

Andrzej RAGANOWICZ
Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal

Józef DZIOPAK
Katedra Infrastruktury i Ekorozwoju
Politechnika Rzeszowska

SYSTEM KLASYFIKACJI STANU TECHNICZNEGO SIECI KANALIZACYJNEJ NA PODSTAWIE *PFORZHEIMER MODELL*

W artykule poddano analizie najbardziej popularny w Niemczech system klasyfikacji stanu technicznego sieci kanalizacyjnych, który dobrze opisuje stan techniczny przewodów na bazie wyników inspekcji optycznej dla potrzeb jej odnowy w różnych warunkach funkcjonowania sieci kanalizacyjnej. W oparciu o opracowaną metodykę i podaną strukturę modelu, sporządza się dokumentację stanu technicznego sieci, która służy do jej oceny w oparciu o odpowiednio sformułowane notacje uszkodzeń pojedynczych, punktowych, równoległych i na długości odcinka sieci. *Pforzheimer Modell* uwzględnia wszystkie ważne warunki brzegowe, które mają w perspektywie wpływ na kryteria dyspozycyjności sieci w odniesieniu do warunków technicznych o znaczeniu peryferyjnym i warunki krytyczne. Zastosowane klasyfikacje tworzą odrębną grupę modeli, które na podstawie wyników inspekcji optycznej pozwalają ustalić priorytety odnowy i czas jej wykonania. Ponieważ model ten uwzględnia wszystkie aspekty stanu budowlano-eksploacyjnego badanej sieci oraz uwarunkowania peryferyjne, to w szczególnie sposób są respektowane ważne aspekty ochrony środowiska naturalnego.

1. Wprowadzenie

Okazuje się, że na tle popularnych europejskich klasyfikacji stanu technicznego sieci *Pforzheimer Modell* wyróżnia się wyjątkową kompleksowością oraz precyzyjnością notacji. Model ten został opracowany w połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia przez instytucję zarządzającą siecią publiczną miasta Pforzheim w Niemczech. Jego podstawowym celem jest opis stanu techniczno-eksploacyjnego dla potrzeb ustalenia priorytetów odnowy sieci kanalizacyjnej. Natomiast ramowym założeniem tego modelu jest uzyskanie pełnej dyspozycyjności sieci kanalizacyjnej. Przy ustalaniu dyspozycyjności przyjęto kryteria, które odnoszą się do: (1) szczelności przewodów chroniącej podłoże gruntowe i wody podziemne przed skażeniem, (2) funkcjonalności będącej potencjałem transportowym redukującym do minimum niebezpieczeń-

stwo groźnego podpiętrzenia kanału i zalania pewnego obszaru oraz (3) nośności, która gwarantuje bezpieczne przenoszenie przez konstrukcję kanału wszystkich obciążeń i zapewnia jego niezawodną eksploatację.

Zapewnienie stanu pełnej dyspozycyjności sieci wymaga od jej eksploataatorów realizacji określonego programu konsekwentnych przedsięwzięć, które głównie obejmują swoim zakresem: inspekcję optyczną, ustalenie priorytetów renowacyjnych i kwalifikowane plany odnowy. Przy definiowaniu priorytetów renowacyjnych należy brać pod uwagę zasadnicze kwestie stanowiące określone maksymy, i tak:

- odnowa, która musi być zrealizowana ma pierwszeństwo przed odnową, która powinna być zrealizowana, natomiast wszystkie regulacje prawne dotyczące odnowy mają wyższy priorytet;
- odnowa przewodów kanalizacyjnych, które są zlokalizowane w strefach ochrony wód podziemnych ma absolutne pierwszeństwo;
- ochrona wód gruntowych ma wyższy status od ochrony wód powierzchniowych;
- ochrona wód gruntowych ma wyższy priorytet niż niezawodna eksploatacja sieci, co oznacza, że nieszczelne przewody kanalizacyjne są potencjalnie większym zagrożeniem dla środowiska naturalnego niż ich hydrauliczne przeciążenie.

Zasadniczym punktem wyjścia dla wszystkich działań związanych z odnową jest przeprowadzenie pełnozakresowej inspekcji optycznej oraz klasyfikacji stanu techniczno-eksploatacyjnego badanej sieci. Zatem jedynie na podstawie pełnej wiedzy dotyczącej stanu budowlanego i warunków hydraulicznych sieci można racjonalnie planować i realizować jej odnowę.

W połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia opracowano system klasyfikacji stanu technicznego sieci kanalizacyjnych w kontekście odnowy, znany w literaturze fachowej pod nazwą *Pforzheimer Modell* [1]. Model ten powstał z zamiarem stworzenia krytycznej alternatywy w stosunku do ówczesnie opublikowanego projektu niemieckiej wytycznej ATV-M 149 [2].

2. Podstawy i metodyka modelu

Niemieccy specjaliści bardzo krytycznie ustosunkowali się do projektu wspomnianej wytycznej ATV, co znalazło odpowiednie odzwierciedlenie w modelu stanu technicznego sieci kanalizacyjnej miasta Pforzheim. Zasadniczym celem stawianym przed tym modelem, który odróżniał go od projektu wytycznej ATV-M 149 [2], była wyłącznie elektroniczna obróbka danych, począwszy od fazy dokumentacji inspekcji optycznej, aż do momentu ustalenia stanu technicznego sieci wraz z możliwością opracowania strategii średnio i długoterminowej jej odnowy. Aby realizacja podanego celu była możliwa, spełnić należy szereg istotnych warunków, w tym:

- system musi umożliwiać wprowadzenie wszystkich danych pochodzących z pełnozakresowej inspekcji optycznej sieci oraz ich klasyfikację;

