

Andrzej RAGANOWICZ
Zweckverband zur Abwasserbeseitigung
im Hachinger Tal, Niemcy

Józef DZIOPAK
Politechnika Rzeszowska

STATYSTYCZNO-STOCHASTYCZNY MODEL PROGNOZOWANIA STANU TECHNICZNEGO SIECI KANALIZACYJNYCH

W artykule poddano analizie i ocenie stosowane metody statystycznego oraz stochastycznego prognozowania stanu technicznego sieci kanalizacyjnych. Zaprezentowane prognozy zostały opracowane na podstawie modeli matematycznych, w tym statystycznego modelu *Cohort-Survival-Method*. Bazą danych w przypadku obu typów prognoz są wyniki pełnozakresowej inspekcji optycznej sieci kanalizacyjnej. Okazuje się, że pewien szczególny rodzaj prognozy opracowany według modelu *Cohort-Survival-Method* może także bazować na danych, które w praktyce pochodzą z niepełnozakresowej inspekcji optycznej określonej sieci kanalizacyjnej.

1. Wprowadzenie

Na przełomie lat osiemdziesiątych i dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia zostały bardzo spopularyzowane systemy telewizyjne CCTV do oceny stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych. W okresie tym powstało również wiele programów, które umożliwiają kodowanie uszkodzeń tego typu obiektów liniowych. Potęgą w tej dziedzinie był bezpośrednią inspiracją do tworzenia prognoz stanu technicznego infrastruktury kanalizacyjnej. Prognozy te stały się w krótkim czasie praktycznymi instrumentami racjonalnej i efektywnej eksploatacji sieci kanalizacyjnych. Ideą przewodnią tych prognoz była analiza aktualnego stanu technicznego poszczególnych odcinków sieci w kontekście ich wieku. Na podstawie prognozy stanu technicznego sieci można ustalić ilościowy zakres zabiegów renowacyjnych. Informacja ta jest praktyczną wiedzą dla każdego eksploatatora sieci kanalizacyjnej. Pozwala ona na opracowanie najkorzystniejszej strategii renowacyjnej uwzględniającej możliwości finansowe instytucji zarządzającej daną siecią. Innym, nie mniej ważnym efektem prognozy jest ustalenie tempa starzenia się sieci, co pozwala

na prognozowanie zmiany jej stanu technicznego w czasie bez konieczności jej monitorowania i to w długim przedziale czasowym.

W literaturze fachowej opisane są przykłady statystycznych prognoz stanu technicznego sieci kanalizacyjnych, z których najliczniejszą grupę stanowią rozwiązania oparte na modelu *Cohort-Survival-Method*, stosowanego powszechnie dla potrzeb analiz demograficznych. Pojęcie kohorty (grupy) pochodzi ze starożytnego Rzymu, gdzie nazwę tę przypisywano jednostkom ówczesnej policji, straży pożarnej oraz oddziałom legionów rzymskich. Pojęcie to zastosował *Whelpton* [1] w roku 1949 do opisu zasad rządzących rozwojem społeczeństwa. Celem prognoz demograficznych [2] jest ustalenie liczby i struktury ludności dla określonego horyzontu czasowego, która uwzględnia takie ważne czynniki, jak: przyrost naturalny, śmiertelność oraz procesy migracyjne. Prognozy te stanowią solidną bazę do sporządzania szacunkowych planów w zakresie polityki zatrudnienia, ochrony zdrowia, rent i emerytur oraz szkolnictwa.

Model *Cohort-Survival-Method*, zwany modelem przeżycia, definiuje warunki, które umożliwiają przeżycie (przetrwanie) pewnej grupy plemiennej lub społeczeństwa. Zmodyfikowana wersja tego modelu znajduje często zastosowanie do szacowania wartości rynkowej obiektów budowlanych. Swoją przydatność do obliczania odpisów amortyzacyjnych od zrealizowanych inwestycji potwierdził program o nazwie *Perpetual-Inventory-Concept* [3, 4]. Przy zastosowaniu modelu *Cohort-Survival-Method* do prognozowania stanu technicznego sieci kanalizacyjnych można przyjąć, na podstawie analogii do procesów demograficznych, że śmierć członka badanej społeczności odpowiada zawaleniu się konstrukcji pojedynczego przewodu kanalizacyjnego lub całego fragmentu sieci. Z kolei prawdopodobieństwo śmierci pewnego człowieka interpretuje się jako prawdopodobieństwo wystąpienia awarii lub priorytetu odnowy. W przypadku każdej sieci kanalizacyjnej istnieje możliwość wyodrębnienia charakterystycznych jej fragmentów lub pojedynczych odcinków, które będą dobrze odwzorowywały różne zachowania określonych męskich albo żeńskich grup wiekowych przykładowej społeczności. Do kryteriów determinujących utworzenie kohort (grup) przewodów kanalizacyjnych, niezależnie od wieku należą: system odprowadzania ścieków, agresywność ścieków, materiał i geometria przewodu, głębokość posadowienia, poziom zwierciadła wody gruntowej, itd. W ramach poszczególnych kohort, wiekowo homogenicznych, zawsze występują odcinki, których stan techniczny ulega bardzo powolnemu pogorszeniu. I tak, po wielu latach eksploatacji sieci, pewna grupa odcinków będzie znajdowała się w bardzo dobrym stanie technicznym, natomiast inne odcinki będą wykazywały pojedyncze uszkodzenia, które należy pilnie naprawić, a jeszcze inne są do tego stopnia zniszczone, że nieodzowna jest ich rehabilitacja techniczna. Bazę danych tworzą aktualne, kompleksowe informacje dotyczące ogólnej charakterystyki sieci, jej stanu techniczno-eksploatacyjnego i stopnia jej efektywnego wykorzystania. Opisują one sieć w formie zdefiniowanych klas stanu

techniczno-eksploatacyjnego. W oparciu o wyniki inspekcji optycznej i klasyfikacji bazy danych uwzględniającej wiek odcinków sieci ustala się funkcje opisujące moment, w którym następuje przejście pewnego odcinka lub grupy odcinków sieci od jednej do następnej, gorszej klasy stanu technicznego. Podstawą tego modelu jest, w zależności od wieku, permanentne przechodzenie odcinków sieci od jednej do innej klasy stanu technicznego, aż do osiągnięcia umownej żywotności technicznej. Stąd też nazwa modelu – model starzenia się infrastruktury kanalizacyjnej.

