

Autoreferat

1. Andrzej Raganowicz

2. Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

- Magister inżynier inżynierii środowiska w zakresie inżynierii wodnej i morskiej, Politechnika Gdańska, Instytut Hydrotechniki, 1978.
- Regierungsbaumeister, dwuletnie studium podyplomowe w zakresie gospodarki wodnej, Bawarskie Ministerstwo Spraw Wewnętrznych, Monachium 1992.
- Rzecznik ATV/DWA w zakresie renowacji sieci wodnych, kanalizacyjnych oraz gazowych, Drezno 2000.
- Doktor nauk technicznych w zakresie budownictwa, Politechnika Wrocławska, Instytut Inżynierii Łądowej, Wrocław 2010, tytuł rozprawy doktorskiej – „Metodyka prognozowania stanu technicznego sieci kanalizacyjnej”.

3. Informacje dotyczące zatrudnienia w jednostkach naukowych oraz gospodarki polskiej/niemieckiej

04.78÷08.80	Stażysta w Przedsiębiorstwie „Energopol 4“ w Gdańsku,
09.80÷12.87	Technolog/Specjalista w Katedrze Geotechniki Instytutu Hydrotechniki Politechniki Gdańskiej,
12.92÷01.94	Pracownik techniczno-naukowy Urzędu Gospodarki Wodnej w Donauwörth,
02.94÷07.94	Projektant biura projektów „Dippold und Gerold“ w Dillingen,
08.94÷12.96	Projektant biura projektów „Arnold“ w Kissing,
01.97÷12.97	Prowadzenie własnej firmy budowlanej,
01.98÷aktualnie	Szef techniczny Związku Celowego eksploatującego sieć kanalizacyjną, pn. Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal, Taufkirchen.

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)

Tytuł osiągnięcia naukowego

„Kryteria i metodyka oceny stanu technicznego sieci kanalizacyjnej”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2015.

Wprowadzenie

Monografia - „Kryteria i metodyka oceny stanu technicznego sieci kanalizacyjnej” jest moim największym dotychczasowym osiągnięciem naukowym i stanowi podsumowanie wieloletnich badań będących próbą odpowiedzi analitycznej na pytanie dotyczące racjonalnej eksploatacji liniowej infrastruktury kanalizacyjnej. Prognozowanie stanu technicznego sieci kanalizacyjnej ma na celu optymalizację jej zarządzania. Miasta europejskie wydają w skali jednego roku kilka bilionów euro na odnowę systemów wodociągowo-kanalizacyjnych. W następnych dekadach należy liczyć się z dalszym wzrostem tych kosztów z uwagi na systematycznie postępującą destrukcję infrastruktury miejskiej. Prognozowanie stanu technicznego obiektów kanalizacyjnych w celu optymalizacji zakresu odnowy będącej najważniejszym komponentem eksploatacji jest skutecznym sposobem zahamowania tych destrukcyjnych procesów oraz racjonalnego finansowania zabiegów rehabilitacji technicznej.

Cel i zakres pracy

Głównym celem pracy jest sformułowanie metodologii prognozowania stanu technicznego sieci bytowo-gospodarczej przy uwzględnieniu różnych warunków brzegowych jej funkcjonowania. Na podstawie opracowanej prognozy ustala się faktyczny stan techniczny obiektu liniowego, który pozwala na jego racjonalną eksploatację przez efektywniejsze planowanie zakresu konserwacji oraz odnowy. Ekonomiczna eksploatacja obiektu kanalizacyjnego ma istotne znaczenie w dobie

zmniejszającego się poboru wody powodującego redukcję zrzutu ścieków do systemów kanalizacyjnych. Skutkiem tych tendencji jest kurczenie się zasobów finansowych, jakie mają do dyspozycji eksploatatorzy sieci. Ważnym i drogim komponentem eksploatacji sieci kanalizacyjnej jest jej odnowa. Jakość i zakres realizowanej odnowy mają istotne znaczenie dla zapewnienia pełnej dyspozycyjności obiektu kanalizacyjnego w okresie założonej żywotności technicznej zdefiniowanej przez szczelność, nośność i funkcjonalność.

Badania modelowe stanu techniczno-eksploatacyjnego sieci odprowadzającej ścieki ze zlewni ciekłu Hachinger Bach umożliwiły sformułowanie wiodącego celu pracy, a uzyskane wyniki charakteryzuje głęboki aspekt aplikacyjny o znaczeniu poznawczym.

Zastosowanie modelu Weibulla w połączeniu z metodą Monte-Carlo pozwala ustalać krytyczny stan techniczno-eksploatacyjny liniowego obiektu kanalizacyjnego na podstawie danych empirycznych i wnioskować o rzeczywistej kondycji technicznej badanego obiektu. Takie podejście daje możliwość szczegółowego wglądu w wiele aspektów funkcjonowania sieci, co ma strategiczne znaczenie poznawcze jak również wysokie walory aplikacyjne oraz spełnia oczekiwania zarządzających obiektami liniowymi.

Nowatorskie połączenie rozkładu Weibulla z metodą Monte-Carlo zapewnia oryginalne i dokładniejsze opisanie posiadanego materiału empirycznego przy prowadzeniu analizy stanu techniczno-eksploatacyjnego liniowych obiektów infrastruktury miejskiej i stanowi istotny postęp w badaniach, których celem była praktyka eksploatacyjna. Natomiast zastosowanie metody Monte-Carlo wpływa na znaczne poszerzenie bazy danych i pozwala w istotny sposób uwiarygodnić prawidłowość oraz znaczenie wyników badań w zakresie teoretycznym.

Zaproponowana metodyka upraszcza całą procedurę prognozowania i analizowania stanu techniczno-eksploatacyjnego liniowych obiektów infrastruktury miejskiej. Okazuje się, że nawet przy niewielkiej bazie danych pozwala ona na uzyskanie miarodajnej oceny rzeczywistego stanu obiektu przy uwzględnieniu różnych warunków jego funkcjonowania. Zastosowanie opracowanej metodyki umożliwi optymalizację eksploatacji różnych systemów infrastruktury miejskiej polegającej na dążeniu do maksymalnego wydłużenia okresu ich pełnej dyspozycyjności przy wykorzystaniu minimalnych nakładów finansowych.

Zakres pracy obejmuje zagadnienia związane z modelowaniem statystyczno-stochastycznym krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego sieci kanalizacyjnej w warunkach jej funkcjonowania w zlewni ciekłu Hachinger Bach. Bazą danych zrealizowanych badań jest dokumentacja pełnozakresowej inspekcji optycznej. Krytyczny stan techniczno-eksploatacyjny zdefiniowano jako granicę między obszarem dyspozycyjności sieci zarezerwowanym w zakresie ujmującym zabiegi o charakterze konserwacyjnym a obszarem przewidzianym do stosowania technik i technologii rehabilitacji technicznej. Granica ta wyznacza bardzo ważny punkt na skali czasu eksploatacji liniowych obiektów infrastruktury miejskiej, ponieważ od niego rozpoczyna się przyspieszony wzrost uszkodzeń, prowadzący do nieodwracalnych skutków a niejednokrotnie nawet do katastrofy budowlanej.

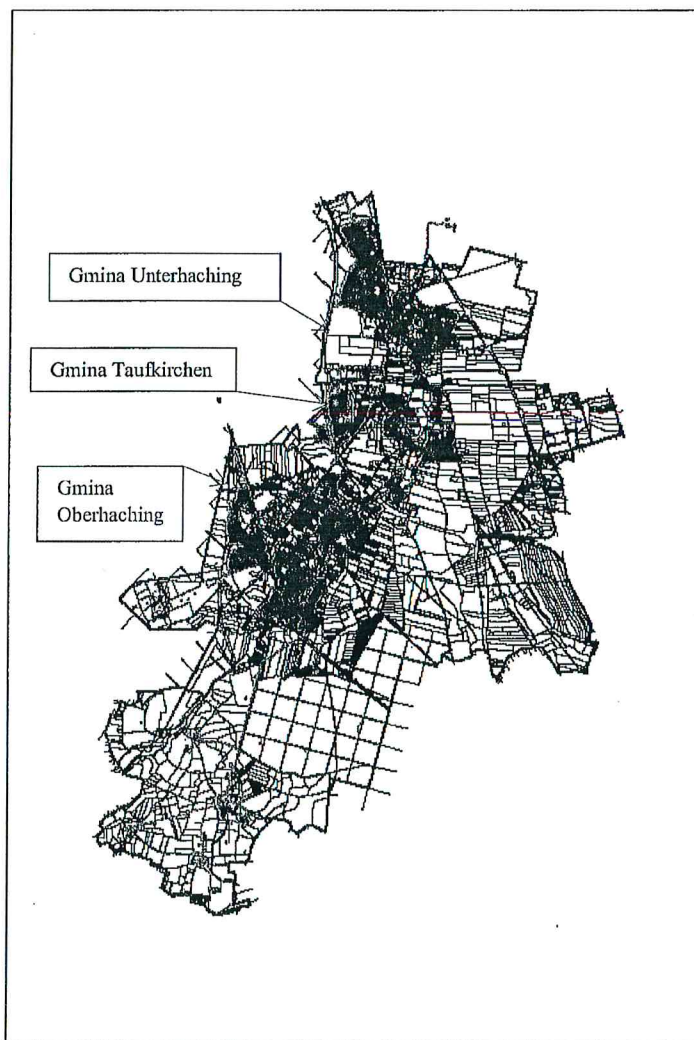
W fazie badań statystycznych zastosowano dwuparametrowy rozkład Weibulla i prostopadłą metodę momentów do teoretycznej interpretacji materiału empirycznego. W ramach tej fazy uwzględniono niejednorodne warunki funkcjonowania sieci: materiał z jakiego wykonano przewody, ich rolę w obiekcie liniowym, wpływ głębokości posadowienia przewodów oraz wody gruntowej.