- bloki obliczeniowe wyników inspekcji optycznej i klasyfikacji stanu technicznego sieci muszą niezależnie realizować swoje zadanie;
- struktura modelu powinna zapewniać integrację wszystkich ważnych aspektów klasyfikacji, a system musi być elastyczny i otwarty na wprowadzenie dodatkowych warunków klasyfikacji;
- struktura modelu musi być dynamiczna, co oznacza, że parametry mogą być poddane skalowaniu i wszystkie działania matematyczne dadzą się dowolnie obrabiać;
- wszystkie działania matematyczne muszą posiadać racjonalne uzasadnienie, a ich wyniki powinny mieć potwierdzenie empiryczne;
- klasyfikacja stanu technicznego sieci jest prowadzona w kontekście trzech kryteriów, tj. szczelności, funkcjonalności i nośności w związku z tym, że celem generalnym modelu jest osiągnięcie pełnej dyspozycyjności sieci;
- w fazie ustalania priorytetów renowacyjnych należy uwzględnić inne warunki, i tak:
 - system kanalizacji, funkcję kanału i jego charakterystykę konstrukcyjną,
 - uwarunkowania zewnętrzne i warunki gruntowo-wodne oraz sytuację panującą na powierzchni terenu,
 - szczególne uwarunkowania związane z ochroną wód podziemnych, hydrauliką, nośnością oraz eksploatacją przewodów.

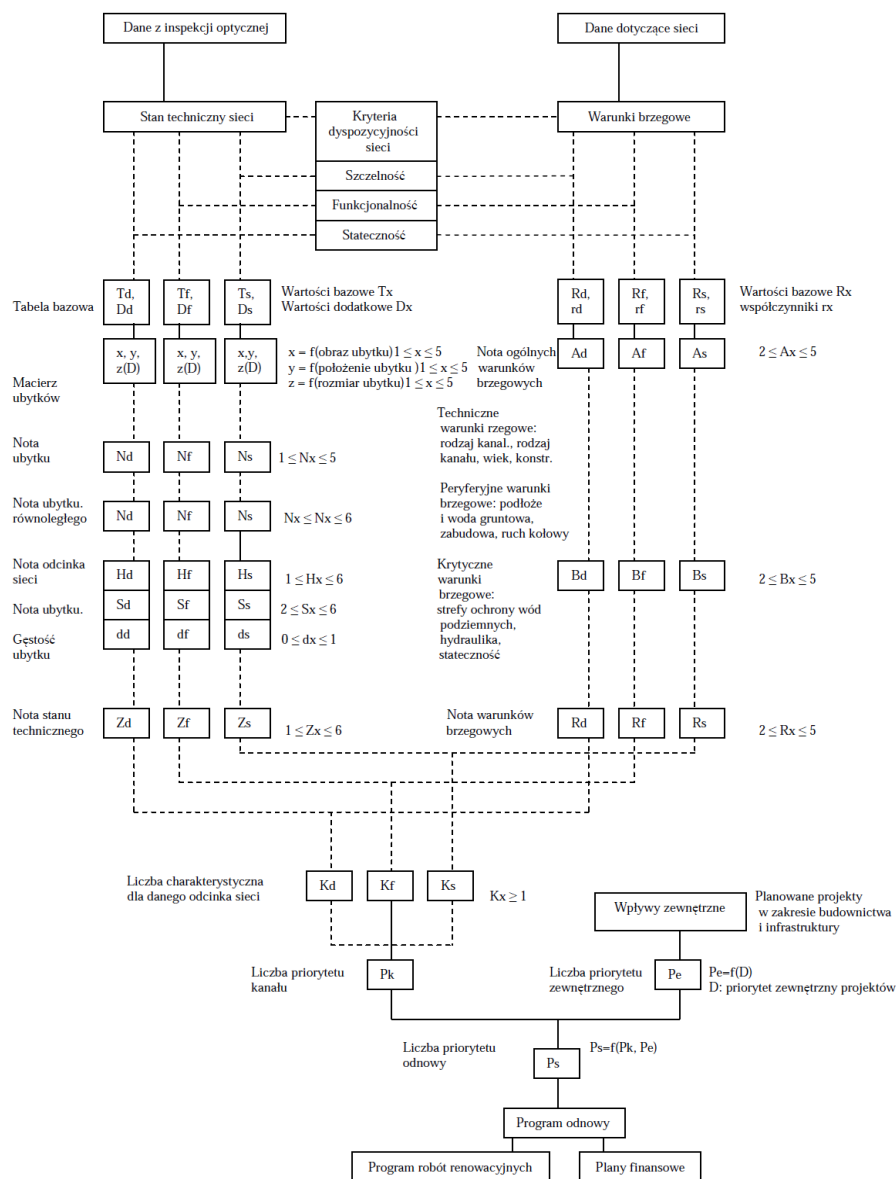
3. Struktura modelu

W strukturze *Pforzheimer Modell* wyróżnia się dwie zasadnicze fazy obejmujące: (1) inspekcję optyczną z badaniami telewizyjnymi, dokumentacją wyników inspekcji i przygotowaniem danych do notacji uszkodzeń oraz (2) notację uszkodzeń obejmującą notację pojedynczych uszkodzeń, odcinków uszkodzeń, odcinków sieci i notację obiektów sieci.

Schematyczną strukturę modelu przedstawiono na rysunku 1 [3], na którym można wyróżnić odmienne fazy, w tym: inspekcję optyczną, badania telewizyjne, dokumentację wyników inspekcji oraz przygotowanie danych do notacji uszkodzeń.

Biorąc pod uwagę trzy kryteria - szczelność, funkcjonalność i nośność, które są celami odnowy, zostaje ustalona reprezentatywna ocena (nota) stanu technicznego sieci.

