujących.

Techniki bezwykopowej odnowy, poprzez m.in. uszczelnianie przewodów oraz ich konstrukcyjne wzmocnienie, eliminują wyżej wymienione zagrożenia środowiskowe i szereg innych, a w większości przypadków dodatkowo poprawiają parametry hydrauliczne przewodów, zmniejszając ryzyko podtopień sąsiadujących terenów. Techniki bezwykopowe cechuje także znacznie szybszy czas i koszt realizacji, a także znaczna redukcja różnych kosztów społecznych opisanych m.in. w [7,8].

Dobór bezwykopowych technik odnowy przewodów kanalizacyjnych uwarunkowany jest względami technicznymi (przepustowość, nośność, trwałość), ekonomicznymi oraz możliwościami realizacyjnymi (np. długość i średnica przewodów). W ostatnich latach w wielu krajach dobór technik bezwykopowych uzależniano się nie tylko od wymienionych czynników, ale także bierze się pod uwagę koszty

dr hab. inż. Emilia Kuliczowska, prof. PŚk, <https://orcid.org/0000-0001-5807-860X>, prof. dr hab. inż. Andrzej Kuliczowski, <https://orcid.org/0000-0001-9807-6190> – Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki. Adres do korespondencji/Corresponding author: akuli@wp.pl

społeczne i wpływ tych technik na środowisko. Istnieje niewielka liczba badań dotyczących tych zagadnień [1]. Koncentrują się one głównie na analizie tylko niektórych czynników dotyczących wpływu tych technik na środowisko. Brak jest kompleksowego ujęcia wszystkich czynników mających wpływ na środowisko.

Zastosowanie technik bezwykopowych, zamiast wykopowych, jest szczególnie korzystne dla środowiska, zarówno w odniesieniu do ich oddziaływań na: atmosferę, hydrosferę, biosferę, litosferę jak i antroposferę. Taki sposób ujęcia oddziaływań na środowisko bezwykopowych technik rehabilitacji przewodów kanalizacyjnych znalazł swoje odzwierciedlenie w zaproponowanej poniżej metodzie wyznaczania kryterium oddziaływań tychże technik na środowisko.

W zaproponowanej metodzie uwzględniane są wszystkie czynniki wynikające z zastosowania technik bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych, które oddziałują na środowisko. Umożliwia ona ustalenie kolejności analizowanych technik dla kryterium ich oddziaływania na środowisko, a tym samym wybór najkorzystniejszej techniki.

Założenia

- Przyjęto siedem różnych metod bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych. Wymienione poniżej techniki T1-T6 należą do grupy bezwykopowych technik rehabilitacyjnych, a T7 to bezwykopowa technika wymiany. Są one szczegółowo opisane m.in. w [9,12].

– T1: Technika utwardzanych na miejscu powłok żywicznych (CIPP) nazywana potocznie metodą "rękawa" polega na włożeniu impregnowanej żywicą powłoki tekstylnej do przewodu kanalizacyjnego, a następnie utwardzeniu jej parą, wodą, promieniami ultrafioletowymi lub światłem ledowym. Powłoka poliestrowa lub szklana jest impregnowana żywicą na miejscu lub przez producenta w zakładzie produkcyjnym.

– T2: Technika Sliplining z ciągłymi rurami (long Relining) polega na wciąganiu rur do wnętrza kanału. Zwykle wymagane jest wypełnienie zaprawą cementową pierścieniowej przestrzeni między kanałem a nową rurą. Rury długie (najczęściej polietylenowe o długości 6 lub 12 m) dostarczane są na plac budowy, a następnie zgrzewane na długość ich wciągania.

– T3: Technika Sliplining z zastosowaniem krótkich modułów rur, najczęściej polietylenowych o długości ok. 0,5 m,

(short Relining) polega na ich montażu w studni kanalizacyjnej, a następnie na wciągnięciu lub ich przecisku do wnętrza kanału. Zwykle wymagane jest, podobnie jak w przypadku techniki T2, wypełnienie zaprawą cementową pierścieniowej przestrzeni między kanałem a nową rurą.