2. *Herz-Survival-Model, Bietigheimer Modell i AQUA-WertMin*

Powyższe trzy metody prognozowania stanu technicznego sieci oparte są na matematycznym modelu *Cohort-Survival-Method*. W przypadku systemu *AQUA-WertMin* chodzi o statystyczną prognozę stanu sieci, opartą na analizie wyników niepełnozakresowej inspekcji optycznej. Autorzy tych modeli wypracowali różne kryteria, które decydowały o nadaniu pewnemu odcinkowi sieci odpowiedniej klasy stanu technicznego. Celem tych zróżnicowanych klasyfikacji jest ustalenie granic pomiędzy poszczególnymi klasami stanu technicznego oraz przede wszystkim granicy, od której wymagana jest naprawa odcinka na całej jego długości. Sprowadza się to do przeprowadzenie wymiany lub rehabilitacji technicznej przewodu, na przykład w systemie reliningu. Elementem wiążącym różne typy klasyfikacji jest podstawowe założenie klasyfikacji priorytetowej, które według wytycznej niemieckiej ATV M-149 [6] zakłada, że największy ubytek (deficyt) w ramach danego odcinka ma istotny wpływ na decyzję dotyczącą przyznania mu odpowiedniej klasy stanu technicznego.

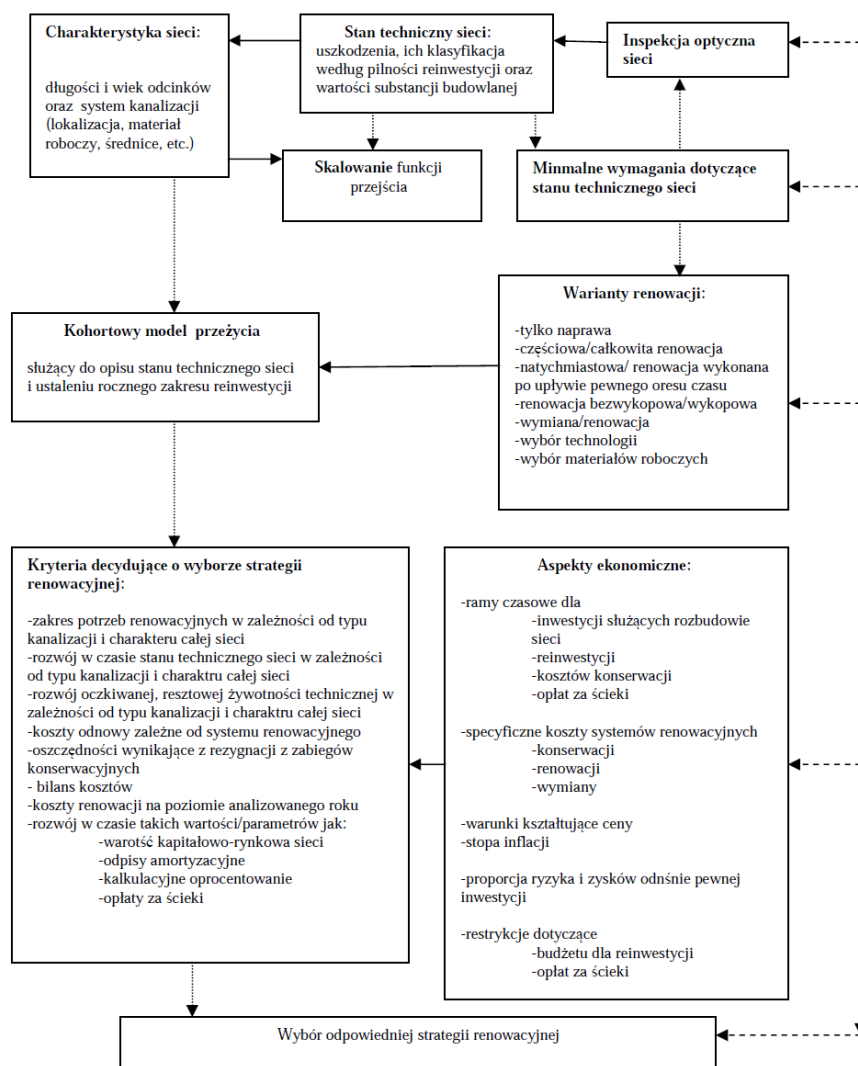
Nadrzędnym zadaniem wszystkich trzech modeli jest długofalowe planowanie kosztów zabiegów renowacyjnych, obejmujących bieżące naprawy oraz rehabilitację techniczną sieci, mające na celu utrzymanie jej w odpowiednim stanie techniczno-eksploatacyjnym. W związku z tym należy wyodrębnić z całej struktury sieci te odcinki, które w danym roku nie spełnią kryteriów minimalnego stanu technicznego. Oznacza to, że znajdują się one w końcowej fazie swojej żywotności technicznej i dlatego wymagają zabiegów renowacyjnych. Przy pomocy statystycznej prognozy stanu technicznego sieci można ustalić niezbędny budżet, który umożliwiłby przeprowadzenie inwestycji renowacyjnych i byłby niezależny od wpływu przypadkowych wyników inspekcji optycznej. U podstaw takiej właśnie prognozy powinna znajdować się strategia renowacyjna, zapewniająca wzrost wartości kapitałowo-rynkowej sieci, albo przynajmniej utrzymanie jej na odpowiednim poziomie. Pewnym anachronizmem jest eksploatacja sieci kanalizacyjnej oparta na strategii straży pożarnej, która polega na naprawie li tylko udokumentowanych i najpoważniejszych uszkodzeń. Racjonalna eksploatacja infrastruktury kanalizacyjnych wymaga takich działań i przedsięwzięć, które zapewniają jak najdłuższy okres żywotności technicznej obiektu. Osiągnięcie powyższego celu

jest możliwe poprzez poprawne prognozowanie strategii renowacyjnych, bazujących na aktualnym – empirycznym stanie technicznym sieci. Wynik oceny stanu technicznego sieci jest zależny od sposobu klasyfikacji danych empirycznych. Najbardziej popularne systemy [6, 7, 8, 9] przewidują bardzo dokładną analizę pojedynczych uszkodzeń (deficytów), posiadających charakterystyczne długości o różnym ciężarze gatunkowym, przy czym największe uszkodzenie w ramach danego odcinka istotnie wpływa na jego klasę stanu technicznego. Ostateczną decyzję dotyczącą sposobu renowacji podejmuje się na podstawie ogólnego stanu odcinka sieci, przy uwzględnieniu dodatkowych informacji, takich jak: liczba przyłączy oraz ich stan techniczny. Metodę ustalenia najbardziej korzystnej strategii renowacyjnej schematycznie przedstawiono na rys. 1. Punktem wyjścia dla tej analizy jest określona infrastruktura kanalizacyjna, stanowiąca konkretny system odprowadzania ścieków, jej wiek oraz stan techniczno-eksploatacyjny. Z uwagi na zróżnicowane tempo starzenia się sieci, można wyodrębnić z niej homogeniczne fragmenty, uwzględniając system odprowadzania ścieków, średnicę oraz materiał roboczy przewodów kanalizacyjnych.