Analogicznie do uszkodzeń, w kontekście trzech kryteriów dyspozycyjności sieci, analizowane są warunki brzegowe. Każdy z nich uzyskuje reprezentacyjną notę. Do warunków brzegowych zalicza się między innymi: system kanalizacji, stosunki gruntowo-wodne oraz sytuację jaka występuje na powierzchni terenu w obrębie trasy kanału. Poprzez pewną zależność matematyczno-logiczną wiążącą notę stanu technicznego z notą warunków brzegowych, ustala się ważoną wartość tak zwanego wskaźnika kanału.



Rys. 1. Schemat systemu *Pforzheimer Modell* klasyfikującego wyniki pełnozakresowej inspekcji optycznej [3]

Ogólną koncepcję *Pforzheimer Modell* oraz wszystkie detale matematyczno-logiczne wyjaśniono na podstawie konkretnego przykładu, który pochodzi z eksploatacji sieci kanalizacyjnej miasta Pforzheim, a którego fragment jest przedstawiony w tabeli 1.

Tabela 1. Protokół inspekcji optycznej przykładowego odcinka sieci

Ulica:	ZERRENNERSTRASSE					
Odcinek sieci:	M	77170357	77170354	2443	2026	
Przekrój:	DN	550	550			
Materiał:	kamionka					
Długość odcinka:	29,80 m					
Rok powstania:	1906					
Data inspekcji:	17.02.1995					
Data notacji stanu technicznego:	04.08.1995					
Nota:	5,54					
Wartości maksymalne:	$N_X(5,00)$ 3,21 5,00)					
Liczba uszkodzeń:	12					
$\frac{K}{L_S} = \frac{12}{7}$	$Z_X(\max.) = 4,16$ $L_S(\max.) = 28,70$ m $L_S(\max.) = 0,98$					
Stacja	Długość uszkodzenia	Początek/Koniec	Kod uszkodzenia	N_D	N_F	N_S
0,00			PO	0,00	0,00	0,00
0,80			PP	0,00	0,00	0,00
0,80	2,80	P	RS - -	5,00	2,37	5,00
2,80		K	RS - -	5,00	2,37	5,00
2,80	5,40	P	RL - R 01	3,58	1,00	4,07
4,30			A - - R	0,00	0,00	0,00
4,30			ZHA	0,00	0,00	0,00
5,40		K	RL - R 01	3,58	1,00	4,07
5,40	16,40	P	LB - U 04	3,07	3,00	3,72
7,50	9,20	P	RS - O	4,67	2,25	4,81
9,20		K	RS - O	4,67	2,25	4,81
9,20	16,40	P	RS	5,00	2,37	5,00
9,60			AU - L	0,00	0,00	0,00
11,20			AU - R	0,00	0,00	0,00
12,00			SN - R	4,19	2,26	3,45
12,00			ZHA	0,00	0,00	0,00
13,60			SN - L	4,19	2,26	3,45
13,60			ZSA	0,00	0,00	0,00
16,20			A - - L	0,00	0,00	0,00
16,20			ZHA	0,00	0,00	0,00
16,40		K	LB - U 04	3,07	3,00	3,72
16,40	29,50	P	LB - U 08	3,28	3,21	4,07
16,40		K	RS - -	5,00	2,37	5,00
17,30			LV - O 02	3,47	2,91	2,17
19,30		P	RL - O 02	3,47	1,00	3,98
21,30		K	RL - O 02	3,47	1,00	3,98
24,30			LH - R 01	3,16	2,65	2,09
27,40			LH - R 02	3,58	2,91	2,21
29,50		K	LB - U 08	3,28	3,21	4,07
29,80			KP	0,00	0,00	0,00
29,80			KO	0,00	0,00	0,00

4. Dokumentacja stanu technicznego sieci

Podstawowym zadaniem prowadzenia inspekcji optycznej przewodów jest opisanie zarejestrowanych uszkodzeń z uwagi na ich rodzaj i zasięg w sposób jak najbardziej obiektywny i jednoznaczny. Spełnienie tych dwóch warunków umożliwia przeprowadzenie niezawodnej obróbki elektronicznej bazy danych. W momencie, kiedy powstała koncepcja powyższego modelu, a więc w połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia, nie istniały jeszcze techniczne przesłanki obiektywnego filmowania przewodów kanalizacyjnych.

W każdym przypadku, kiedy operator jest bezpośrednio odpowiedzialny za rejestrację stanu technicznego kanału, to niezależnie od wyposażenia technicznego kamery, zawsze będzie to dokumentacja o charakterze subiektywnym. To właśnie operator decyduje o prędkości, z jaką będzie się poruszała kamera i o sposobie, w jaki zostaną sfilmowane poszczególne uszkodzenia. Predyspozycje psychiczno-fizyczne, wiedza fachowe w zakresie budowy i funkcjonowania przewodów kanalizacyjnych oraz doświadczenie operatora mają decydujący wpływ na to, czy przeprowadzona inspekcja sieci będzie mogła być potraktowana jako obiektywna.

W latach 2002/2003 pojawiła się na rynku kamera telewizyjna o nazwie „Panoramo” niemieckiej firmy IBAK, wykorzystująca technikę błyskową do filmowania przewodów kanalizacyjnych. Kamera ta składa się w rzeczywistości z dwóch kamer z przedniej i tylnej, wykonujących jednocześnie zgodnie z zadaną częstotliwością zdjęcia sferyczne wnętrza kanału, które są następnie elektronicznie spajane do jednego obrazu. Porusza się ona w kanale w sposób automatyczny, z prędkością 3-krotnie wyższą niż kamera konwencjonalna i obiektywnie rejestruje stan budowlany wnętrza przewodu kanalizacyjnego. Kamera ta jest wyposażona w bardzo dobre oprogramowanie, umożliwiające przedstawienie wnętrza kanału w formie płaskiego obrazu i analizę geometrii uszkodzeń z dokładnością do 0,1 mm.