– T4: Technika ciasnopasowana polega na włożeniu do wnętrza kanału fabrycznie zdeformowanej rury, najczęściej polietylenowej o kształcie litery U, a następnie doprowadzając do jej wnętrza parę pod ciśnieniem na ponownym uzyskaniu przez nią przekroju kołowego. Jest ona ściśle dopasowana do wewnętrznej powierzchni kanału ściekowego. Na plac budowy dostarczana jest ona zwinięta na bębnie.

– T5: Technika tworzenia powłoki wewnątrz rehabilitowanego kanału z doprowadzanej na dno studni kanalizacyjnej, do specjalnie umieszczonego tam urządzenia, profilowanej uźbrowanej taśmy wykonanej z polietylenu lub PVC (np. Rib Loc). Na placu budowy jest ona nawinięta na bębnie.

– T6: Technika natrysku wewnętrznej powierzchni kanału zaprawą kompozytową o szerokim zakresie pH rzędu 3-12 lub żywicą. Na plac budowy dostarczane jest urządzenie natryskowe i specjalna zaprawa kompozytowa lub żywica.

– T7: Metoda wymiany rur Pipe Bursting polega na zniszczeniu starej rury od wewnątrz poprzez jej rozkruszenie lub rozcięcie, a następnie rozepchanie jej na zewnątrz do gruntu i wciągnięciu w to miejsce nowych rur o tej samej lub większej średnicy, przy wykorzystaniu w tym celu specjalnej głowicy statycznej, dynamicznej lub hydraulicznej.

- Techniki T1-T7 mogą być stosowane w różnych wariantach szczegółowych, np. przy zastosowaniu techniki T1 powłokę rehabilitacyjną można utwardzać gorącą wodą, parą wodną, promieniami UV lub światłem LED. Każda z tych metod ma inny wpływ na środowisko. Najwyższa emisja CO₂ występuje przy użyciu gorącej wody, niższa przy użyciu pary, a jeszcze niższa przy użyciu promieni UV [9]. Najniższą emisję uzyskuje się przy utwardzaniu powłok światłem ledowym [3]. W kolejnym przykładzie dotyczącym techniki T2 szczelinę między starym kanałem a nowymi rurami wypełnia się (lub nie) zaprawą cementową. Dlatego każda z siedmiu analizowanych technik powinna być każdorazowo szczegółowo opisana.
- Oddziaływania środowiskowe poszczególnych bezwykopowych technik odno-

wy ujęto w pięciu grupach, kolejno odnosząc się do ich wpływu na atmosferę, hydrosferę, biosferę, litosferę i antroposferę. Uwzględniono łącznie 15 czynników mających wpływ na środowisko.

- Każdy z powyższych 15 czynników jest oceniany inaczej dla wartości niemierzalnych, a inaczej dla wartości mierzalnych. W przypadku wartości niemierzalnych, np. dotyczących zakłóceń miejskiej jakości środowiska, ocena polega na przypisaniu jednej z liczb z przedziału {1,5} do analizowanej techniki. Liczbę 1 przypisano najniższemu negatywnemu wpływowi na środowisko, liczbę 5 najwyższemu, a liczby z przedziału {2,4} do ocen pośrednich. W przypadku wartości mierzalnych, np. przy ocenie emisji CO₂ wyrażonej w jednostkach masy, liczbę 1 należy przypisać najniższej z obliczonych wartości (w kg emisji), liczbę 5 – najwyższej wartości, a pozostałe ustalić proporcjonalnie z przedziału {1,5}.
- Przyjęto dwie grupy współczynników wagowych. Umożliwia to nadanie rangi każdemu z 15 analizowanych czynników, które mają wpływ na środowisko, a także nadanie rangi każdej z pięciu grup czynników (wpływ na atmosferę, hydrosferę, biosferę, litosferę i antroposferę).
- W [1] opisano tzw. kalkulator emisji. Umożliwia on obliczenie emisji następujących sześciu zanieczyszczeń powietrza: węglowodorów (HC), tlenku węgla (CO), tlenku azotu (NO_x), pyłu zawieszonego (PM), dwutlenku węgla (CO₂) i tlenku siarki (SO_x). Krytyczne dla zrównoważonego rozwoju są trzy główne emisje zanieczyszczeń: NO_x, SO_x i CO₂. W niektórych pracach, na przykład w [10] oceniana jest tylko emisja CO₂. Jako wartości wejściowe w niżej zaproponowanej metodzie można założyć emisję CO₂ lub całkowitą emisję kilku gazów, w zależności od dostępności tych danych.