Na podstawie dostępnej dokumentacji budowlanej ustala się wiek każdego odcinka, z dokładnością do pięciu lat. Wiek odcinka sieci ma tylko wtedy istotne znaczenie dla analizy, gdy stan techniczny sieci ulega pogorszeniu w ramach badanego okresu czasu. Progresję uszkodzeń przewodów kanalizacyjnych ustala się na podstawie przynajmniej dwóch inspekcji optycznych. Analiza ta nie obejmuje z reguły całej sieci, lecz jedynie jej pewnego fragmentu. Długi przedział czasu dzielący kolejne inspekcje optyczne sprawia, że są one przeprowadzane przy zastosowaniu różnych technik badań telewizyjnych oraz metodyk analizy uszkodzeń. W związku z tym rozszerzanie wyników tych analiz na całą sieć jest co najmniej problematyczne.

Na podstawie analizy uszkodzeń w przekroju poprzecznym przewodów kanalizacyjnych, w zależności od typu kanału, są konstruowane empiryczne funkcje starzenia się, inaczej zwane funkcjami przejścia. Następnie, będą one wykorzystywane do opisu aktualnego stanu technicznego sieci. Długość przewodów kanalizacyjnych, które w prognozowanym roku przejdą do określonego stanu technicznego sieci, umownie zwanego krytycznym, odzwierciedla konieczny zakres renowacji sieci. Na podstawie aktualnych cen powszechnie stosowanych systemów renowacyjnych można ustalić budżet zabiegów renowacyjnych dla prognozowanego roku eksploatacji sieci. Dla każdego homogenicznego fragmentu sieci można odrębnie zdefiniować kryteria tzw. stanu krytycznego, który wymaga podjęcia prac, zgodnie z odpowiednią strategią renowacyjną. W trakcie planowania odnowy należy zwracać szczególną uwagę na rozwój wartości rynkowo-kapitałowej oraz aktualny stan techniczny sieci. Jeżeli z zaplanowanej odnowy sieci będą zrealizowane tylko najpilniejsze naprawy, a kosztowne zabiegi renowacyjne przełożone na późniejszy okres czasu, to w konsekwencji takiego postępowania wzrośnie raptownie liczba napraw i zdecydowanie obniży się wartość rynkowo-

kapitałowa sieci w stosunku do odpisów amortyzacyjnych.



Rys. 1. Diagram umożliwiający ustalenie zakresu i strategii renowacji sieci kanalizacyjnej

Możliwa jest zupełnie inna strategia eksploatacyjna, przewidująca renowację profilaktyczną. Obejmuje ona swoim zakresem także te odcinki sieci, które nie osiągnęły jeszcze stanu krytycznego, tzn. ich odnowa powinna nastąpić dopiero po upływie kilku lat. Ostateczną decyzję dotyczącą momentu i sposobu renowacji jest podejmuje się z reguły na podstawie dodatkowej inspekcji optycznej, dającą się w ramach pewnej długofalowej polityki

renowacyjnej zintegrować z prognozą stanu technicznego. Ocenę strategii renowacyjnych można przeprowadzić porównując koszty pośrednie i bezpośrednie napraw oraz rehabilitacji technicznych z korzyściami, jakie wystąpią w przypadku realizacji zabiegów renowacyjnych. Do najistotniejszych korzyści można zaliczyć redukcję kosztów napraw oraz odpisów amortyzacyjnych, które są elementem składowym kalkulacji opłat za odprowadzania ścieków. Korzyści ekonomiczne z tytułu renowacji są bardzo łatwe do wykazania, na przykład w przypadku redukcji infiltracji wody gruntowej do wnętrza przewodów kanalizacyjnych.

Analizując różne typy strategii renowacyjnych należy brać także pod uwagę rozwój takich parametrów sieci, jak:

- wartość rynkowo-kapitałową,
- resztkową wartość rynkowo-kapitałową,
- resztkową średnią wartość żywotności technicznej.

Wybór najkorzystniejszej strategii renowacyjnej nie powinien być wynikiem pewnego formalnego procesu, lecz konsekwentnego porównywania korzyści i strat wynikających z zastosowania konkretnej strategii. Powinna ona prowadzić do osiągnięcia założonego celu, przy uwzględnieniu wszystkich uwarunkowań planowanej renowacji.

Statystyczny model starzenia się sieci kanalizacyjnej, bazujący na matematycznej metodzie *Cohort-Survival-Method* rozwija oraz rozbudowuje Herz i Hochstrate w ramach wspólnych badań prowadzonych na Uniwersytecie Technicznym Karlsruhe [10, 11]. Wykorzystano ten model przy opracowaniu dwóch pakietów programów: *AQUA-WertMin* [12] dla infrastruktury kanalizacyjnych oraz *KANEW* [13] specjalnie przeznaczony dla sieci wodociągowych i gazowych.

Proces starzenia się przewodów kanalizacyjnych opisuje model przeżycia jednej lub zespołu kohort, stanowiących fragment pewnej infrastruktury kanalizacyjnej. Model ten bazuje na klasyfikacji odcinków w zależności od ich stanu technicznego oraz przechodzeniu określonych elementów sieci kanalizacyjnej do gorszej klasy stanu technicznego. Kohortami w sensie sieci kanalizacyjnej są grupy wiekowe odcinków lub typy kanałów, w ramach których można wyodrębnić mniejsze grupy, biorąc pod uwagę materiał roboczy przewodu, średnicę, agresywność ścieków, głębokość posadowienia, położenie zwierciadła wody gruntowej, itd. W każdej homogenicznej grupie znajdują się odcinki, które podlegają szybszemu lub wolniejszemu procesowi starzenia się. Po okresie dłuższej eksploatacji sieci okazuje się, że stan techniczny wielu odcinków jest zadowalający, natomiast wielu jest tak zły, że konieczne jest przeprowadzenie zabiegów renowacyjnych lub ich wymiany. Na podstawie wyników inspekcji optycznej i klasyfikacji stanu technicznego buduje się funkcje przejścia od jednej do następnej, gorszej klasy stanu technicznego. Szczególne znaczenie ma funkcja przejścia do stanu, w którym dany odcinek sieci kończy swoją żywotność techniczną. Z przebiegu funkcji przeżycia można ustalić, jaki odsetek odcinków konkretnej grupy wiekowej będzie w stanie