Innym ważnym problemem badań telewizyjnych jest jednoznaczna dokumentacja danych. Protokół inspekcji optycznej pewnego odcinka sieci musi zawierać teksty oraz notacje uszkodzeń, które będą czytelne w zapisie elektronicznym. Notacja uszkodzeń sieci bazuje na pewnym katalogu, który jest wynikiem ich jednoznacznej charakterystyki. Każdy pojedynczy kod powyższego modelu składa się z 6-ciu następujących elementów:

- pierwsza pozycja kodu oznacza rodzaj uszkodzenia w sensie ogólnym i przykładowo może to być - rysa,
- druga pozycja kodu ujmuje rodzaj uszkodzenia w ujęciu bardziej szczegółowym, na przykład będzie to - rysa radialna,
- trzecia pozycja kodu dotyczy informacji o rodzaju uszkodzenia w kontekście szczelności, jak na przykład - widoczne podłoże gruntowe,
- czwarta pozycja kodu odnosi się do lokalizacji uszkodzenia oraz jego przedmiotu, przykładowo będzie to na dnie przewodu - uszkodzenie przyłącza;
- piąta i szósta pozycja kodu obejmuje numeryczną informację lub ustalenie dotyczące geometrii uszkodzenia.

5. Ocena stanu technicznego sieci

Uszkodzenia przewodów kanalizacyjnych mogą występować z uwagi na ich rodzaj, długość, liczbę oraz równoległy przebieg we wszystkich możliwych kombinacjach. Ocena stanu technicznego sieci musi uwzględniać to szerokie spektrum kombinacji w taki sposób, aby z jednej strony - zostały wzięte pod

uwagę jej wszystkie aspekty, a z drugiej strony, ażeby wszystkie zależności i operacje matematyczno-logiczne mające wpływ na jej wynik, były bez wyjątków przejrzyste i odpowiadały realnym uwarunkowaniom eksploatacyjnym.

W systemie oceny stanu technicznego sieci wyniki inspekcji optycznej odgrywają decydującą rolę. Ocena stanu sieci bazuje we wstępnej fazie na oddzielnych analizach w kontekście szczelności, funkcjonalności oraz nośności, a następnie przechodzi stopniowo do jakościowego ujęcia szeregu elementów, w tym zwłaszcza:

- charakterystyki uszkodzeń,
- pojedynczych uszkodzeń,
- uszkodzeń występujących równolegle,
- uszkodzeń o charakterze liniowym,
- odcinków, względnie obiektów sieci kanalizacyjnej.

Przeprowadzenie kompleksowej oceny stanu technicznego określonej infrastruktury kanalizacyjnej bazuje na dwóch tabelach wartości podstawowych oraz prostych formułach matematycznych. Wynik tej oceny jest reprezentatywny, ponieważ odpowiada on realiom eksploatacyjnym i jest łatwy do skontrolowania. Każde pojedyncze uszkodzenie może być opisane na podstawie trzech charakterystycznych cech i jest poddawane ocenie ilościowej:

- obraz uszkodzenia: pierwsza, druga i trzecia pozycja kodu - wartość x ;
- lokalizacja względnie przedmiot uszkodzenia jako czwarta pozycja kodu - wartość y ;
- numeryczna informacja dotycząca rozmiaru uszkodzenia: piąta i szósta pozycja kodu - wartość z .

W rezultacie takiego sformułowania problemu zostaje utworzona macierz uszkodzenia (tabela 2), która w przejrzysty sposób umożliwia przeprowadzenie notacji każdego uszkodzenia w zakresie trzech wspomnianych już kryteriów dyspozycyjności sieci, jakimi są: szczelność, funkcjonalność oraz nośność przewodu.

Nota stanu N jest funkcją parametrów x opisujących każde kryterium dyspozycyjności sieci w następujący sposób:

- nota szczelności: $N_D = f(X_D, Y_D, Z_D)$;
- nota funkcjonalności: $N_F = f(X_F, Y_F, Z_F)$;
- nota nośności: $N_S = f(X_S, Y_S, Z_S)$.

Wszystkie elementy macierzy uszkodzenia mogą być odczytane z tabeli wartości bazowych, które są przyporządkowane kodom zajmującym pierwszą i drugą pozycję i wyczerpują wszystkie możliwe kombinacje rodzajów uszkodzeń. Wartości X_X są wynikiem zsumowania dwóch czynników:

$$X_X = T_X + D_X \quad (1)$$

gdzie:

T_X - wartość odczytana z tabeli wartości bazowych, która opisuje

rodzaj uszkodzenia (pierwsza i druga pozycja kodu),

D_X - wartość uzupełniająca, która opisuje trzecią pozycję kodu i jej wpływ na szczelność przewodu w punkcie wystąpienia uszkodzenia.

Tabela 2. Macierz uszkodzenia

		Kryterium notacji			Cecha charakterystyczna uszkodzenia
		Szczelność	Funkcjonalność	Nośność	
Wartości bazowe	X	X_d	X_f	X_s	obraz uszkodzenia
	Y	Y_d	Y_f	Y_s	lokalizacja uszkodzenia
	Z	Z_d	Z_f	Z_s	rozmiar uszkodzenia
		N_d	N_f	N_s	
		Wektor kolumny Nota uszkodzenia			

Wartość Y_X opisuje wpływ lokalizacji lub przedmiotu uszkodzenia (czwartej pozycji kodu) na szczelność, funkcjonalność oraz nośność przewodu kanalizacyjnego.