Natomiast fazę modelowania stochastycznego krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego wykonano stosując analogiczny schemat jak przy modelowaniu statystycznym, przy czym do estymacji parametrów Weibulla zastosowano metodę Monte-Carlo. Symulacje matematyczne umożliwiły stochastyczne zwiększenie liczebności prób losowych oraz dokładności wyników badań. W dyskusji wykorzystano analizę struktury wieku przewodów oraz charakterystykę techniczno-technologiczną sieci.

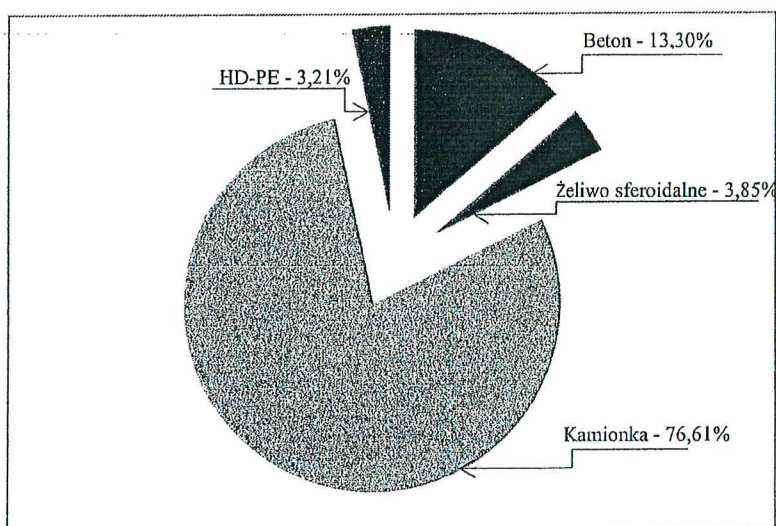
Ogólna charakterystyka obiektu badań

Obiektem badań jest sieć kanalizacyjna eksploatowana przez Związek Celowy pn. Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal. Odprowadza ona ścieki bytowo-gospodarcze trzech gmin bawarskich – Oberhaching, Unterhaching oraz Taufkirchen zlokalizowanych w zlewni ciekłu Hachinger Bach na południowym wschodzie Monachium. Budowę tej infrastruktury kanalizacyjnej rozpoczęto w połowie lat pięćdziesiątych ubiegłego stulecia (rys. 1). Do 2000 r., w którym wykonano pierwszą pełnozakresową inspekcję optyczną, sieć ta była budowana zgodnie z normami

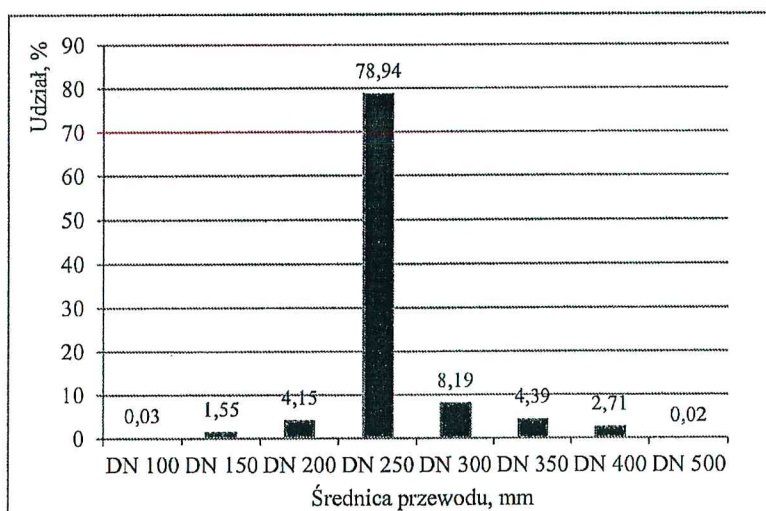
opracowanymi przez miasto Monachium pn. Münchner Normalien [1]. 76,61% łącznej długości sieci tworzą przewody wykonane z niemieckiej kamionki (rys. 2). Udział przewodów betonowych wynosi zaledwie 13,30%, a sporadycznie reprezentowanymi materiałami są polietylen HD-PE (3,21%) oraz żeliwo sferoidalne (3,21%). Strukturę średnic przewodów kamionkowych przedstawiono na rysunku 3. Wynika z niego, że dominującą średnicą wewnętrzną jest DN 250 mm. Münchner Normalien przewidywały budowę przewodów kanalizacyjnych w zakresie średnic do DN 500 mm wyłącznie z kamionki niemieckiej zasypywanych tłuczniem o uziarnieniu 4÷8 mm (pn. Riesel). Wybór tego typu zasypki był podyktowany warunkami gruntowymi występującymi na terenie zlewni ciek Hachinger Bach w postaci żwirów gruboziarnistych częściowo przewarstwionych ilami i glinami.



Rys. 1. Infrastruktura kanalizacyjna w zlewni ciek Hachinger Bach [2]



Rys. 2. Struktura materiałowa sieci w zlewni ciek Hachinger Bach



Rys. 3. Struktura średnic kamionkowych przewodów kanalizacyjnych

Oprócz przewodów kamionkowych w skład sieci wchodzi także trzy kolektory betonowe. Dwa z nich, kolektor wschodni i zachodni, przebiegają równolegle do siebie z południa na północ zlewni ciek Hachinger Bach. Trzeci kolektor stanowi prostopadłe przyłącze do kolektora wschodniego, którym odprowadzane są ścieki z najbardziej na wschód wysuniętego obszaru gminy Unterhaching. Kolektory są konstrukcjami betonowymi wykonanymi z betonu B10, wylewanego w technologii „na mokro”. Przewody o podwyższonym profilu jajowym mają wymiary DN 600/1100 mm a o normalnym profilu DN 800/1200 oraz 900/1350 mm.

Infrastruktura kanalizacyjna w zlewni ciek Hachinger Bach odprowadza ścieki bytowo-gospodarcze spełniające parametry fizyko-chemiczne zdefiniowane w niemieckich wytycznych dotyczących ścieków bytowo-gospodarczych. Dlatego mogą być one wprowadzane do sieci bez uprzedniego podczyszczenia [3]. Ponieważ Hachinger Bach jest małym ciekim w sensie hydrologicznym, konieczne było podłączenie całej infrastruktury kanalizacyjnej do sieci miasta Monachium.

Serie utworów żwirowych występujących w podłożu gruntowym umożliwiają rozsączanie wód opadowych przez studnie rozsączające. Korzystna morfologia zlewni ciek Hachinger Bach sprawia, że sieć ma charakter grawitacyjny, a średnie spadki podłużne przewodów kanalizacyjnych wynoszą 3÷5‰. Głębokość posadowienia przewodów kanalizacyjnych wynosi od 2 do 4 m poniżej poziomu

terenu. Z uwagi na lokalnie występujące zagłębienia terenu konieczna była budowa 10 stacji pomp wraz z przewodami transportowo-ciśnieniowymi. Siedem stacji pracuje w systemie pneumatycznym.

Powyższe dane wskazują na dużą jednorodność badanej sieci kanalizacyjnej z uwagi na materiał z jakiego zostały wykonane przewody, ich średnicę oraz głębokość posadowienia.

Związek Celowy eksploatuje sieć kanalizacyjną w oparciu o bank danych operujący w systemie Magellan [4]. Zapewnia on bezpośrednie połączenie między bazą danych a grafiką. W latach 2000÷2003 udało się Bawarskiemu Urzędowi Geodezji dokonać pomiaru całego terytorium Bawarii i opracować numeryczną mapę parceli (pn. Digitale Flurkarte). Dzięki ciągłemu rozwojowi banku danych Magellan, który od ponad roku pracuje online, możliwe jest ściąganie przez internet różnych map tematycznych, np.: mapę izohips wody gruntowej, geologiczną, terenów zielonych itp. Mapy te są niezbędne przy planowaniu rozbudowy sieci kanalizacyjnej.