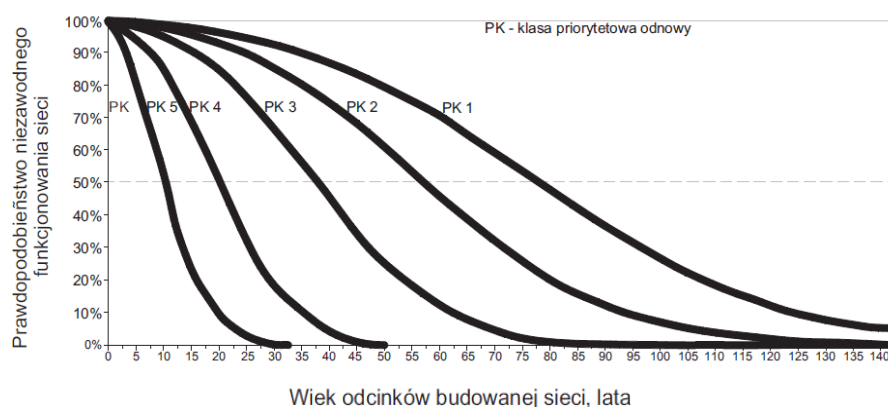
osiągnąć określoną żywotność techniczną. Odpowiednikiem tego pojęcia jest rozkład częstotliwości, względnie gęstości prawdopodobieństwa osiągnięcia przez dany odcinek sieci właśnie tej, konkretnej żywotności technicznej. Z przebiegu tych funkcji można wyprowadzić pewną zależność, która ustala liczbę odcinków, w zależności od ich stanu technicznego, pozostających w danej klasie lub przechodzących do następnej, gorszej klasy. Odsetek odcinków kończących przebywanie w danej klasie wzrasta wraz ich wiekiem. Dodatkowo można ustalić oczekiwaną wartość resztkowej żywotności technicznej, jaka pozostała do osiągnięcia stanu krytycznego. Funkcje przejścia są wyrażone za pomocą formuły [10]:

$$y(x) = \frac{A+1}{A + e^{B(x-C)}} \quad (1)$$

gdzie:

- $y(x)$ - część grupy (kohorty) odcinków sieci, będących w wieku x , wykazujących dobry stan techniczny;
- A, B, C - parametry klas stanu technicznego;
- A - bezwymiarowy parametr starzenia się odcinków sieci;
- B - parametr przejścia odcinków sieci do gorszego stanu technicznego w starszym wieku, 1/lata;
- C - wiek, do którego odcinki sieci znajdują się jeszcze w dobrym stanie technicznym, lata.

Parametry A , B i C wyznacza się na podstawie metody minimalnej sumy kwadratów odchyleń. Na rysunku 2 przedstawiono przebieg pięciu funkcji przejścia, które skonstruowano na podstawie danych i parametrów sieci kanalizacyjnej miasta Drezna w Niemczech [14].



Rys. 2. Przebieg teoretycznych funkcji przejścia dla fragmentu sieci miasta Drezna

Z przebiegu tych funkcji można ustalić ważny parametr, jakim jest średni wiek, po osiągnięciu którego 50% jednostek sieci przechodzi właśnie do gorszych klas stanu technicznego. Funkcje przejścia, tworzą w zależności od typu kanału, także podstawę do prognozowania stanu technicznego odcinków sieci, które nie zostały jeszcze zbadane telewizyjnie. Są one również bardzo przydatne do prognozowania resztkowej żywotności technicznej przy planowaniu powtórnego badania w ramach niepełnozakresowej inspekcji optycznej.

2.1 *Bietigheimer Modell*

Klaus Hochstrate jest nie tylko współautorem modeli *AQUA-WertMin* i *Herz-Survival-Model*, ale przede wszystkim autorem znanego w literaturze przedmiotu modelu o nazwie *Bietigheimer Modell* [8]. Stanowi on interesujący przykład dwuwymiarowej klasyfikacji wyników inspekcji optycznej sieci miasta Bietigheim-Bissingen w Niemczech. Klasyfikacja stanu technicznego opiera się na strategii renowacyjnej substancji budowlanej sieci połączona z indywidualną prognozą stanu, opracowaną dla każdego jej odcinka.

W modelu tym przyjęto sześciostopniową, dwuwymiarową skalę klas priorytetowych i stanu technicznego, aby na tej podstawie dokonać podziału całej sieci na 4 grupy charakteryzujące się określonymi zakresami zabiegów renowacyjnych (rys. 3).

- Grupa 1: renowacja lub wymiana całego odcinka sieci z szacowaniem kosztów na podstawie aktualnych cen budowy kanałów.
- Grupa 2: konserwacja z szacowaniem kosztów na podstawie dostępnej dokumentacji.
- Grupa 3: charakter uszkodzeń nie wymaga zabiegów renowacyjnych, a ustalenie resztkowej wartości żywotności technicznej jest zgodne z indywidualną prognozą przeprowadzoną dla każdego odcinka sieci.
- Grupa 4: odcinki sieci nie wykazują żadnych uszkodzeń i w dłuższej perspektywie czasowej nie będą konieczne zabiegi renowacyjne, natomiast resztkowa żywotność techniczna jest zgodna z funkcją starzenia się odcinka sieci.

Miasto Bietigheim-Bissingen prowadziło przez wiele lat odnowę eksploatowanej sieci zgodnie ze schematem obejmującym trzy fazy.

- Faza 1: inspekcja optyczna sieci i dokumentacja pojedynczych uszkodzeń za pomocą odpowiednich kodów według typu, zakresu oraz położenia, zgodnie z kierunkiem przepływu, jako priorytetowa klasyfikacja uszkodzeń.
- Faza 2: ustalenie dla każdego odcinka sieci priorytetowej klasy stanu technicznego (KST).
- Faza 3: renowacja odcinków posiadających klasę stanu technicznego KST1 i KST2.

Klasa stanu technicznego	Klasa priorytetowa					
	KP1	KP2	KP3	KP4	KP5	KP6
KST1	1. Konieczność przeprowadzenia kompletnej renowacji	logicznie niemożliwe				
KST2						
KST3	2. Konieczność przeprowadzenia częściowej renowacji	3. Uszkodzenia nie mające większego znaczenia				
KST4						
KST5						
KST6						
						4. Brak potrzeb renowacyjnych