Wielkości wejściowe

Czynniki mające wpływ na atmosferę

$[T^a] = t_{i,j}^a$, $i = 1,2,\dots,n1$, $j = 1,2,\dots,m$ – macierz zawierająca liczby z przedziału {1,5} określające dla j -tych technik bezwykopowej odnowy ich wpływ na zanieczyszczenie atmosfery dla i -tych czynników,

$n1$ – liczba czynników w macierzy $[T^a]$ oddziałujących na atmosferę,

m – liczba analizowanych technik bezwykopowej odnowy,

$\mathbf{t}_{1,j}^a = [t_{1,1}^a, t_{1,2}^a, \dots, t_{1,j}^a, \dots, t_{1,m}^a]$
– wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na wielkość emisji gazów cieplarnianych, powstających w trakcie ich stosowania. Stopień emisji gazów cieplarnianych jest różny w przypadku poszczególnych technik, niższy np. w przypadku techniki T4 (montaż ciasno pasowanych linerów nawiniętych na kołowrót) niż np. w technice T2 (montaż wielu krótkich rur łączonych na dnie studni kanalizacyjnej oraz wypełnianie zaprawą cementową wolnej przestrzeni międzyrurowej),

$\mathbf{t}_{2,j}^a = [t_{2,1}^a, t_{2,2}^a, \dots, t_{2,j}^a, \dots, t_{2,m}^a]$
– wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na wielkość emisji gazów cieplarnianych wytwarzanych w trakcie rozbiórki nawierzchni ulicznej, a następnie jej ponownego ułożenia. Emisja gazów cieplarnianych jest różna w przypadku poszczególnych technik, niższa np. w przypadku techniki T1 (nie wykonuje się żadnych wykopów, a powłokę rehabilitacyjną wprowadza się do kanału poprzez studnię kanalizacyjną), a wyższa w technice T2 (konieczność wykonania wykopu początkowego i końcowego umożliwiających wprowadzenie nowych rur do wnętrza kanału, a w przypadku występowania przykanalików między studniami kanalizacyjnymi, wykonywania w tych miejscach wykopów),

$\mathbf{t}_{3,j}^a = [t_{3,1}^a, t_{3,2}^a, \dots, t_{3,j}^a, \dots, t_{3,m}^a]$
– wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na wielkość emisji gazów cieplarnianych ze spalin pojazdów korzystających z objazdów wokół zamkniętych ulic, na których wykonywane są roboty wykopowe. Emisja wynika z wydłużenia drogi pojazdów i wprowadzenia ograniczeń prędkości pojazdów. Emisja jest funkcją czasu trwania robót. W przypadku stosowania technik bezwykopowych mogą jedynie występować niewielkie utrudnienia ruchu nie wymagające wykonywania objazdów, ale różne w przypadku poszczególnych technik,

$\mathbf{t}_{4,j}^a = [t_{4,1}^a, t_{4,2}^a, \dots, t_{4,j}^a, \dots, t_{4,m}^a]$
– wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na emisję gazów cieplarnianych ze spalin pojazdów dowożących na plac budowy materiały (np. rury, zaprawę cementową) i sprzęt (np. koparki) służący do wykonywania wykopów, o ile są one konieczne, urządzenia służące do odwadniania wykopów (o ile konieczne jest ich wykonanie), itp. W przypadku stosowania technik wykopowych sporadycznie wykonywane są wykopy np.

w miejscu występowania przykanalików między studniami kanalizacyjnymi.