Z kolei wartości Z_X stanowią informację o rozmiarach uszkodzenia i odnoszą się do piątej i szóstej pozycji kodu i nie mają żadnego wpływu na kryteria dyspozycyjności sieci. Poniżej zaprezentowano macierz uszkodzenia nr 1 zarejestrowanego pomiędzy stacją 0,80 i 5,40 m, które zostało udokumentowane w protokole inspekcji optycznej odcinka sieci miasta Pforzheim.

Uszkodzenie nr 1: Spękania i rysy na całym obwodzie wewnętrznym przewodu

Kod uszkodzenia: R S - - -

Macierz uszkodzenia: 5 2 5
5 4 5
5 5 5

Uszkodzenie nr 2: Rysa podłużna o rozwarości 1 mm z prawej strony przewodu

Kod uszkodzenia: R L - R O 1

Macierz uszkodzenia: 4 1 4
3 2 4
3 3 3

5.1 Notacja pojedynczych uszkodzeń

Nota uszkodzenia $N_X = f(X_X, Y_X, Z_X)$; zostaje wyznaczona jako wartość średnia geometryczna ważona, zgodnie z formułą (2):

$$N_X = \alpha + \beta + \gamma \sqrt{X_x^\alpha + Y_x^\beta + Z_x^\gamma} \quad (2)$$

Na podstawie analiz oraz obliczeń porównawczych ustalono następujące wartości eksponentów: $\alpha = 6$, $\beta = (X_X - 1)/X_X$ i $\gamma = X_X - 1$.

Autorzy modelu uzasadnili przyjęcie powyższych parametrów w następujący sposób:

- wartość X_X jest głównym i najbardziej reprezentatywnym parametrem opisującym obraz uszkodzenia (pozycje kodu: 1, 2 i 3),
- $X_X = 1$, kiedy pewien rodzaj uszkodzenia nie ma żadnego wpływu na jedno z kryteriów dyspozycyjności i wtedy nota uszkodzenia $N_X = 1$, co wynika ze wzoru $\beta, \gamma = f(X_X - 1)$,
- gdy $X_X = Y_X = Z_X$, to także $N_X = X_X = Y_X = Z_X$.

Stosując powyższe formuły ustalono dla uszkodzenia nr 1 wartości jego noty. Uszkodzenie nr 1 (spekania na całym obwodzie przewodu):

- $N_D = 5,00$ - ocena zła,
- $N_F = 2,37$ - ocena dobra do zadowalającej,
- $N_S = 5,00$ - ocena zła.

Uszkodzenie nr 2 (rysa podłużna):

- $N_D = 3,58$ - ocena zadowalająca do krytycznej;
- $N_F = 1,00$ - ocena bez znaczenia dla stanu sieci;
- $N_S = 4,07$ - ocena krytyczna.

Analogicznie można dokonać analizy pozostałych uszkodzeń z przykładowego protokołu inspekcji optycznej przeprowadzonej w mieście Pforzheim.

5.2 Notacja uszkodzeń punktowych, równoległych i na długości

Przeprowadzenie klasyfikacji uszkodzeń li tylko na podstawie oceny punktowej nie jest wystarczającym warunkiem podjęcia trudnej decyzji, czy dany odcinek sieci zostanie poddany konserwacji, czy też odnowie. W modelu tym jest to rozwiązane w ten sposób, że w celu ustalenia gęstości uszkodzeń noty pojedynczych uszkodzeń N_X są przedstawiane w postaci określonego diagramu schodkowego. Natomiast, aby prawidłowo skonstruować taki diagram uszkodzeń należy uwzględnić następujące warunki:

- wartości rzędnych są notami uszkodzeń,
- fragmenty odcinka sieci bez uszkodzeń przyjmują wartość $N_X = 1$,
- noty pojedynczych uszkodzeń $N_E = N_X$,
- noty równoległych uszkodzeń są obliczane ze wzoru (3):

$$N_P = N_O + \sum_{k=1}^{k=n} \frac{1}{k!} \cdot \left(\frac{N_K - 1}{N_O} \right)^k \quad (3)$$

gdzie:

- N_E - nota pojedynczego uszkodzenia,
- N_P - nota uszkodzeń równoległych i z reguły $N_P < N_0 + 1$,
- N_0 - najwyższa nota pojedyncza,
- N_K - pojedyncza nota uszkodzenia równoległego i $N_{K-1} \geq N_K \geq N_{K+1}$.

5.3 Notacja stanu odcinka sieci

Nota dla uszkodzeń występujących na długości odcinka kanału jest ustalana zgodnie z ogólną formułą zapisaną jako:

$$N_L = \frac{\int N^2 \cdot dL}{\int N \cdot dL} \quad (4)$$

co oznacza stosunek *momentu krzywej 2-go stopnia do momentu krzywej 1-go stopnia* i jest równy *momentowi oporu*.

W przypadku każdego odcinka sieci ustala się we wstępnej fazie dwie wartości ze wzorów (5) i (6). Nota odcinka:

$$H_x = \frac{\sum N_x^2 \cdot \Delta L}{\sum N_x \cdot \Delta L} = \frac{L - \sum \Delta L_s + \sum N_{sx}^2 \cdot \Delta L_s}{L - \sum \Delta L_s + \sum N_{sx} \cdot \Delta L_s} \quad (5)$$

gdzie:

- długość danego odcinka sieci $L = \sum \Delta L$,
- uszkodzone fragmenty odcinka sieci ΔL_s ,
- nota uszkodzenia N_{sx} ($N_x > 1$) obejmuje cały odcinek sieci, to znaczy fragmenty bez uszkodzeń ($N_x = 1$) oraz uszkodzone.