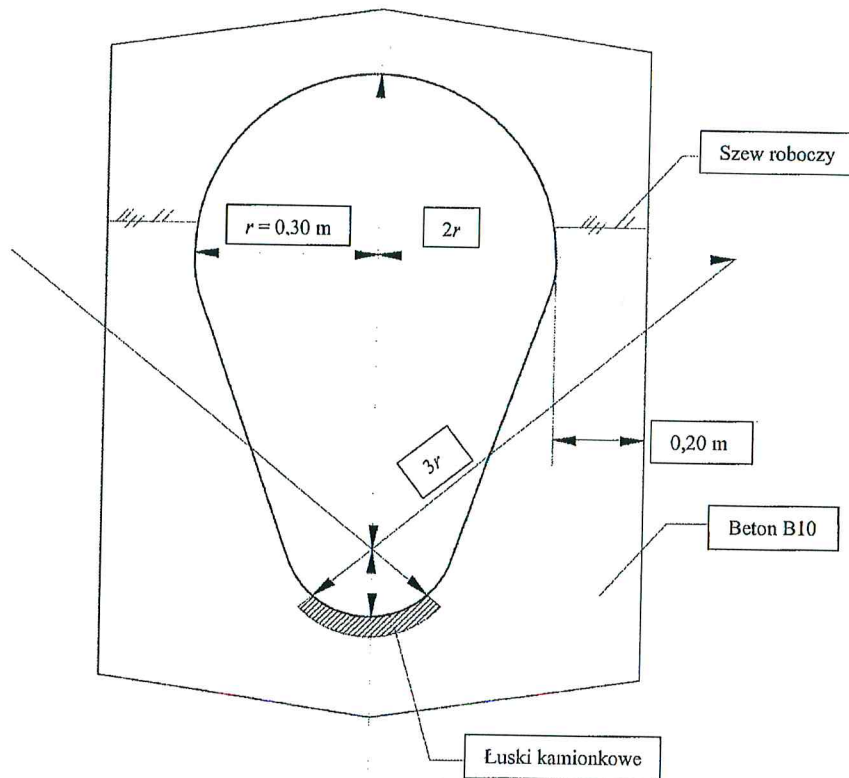
Po zakończeniu pierwszej pełnozakresowej inspekcji optycznej sieci wszystkie wyniki badań wprowadzono do banku danych. Analogicznie postąpiono w przypadku dokumentacji odnowy sieci gminnych. Od 15 lat bank danych stanowi ważny instrument eksploatacyjny, który ma duże znaczenie również przy planowaniu renowacji sieci.

Zlewnia ciekłu Hachinger Bach jest zlokalizowana na obszarze formacji geologicznej, zwanej Monachijską Platformą Żwirową (pn. Münchner Schotterebene). Jest ona zbudowana ze żwirów gruboziarnistych częściowo przewarstwionych ilami i glinami. Jej obrys ma kształt trójkąta o powierzchni około 1500 km². Münchner Schotterebene jest nachylona w kierunku z południowego zachodu na północny wschód, a różnica wysokości wynosi około 300 m. Maksymalna miąższość utworów żwirowych osiąga 100 m. Münchner Schotterebene powstała w ramach trzech kolejnych zlodowaceń: Mindeleiszeit, Rißeiszeit oraz Würmeiszeit mających decydujący wpływ na jej budowę geologiczną [5].

Główny kierunek przepływu wód gruntowych ma miejsce z południa na północ i jest zgodny z kierunkiem nachylenia całej platformy. Zwierciadło wody gruntowej w obrębie Monachijskiej Platformy Żwirowej występuje na głębokości 1÷13 m od poziomu terenu. 30% sieci funkcjonuje w strefie wahań zwierciadła wody gruntowej. Problem ten występuje w gminie Oberhaching oraz Taufkirchen. W gminie Unterhaching przewody kanalizacyjne są posadowione średnio 3 m od poziomu terenu, a woda gruntowa występuje na głębokości 7 m.

Kolektory betonowe stanowią główne ciągi transportu ścieków. Długość przewodów o podwyższonym profilu jajowym (DN 600/1100 mm) wynosi 10 886 m, a przewodów o normalnym profilu jajowym (DN 800/1200 i DN 900/1350 mm) – 10 529 m. W sumie stanowią one 13% długości całej sieci, bez uwzględnienia przyłączy. Kanały betonowe, zgodnie z zasadami ujętymi w Münchner Normalien [1], budowano z betonu nieuzbrojonego B10 wylewanego w technologii „na mokro”. W uprzednio przygotowanym wykopie betonowano najpierw dolny fragment kanału jako jedną sekcję o długości 1,0÷1,5 m a następnie jego sklepienie (rys. 4). W wyniku tak przyjętej technologii powstawały dwa podłużne szwy robocze na długości całego kanału oraz radialne na końcu każdej sekcji. Szwy robocze po oczyszczeniu zacierano zaprawą cementowo-piaskową [6], a dno kanału wykładano płytkami klinkerowymi. Studnie rewizyjne wykonano także z betonu B10 wylewanego „na mokro” oraz połączono bezprzegubowo z przewodami. Monachijskie zasady budowy kanałów nie przewidywały dla tej sztywnej konstrukcji żadnej dylatacji, co poważnie utrudniało jej późniejszą eksploatację. Funkcjonowanie każdego przewodu kanalizacyjnego w podłożu gruntowym związane jest z oddziaływaniem na niego określonej wypadkowej naprężeń. Ma ona negatywny wpływ na najsłabsze elementy konstrukcji - szwy robocze.

Powyższe wady projektowo-konstrukcyjne utrudniają eksploatację kolektorów betonowych funkcjonujących w strefach wahań wody gruntowej [7]. Dochodzi w nich do infiltracji wody gruntowej do wnętrza kanału. Wody infiltracyjne mają istotne znaczenie, gdy eksploatowana sieć nie dysponuje własną oczyszczalnią ścieków. Głównym celem eksploatatora takiej sieci jest redukcja wody infiltracyjnej przez doszczelnianie uszkodzonych fragmentów sieci.



Rys. 4. Przekrój poprzeczny kanału betonowego DN 600/1100 mm [7]

Długość kolektorów betonowych funkcjonujących w strefie wahań zwierciadła wody gruntowej wynosi 6184 m, co stanowi prawie 30% ich łącznej długości i 4% całej infrastruktury kanalizacyjnej. Dzięki systematycznemu monitoringowi tego fragmentu sieci udaje się zarejestrować wszystkie nieszczelności sieci. Przeprowadzone dotychczas zabiegi koncentrowały się jedynie na doszczelnianiu kolektorów betonowych na bazie żywicy poliuretanowej lub mieszanek mineralnych. Prace tego typu muszą być realizowane kompleksowo, ponieważ doszczelnienie jednego punktu sieci powoduje lokalne podniesienie się wody gruntowej i infiltrację w miejscach dotychczas szczelnych.

Łączna długość kamionkowych przewodów kanalizacyjnych w zlewni ciek Hachinger Bach wynosi 124 755 m, co stanowi 80% długości całej sieci. Dominującą średnicą rur kamionkowych jest DN 250 mm (rys. 3). Produkcja rur kamionkowych w Niemczech do 1965 r. nie przewidywała fabrycznego wbudowywania uszczelnień do ich połączeń. Pakiety impregnowane w materiałach bitumicznych bądź też sznur konopny były w tamtym okresie powszechnie stosowanym typem uszczelnienia. Przełom miał miejsce w 1965 r., kiedy to rozpoczęto na stałe wbudowywać do nich elementy uszczelniające z elastomeru (EPDM) i poliuretanu (PU). Dla rur kamionkowych układanych w wykopach otwartych stosowane są trzy podstawowe typy złączy: system F, C oraz S [8].

Przewody kamionkowe będące tradycyjnym materiałem kanalizacyjnym należą do tak zwanej grupy rur sztywnych posiadających bardzo dobre parametry wytrzymałościowe. Do zalet kamionki można zaliczyć: trwałość, odporność na korozję, szczelność, małą chropowatość, odporność na ścieranie oraz bezproblemowy recykling. Nowoczesne rury kamionkowe posiadają niezależnie od skutecznych uszczelnień złączy także pogrubione ścianki zwiększające ich odporność na uderzenie oraz na niewłaściwy sposób układania i zasypania w wykopie. Dodatkową zaletą kamionki w porównaniu z innymi materiałami jest jej łatwa renowacja. Kamionka, tak jak każdy materiał posiada również wady. Istotną wadą kamionki jest jej kruchość wymagająca ostrożnego obchodzenia się z rurami, aż do ich zasypania w wykopie.

Ważnym elementem składowym badanej infrastruktury kanalizacyjnej są przyłącza (przykanaliki). Ich liczba wg. stanu na styczeń 2013 r. wynosiła 8383, natomiast ich łączna długość to 95 200 m. Są to obiekty łączące kanał publiczny ze studzienką rewizyjną, zlokalizowaną w obrębie nieruchomości. Z tego powodu eksploatacja przykanalików ma częściowo charakter publiczny i częściowo prywatny. Ich stan techniczno-eksploatacyjny jest zdecydowanie gorszy od stanu kanałów publicznych. Przyjmuje się, że liczba uszkodzeń na 1000 m przykanalików jest dwukrotnie wyższa od liczby uszkodzeń na 1000 m kanałów publicznych.

Przyłącza w zlewni ciekłu Hachinger Tal są w 99% wykonane z niemieckiej kamionki w zakresie średnic DN 100÷200 mm. Związek Celowy odpowiada za budowę oraz eksploatację przyłączy do granicy nieruchomości.

Modelowanie statystyczno-stochastyczne stanu krytycznego sieci kanalizacyjnej

Prognozowanie stanu techniczno-eksploatacyjnego sieci odprowadzającej ścieki bytowo-gospodarcze ze zlewni ciekłu Hachinger Bach oparto na zależności stanu technicznego przewodów od ich wieku. Podstawą klasyfikacji uszkodzeń oraz stanu technicznego były dwie pełnozakresowe inspekcje optyczne zrealizowane w 2000 i 2010 r. Obydwie klasyfikacje dla przewodów publicznych przeprowadzono wg. wytycznych ATV-M 149 [9] a dla przyłączy wg. normy DIN 1986-30 [10]. Zgodnie z praktyką eksploatacyjną przyjęto założenie, że najstarsze odcinki sieci wykazują najgorszy stan techniczny. W celu uproszczenia prognozy stanu technicznego badanego obiektu wprowadzono do terminologii eksploatacyjnej pojęcie stanu krytycznego. Sprowadza on skomplikowaną prognozę do istotnego momentu, w którym następuje przejście odcinków sieci od stanu wymagającego konserwacji do stanu odnowy.