Czynnik mający wpływ na hydrosferę

$\mathbf{t}^h = [t_{1,1}^h, t_{1,2}^h, \dots, t_{1,j}^h, \dots, t_{1,m}^h]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na hydrosferę w zakresie wystąpienia zanieczyszczeń wody gruntowej, spowodowanych wyciekami benzyny, olejów i smarów do wód gruntowych z urządzeń używanych w trakcie wykonywania odnowy kanału oraz w trakcie ewentualnych prac wykopowych (wykop początkowy i końcowy w przypadku techniki T2 i ewentualne wykopy w miejscu występowania przykanalików).

Czynniki mające wpływ na biosferę

$[T^b] = t_{i,j}^b, i = 1, 2, \dots, n3, j = 1, 2, \dots, m$ – macierz zawierająca liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na biosferę,

$n3$ – liczba czynników w macierzy $[T^b]$ oddziałujących na biosferę,

$\mathbf{t}_{1,j}^b = [t_{1,1}^b, t_{1,2}^b, \dots, t_{1,j}^b, \dots, t_{1,m}^b]$
– wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich oddziaływanie na ludzi, ptaki i zwierzęta z samochodów dowożących i odwożących rury, wymienianych nawierzchni ulicznych oraz innych urządzeń głośno pracujących (hałas spowodowany pracą koparek, zagęszczarek, pomp i innych urządzeń),

$\mathbf{t}_{2,j}^b = [t_{2,1}^b, t_{2,2}^b, \dots, t_{2,j}^b, \dots, t_{2,m}^b]$
– wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych stopień uszkodzenia zieleni miejskiej i korzeni drzew oraz krzewów w trakcie ewentualnego wykonywania wykopów lub ich odwadniania powodującego obniżenie się zwierciadła wód gruntowych i przesuszenie okolicznych terenów. Ryzyko takie jest niewielkie w przypadku technik bezwykopowych i dotyczy tylko niektórych technik wymagających wykonywania wykopów w miejscu przykanalików lub studni kanalizacyjnych.

Czynniki mające wpływ na litosferę

$[T^l] = t_{i,j}^l, i = 1, 2, \dots, n4, j = 1, 2, \dots, m$
– macierz zawierająca liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na litosferę,

$n4$ – liczba czynników w macierzy $[T^l]$ oddziałujących na litosferę,

$\mathbf{t}_{1,j}^l = [t_{1,1}^l, t_{1,2}^l, \dots, t_{1,j}^l, \dots, t_{1,m}^l]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na litosferę w zakresie wystąpienia zanieczyszczeń gruntu

spowodowanych wyciekami benzyny, olejów, smarów i innych zanieczyszczeń do gruntu ze stosowanych urządzeń i związanych z tym zmian parametrów gruntu w trakcie robót wykopowych,

$\mathbf{t}_{2,j}^l = [t_{2,1}^l, t_{2,2}^l, \dots, t_{2,j}^l, \dots, t_{2,m}^l]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na litosferę w zakresie ryzyka przedostawania się do gruntu żywic lub innych związków chemicznych stosowanych w trakcie robót (np. wypełniacza przestrzeni międzyrurowej w technice T2, T3 lub żywicy w technice T1).