Nota uszkodzenia:

$$S_x = \frac{\sum N_{sx}^2 \cdot \Delta L_s}{\sum N_{sx} \cdot \Delta L_s} \quad (6)$$

odnosi się tylko do uszkodzonych fragmentów odcinka. Poprzez porównanie wielkości H_x i S_x uzyskuje się pewną charakterystyczną wartość rozkładu gęstości uszkodzenia d_x . Wartości tego rozkładu oblicza się na podstawie wzoru (7) i oznacza stosunek promienia noty odcinka do promienia noty uszkodzenia, i tak:

$$d_x = \sqrt{\frac{\sum N_x^2}{\sum \Delta L} \cdot \frac{\sum \Delta L}{\sum N_{sx}^2 \cdot \Delta L_s}} \approx \quad (7)$$

Promień we wzorze (7) jest rozumiany jako odległość środka ciężkości obciążenia, którym jest schodkowy diagram notacji pojedynczych uszkodzeń. Po przekształceniu wzoru (7) uzyskuje się jego zmodyfikowaną postać:

$$d_x = \sqrt{\alpha \left(1 + \frac{1-\alpha}{\sum N_{sx}^2 \cdot \Delta L_s} \right)} = \sqrt{\frac{H_x}{S_x} \cdot \left(\alpha + \frac{1-\alpha}{N_s} \right)} \quad (8)$$

$$\alpha = \frac{\sum \Delta L_s}{L} = \quad (9)$$

$$N_s = \frac{\sum N_s \cdot \Delta L_s}{\sum \Delta L_s} = \quad (10)$$

gdzie:

- α - uszkodzona długość odcinka sieci,
- N_s - średnia wartość noty uszkodzenia.

Gęstość uszkodzenia d_x przyjmuje wartości w przedziale od 0 do 1 i sygnalizuje konieczny zakres zabiegów renowacyjnych. Gdy d_x przyjmuje wartość większą od 0,5, to niezbędne jest przeprowadzenie odnowy na całej długości odcinka. Zastosowanie powyższego systemu klasyfikacji stanu technicznego sieci kanalizacyjnej miasta Pforzheim potwierdziło tezę, że parametr gęstości uszkodzenia d_x jest niezawodnym kryterium oraz instrumentem planowania jej średnio i długoterminowej odnowy.

Na podstawie wartości parametrów H_x , S_x oraz d_x można ustalić tak zwaną notę stanu Z_x , która jest reprezentatywnym parametrem stanu techniczno-eksploatacyjnego danego odcinka w kontekście jego dyspozycyjności. Notę stanu Z_x można wyznaczyć na podstawie wzoru (11):

$$Z_x = H_x + d_x \cdot (S_x - H_x) \quad (11)$$

dla którego muszą być spełnione poniższe warunki:

- $H_s \leq Z_x \leq S_x$,
- dla $H_x = S_x \rightarrow d_x = 1$ oraz $Z_x = H_x = S_x$,
- dla $d_x \approx 0 \rightarrow Z_x \approx H_x$,
- dla $d_x \approx 1 \rightarrow Z_x \approx S_x$.

Stosując powyżej zdefiniowane formuły ustalono dla konkretnego przykładu wartość ogólnej notacji odcinka, notacji uszkodzenia i gęstości uszkodzenia, a wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Notacja stanu przykładowego odcinka sieci kanalizacyjnej

	Cele dyspozycyjności sieci		
	Szczelność	Funkcjonalność	Nośność
Nota odcinka	$H_D = 4,40$	$H_F = 3,22$	$H_S = 4,71$
Nota uszkodzenia	$S_D = 4,43$	$S_F = 3,32$	$S_S = 4,74$
Gęstość uszkodzenia	$d_D = 0,98$	$d_F = 0,94$	$d_S = 0,98$
Nota stanu technicznego	$Z_D = 4,43$	$Z_F = 3,31$	$Z_S = 4,74$
Ocena stanu	krytyczny	zadowalający	krytyczny

Parametr d_x przyjmuje wartości w przedziale od 0,94 do 0,98, to znaczy, że $d_x > 0,50$ i dlatego analizowany odcinek musi być poddany odnowie. Dla wykazania efektywności tego modelu przeanalizowano ponownie przykładowy odcinek sieci, z tą różnicą, że wzięto pod uwagę tylko uszkodzenia zlokalizowane pomiędzy stacją 0,80 i 5,40 m (uszkodzenia nr 1 i 2). Wyniki powyższej analizy zestawiono w tabeli 4.

Dla każdego kryterium dyspozycyjności sieci wartości parametru d_x są mniejsze od 0,50, co świadczy o tym, że sama konserwacja tego odcinka jest wystarczającym zabiegiem renowacyjnym.

6. Warunki brzegowe

Konkretne uwarunkowania eksploatacyjne mogą, a niejednokrotnie mają istotny wpływ na ustalenia priorytetów zabiegów renowacyjnych oraz kolejności ich wykonania. *Pforzheimer Modell* uwzględnia wszystkie ważne warunki brzegowe, które w perspektywie mają istotny wpływ na kryteria dyspozycyjności sieci.

Warunki techniczne: rodzaj kanalizacji, stopień zanieczyszczenia ścieków, znaczenie kanału (główny, zbiorczy, lokalny, przyłącze), wiek kanału i jego konstrukcja (materiał, rodzaj połączeń i typ posadowienia).

Warunki o znaczeniu peryferyjnym: rodzaj podłoża gruntowego, szczególnie w aspekcie jego wodoprzepuszczalności, poziomu zwierciadła wody gruntowej w stosunku do posadowienia kanału, rodzaj zabudowy na powierzchni terenu (zabudowa przemysłowa, mieszkalna i mieszana), obciążenie kanału z tytułu ruchu drogowego (kategoria drogi).