Zastosowanie oceny stanu technicznego opartej tylko na analizie uszkodzeń było możliwe, ponieważ badana sieć wykazuje korzystną charakterystykę. Obiekt ten funkcjonuje w systemie rozdzielczym, co eliminuje problemy hydrauliczne. Produkcja lokalnych zakładów przemysłowych nie wpływa negatywnie na właściwości fizyko-chemiczne ścieków. Lokalizacja sieci nie koliduje ze strefami ochrony wód podziemnych.

Modelowanie stanu techniczno-eksploatacyjnego przedmiotowej sieci zrealizowano w fazie statystycznej oraz stochastycznej. Badania statystyczne oparto na dwuparametrowym modelu Weibulla powszechnie stosowanym do prognozowania niezawodności różnego rodzaju urządzeń oraz obiektów budowlanych. Rozkład ten po raz pierwszy zastosował w 1939 r. badacz szwedzki Waloddi Weibull w teorii zmęczenia materiałów [11]. Pierwszym parametrem rozkładu Weibulla jest żywotność charakterystyczna T określająca skalę krzywej wzdłuż osi odciętych. Żywotność charakterystyczna może być traktowana jako średnia wartość rozkładu Weibulla i dlatego przy wzroście tego parametru następuje przesunięcie krzywej awaryjności w kierunku dłuższej żywotności technicznej. Drugi parametr rozkładu b jest miarą stromości oraz asymetrii rozkładu. W zależności od wartości parametru b można opisać każdy z trzech charakterystycznych fragmentów wykresu gęstości awarii mającego formę wanny.

Model Weibulla ma następujące uwarunkowania matematyczne [12]:

$$\text{funkcja gęstości prawdopodobieństwa} \quad f(t) = dF/dt \quad (1)$$

$$f(t) = b/T \cdot (t/T)^{b-1} \cdot \exp(-t/T)^b \quad (2)$$

$$\text{funkcja prawdopodobieństwa awarii} \quad F(t) = 1 - \exp(-t/T)^b \quad (3)$$

$$\text{funkcja prawdopodobieństwa niezawodności} \quad R(t) = \exp(-t/T)^b \quad (4)$$

$$\text{gęstość awarii} \quad \lambda(t) = f(t)/R(t) \quad (5)$$

$$\lambda(t) = b/T \cdot (t/T)^{b-1} \quad (6)$$

gdzie: t - zmienna statystyczna, np. żywotność techniczna obiektu, lata,
 T - żywotność charakterystyczna rozkładu odpowiadająca średniej wartości rozkładu, lata,
 b - parametr formy rozkładu.

Parametry rozkładu Weibulla b i T można oszacować za pomocą metod graficznych lub analitycznych i uzyskać dużą zgodność funkcji teoretycznych z danymi empirycznymi. Stosując powyższą metodykę analizy stanu techniczno-eksploatacyjnego sieci można wyznaczyć dla każdej klasy odnowy teoretyczną krzywą prawdopodobieństwa niezawodności $R(t)$. Pojęcia awarii nie należy rozumieć dosłownie lecz jako fazę przejścia odcinka w bardzo krótkim czasie od jednej do następnej - gorszej klasy jego stanu technicznego.

Jedną z metod analitycznych, która pozwala w krótkim czasie obliczeniowym oszacować parametry (b , T), jest prostopadła metoda momentów. Wybór metody momentów nie jest przypadkowy, ponieważ celem dalszych badań jest zamierzone zadanie naukowe polegające na szacowaniu parametrów rozkładu Weibulla czasochłonną metodą symulacji matematycznych Monte-Carlo.

We wstępnej fazie badań wykonano klasyfikację uszkodzeń i stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych tworzących bazę danych. W ramach dalszej klasyfikacji dla każdego rodzaju przewodów i warunków brzegowych funkcjonowania sieci utworzono próby losowe składające się z odcinków zaklasyfikowanych do piątej, czwartej i do trzeciej klasy odnowy. Zbiory te pozwoliły wyznaczyć granicę między obszarem konserwacji i odnowy. Na podstawie tak przygotowanej bazy danych wykonano wstępne badania statystyczne a następnie modelowanie statystyczno-stochastyczne stanu krytycznego dla każdego rodzaju przewodu kanalizacyjnego w kontekście głębokości posadowienia oraz położenia wody gruntowej. Krytyczny stan techniczno-eksploatacyjny opisano za pomocą funkcji przejścia od stanu konserwacji do stanu odnowy. Wybór krytycznej funkcji przejścia zdecydowanie uprościł analizę funkcjonowania przedmiotowej sieci bytowo-gospodarczej w różnych warunkach brzegowych.

W fazie badań stochastycznych wykorzystano oryginalne połączenie rozkładu Weibulla z symulacjami matematycznymi metodą Monte-Carlo (MMC). Zastosowanie powyższej metodyki pozwoliło na uzyskanie większej dokładności wyników badań modelowych. Pojęcie metody Monte-Carlo nie odnosi się tylko do jednego algorytmu ale do pewnej grupy metod numerycznych, które wykorzystują liczby losowe do rozwiązań aproksymacyjnych albo do symulacji różnych procesów.

Do estymacji parametrów Weibulla zastosowano metodę inwersji umożliwiającą realizację dowolnej liczby symulacji matematycznych wieku przewodów t_1, \dots, t_n zgodnie z przyjętą funkcją rozkładu F . Jeżeli $F : R \rightarrow [0, 1]$ jest pewną funkcją rozkładu i jej funkcją odwrotną jest F^{-1} oraz $Y \approx U(0; 1)$ jest zmienną losową o równomiernym rozkładzie, to można przyjąć, że $X = F^{-1}(Y)$. W związku z tym można założyć, że $X \approx F$. Oznacza to z kolei, że funkcja rozkładu zmiennej losowej X jest przyjętą na wstępie rzeczywistą funkcją rozkładu F [13].

W przypadku rozkładu Weibulla i jego funkcji odwrotnej wiek analizowanych przewodów kanalizacyjnych ustala się wg. następującego wzoru:

$$t_i^{k^*} = \hat{T} \left(\ln(1/1 - U_i^{k^*}) \right)^{\frac{1}{\hat{b}}} \quad (7)$$

gdzie: t^{k^*} - symulowany wiek przewodów kanalizacyjnych, lata,
 \hat{T} - charakterystyczna żywotność techniczna przewodów kanalizacyjnych ustalona wg. dowolnej metody analitycznej, lata,
 \hat{b} - parametr formy rozkładu ustalony wg. dowolnej metody analitycznej,
 U^{k^*} - zmienna losowa o równomiernym rozkładzie ($0 < U^{k^*} < 1$),
 $k^* = 1, 2, \dots, N$.

W celu pozyskania odpowiednio dużej liczby zmiennych losowych o równomiernym rozkładzie zastosowano jeden z popularnych generatorów – Multiplicative Linear Congruential Generator [14]. Jego formuła ma postać:

$$x_{i-1} = (ax_i + c) \text{mod} m \quad (8)$$

gdzie: x_i - zmienna losowa,

$$a = 6909,$$

$$c = 23606797,$$

$$m = 2^{32}.$$

Długość powtarzającej się sekwencji liczbowej wynosi w tym przypadku m . W wyniku wykonania wielu prób ustalono odpowiednie algorytmy pozwalające określić wartości x_i dla 1000, 2500, 5000, 10 000 i 15 000 symulacji matematycznych:

$$\text{MMC}(1000): x_1 = 3000, x_2 = 3000 + 58, \dots, x_{1000} = 3000 + 999 * 58; \quad (9)$$

$$\text{MMC}(2500): x_1 = 1500, x_2 = 1500 + 22, \dots, x_{2500} = 1500 + 2499 * 22; \quad (10)$$

$$\text{MMC}(5000): x_1 = 1500, x_2 = 1500 + 12, \dots, x_{5000} = 1500 + 4999 * 12; \quad (11)$$

$$\text{MMC}(10\ 000): x_1 = 500, x_2 = 500 + 6, \dots, x_{10000} = 500 + 9999 * 6; \quad (12)$$

$$\text{MMC}(15\ 000): x_1 = 500, x_2 = 500 + 3, \dots, x_{15000} = 500 + 14999 * 3. \quad (13)$$

Fazę modelowania stochastycznego oparto na metodzie inwersji należącej do rodziny metod Monte-Carlo. W tym celu z funkcji Weibulla F utworzono funkcję odwrotną F^{-1} i wyznaczono z niej wiek przewodów t , który następnie symulowano matematycznie zgodnie z zależnością (7). W miejsce wartości rozkładu F wstawiano zmienne losowe o rozkładzie równomiernym przyjmujące wartości z przedziału (0, 1). Wykonanie symulacji matematycznych pozwoliło powiększyć stochastycznie liczebność badanych prób losowych. Uzyskane dane z symulacji wprowadzono ponownie do prostopadłej metody momentów (MM) w celu dokładniejszej estymacji parametrów Weibulla. Wyjściowe wartości parametrów b i T wykorzystano z uprzednio przeprowadzonych badań statystycznych. Zmienne losowe o rozkładzie równomiernym generowano w oparciu o Multiplicative Linear Congruential Generator (8).

W ostatniej fazie badań porównano wyniki modelowania krytycznego stanu przewodów kanalizacyjnych uwzględniając ich materiał roboczy, rodzaj, głębokość posadowienia oraz obecność wody gruntowej. W ramach tych porównań ustalono wpływ materiału roboczego i rodzaju przewodów na stan techniczny przewodów kanalizacyjnych posadowionych na różnych głębokościach oraz powyżej i poniżej zwierciadła wody gruntowej. W analizach uwzględniono istotne aspekty technologii wykonawstwa różnych typów przewodów kanalizacyjnych oraz ich struktury wiekowe.