Czynniki mające wpływ na antroposferę

$[T^a] = t_{i,j}^a, i = 1, 2, \dots, n5, j = 1, 2, \dots, m$ – macierz zawierająca liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na antroposferę,

$n5$ – liczba czynników w macierzy $[T^a]$ oddziałujących na antroposferę,

$\mathbf{t}_{1,j}^a = [t_{1,1}^a, t_{1,2}^a, \dots, t_{1,j}^a, \dots, t_{1,m}^a]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na uciążliwość w przemieszczaniu się ludzi do miejsc zamieszkania, sklepów, budynków użyteczności publicznej i innych,

$\mathbf{t}_{2,j}^a = [t_{2,1}^a, t_{2,2}^a, \dots, t_{2,j}^a, \dots, t_{2,m}^a]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na zakłócanie jakości urbanistycznej obszaru w obrębie wykonywanych prac,

$\mathbf{t}_{3,j}^a = [t_{3,1}^a, t_{3,2}^a, \dots, t_{3,j}^a, \dots, t_{3,m}^a]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na ryzyko uszkodzenia innych budowli znajdujących się w pobliżu wskutek np. drgań spowodowanych stosowanymi urządzeniami,

$\mathbf{t}_{4,j}^a = [t_{4,1}^a, t_{4,2}^a, \dots, t_{4,j}^a, \dots, t_{4,m}^a]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na ryzyko uszkodzenia innych przewodów podziemnych (np. przewodów gazowych i wodociągowych) lub kabli (np. elektrycznych lub światłowodowych) doprowadzających różne media do mieszkańców,

$\mathbf{t}_{5,j}^a = [t_{5,1}^a, t_{5,2}^a, \dots, t_{5,j}^a, \dots, t_{5,m}^a]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych ich wpływ na ilość powstających odpadów,

$\mathbf{t}_{6,j}^a = [t_{6,1}^a, t_{6,2}^a, \dots, t_{6,j}^a, \dots, t_{6,m}^a]$ – wektor zawierający liczby z przedziału {1,5} określające dla j-tych technik bezwykopowych stopień ich negatywnego oddziaływania na zdrowie mieszkańców

w zakresie emisji toksycznych substancji (np. styrenu przy stosowaniu żywicy poliestrowej powstającego w trakcie utwardzania żywicy w przypadku techniki T1).

Inne wielkości wejściowe

$w^{ta} = [w^{ta}_1, w^{ta}_2, \dots, w^{ta}_i, \dots, w^{ta}_{n1}]$ – wektor współczynników wagowych określających wagę i-tych czynników w macierzy $[T^a]$ przy założeniu, że

$$\sum_{i=1}^{n1} w^{ta}_i = 1,$$

$w^{tb} = [w^{tb}_1, w^{tb}_2, \dots, w^{tb}_i, \dots, w^{tb}_{n3}]$ – wektor współczynników wagowych określających wagę i-tych czynników w macierzy $[T^b]$ przy założeniu, że

$$\sum_{i=1}^{n3} w^{tb}_i = 1,$$

$w^{th} = [w^{th}_1, w^{th}_2, \dots, w^{th}_i, \dots, w^{th}_{n4}]$ – wektor współczynników wagowych określających wagę i-tych czynników w macierzy $[T^h]$ przy założeniu, że

$$\sum_{i=1}^{n4} w^{th}_i = 1,$$

$w^{tn} = [w^{tn}_1, w^{tn}_2, \dots, w^{tn}_i, \dots, w^{tn}_{n5}]$ – wektor współczynników wagowych określających wagę i-tych czynników w macierzy $[T^n]$ przy założeniu, że

$$\sum_{i=1}^{n5} w^{tn}_i = 1,$$

$c^{ta}, c^{th}, c^{tb}, c^t, c^{tn}$ – współczynniki wagi poszczególnych czynników ujętych w grupy zróżnicowane oddziaływaniem na kolejno atmosferę, hydrosferę, biosferę, litosferę i antroposferę zestawionych w macierzach T^a, T^b, T^h, T^n i wektorze t^h przy założeniu, że $c^{ta} + c^{th} + c^{tb} + c^t + c^{tn} = 1$.