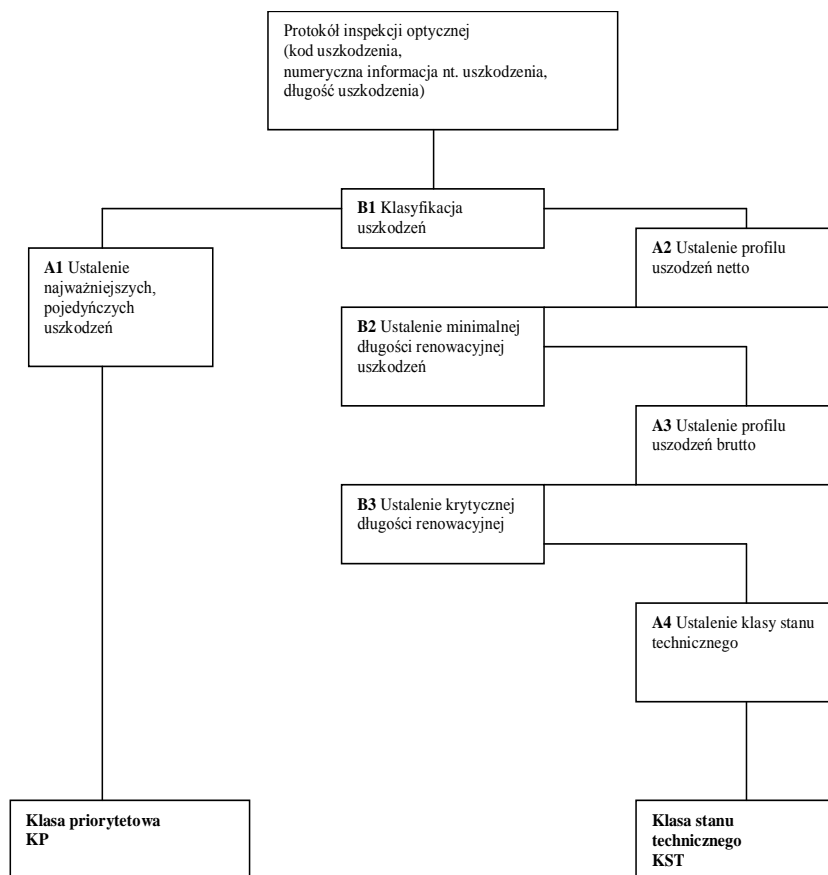
Rys. 3. Grupy stanu technicznego sieci kanalizacyjnej

Praktyka renowacyjna obejmowała wymianę i rehabilitację techniczną w postaci reliningu oraz konserwację w formie krótkich rękawów. Z doświadczeń renowacyjnych wynikało, że zabiegi konserwacyjne były stosowane w przypadkach, gdy skumulowana długość uszkodzeń była relatywnie krótka w stosunku do długości odcinka kanału. Natomiast technologia reliningu stawiała się bardzo często opłacalna w warunkach, gdy długość uszkodzeń była krótsza od 50% długości odcinka sieci. Pewien problem stanowił w tym okresie wybór rodzaju odnowy dla odcinków wymagających zabiegów renowacyjnych. Rozwiązaniem tego problemu było wprowadzenie do praktyki renowacyjnej dwuwymiarowego modelu klasyfikacji stanu technicznego, który uwzględniał przestrzenne nakładanie się poszczególnych fragmentów renowacyjnych wynikających z uszkodzeń, jakie zarejestrowano w ramach analizowanego odcinka sieci. Realizacja projektu odnowy sieci według tego modelu wymagała opracowania takich danych, jak:

- klasa priorytetowa odcinka w celu opisu priorytetu renowacji,
- klasa stanu technicznego odcinka w celu opisu resztkowej żywotności technicznej,
- profil uszkodzenia netto oraz brutto dla zobrazowania stanu odcinka sieci,
- klasyfikacja długości uszkodzeń brutto i netto jako wyznaczników wprowadzonych do bazy danych sieci.

Na rys. 4 przedstawiono klasyfikację stanu technicznego sieci, którą

oparto na trzech założeniach - od B1 do B3, prowadzących do uzyskania wyników w czterech fazach - od A1 do A4.



Rys. 4. Klasyfikacja stanu technicznego sieci kanalizacyjnej według *Bietigheimer Modell*

Wynik klasyfikacji stanu technicznego według modelu *Bietigheimer Modell* zależy bezpośrednio od trzech przyjętych założeń B1, B2 i B3, które mają wpływ na priorytet renowacyjny oraz zakres odnowy zdefiniowany dla każdego odcinka sieci. W celu weryfikacji tego modelu przeprowadzono szczegółową analizę realizowanego w roku 1996 programu renowacyjnego sieci kanalizacyjnej miasta Bietigheim-Bissingen. Wartość analizowanego zadania inwestycyjnego wynosiła dwa miliony Euro. Odnowę całych odcinków sieci zrealizowano zgodnie z opracowaną prognozą, obejmującą dwie klasy stanu technicznego KST1 i KST2. Ze stu odcinków przeznaczonych do konserwacji, tylko trzy musiały być zrehabilitowane technicznie. Dane te świadczą o dużej statystycznej dokładności prognozy, co zapewnia trafność przyszłych decyzji, dotyczących rodzaju i zakresu zabiegów renowacyjnych.

2.2 Niepełnozakresowa inspekcja optyczna sieci kanalizacyjnej

Prognoza stanu technicznego według modelu *AQUA-WertMin* wykorzystuje wyniki niepełnozakresowej inspekcji optycznej sieci kanalizacyjnej. Zasadniczym motywem tej metody jest założenie, że informację o stanie całej infrastruktury uzyskuje się na podstawie wyników otrzymanych z analizy statystycznej wybranych, charakterystycznych odcinków sieci. Norma europejska DIN EN 752-5 [15] traktuje równorzędnie obie te strategie inspekcji optycznej. Pomysł opracowania niepełnozakresowej inspekcji był wynikiem analizy sytuacji, jaka powstaje wskutek kilku następujących po sobie w odstępstwie około 10 lat, pełnozakresowych inspekcji optycznych [16]. Pewne fragmenty sieci są kilkakrotnie badane, pomimo tego że nie weszły jeszcze w fazę interwencyjną, tzn. nie muszą być rehabilitowane technicznie. Zakładając żywotność techniczną przewodów kanalizacyjnych wynoszącą 50 do 100 lat można przyjąć, że w skali jednego roku około 1÷2% długości sieci musi być poddawanych odnowie. W ramach pełnozakresowej inspekcji optycznej, w cyklu dziesięcio letnim realizuje się przeciętnie w ciągu roku badania telewizyjne obejmujące około 10% całkowitej długości sieci, z czego tylko 20% podaje się zabiegom renowacyjnym. W stosunku do pozostałych 80%, pozostających w dobrym stanie technicznym, nie są podejmowane żadne działania renowacyjne. Eksploatacja sieci kanalizacyjnej bazująca na inspekcji pełnozakresowej prowadzi do sytuacji, w której każdy odcinek jest przeciętnie pięciokrotnie kontrolowany, zanim zostanie poddany odnowie. Przyjęcie strategii renowacyjnej opartej na kontroli odcinków sieci w zależności od ich stanu, będącego wynikiem statystycznej prognozy, wydaje się być korzystną alternatywą dla inspekcji pełnozakresowej. Niepełnozakresowa inspekcja optyczna stanowi między innymi dlatego korzystne rozwiązanie, gdyż weryfikuje ona stare, niezrealizowane w wyniku braku płynności finansowej, koncepcje renowacyjne w sensie ich aktualności. W niektórych przypadkach potwierdza ona jednak prawidłowość starych rozwiązań oraz umożliwia wybór odcinków sieci do kolejnej niepełnozakresowej inspekcji. Zastosowanie niepełnozakresowych badań telewizyjnych wydaje się uzasadnione, ponieważ po zbadaniu około 20% sieci możliwe jest już wnioskowanie o jej ogólnym stanie technicznym i na tej podstawie długofalowe planowanie kompleksowych rozwiązań renowacyjnych.