Szczegółowa analiza stanu krytycznego infrastruktury kanalizacyjnej w zlewni cieką Hachinger Bach pozwoliła ustalić rzeczywisty stan techniczny i dokładną ocenę eksploatowanego obiektu liniowego. Możliwe było także dokonanie szczegółowego wglądu w problematykę stanu budowlanego sieci przy uwzględnieniu różnych warunków jej funkcjonowania.

Innym ważnym efektem wykonanych badań była możliwość dokładnego ustalenia zakresu odnowy stanowiącego podstawy do projektowania strategii renowacyjnych i bilansowania niezbędnych środków finansowych.

Wyniki zrealizowanych badań statystyczno-stochastycznych należy uznać za miarodajne, ponieważ próby losowe reprezentujące wszystkie rodzaje przewodów miały duże liczebności, a warunki brzegowe funkcjonowania sieci wykazywały jednorodny charakter. Liczebność najmniejszej próby losowej wynosiła 100 elementów, co w ujęciu statystycznym tworzy solidne podstawy badań. Jednorodność warunków eksploatacyjnych badanej sieci zapewniają żwiru gruboziarniste występujące na obszarze całej zlewni cieką Hachinger Bach. Drugim czynnikiem jest jednorodne obciążenie ruchem kołowym gminnych dróg, w obrębie których przebiegają przewody kanalizacyjne. Tak więc cechami różnicującymi eksploatację sieci są: materiał roboczy, rodzaj przewodów, głębokość posadowienia oraz obecność wody gruntowej.

Oryginalnym aspektem badań było uwzględnienie kamionkowych przyłączy, które są integralną częścią składową każdej liniowej infrastruktury kanalizacyjnej. W niedalekiej przeszłości przyłącza nie były przedmiotem dyskusji nt. stanu technicznego sieci kanalizacyjnych i ich odnowy. Jedną z przyczyn takiej sytuacji był brak środków technicznych umożliwiających inspekcję optyczną i renowację przewodów kanalizacyjnych o średnicach $DN \leq 150$ mm [15]. W ostatnim 10-ciu przyłącza stały się centralnym tematem dyskusji naukowo-technicznej dotyczącej odnowy przewodów kanalizacyjnych. Dodatkowym impulsem do podjęcia konkretnych działań na rzecz przyłączy było opublikowanie normy DIN 1986-30 w 2003 r. [16] i jej nowelizacja w 2012 r. [10], jak również

opracowanie specjalnej normy DIN SPEC 19748 [17] zawierającej wytyczne dotyczące odnowy. W normie DIN 1986-30 z 2003 r. [16] pojawił się nietypowy zapis zobowiązujący wszystkich właścicieli nieruchomości do kontroli eksploatowanych przez nich przyłączy do końca 2015 r. Zapis ten okazał się skutecznym instrumentem stymulującym postęp techniczny w zakresie badań i odnowy przyłączy.

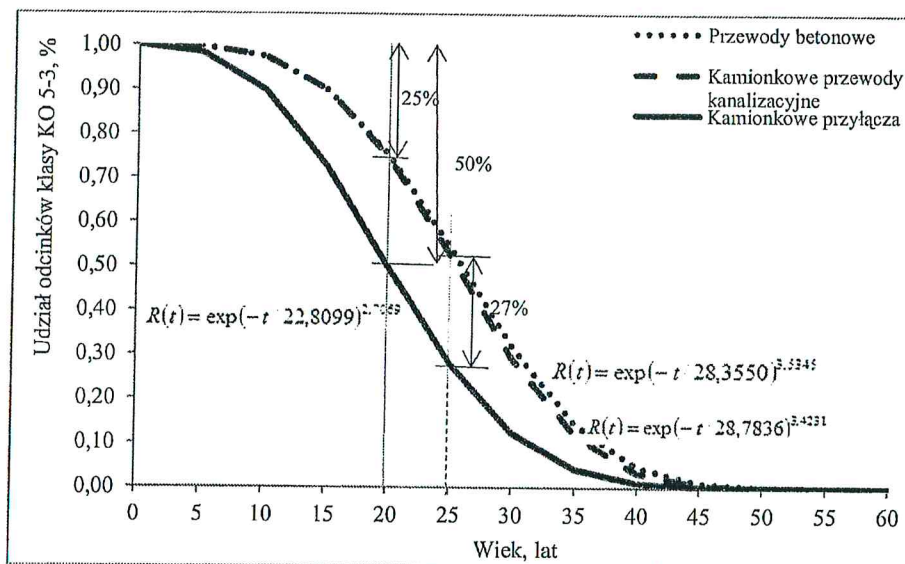
Przyłącza eksploatowane wyłącznie przez właścicieli nieruchomości nie są w centrum uwagi eksploatatorów infrastruktury publicznej. Właściciele nieruchomości nie są świadomi spoczywających na nich obowiązków i nie są skłonni do finansowania zabiegów konserwacyjno-renowacyjnych.

Inny wariant prawny przewiduje, że przyłącza przebiegają częściowo w obszarze prywatnym i częściowo w obszarze publicznym. W przypadku takiej konfiguracji eksploatator sieci publicznej jest odpowiedzialny za stan techniczny przyłączy do granicy nieruchomości. Związek Celowy eksploatuje sieć do granicy nieruchomości i realizuje odnowę przyłączy aż do studni rewizyjnej wraz z wykonaniem w niej zakończenia.

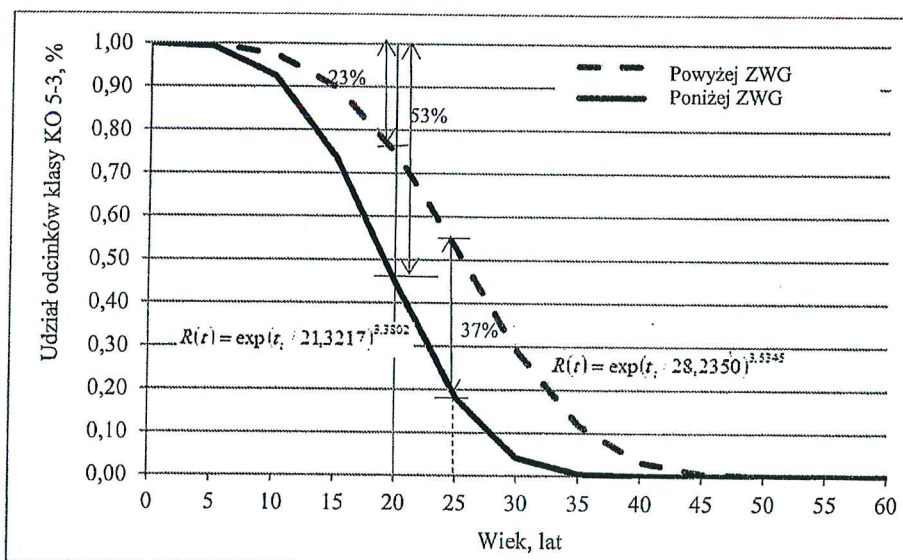
Wnioski

Kompleksowe badania naukowe i analizy oparte na bogatym materiale empirycznym pozwoliły na sformułowanie szeregu istotnych wniosków o znaczeniu poznawczym i aplikacyjnym, których najlepszym i najbardziej surowym weryfikatorem będzie praktyka eksploatacyjna.

1. Dwuparametrowy rozkład Weibulla w kombinacji z prostopadłą metodą momentów stanowią praktyczne narzędzie, które pozwala skutecznie modelować statystycznie krytyczny stan techniczno-eksploatacyjny opisujący przejście od stanu konserwacji do stanu odnowy różnego rodzaju obiektów liniowych infrastruktury miejskiej.
2. Zastosowanie 10 000 symulacji matematycznych opartych na metodzie Monte-Carlo okazało się trafnym sposobem wyznaczania granicy między obszarami konserwacji i rehabilitacji technicznej obiektów liniowych.
3. Stochastyczne modelowanie krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego przewodów kanalizacyjnych funkcjonujących powyżej zwierciadła wody gruntowej wykazało, że w najlepszym stanie technicznym znajdują się kolektory betonowe, w nieco gorszym stanie są kamionkowe przewody kanalizacyjne, a najgorszy stan prezentują przyłącza (rys. 5).
4. Na podstawie badań ustalono jednoznacznie, że obecność wody gruntowej ma negatywny wpływ na eksploatację i stan techniczno-eksploatacyjny przewodów kanalizacyjnych i przyłączy (rys. 6).
5. Stochastyczne badania modelowe pozwoliły wykazać pozytywny wpływ głębszego posadowienia wszystkich rodzajów przewodów kanalizacyjnych na ich stan techniczno-eksploatacyjny.
6. W ramach każdego z trzech ustalonych poziomów posadowienia ($G < 2$ m, $2 \leq G < 4$ m i $G \geq 4$ m) była widoczna tendencja, z której wynikało, że stan techniczny kamionkowych przewodów kanalizacyjnych był lepszy od stanu technicznego przyłączy.
7. Analiza uszkodzeń wykazała, że stosunek częstotliwości uszkodzeń przyłączy do częstotliwości uszkodzeń przewodów publicznych wynosi 137,50 : 66,34. Zatem ustalony w badaniach stosunek 2,07 : 1 jest zgodny z ogólnie przyjętą proporcją 2 : 1.
8. Stan techniczno-eksploatacyjny kamionkowych przyłączy funkcjonujących całkowicie lub częściowo poniżej zwierciadła wody gruntowej (ZWG) powinien skupiać szczególną uwagę eksploatatorów sieci kanalizacyjnych, ponieważ są one istotnym źródłem infiltracji wody gruntowej do wnętrza przewodów kanalizacyjnych (rys. 7).