Kryterium oddziaływania bezwykopowych technik odnowy przewodów kanalizacyjnych na środowisko

Dla każdej z możliwych j-tych technik bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych oblicza się wartość t_j zawartą w przedziale {1,5} określającą ich wpływ na środowisko.

$$t_j = \left(\sum_{i=1}^{n1} t_{i,j}^a \cdot w^{ta}_i \right) \cdot c^{ta} + t_j^h + \left(\sum_{i=1}^{n3} t_{i,j}^b \cdot w^{tb}_i \right) \cdot c^{tb} + \left(\sum_{i=1}^{n4} t_{i,j}^h \cdot w^{th}_i \right) \cdot c^t + \left(\sum_{i=1}^{n5} t_{i,j}^n \cdot w^{tn}_i \right) \cdot c^{tn} \quad (1)$$

Kryterium wyboru optymalnej techniki jest wartość wskaźnika t_j . Technika, dla

której wskaźnik t_j jest najniższy, jest najbardziej korzystna dla kryterium jej oddziaływania na środowisko. Wielkością wyjściową z obliczeń jest wektor $[t]$.

$[t] = [t_1, t_2, \dots, t_i, \dots, t_m]$ – wektor wskaźników t_j podających w przedziale od 1 do 5 wartości liczbowe określające ilościowy wpływ zastosowania j-tych technik bezwykopowej odnowy na środowisko.

Przykład obliczeniowy

Studia literaturowe opisane m.in. w [7] wykazały, że analizując wpływ technik bezwykopowej odnowy na środowisko należy uwzględnić 15 różnych czynników. W tabeli 1 podano, które z analizowanych czynników mają wpływ na określone sfery ich oddziaływania.

Tabela 1. Liczby czynników mających wpływ na poszczególne sfery ich oddziaływania środowiskowego

Sfera oddziaływania środowiskowego	Liczba czynników mających wpływ na środowisko
Atmosfera	$n1=4, [T^a] = t_{ij}^a$ dla $i = 1, 2 \dots 4$.
Hydrosfera	$n2=1, t^b$ dla $i = 1$.
Biosfera	$n3=2, [T^b] = t_{ij}^b$ dla $i = 1, 2$.
Litosfera	$n4=2, [T^h]$ dla $i = 1, 2$.
Antroposfera	$n5=6, [T^n] = t_{ij}^n$ dla $i = 1, 2 \dots 6$.

Poniżej zamieszczono przykład obliczeniowy dotyczący opracowanej metody dla długo eksploatowanego kanału o następujących danych:

- rodzaj rur: rury kamionkowe,
- rok budowy kanału: 1968,
- średnica wewnętrzna kanału: 300 mm,
- długość odcinka kanału między studzienkami: 47,1 m,
- lokalizacja kanału: wąska ulica staromiejaska,
- rodzaj ścieków: sanitarne,
- liczba i średnica przykanalików między studzienkami kanalizacyjnymi: 3, 150 mm (konieczne jest wykonanie wykopów w miejscach występowania przykanalików w przypadku niektórych spośród analizowanych technik,
- rodzaj uszkodzeń zaobserwowanych w trakcie badań CCTV kanału: podłużne, poprzeczne i złożone pęknięcia, korzenie drzew przerastające do wnętrza kanału i poprzeczne przemieszczenia rur na złączach,
- wynik badań ciśnieniowych kanału: kanał nieszczelny,
- poziom wody gruntowej: poniżej dna kanału (ścieki eksfiltrują z kanału do gruntu).

Wykonane badania kanału wskazały na konieczność jego bezwykopowej odnowy.

W oparciu o wcześniej zaproponowaną metodę dokonano oceny technik T1 – T7 dla kryterium ich uciążliwości dla środowiska. W tym celu zwrócono się do grupy ekspertów z prośbą o dokonanie ilościowej oceny wszystkich parametrów występujących we wzorze (1) dla wszystkich siedmiu technik.