Z analizy kosztów niepełnozakresowej i pełnozakresowej inspekcji optycznej dla stu kilometrowej sieci kanalizacyjnej, realizowanej w okresie 25-ciu lat wynika, że skumulowane koszty strategii niepełnozakresowej są o 60% niższe od strategii tradycyjnej [16]. Niezależnie od kosztów, strategia ta daje możliwość szybkiej oceny stanu całej sieci, która bazuje na aktualnych wynikach inspekcji. Realizacja niepełnozakresowej inspekcji optycznej obejmuje cztery fazy, którymi są:

- podział całej sieci na warstwy, czyli zespoły odcinków o podobnych charakterystykach,
- wybór z każdej warstwy pewnej grupy odcinków stanowiących próbę

losową, przeznaczonych do badań telewizyjnych,

- inspekcja optyczna oraz ocena stanu technicznego prób losowych,
- badania statystyczne wyników inspekcji i opracowanie na tej podstawie prognoz stanu technicznego dla poszczególnych grup losowych oraz ich ekstrapolacja na całą infrastrukturę kanalizacyjną.

Tworzenie warstw w ramach danej sieci powinno uwzględniać takie kryteria, jak:

- klasa obciążenia jezdni,
- materiał roboczy przewodów kanalizacyjnych,
- średnica oraz typ przekroju przewodu,
- system kanalizacji,
- warunki gruntowo-wodne,
- głębokość oraz sposób posadowienia przewodu,
- rok/dekada budowy obiektu.

Jednym z podstawowych problemów, które występują przy podziale sieci na warstwy jest ich duża liczba. Zależy ona od liczby kryteriów i specyfiki badanej sieci. Ważnym warunkiem przeprowadzenia badań statystycznych jest liczebność jednej warstwy, wynosząca minimum 30 odcinków. W wielu przypadkach konieczna jest rezygnacja z niektórych kryteriów oraz łączenie warstw wykazujących pewne podobieństwa. Kolejnym ważnym zagadnieniem jest wybór przewodów z warstwy, które powinny zostać poddane inspekcji, czyli utworzenie próby losowej. Jej minimalna liczebność powinna wynosić $12 \div 15$ odcinków [16]. Aby próba losowa była reprezentatywna, musi ona obejmować około 10÷20% odcinków całej warstwy. Wybór przewodów przeznaczonych do inspekcji musi mieć charakter losowy. Po inspekcji odcinków należących do pewnej próby losowej przeprowadza się ich klasyfikację i ustala klasę stanu technicznego, która jest wyznacznikiem stanu. Mając wyniki klasyfikacji odcinków z prób losowych, można je uogólnić dla poszczególnych warstw i następnie dla całej sieci. Obliczony dla prognozowanego rozkładu średni stan przewodów w warstwie charakteryzuje się przedziałem ufności, który opisuje w zależności od wieku, dopuszczalny rozrzut między rzeczywistością a prognozowaną wartością.

Podstawy niepełnozakresowej metody inspekcji opracowali w Niemczech przez *Herz* i *Hochstrate* w drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Metoda ta powinna prawie całkowicie wyprzeć inspekcję konwencjonalną, szczególnie w przypadku dużych aglomeracji miejskich. Szersze jej zastosowanie ograniczyło się jednak do kilku eksperymentalnych projektów, które zrealizowano między innymi w takich miastach, jak: Drezno, Braunschweig oraz Ingolstadt. Badania te zakończono po wykonaniu pierwszej fazy inspekcji, obejmującej około 20% wszystkich odcinków sieci. W literaturze fachowej nie ma żadnej wzmianki na temat pełnego zastosowania tego typu inspekcji, która polegałaby na selektywnym zbadaniu całej sieci w dłuższym przedziale czasowym. W tej sytuacji niemożliwe jest przeprowadzenie pełnej weryfikacji zrealizowanych do tej pory projektów.

Zastosowanie tej metody niesie ze sobą wiele niebezpieczeństw, które sprawiają, że duże miasta niemieckie, pomimo tego że nie zakończyły jeszcze pierwszej pełnozakresowej inspekcji, nie zdecydowały się na selektywną wersję badań telewizyjnych.

Aspekt ekonomiczny, który w przypadku dużych aglomeracji ma istotne znaczenie, nie jest oczywiście decydującym czynnikiem. Porównując koszty obu systemów badań telewizyjnych dla pewnej sieci o długości 50 km na przestrzeni około trzydziestu lat, można uzyskać oszczędności rzędu 250.000 Euro. Statystyczna prognoza stanu technicznego, oparta na wynikach niepełnozakresowej inspekcji umożliwia długofalową i racjonalną politykę inwestycyjną oraz kalkulację opłat, pokrywających koszty eksploatacji sieci. Zasadniczym czynnikiem powodującym, że eksploataторы głównie wielkomiejskich infrastruktur kanalizacyjnych, z dużym dystansem podchodzą do tej metody, jest niebezpieczeństwo popełnienia błędów w pierwszej fazie inspekcji obejmującej próbę losową. Wyniki tych wstępnych badań, zależne w dużej mierze od poziomu techniki, a częściowo od subiektywnej oceny operatora oraz metodyki ich klasyfikacji, będą miały decydujące znaczenie w przypadku rezultatów statystycznej prognozy stanu technicznego całej sieci, jak również dalszego przebiegu niepełnozakresowej inspekcji. Program *AQUA-WertMin*, który umożliwia przeprowadzenie prognozy stanu technicznego oraz niepełnozakresowej inspekcji sieci kanalizacyjnej, jest kosztowną inwestycją. Jego autorzy, oprócz ogólnych informacji zawartych w wielu publikacjach, nie prezentują żadnych szczegółów dotyczących przede wszystkim wiarygodności ekstrapolacji wyników dużej próby losowej na całą sieć, aplikacyjności metody oraz rzeczywiście udokumentowanych oszczędności. Powyższa sytuacja stała się przyczyną tego, że niemieckie Ministerstwo Kształcenia i Badań Naukowych pn. Bundesministerium für Bildung und Forschung (bmb + f) włączyło do swojego programu badań projekt obejmujący szczegółową analizę niepełnozakresowej inspekcji optycznej dla potrzeb statystycznego prognozowania stanu technicznego sieci kanalizacyjnych [17]. W ramach tego projektu, zrealizowanego przez Wyższą Szkołę Techniczną z Akwizgranu, objęto badaniami statystycznymi ponad 35.000 odcinków sieci kanalizacyjnych. Wyniki tych badań wdrożono w przypadku trzech, zdecydowanie różniących się od siebie struktur kanalizacyjnych. Realizacja tego projektu umożliwiła wyjaśnienie kilku kwestii dotyczących praktycznego zastosowania niepełnozakresowej inspekcji optycznej, które nie zostały rozwiązane w poprzednich opracowaniach. Chodziło głównie o zdefiniowanie kryteriów warunkujących ekonomiczne zastosowanie tej strategii i wykazanie jej wiarygodności oraz aplikacyjności [18]. Program badań statystycznych objął swoim zakresem typowe dla tego typu inspekcji etapy:

- ustalenie wielkości generalnej próby losowej,
- wyodrębnienie z całej sieci kilku warstw w zależności od warunków limitujących jej stan techniczny oraz utworzenie prób losowych reprezentujących poszczególne warstwy,

- inspekcja optyczna i klasyfikacja stanu generalnej próby losowej,
- ekstrapolacja wyników klasyfikacji stanu na całą sieć,
- ustalenie lokalizacji i zakresu odnowy oraz następnej inspekcji optycznej.

2.2.1 Ustalenie wielkości prób losowych

Zasadniczym celem inspekcji niepełnozakresowej jest ekstrapolacja chwilowego rozkładu klas stanu technicznego pewnej próby losowej na całą sieć kanalizacyjną. Obliczenia tego typu są związane z ryzykiem, które przy zapewnionej losowości próby może być poddane kwantyfikacji. W związku z tym, ryzyko zmniejsza się wraz z wielkością próby losowej, jednak wielkość próby losowej jest tak samo ważna, jak wielkość tolerowanego ryzyka. W celu kwantyfikacji ryzyka należy wyznaczyć przedział ufności, w przypadku którego procentowy udział p (populacja) pewnej klasy stanu technicznego w stosunku do całej sieci jest nieznaną wartością, przy zadanej pewności wynoszącej $(1 - \alpha)$. Dla potrzeb obliczeń niepełnozakresowej inspekcji optycznej można przyjąć, że typowa wartość prawdopodobieństwa błędu $\alpha = 0,05$ (5%), co jest równoznaczne z pewnością wynoszącą $(1 - \alpha) = 0,95$ (95%). Oznacza to, że prognozowane wartości w 95% nie wykraczają poza przedział ufności. Przedział ufności według *Bortz'a* [19] wyznacza się z zależności:

$$\Delta K_i = \pi_o - \pi_u = \frac{n}{n + z^2} \left[p + \frac{z^2}{2n} + z \sqrt{\left(\frac{p - p}{n} + \frac{z^2}{4n^2} \right)} \right] - \frac{n}{n + z^2} \left[p + \frac{z^2}{2n} - z \sqrt{\left(\frac{p - p}{n} + \frac{z^2}{4n^2} \right)} \right] \quad (2)$$

gdzie: ΔK_i - przedział ufności przyjętego prawdopodobieństwa błędu,
 π_o, π_u - górna oraz dolna granica przedziału ufności,
 n - liczba odcinków próby losowej,
 z - wartość rozkładu normalnego,
 p - populacja danej klasy stanu technicznego.

Przeprowadzone dla powyżej zdefiniowanych warunków badania statystyczne wykazały, że w celu uzyskania wysokiej jakości prognozy rozkładu klas stanu technicznego konieczne jest, aby generalna próba losowa składała się przynajmniej z 500 odcinków. Natomiast próba losowa reprezentująca każdą warstwę powinna liczyć nie mniej niż 100 odcinków. Wymagana liczebność prób losowych jest pięciokrotnie większa od założeń, które poczyniono we wcześniejszych opracowaniach.

2.2.2 Kreowanie warstw w ramach badanej sieci

Infrastruktury kanalizacyjne są obiektami, które powstawały na

przestrzeni wielu dziesiątek, a nawet setek lat. W tak długich przedziałach czasu zmieniała się technika budowy kanałów, materiał roboczy przewodów, elementy uszczelniające oraz ogólny poziom techniki. Dlatego sieci kanalizacyjne są konglomeratami składającymi się z dużej liczby odcinków o zróżnicowanych charakterystykach i wieku, które w ciągły sposób poddawane są wymuszeniom zewnętrznym i wewnętrznym. W tej sytuacji wyodrębnienie z badanej sieci homogenicznych warstw odcinków ma dla prognozy stanu sieci decydujące znaczenie. Przeprowadzone badania w oparciu o statystyczne testy, takie jak: *U-Test* według *Wilcoxon'a*, *Mann'a*, *Withney'a* oraz *H-Test* według *Kruskal'a* i *Wallis'a* [20] wykazały, że największy wpływ na klasę stanu technicznego każdego odcinka sieci mają kolejno następujące cechy:

- wiek i cecha ta ma bezsprzecznie największy wpływ na stan techniczny odcinka,
- średnica przewodu,
- rodzaj kanalizacji,
- głębokość posadowienia,
- warunki gruntowo-wodne,
- materiał roboczy przewodu.

Operując powyższymi cechami należy wyodrębnić z całej badanej sieci tylko najważniejsze warstwy, ponieważ ich liczba implikuje wielkość generalnej próby losowej.

2.2.3 Inspekcja i klasyfikacja stanu technicznego odcinków generalnej próby losowej

Po przeprowadzeniu analizy cech badanej sieci i wyodrębnieniu warstw następuje ustalanie wielkości prób losowych reprezentujących każdą warstwę. Przy tej okazji należy brać pod uwagę takie aspekty, jak to, że:

- ustalanie prób losowych musi spełniać kryterium przypadkowości, aby zagwarantować stosowalność metod statystycznych,
- uwarunkowania logistyczne oraz ekonomiczne powinny determinować planowanie inspekcji optycznej.

Upřednio przeprowadzone inspekcje optyczne nie mogą mieć wpływu na ustalanie prób losowych, ponieważ nie będą one reprezentatywne, co z kolei negatywnie wpłynie na jakość prognozy.