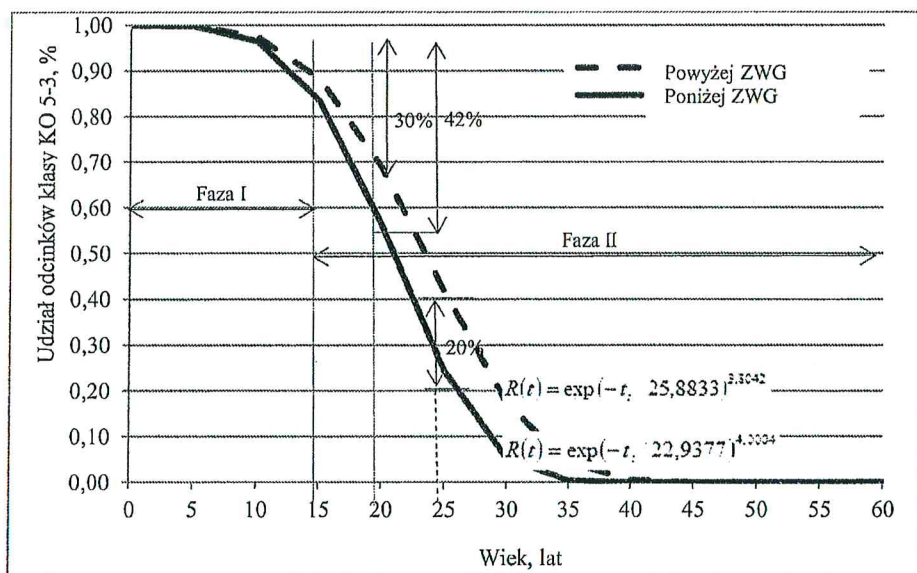


Rys. 5. Przebieg krytycznych funkcji Weibulla wg. MMC dla przewodów betonowych, kamionkowych przewodów kanalizacyjnych i kamionkowych przyłączy funkcjonujących powyżej poziomu ZWG



Rys. 6. Przebieg krytycznych funkcji Weibulla wyznaczonych MMC dla kamionkowych przewodów kanalizacyjnych w zależności od ich położenia w stosunku do ZWG

9. Badania modelowe pozwalają na wykonanie analizy stanu technicznego eksploatowanej sieci w ujęciu jakościowym oraz ilościowym.
10. Z analizy ilościowej określono zakres koniecznej odnowy dla badanej sieci na poziomie 40%. Zatem, ustalona skala potrzeb renowacyjnych w zlewni ciekę Hachinger Bach jest wyższa od wskaźnika ogólnoniemieckiego wynoszącego 30%.
11. Uwzględnienie w analizie stanu technicznego sieci głębokości posadowienia przewodów wykazało, że w początkowym okresie eksploatacji trwającym do 25 lat najpłycej posadowione główne przewody kanalizacyjne mają najlepszy stan techniczny, a najgłębiej posadowione najgorszy. Dopiero w następnej fazie eksploatacji, po upływie 25 lat, stan techniczny sieci ma standardowy, powszechnie znany charakter, a to oznacza, że najgłębiej posadowione przewody mają zdecydowanie najlepszy stan techniczny, a najpłycej posadowione najgorszy.



Rys. 7. Przebieg krytycznych funkcji Weibulla wyznaczonych drogą symulacji MMC dla kamionkowych przyłączy w zależności od położenia w stosunku do ZWG

Kanalizację bytowo-gospodarczą transportującą ścieki ze zlewni ciekłu Hachinger Bach charakteryzują bardzo jednorodne warunki brzegowe limitujące jej eksploatację. Dzięki temu wykazano analitycznie i potwierdzono badaniami wszystkie powszechnie znane doświadczenia wynikające z praktyki eksploatacyjnej. Uzyskanie realnych wyników badań upoważnia do stwierdzenia, że stochastyczne modelowanie krytycznego stanu przewodów kanalizacyjnych ma aplikacyjny charakter i może być przeniesione na inne infrastruktury kanalizacyjne, niezależnie od warunków brzegowych ich funkcjonowania. Podstawowym warunkiem aplikacyjności zaproponowanej metodyki jest realność materiału empirycznego. Wymóg ten jest stawiany wszystkim analizom statystycznym. Ma on również bezpośredni wpływ na jakość modelowania stochastycznego.

Rzeczywiste walory zaproponowanego modelowania krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego sieci kanalizacyjnej najlepiej zweryfikują praktyczne zastosowania. Opracowany model ma uniwersalny charakter, a jego zakres zastosowań jest szeroki i obejmuje wiele dziedzin gospodarki komunalnej. Należą do nich systemy wodociągowe, zagospodarowania wód opadowych, drogowo-mostowe czy np. stany cieków powierzchniowych oraz wód gruntowych. Prognozowanie stanów zwierciadła wody gruntowej jest nieodzownym elementem projektowania systemów bezpieczeństwa przeciwpowodziowego oraz zagospodarowania wód deszczowych.

Prognozowanie stanu technicznego wspomnianych powyżej systemów gospodarki komunalnej umożliwia wgląd w detale warunkujące i optymalizujące ich eksploatację. Inną korzyścią jest możliwość dokładnego planowania inwestycji infrastrukturalnych w celu racjonalnego zarządzania tymi obiektami w kontekście bieżącego utrzymania, konserwacji i odnowy. Realizacja zabiegów renowacyjnych przyczynia się w istotnym stopniu do redukcji wód infiltracyjnych w sieci i eksfiltracji ścieków do podłoża gruntowego. Efektem redukcji infiltracji jest mniejsze zużycie energii koniecznej do transportowania i oczyszczania ścieków, a efektem redukcji eksfiltracji jest ochrona wód podziemnych i podłoża gruntowego przed skażeniem.

Oryginalną wartością naukową przeprowadzonych badań statystyczno-stochastycznych jest nowe podejście do określenia zarówno ogólnej jak i szczegółowej oceny stanu techniczno-eksploatacyjnego przewodów kanalizacyjnych. W celu uproszczenia tradycyjnej metodyki prognozowania wprowadzono pojęcie krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego wyznaczającego granicę między obszarem zarezerwowanym dla zabiegów naprawczo-konserwacyjnych i dla technik renowacyjnych.

W analizach oceny stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych uwzględniono istotne warunki brzegowe ich funkcjonowania. Analizowana infrastruktura kanalizacyjna funkcjonuje w jednorodnych warunkach, do których należą: podłoża gruntowe, obciążenia zewnętrzne i transportowane medium. Dlatego też badania skoncentrowano na ocenie wpływu głębokości posadowienia, obecności wody

gruntowej, materiału roboczego oraz funkcji przewodów w sieci na jej stan techniczno-eksploatacyjny. W ramach szczegółowych analiz uwzględniano również strukturę wieku badanych obiektów i wynikające z niej rozwiązania techniczno-technologiczne.

Fazę badań statystycznych oparto na dwuparametrowym rozkładzie Weibulla, a w fazie modelowania stochastycznego wykorzystano nowatorskie narzędzie umożliwiające symulacje matematyczne metodą Monte-Carlo, co pozwoliło na istotne zwiększenie liczebności analizowanych prób losowych i dokładności estymacji parametrów Weibulla.

Wykonane serie badań umożliwiły osiągnięcie celu niniejszej monografii, ponieważ wykazały, że statystyczno-stochastyczna analiza krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego jest skuteczną formą prognozowania procesów starzeniowych liniowych obiektów kanalizacyjnych oraz pozwala uwzględnić zróżnicowane warunki brzegowe ich funkcjonowania.

Uzyskane wyniki badań i analiz mają duże znaczenie teoretyczno-poznawcze oraz aplikacyjne. Zaproponowana metodyka prognozowania krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego przewodów kanalizacyjnych ma uniwersalny charakter i może być zastosowana w codziennej praktyce eksploatacyjnej w celu skutecznego zapobiegania destrukcji liniowej infrastruktury miejskiej prowadzącej nawet do katastrofy budowlanej. Opracowana metodyka badawcza może z powodzeniem znaleźć zastosowanie w prognozowaniu stanu technicznego innych systemów gospodarki komunalnej.

Stochastyczne modelowanie krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego przewodów kanalizacyjnych umożliwiło również ustalenie typowych faz eksploatacyjnych charakteryzujących się odpowiednimi prędkościami destrukcji budowlano-technicznej. Na podstawie wykonanych badań i analiz ustalono, że główne przewody sieci (kolektory betonowe i kamionkowe przewody kanalizacyjne) mogą być bezinterwencyjnie eksploatowane przez okres 30 lat. Dla przyłączy okres ten wynosi tylko 20 lat. Natomiast prognozowana żywotność techniczna dla pierwszej grupy przewodów osiągnęła 50÷55 lat a dla drugiej grupy 45÷50 lat.

Opracowana metodyka prognozowania krytycznego stanu techniczno-eksploatacyjnego przewodów kanalizacyjnych wymaga prowadzenia dalszych badań, które przez rozszerzenie bazy danych empirycznych pozwolą uwzględnić dodatkowe uwarunkowania funkcjonowania sieci kanalizacyjnej w zlewni ciekłu Hachinger Bach. Większa baza danych stworzy podstawy do zastosowania innych modeli matematycznych umożliwiających wykonanie jeszcze dokładniejszych analiz i wyciągnięcie bardziej miarodajnych wniosków o znaczeniu teoretycznym jak również ważnych dla codziennej praktyki eksploatacyjnej liniowych obiektów kanalizacyjnych.