Ostatecznie uzyskano z każdej ankiety wielkości numeryczne dotyczące wszystkich wielkości wejściowych. Następnie autorzy artykułu ustalili średnie arytmetyczne zaproponowanych ocen i współczynników wagowych.

Przykładowo uzyskane wartości elementów macierzy $[T^a]$, wektora w^{ta} i parametru c^{ta} były następujące:

$$[T^a] = \begin{bmatrix} 1.89 & 4.89 & 4.78 & 1.17 & 3.22 & 2.67 & 3.89 \\ 1.34 & 4.72 & 3.22 & 1.58 & 2.89 & 1.67 & 3.94 \\ 1.89 & 4.67 & 4.34 & 1.89 & 2.94 & 1.78 & 2.89 \\ 1.72 & 4.33 & 3.83 & 1.56 & 3.56 & 1.44 & 4.11 \end{bmatrix}$$

$$w^{ta} = [0.27, 0.24, 0.23, 0.26]$$

$$c^{ta} = 0.21$$

Zatem pierwszy składnik wektora t obliczany ze wzoru (1) dla techniki $j = 1$ ma wartość:

$$\left(\sum_{i=1}^{n1} t_{i,j}^a \cdot w^{ta}_i \right) \cdot c^{ta} = (1.89 \cdot 0.27 + 1.34 \cdot 0.23 + 1.89 \cdot 0.24 + 1.72 \cdot 0.26) = 0.36$$

Wartość t_1 po dodaniu pozostałych składników zawartych we wzorze (1) wynosi:

$$t_1 = 1.80$$

W ten sam sposób obliczono pozostałe składniki wektora t . Ma on następującą ostateczną postać:

$$t = [1.80, 3.84, 3.16, 1.71, 2.49, 2.78, 3.82]$$

Uzyskany wynik wskazuje, że najkorzystniejsze dla kryterium uciążliwości dla środowiska okazały się techniki T4 ($t_4 = 1.71$) i T1 ($t_1 = 1.80$), a najbardziej uciążliwe dla środowiska techniki T2 ($t_2 = 3.84$) i T7 ($t_7 = 3.82$).

Analiza techniczna wykazała, że z uwagi na rodzaj i wielkość uszkodzeń zaobserwowanych w badanym kanale należy zastosować bezwykopową odnowę kanału w wersji rekonstrukcyjnej (ang. fully structural rehabilitation), która może być uzyskana za pomocą technik: T1, T2, T3, T4, T5, T7.

W tym przypadku, z uwagi na rodzaj zaobserwowanych uszkodzeń, nie może być zastosowana technika T6, którą stosuje się tylko w przypadku renowacji (ang. non structural rehabilitation). Zatem najkorzystniejsza z analizowanych technik dla kryterium środowiskowego jest technika T4.

Wnioski

- Bezwykopowe techniki odnowy stosowane w przypadku uszkodzonych nieuszczelnionych przewodów kanalizacyjnych stanowią korzystną alternatywę dla metod wykopowych, biorąc pod uwagę ich wpływ na środowisko. W znacznie mniejszym stopniu, w stosunku do technik wykopowych, oddziałują one na atmosferę, hydrosferę, biosferę, litosferę i antroposferę. Zastosowanie bezwykopowych technik bezwykopowej odnowy prowadzi między innymi do redukcji emisji CO₂ i innych gazów, zmniejszenia zanieczyszczenia gruntu i wód gruntowych, redukcji hałasu i zanieczyszczeń (np. pyłu), zmniejszenia lub wyeliminowania szeregu uciążliwości dla ludzi, zmniejszenia zagrożeń dla zdrowia ludzi, zniszczeń korzeni drzew, uszkodzeń innych rurociągów i kabli oraz osuszenia gruntu podczas prac odwodnieniowych i konieczności usuwania uszkodzonych rur (pozostają one w gruncie).
- Nowością w dotychczasowym podejściu do klasyfikacji czynników dotyczących wpływu technik bezwykopowych na środowisko jest ujęcie ich w pięciu grupach zróżnicowanych ze

względem na rodzaj sfery, na którą oddziałują. Uwzględniono łącznie 15 czynników mających wpływ na środowisko.