Warunki krytyczne: tereny ochrony wód podziemnych wymagające szczelnych przewodów kanalizacyjnych, rezerwy hydrauliczne sieci w aspekcie jej funkcjonalności, nośności oraz bezawaryjna eksploatacja kanalizacji i innych obiektów podziemnych.

Tabela 4. Notacja stanu przykładowego odcinka z uwzględnieniem uszkodzenia nr 1 i 2

	Cele dyspozycyjności sieci		
	Szczelność	Funkcjonalność	Nośność
Nota odcinka	$H_D = 2,44$	$H_F = 1,20$	$H_S = 2,56$
Nota uszkodzenia	$S_D = 4,32$	$S_F = 2,37$	$S_S = 4,52$
Gęstość uszkodzenia	$d_D = 0,45$	$d_F = 0,48$	$d_S = 0,44$
Nota stanu technicznego	$Z_D = 3,29$	$Z_F = 1,76$	$Z_S = 3,43$
Ocena stanu	zadowalający	dobry	zadowalający

Analogicznie, jak w przypadku oceny pojedynczych uszkodzeń, wartości powyżej zdefiniowanych warunków peryferyjnych mogą być odczytane z tabeli tak zwanych wartości bazowych. Zawiera ona informacje dotyczące ważności warunków brzegowych w odniesieniu do poszczególnych kryteriów dyspozycyjności sieci. W celu ustalenia reprezentatywnej noty odnośnie pewnego kryterium dyspozycyjności sieci, brane są pod uwagę dwie noty częściowe oznaczone jako nota ogólna A_X i nota krytyczna B_X . Nota ogólna A_X jest odpowiedzialna za brzegowe warunki techniczne. Matematycznie jest ona wyrażona przy pomocy formuły średniej wartości arytmetycznej ważonej z zależności (12):

$$A_X = \frac{\sum_{i=1}^n R_{xi} \cdot r_{xi}}{\sum_{i=1}^n r_{xi}} \quad (12)$$

gdzie:

- R_{xi} - wartość brzegowa odczytana z odpowiedniej tabeli,
- r_{xi} - ważność wartości brzegowej.

Drugim elementem składowym noty ogólnej jest wartość krytyczna warunków brzegowych, która w zależności od kryterium dyspozycyjności sieci przyjmuje określone wartości.

Kryterium szczelności jest funkcją zależną od strefy ochrony wód podziemnych, przyjmując określone wartości, i tak:

- $B_D = 2$, gdy brak strefy ochronnej;
- $B_D = 3$, gdy jest strefa ochronna IIIb;
- $B_D = 4$, gdy jest strefa ochronna IIIa;
- $B_D = 5$, gdy jest strefa ochronna IIb.

Kryterium funkcjonalności związane jest z hydrauliką kanału, którą określa się ze wzoru (13):

$$B_F = 2 + 3 \cdot \frac{\Delta h}{h_u - h_s} \quad (13)$$

gdzie:

$$2 \leq B_F \leq 5,$$

Δh - wysokość ciśnienia w stosunku do najwyższego punktu przekroju przewodu kanalizacyjnego, m;

h_u - odległość najwyższego punktu przekroju poprzecznego przewodu kanalizacyjnego do poziomu powierzchni terenu, m;

h_s - odległość bezpieczna, m.

Kryterium nośności przewodu wyznacza się w oparciu o zależność (14):

$$B_S = 2 + \frac{1 + \sqrt{d}}{h_u} \quad (14)$$

gdzie:

$$2 \leq B_S \leq 5,$$

d - średnica wewnętrzna przewodu, m;

h_u - odległość najwyższego punktu przekroju poprzecznego przewodu kanalizacyjnego do poziomu powierzchni terenu, m.

Reprezentatywną notę warunków brzegowych uzyskuje się w zależności od noty ogólnej i krytycznej, korzystając z formuły (15):

$$R_X = \frac{1}{3} \left[\left(1 + \frac{A_X}{2} \right) \cdot \left(B_X - 2 \right) + 5 \cdot \left(B_X - 2 \right) \right] \quad (15)$$

gdzie:

$$2 \leq R_X \leq 5,$$

przy $A_X = 2$ (wartość neutralna) $R_X = B_X$,

$$\text{przy } B_X = 2 \text{ (wartość neutralna) } R_X = \frac{1}{2} (A_X + B_X) + 1 + \frac{A_X}{2} \leq 3,50,$$

przy $B_X = 5$ (wartość bardzo problematyczna) $R_X = 5$.

Dla konkretnego przykładu nota ogólna, krytyczna oraz reprezentacyjna przyjmują określone wartości, i tak:

- $A_D = 3,25$, $A_F = 3,83$, $A_S = 3,92$;
- $B_D = 2$ (kanał nie jest przeciążony hydraulicznie, gdyż $\Delta h = 0,33$, a $h_u = 3,34$ m), $B_S = 2,52$, $R_D = 2,63$, $R_F = 3,16$, $R_S = 3,31$.

Z analizy wartości reprezentatywnej noty warunków brzegowych wynika, że dany przewód kanalizacyjny nie przebiega przez strefę ochrony wód podziemnych. Jeżeli jednak badany przewód przebiegałby przez obszar strefy ochronnej IIIa, to parametr R_D przyjąłby wartość równą 4,21. Z kolei wartości pozostałych not reprezentatywnych świadczą o lokalizacji kanału w bardzo

zurbanizowanym centrum miasta, o dużym natężeniu ruchu kołowego. Gdyby dany obiekt był posadowiony na głębokości 1,0 m, to R_F przyjąłby wartość równą 4,19, a R_S wartość równą 4,16.