2.2.4 Ekstrapolacja rozkładu klas stanu technicznego na całą badaną sieć

Rozkład klas stanu technicznego pewnej warstwy odpowiada rozkładowi klas próby losowej. Granice przedziału ufności oblicza się dla każdej populacji zgodnie z równaniem (3). Prognozę udziału poszczególnych populacji w ramach całej sieci, składającej się z wielu populacji, na przykład takich jak: pojedyncze grupy wiekowe, pojedyncze fragmenty aglomeracji miejskiej, itp., można obliczyć według wzoru

$$p = \sum_{j=1}^k g_j \cdot p_j \quad (3)$$

gdzie:

- g_j = N_j/N ,
- p – udział populacji w całej sieci,
- p_j – udział populacji w warstwie j ,
- g_j – udział warstwy w całej sieci,
- N_j – liczba odcinków należących do warstwy j ,
- N – liczba odcinków całej sieci.

Rzeczywisty stan techniczny pewnego odcinka może być stwierdzony tylko na podstawie kontroli w formie inspekcji optycznej. Wyniki prognozy podają dla pojedynczych warstw wielkość populacji poszczególnych klas stanu technicznego. Im większa jest populacja odcinków prezentujących krytyczny stan w pewnej warstwie, wymagający natychmiastowej lub krótkoterminowej odnowy, tym większa jest konieczność oraz pilność ustalenia ich stanu technicznego.

Przedstawione powyżej wyniki badań niepełnozakresowej inspekcji optycznej są oparte na bardzo dużej próbie, która objęła swoim zakresem aż 35.000 odcinków sieci kanalizacyjnej i dlatego mogą być one uznane za wiarygodne. Podjęta próba nadania tej metodzie pewnego nowego wymiaru poprzez opracowanie uwarunkowań jej praktycznego zastosowania stanowi duże osiągnięcie naukowo-techniczne. Ustalenie wielkości generalnej próby losowej wykazuje jednoznacznie, że zastosowanie tej metody jest uzasadnione w przypadku sieci o długości przekraczającej 100 km. Niepełnozakresowa inspekcja optyczna stanowi nadal interesującą alternatywę badań telewizyjnych, szczególnie w przypadku dużych obiektów, o długościach większych od 500 km. Pomimo tego, że od opublikowania tych badań minęło już kilka lat, to zarządzający sieciami dużych miast niemieckich nadal sceptycznie podchodzą do tej metody i kontynuują wcześniej rozpoczętą inspekcję pełnozakresową.

3. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano przykład prognozy stanu technicznego sieci kanalizacyjnej, opartej na matematycznym modelu statystyczno-stochastycznym, a reprezentowanym przez model *Survival-Cohort-Method*. W tym modelu bazę stanowią wyniki pełnozakresowej lub niepełnozakresowej inspekcji optycznej.

Badania statystyczne wyników inspekcji optycznej prowadzą do wyznaczenia teoretycznych funkcji niezawodności (przeżycia) dla poszczególnych klas stanu technicznego. Ważną czynnością poprzedzającą badania jest klasyfikacja wyników badań telewizyjnych, która prowadzi do ustalenia kilku stanów techniczno-eksploatacyjnych sieci, od stanu najlepszego do stanu najgorszego.

Szczegóły techniczne dotyczące stosowanych w praktyce klasyfikacji wyników badań telewizyjnych sieci kanalizacyjnych zostaną, z uwagi na kompleksowość tego zagadnienia, przedstawione w jednej z kolejnych publikacji.

Literatura

- [1] Whelpton P. K.: Cohort Analysis of Fertility, American Sociological Review 1949, Band 14.
- [2] Statistisches Bundesamt, Wirtschaft und Statistik, 4/1986.
- [3] Goldsmith R., A.: Perpetual Inventory of National Wealth, The Review of Income and Wealth, Vol. 14, New York 1952.
- [4] Kaiser W.: Die Bestandskontenreihe im System der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnung, Band 64, Duncker & Humbolt, Berlin 1972.
- [5] Baum L. E., Petrie T.: Statistical inference for probabilistic functions of finite state Markov chains, Statistic, Vol. 37, No. 6 (1966), 1554–1563.
- [6] Merkblatt ATV-M 149, Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, April 1999.
- [7] Hochstrate K.: Zustandsbewertung nach Sanierungspriorität, Substanzwert und Funktionsgerechtigkeit als Grundlage einer prognosegestützten Inspektion und einer vorausschauenden Sanierungsplanung. In Tagungsband des 6. Internationalen Kongress Leitungsbau, 538-547, Hamburg 2000: CCH.
- [8] Hochstrate K.: Zustandsorientierte Zustandsklassifizierung von Kanälen – Das Bietigheimer Modell, Korrespondenz Abwasser 1999 (46) Nr 2, 213-217.
- [9] 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.
- [10] Herz R.: Alterung und Erneuerung von Infrastrukturbeständen – Kohortenüberlebensmodell, Jahrbuch für Regionalwissenschaft 14/15, 1995, 5-29.
- [11] Herz R., Hochstrate K.: Erneuerungsstrategien für städtische Infrastrukturnetze, Jahrbuch für Regionalwissenschaft 8, 1987, 67-105.
- [12] AQUA-WertMin Software: www.aqua-ingenieure.de.
- [13] KANEW Software: www.tu-dresden.de/biwiss/stadtbau/KANEW.html.
- [14] Bauer R., Hörold S.: Verbesserte Inspektionsplanung durch Alterungsprognose von Abwasserkanaltypen, Korrespondenz Abwasser 2001 (48) Nr 1, 24-40.
- [15] DIN EN 752-5, Entwässerungssysteme außerhalb von Gebäuden, Teil 5: Sanierung, 1997.
- [16] Hertwig E., Krug R.: Selektive Inspektionsstrategie und statistisch/prognostische Sanierungsmodelle, Korrespondenz Abwasser 1999 (46) Nr 11.
- [17] Müller K., Dohmann M.: Entwicklung eines allgemein anwendbaren Verfahrens zur selektiven Erstinspektion von Kanalisationen und Anschlussleitungen, Abschlussbericht Teil C: Handlungsanleitung, Institut für Siedlungs wasserwirtschaft der RWTH Aachen(ISA), 2002.
- [18] Müller K.: Strategien zur Zustandserfassung von Kanalisationen, Dissertation, Fakultät für Bauingenieurwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, Aachen, 2005.

- [19] Bortz J.: Lehrbuch der empirischen Forschung für Sozialwissenschaftler, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg - New York, 1984.
- [20] Sachs L.: Angewandte Statistik, Anwendung statistischer Methoden, 7. Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1992.

STATISTICAL-STOCHASTIC MODEL OF SEWAGE NET TECHNICAL CODITION PROGNOSIS

S u m m a r y

The article deals with methods of statistical and stochastic forecasting of sewage networks technical condition. Presented prognosis was prepared on basis of statistical model *Cohort-Survival-Method*. Results of optical inspection were used as data base for this prognosis.