- Analiza wpływu czynników środowiskowych przy stosowaniu bezwykopowych technik odnowy wykazała, że niektóre oddziaływania na środowisko są mierzalne, a inne niemierzalne. Zaproponowano nową metodę ilościowej oceny zarówno mierzalnych, jak i niemierzalnych czynników, która ostatecznie umożliwiła ilościową ocenę różnych bezwykopowych technik odnowy dla kryterium ich uciążliwości dla środowiska. Proponowana metoda pozwala zatem na uszerzeganie bezwykopowych technik odnowy dla kryterium ich wpływu na środowisko. Technika, dla której wskaźnik t_j , wyliczony ze wzoru (1) jest najniższy, jest najbardziej korzystna dla kryterium środowiskowego.
- Zaproponowana metoda jest pierwszą propozycją pozwalającą na kompleksowe podejście do oceny wpływu na środowisko technik bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych. Może być ona w miarę pozyskiwania nowych danych dotyczących oddziaływania technik bezwykopowych na środowisko zarówno uściślana, jak i rozbudowywana.

LITERATURA

- [1] Ariaratnam, S.T., Sihabuddin, S., 2009. Comparison of emitted emissions between trenchless pipe replacement and open cut utility construction. *J. Green Build.* 4(2), 126-140. <https://www.journalofgreenbuilding.com/doi/pdf/10.3992/jgb.4.2.126>.

- [2] Ellis, J.B., Revitt, D.M., Lister, P., Willgress, C., Buckley, A., 2003. Experimental studies of sewer exfiltration. *Water Sci. Technol.* 47(4), 61-67. http://apuss.insa-lyon.fr/pr_003_WSTExfiltrationPaper1.pdf?q=...
- [3] Ernst, N., 2017. LED curing of CIPP. Proc. of the NASTT No-Dig Conf., Washington, Paper WM-T4-04.
- [4] Kuliczowska, E., 2008. Kryteria planowania bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych, monografia M3, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce.
- [5] Kuliczowska, E., 2016a. The interaction between road traffic safety and the condition of sewers laid under roads. *Transport Res. D.* 48, 203-213. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.025>.
- [6] Kuliczowska, E., 2017. Environmental and structural risk assessment of long operated vitrified clay sewers. *Environment Protection Engineering.* 44(2), 53-67. doi:10.5277/epe170205 ; oai:dbc.wroc.pl:37658.
- [7] Kuliczowska, E., Kuliczowski, A., 2021. Oddziaływanie technik bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych na środowisko. *INSTAL.* 425(1), 35-38, DOI 10.36119/15.2021.1.3.
- [8] Kuliczowska, E., Kuliczowski, A., 2021. Możliwości bardziej efektywnego stosowania technik bezwykopowej odnowy przewodów kanalizacyjnych. *INSTAL.* 427(3), 37-40, DOI 10.36119/15.2021.3.5.
- [9] Kuliczowski, A., Kuliczowska, E., Zwierzchowska, A., Zwierzchowski, D., Dańczuk, P., Kubicka, U., Kuliczowski, P., Lisowska, J., 2019. Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska. Wyd.2, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Lublin.
- [10] Nenadalova, L., 2010. Determining the environmental parameters of trenchless technologies for construction practise. In: Proc. of the ISTT No-Dig Conf., Singapore, Paper 51.
- [11] Stein, D., 1999. Instandhaltung von Kanalisationen. Ernst & Sohn, A Wiley Company, Berlin.
- [12] Stein, D., 2005. Trenchless technology for installation of cables and pipelines. Stein & Partner, Germany.