Literatura

- [1] Münchner Normalien, Zentrale Technische Normen für Kanalbau in München, Stadtentwässerung München, wersja uzupełniona i poprawiona w 1992 r.
- [2] Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal, Dokumentation der Durflussmessung, 2003÷2013.
- [3] Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserverordnung – AbwV), 21.03.1997.
- [4] GEOINFORM, Magellan – GIS in new dimensions, 2002.
- [5] Kölling Ch., Tomsu Ch.: Grundwassermodell – östliche Münchner Schotterebene, Umweltreport der Stadt München, München, 2003.
- [6] Raganowicz A.: Besonderheiten der Kanalsanierung in Unterhaching, UmweltBau Nr. 5, 2007.
- [7] Raganowicz A.: Technische Aspekte der Kanalsanierung im Hachinger Tal, I Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna INFRAEKO 2008, Rzeszów 2008.
- [8] Steinzeug – Ein komplettes Programm für die moderne Abwasserkanalisation, Handbuch, Steinzeug GmbH, Köln 1998.
- [9] ATV-M 149, Zustandserfassung, -klassifizierung und -bewertung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden, 1999.
- [10] DIN 1986-30, Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 30, Instandhaltung, 2012.

- [11] Weibull W.: A statistical distribution function of wide applicability, Trans. ASME, Serie E: Journal of Appl. Mechanics 18, 1951.
- [12] Wilker H.: Band 3: Weibull-Statistik in der Praxis, Leitfaden zur Zuverlässigkeitsermittlung technischer Komponenten, Books on Demand GmbH, Norderstedt 2010.
- [13] Müller-Gronbach T., Novak E., Ritter K.: Monte Carlo – Algorithmen, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2012.
- [14] Leisch F.: Computerintensive Methoden, LMU München, WS 2010/2011, 8 Zufallszahlen.
- [15] Kipp B., Möllers K.: Inspizierbarkeit von Grundstücksentwässerungsleitungen, Korrespondenz Abwasser (39) Nr. 4, 1992.
- [16] DIN 1986-30, Entwässerungsanlagen für Gebäude und Grundstücke – Teil 30: Instandhaltung, 2003.
- [17] DIN SPEC 19748, Anforderungen an Schlauchliner zur Renovierung von Abwasser-Hausanschlussleitungen, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2012.

5. Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze

Po ukończeniu studiów na Politechnice Gdańskiej w 1978 r. i uzyskaniu tytułu magistra inżyniera inżynierii środowiska w zakresie inżynierii wodnej i morskiej pracowałem dwa lata w Przedsiębiorstwie Budownictwa Hydrotechnicznego "Energopol 4" w Gdańsku. Jako kierownik odcinka robót byłem odpowiedzialny za budowę części lądowej pirsu rudowego w Porcie Północnym, w Gdańsku.

W latach 1980÷1987 pracowałem w Katedrze Geotechniki Instytutu Hydrotechniki Politechniki Gdańskiej na stanowisku technologa a następnie specjalisty. W tym okresie zajmowałem się stabilizacją podłoża gruntowego metodami iniekcyjnymi. Wraz z zespołem prowadziłem badania z zakresu iniekcyjnego wzmocnienia podłoża gruntowego oraz realizowałem zabiegi iniekcyjne mające w celu zahamowanie nierównomiernych osiadań obiektów przemysłowych. Stabilizacja podłoża gruntowego pod fundamentami turbozespołów o mocy 200 MW w Elektrowni Kozienice (1983÷1987) bazowała na wynalazku, którego byłem współautorem (Urząd Patentowy PRL - Patent Nr 149669, 1990). Wdrożenie tego wynalazku w Elektrowni Kozienice było wielokrotnie uhonorowane nagrodą zespołową 2-go i 3-go stopnia Rektora Politechniki Gdańskiej.

Stabilizacja podłoża gruntowego pod fundamentami turbozespołów o mocy 200 MW oraz młynów była realizowana przez Katedrę Geotechniki Politechniki Gdańskiej również w Elektrowni Dolna Odra pod Szczecinem. Wzmocnienie podłoża gruntowego pod fundamentami bloków energetycznych o mocy 200 MW w obu elektrowniach wykonano metodą iniekcji cementowej i elektrosilikatyzacji dwuroztworowej (zał. 4,[2]). W początkowej fazie wzmocniano podłoże w bezpośredniej strefie en-block. Pustki bądź kawerny wypełniano pod ciśnieniem zaczynami cementowymi, a rozluźnione podłoże nasączano roztworem szkła wodnego i chlorku wapniowego przy współudziale stałego prądu elektrycznego. Ze względu na trudności w przewiercaniu płyt fundamentowych wielowarstwowo zbrojonych o grubości 2,60 m zmieniono technologię wzmocnienia i zaczęto wykonywać przesłone wokół zabezpieczanego obiektu. W przypadku wystąpienia dalszych osiadań możliwe było wykonanie przesłon wewnętrznych. Kubatura przesłony dla jednego turbozespołu wynosiła ca. 500 m³ przy głębokości iniekcji 7,0÷10,0 m poniżej poziomu posadowienia i szerokości 0,86 m. Wykonanie przesłon iniekcyjnych spowodowało zdecydowane zahamowanie nierównomiernych osiadań turbozespołów, które monitorowano za pomocą niwelacji precyzyjnej (z dokładnością 0,10÷0,15 mm) 16-tu reperów zainstalowanych na płycie dolnej turbozespołu. Repery osadzono wzdłuż trzech linii równoległych do osi obiektu. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że roboty iniekcyjne realizowano bez przerywania procesu produkcji. Miało to istotne znaczenie, ponieważ obydwie elektrownie gwarantowały ówczesne bezpieczeństwo energetyczne kraju.

Innym istotnym osiągnięciem naukowo-technicznym było zabezpieczenie iniekcyjne nierównomiernie osiadającego przyczółka mostu kolejowego trakcji Gdańsk-Warszawa w Pruszczu Gdańskim. Prace zabezpieczające wykonano bez przerywania ruchu na tej ważnej linii osobowo-towarowej. To spektakularne zabezpieczenie przyczółka mostu kolejowego opisano w publikacji (zał. 4, [5]). Prace iniekcyjne wykonano w dwóch fazach. W pierwszej wypełniono pustki i kawerny mieszanekami na bazie cementu. Następnie iniektowano klej iniekcyjny nr 116 bazujący na żywicy mocznikowo-formaldehydowej. Za pomocą 60 rurek iniekcyjnych o specjalnej konstrukcji

wprowadzono do podłoża gruntowego około 100 t żywicy. Pobrane próbki gruntu wzmocnionego wykazywały wytrzymałość na ściskanie 3,0÷4,0 MPa. Zakres wykonanej iniekcji skontrolowano za pomocą testu SIR (Subsurface Interfacial Rader System), który potwierdził uzyskanie zaplanowanej kubatury wzmocnionego podłoża gruntowego.

Wyniki wszystkich badań oraz ich praktyczne zastosowania z okresu 1980÷1987 przedstawiłem jako współautor w ośmiu publikacjach.

Po przyjeździe do Monachium w 1988 r. przeszedłem konieczną adaptację zawodowo-techniczną, w ramach której ukończyłem dwa kursy zawodowe: Zastosowania EDV w Budownictwie oraz Techniki Budowlane, a w latach 1990÷1992 byłem słuchaczem studium podyplomowego w zakresie gospodarki wodnej. Po zdaniu egzaminu państwowego uzyskałem tytuł "Regierungsbaumeister".

W okresie 1993÷1994 byłem pracownikiem techniczno-naukowym Urzędu Gospodarki Wodnej (Wasserwirtschaftsamt) w Donauwörth. W urzędzie zrealizowałem kilka projektów: wstępna koncepcja systemu antypowodziowego dla miasta Donauwörth, opinie techniczne projektów dużych sieci ogólnospławnych oparte na symulacji frachtu zanieczyszczenia, opinia dotycząca rozbudowy wysypiska śmieci w Binsberg w aspekcie jego szczelności oraz opinia projektu centralnej oszyszczalni ścieków "Mittlere Paar" dla 200-tu tysięcy mieszkańców.

W latach 1994÷1996 byłem projektantem biura projektów "Dippold und Gerold" w Dillingen oraz "Arnold" w Kissing pod Augsburgiem, które specjalizowały się w projektowaniu i odnowie liniowych systemów wodno-kanalizacyjnych.

Od 1998 r. jestem szefem technicznym Związku Celowego (pn. Zweckverband zur Abwasserbeseitigung im Hachinger Tal), który eksploatuje 200-tu km sieć odprowadzającą ścieki bytowo-gospodarcze z trzech gmin: Unterhaching, Taufkirchen oraz Oberhaching. W latach 1998÷2000 Związek Celowy wykonał pierwszą kompletną inspekcję optyczną całej sieci.