7. Wartość charakterystyczna i priorytetowa

Poprzez powiązanie noty stanu technicznego Z_X z notą warunków brzegowych R_X ustala się tak zwaną wartość charakterystyczną K_X , którą wyznacza się ze wzoru (16):

$$K_X = Z_X + \frac{1}{6} (R_X - 1) (R_X - 2) \quad (16)$$

gdzie:

$1 \leq K_X \leq 6$, $Z_X \leq K_X \leq 1,5Z_X$, gdy $Z_X = 1$, to $K_X = 1$; gdy $R_X = 2$, to $K_X = Z_X$.

Dla analizowanego przykładu parametr ten przyjmuje następujące wartości:

$K_D = 4,79$ - wartość prawie krytyczna,

$K_F = 3,76$ - wartość jeszcze akceptowalna,

$K_S = 5,56$ - wartość bardzo krytyczna.

W oparciu o wartość charakterystyczną K_X można ustalić priorytet wykonania zabiegów renowacyjnych P_X z zależności (17).

$$P_K = K_1 + \frac{K_1 \cdot K_3 - 1}{K_1^2} \quad (17)$$

gdzie:

$K_1 \geq K_2 \geq K_3$; gdy $K_2 = K_3 = 1$, to $P_K = K_1$ i $K_1 \leq P_K \leq K_1 + 1$.

Dla wybranego przykładu wartość P_K wynosi 6,11. Natomiast przy uwzględnieniu warunków niekorzystnych, a więc krytycznych warunków brzegowych wartość P_K wynosi 6,68. Harmonogram realizacji planowanych zabiegów renowacyjnych przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Harmonogram realizacji planowanych zabiegów renowacyjnych

Odnowa natychmiastowa		Odnowa krótkoterminowa		Odnowa średnioterminowa	
Konserwacja	Odnowa całego odcinka	Konserwacja	Odnowa całego odcinka	Konserwacja	Odnowa całego odcinka
Kryteria: wartości graniczne określonych parametrów albo not, ale także określone kody uszkodzeń					

Przy ustalaniu ostatecznej kolejności realizacji odnowy należy brać pod uwagę także czynniki, które nie zależą od stanu techniczno-budowlanego sieci, a wynikają z konieczności skorelowania odnowy sieci z renowacją innych elementów infrastruktury technicznej. Wpływ zespołu czynników zewnętrznych na wartość liczby priorytetowej odnowy sieci został uwzględniony poprzez tak zwaną liczbę priorytetową zewnętrzną, zgodnie z zależnością (18):

$$P_S = P_K \pm P_E \quad (18)$$

gdzie:

- P_S - liczba priorytetowa odnowy,
- P_K - liczba priorytetowa kanału,
- P_E - liczba priorytetowa zewnętrzna.

Parametr P_E może przyjąć zarówno wartości pozytywne jak i negatywne, w zależności od tego, czy będzie on proces realizacji odnowy sieci spowalniał, czy przyspieszał.

8. Podsumowanie

Przedstawiony w pracy model klasyfikowania stanu techniczno-eksploatacyjnego sieci kanalizacyjnej stanowi przykład matematyczno-logicznej analizy wyników inspekcji optycznej w celu ustalenia priorytetów i czasu realizacji zabiegów renowacyjnych. Ideą przewodnią systemu *Pforzheimer Modell* jest powiązanie notacji stanu technicznego badanego odcinka sieci z notacją tak zwanych warunków brzegowych jego funkcjonowania. Pewna matematyczna zależność tych dwóch parametrów pozwala ustalić wartość charakterystycznego wskaźnika każdego odcinka sieci, który definiuje priorytety odnowy. W wyniku przeprowadzonej odnowy powinno się osiągnąć pełną dyspozycyjność eksploatowanej sieci w aspekcie jej funkcjonalności, szczelności oraz nośności.

Model ten, w przypadku miasta Pforzheimer jest algorytmem całkowicie zintegrowanym z bankiem danych sieci kanalizacyjnej. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że jest on od momentu wdrożenia w połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia do praktyki eksploatacyjnej aż do chwili obecnej podstawowym instrumentem planowania zabiegów renowacyjnych. Piętnastoletni okres stosowania *Pforzheimer Modell* jest wystarczająco długim przedziałem czasu, który w jednoznaczny sposób potwierdza jego aplikacyjność i przydatność do bieżącego planowania inwestycji w zakresie odnowy sieci kanalizacyjnej.

Literatura

- [1] Müller-Winterstein R., Hotz R.: Was sollen, was können Modelle zur Zustandserfassung und -bewertung von Kanalnetzen leisten? Eine Alternative: Das „Pforzheimer Modell“, *Korrespondenz Abwasser* 1996 (43) Nr 1, 24-40.

- [2] Merkblatt ATV-M 149, Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, April 1999.
- [3] Raganowicz A., Dziopak J.: Analiza stosowanych klasyfikacji stanu technicznego sieci kanalizacyjnej. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.

PFORZHEIMER MODELL AS A SYSTEM OF SEWAGE NET TECHNICAL CONDITION CLASSIFICATION FOR THE PURPOSES OF ITS MODERNIZATION

S u m m a r y

The article deals with the most popular German system of sewage net technical condition classification, which in appropriate way describes the technical state of pipes on the base of optical inspection results for the purposes of modernization in different condition of sewage system functioning. *Pforzheimer Modell* is a logic-mathematical system, which differentiates the sewage system technical and exploitation state on the base of the damages analysis in the context of boundary functional conditions. The aim of modernization based on this model is to obtain full functionality of inspected system. This functionality is defined by the following three criteria: hydraulic capacity, tightness and carrying capacity.