Na podstawie wyników tych badań opracowano generalny plan odnowy sieci, który zrealizowano w latach 2000÷2006. W 2000 r. doszczelniono dwa odcinki kolektora betonowego DN 600/1100 mm o długości 140 m funkcjonującego w strefie wahań wody gruntowej w gminie Taufkirchen (zał. 4, [11]). Kolektor jest konstrukcją z betonu niezbrojonego B10 wylewanego w technologii „na mokro” bez dylatacji. Wszystkie szwy robocze stały się po wielu latach eksploatacji miejscami infiltracji wody gruntowej do wnętrza kanału. Doszczelnienie obiektu wykonano metodą dwufazowej iniekcji żywicy poliuretanowej. Na podstawie badań radarowych nie stwierdzono pustek ani kawern w najbliższym otoczeniu kolektora. We wstępnej fazie iniektowano żywicę ekspansywną (Injektostop 2033 firmy MC-Bauchemie) w celu temporalnego zahamowania infiltracji wody gruntowej. Ostateczne doszczelnienie wykonano przez iniekcję dwuskładnikowej żywicy poliuretanowej (Injektostop 2300 firmy MC-Bauchemie). We wnętrzu jednego odcinka kolektora osadzono ca. 150 pakierów, przez które wprowadzono do podłoża gruntowego 88 l żywicy Injektostop 2033 i 33 l żywicy Injektostop 2300. Doszczelnione szwy robocze zabezpieczono szybkością zaprawą iniekcyjną Ergelit oraz Rapit. W wyniku zrealizowanej renowacji zredukowano dopływ wody infiltracyjnej o około 5 l/s, co w istotny sposób zmniejszyło koszty eksploatacji sieci kanalizacyjnej.

W artykule (zał. 4, [12]) opisano szczegóły techniczno-wykonawcze renowacji kamionkowej sieci publicznej DN 200÷400 mm gminy Unterhaching o łącznej długości 40 000 m. Niemiecka firma Diringer & Scheidel zainstalowała w latach 2003÷2006 5300 m rękawów w systemie RS-CityLiner bazującym na żywicy epoksydowej. Wszystkie przykanaliki wprowadzające ścieki do odnawianych przewodów głównych zbadano optycznie, z których 219 wykazało dwie najgorsze klasy stanu technicznego i dlatego poddano je zabiegom renowacyjnym. Największą trudnością techniczną powyższej inwestycji była odnowa przykanalików. Są one połączone z kanałem publicznym za pomocą trójnika DN 250 mm z odnogą DN 200 mm pod kątem 45°. Następnym elementem jest krzywka 45° oraz redukcja DN 200/150 mm. Wykonanie zakończenia rękawa przykanalika w przewodzie głównym przysparzało firmie wykonawczej duże trudności techniczne. W tym celu konieczne było skonstruowanie specjalnego szalunku. Odnowa sieci kanalizacyjnej w gminie Unterhaching była w owym czasie największą inwestycją w Bawarii.

Dokonana przeze mnie kompleksowa analiza przeprowadzonych badań oraz zabiegów renowacyjnych sieci eksploatowanej przez gminę Unterhaching stała się podstawą opracowania prognozy jej stanu technicznego. Efektem tych badań była praca doktorska - „Metodyka prognozowania stanu technicznego sieci kanalizacyjnej” (zał. 4, [15]) zrealizowana w Instytucie

Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej (promotor: prof. Dziopak) i obroniona w grudniu 2010 r.

W okresie 2003÷2006, w ramach rozbudowy sieci, została zrealizowana duża inwestycja infrastrukturalna o wartości 15-tu milionów euro. Inwestycja ta objęła budowę 5-cio kilometrowego kanału transportowego, kilka lokalnych sieci grawitacyjnych oraz siedem stacji pomp (w tym sześć pneumatycznych). Jestem współautorem tego zadania w zakresie opracowania koncepcji, planowania jak również prowadzenia nadzoru inwestorskiego.

W artykule (zał. 4, [12]) opisano eksperymentalne zastosowanie płynnego gruntu do budowy przewodów kanalizacyjnych w zlewni cieków Hachinger Bach. W ramach rozbudowy sieci realizowanej przez Związek Celowy w latach 2003÷2006 zaszła konieczność budowy bezwstrząsowej kamionkowego przewodu kanalizacyjnego DN 250 mm o długości 450 m w Oberbibergu, dzielnicy gminy Oberhaching. Jedną z niekonwencjonalnych i ekonomicznych możliwości było zastosowanie płynnego gruntu. Ze względu na brak doświadczeń w zakresie stosowania tej technologii w Bawarii postanowiono wykonać eksperymentalny odcinek przewodu kamionkowego DN 250 mm. W ramach tego odcinka o długości 65 m testowano różne kombinacje dwóch materiałów o nazwie „füma boden” oraz „füma rapid” firmy niemieckiej CEMEX Deutschland AG. Pierwszy z nich jest materiałem o drobnym uziarnieniu i służy do wypełnienia strefy zasyпки. „füma boden” gwarantuje po upływie 28-miu dni optymalne posadowienie przewodu przez jej jednolite zagęszczenie. Jest to warunek trudny do osiągnięcia przy zastosowaniu technologii konwencjonalnej. Ostatnie 50 cm do dolnej krawędzi nawierzchni asfaltowej wypełniono materiałem gruboziarnistym - „füma rapid”, który z powodzeniem przejmuje rolę podbudowy nawierzchni drogowej. Największym problemem w czasie wypełniania wykopu płynnym gruntem jest zapobieganie przeciwko wyporowi ułożonych przewodów. W tym celu należy wykorzystać szalowanie oraz inne elementy do stabilizacji położenia rur. Obydwa rodzaje płynnego gruntu uzyskują po 28-miu dniach bardzo dobre parametry wytrzymałościowe i małą wartość wskaźnika wodoprzepuszczalności. Pozytywne wyniki zrealizowanego eksperymentu pozwoliły na budowę docelowego przewodu kamionkowego DN 250 mm o długości 450-ciu m w terenie, gdzie niemożliwe było dynamiczne zagęszczanie wypełnienia wykopu. Technologia płynnego gruntu jest coraz bardziej popularna głównie w centrach dużych aglomeracji miejskich, gdzie na małej powierzchni krzyżuje się kilka liniowych obiektów infrastruktury miejskiej. Koszty tej technologii są porównywalne z metodą konwencjonalną, gdy urobek można wykorzystać do produkcji płynnego gruntu.

Opracowana w ramach osiągnięcia naukowego metodyka prognozowania krytycznego stanu technicznego sieci kanalizacyjnej jest uniwersalnym narzędziem służącym do symulowania wielu zjawisk oraz procesów dotyczących również ogólnie pojętej gospodarki wodnej. W dobie anomalii klimatycznych istotne znaczenie odgrywa zagospodarowanie wód opadowych (ścieków deszczowych). Projektowanie urządzeń służących do rozsączania ścieków deszczowych jest zadaniem wymagającym od projektanta dużego doświadczenia ale także danych dotyczących miarodajnego zwierciadła wody gruntowej. Obserwacje nieprawidłowo funkcjonujących urządzeń do rozsączania wód deszczowych skłoniły autora do opracowania prognozy stanów zwierciadła wody gruntowej dla potrzeb projektowania tego typu urządzeń (zał. 4, [33]). Związek Celowy eksploatuje sieć kilku piezometrów wody gruntowej. Dokumentacja 96 stanów wody gruntowej w jednym z piezometrów z lat 2003÷2006 była bazą danych prognozy stochastycznej opartej na rozkładzie eksponencjalnym. W fazie badań stochastycznych symulowano poziomy wody gruntowej metodą Monte-Carlo. W ten sposób skonstruowano funkcję niezawodności umożliwiającą analizę prawdopodobieństwa wystąpienia poziomu wody gruntowej w kontekście niezawodnego funkcjonowania urządzenia rozsączającego wody deszczowe. Opracowany algorytm symulacyjny można wykorzystać do analizy danych pochodzących z monitoringu każdego piezometru wody gruntowej.

Dodatkowym nurtem badań wynikających z osiągnięcia naukowego była analiza wpływu liczebności próby losowej na wynik prognozy krytycznego stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych. W artykule (zał. 4, [38]) opisano wpływ liczebności próby losowej na wynik prognozy krytycznego stanu technicznego przyłączy kamionkowych (DN 100÷200 mm). W ramach badań utworzono próby losowe o liczebności 200, 400, 600, 868 przyłączy. Dla każdej z nich opracowano statystyczno-stochastyczną prognozę krytycznego stanu technicznego opartą na rozkładzie Weibulla oraz metodzie Monte-Carlo. W celu uzyskania miarodajnych wyników badań wykonano dla każdej próby losowej 15 000 symulacji matematycznych. Wpływ liczebności próby losowej na stan techniczny przyłączy analizowano na podstawie parametru formy funkcji Weibulla b .

Wnioskiem z tych badań było stwierdzenie, że miarodajne prognozowanie stanu technicznego sieci kanalizacyjnej wymaga próby losowej o liczebności wynoszącej przynajmniej 600 odcinków.

Interesującym zastosowaniem opracowanej metodyki badawczej było również prognozowanie wody infiltracyjnej dla sieci eksploatowanej w zlewni ciek Hachinger Bach. Redukcja wody infiltracyjnej jest ważnym zadaniem eksploatacyjnym, ponieważ badana sieć nie dysponuje własną oczyszczalnią ścieków. Badania statystyczne oparto na 154 wynikach pomiarów minimalnego strumienia przepływu ścieków (zał. 4, [44]) w punkcie ich wprowadzenia do infrastruktury monachijskiej. Teoretyczną krzywą przepływów skonstruowano w oparciu o rozkład eksponencjalny. W celu zwiększenia dokładności wyników badań wykorzystano odchylenie standardowe jako podstawę generowania dowolnej liczby danych. Miarodajną krzywą ustalono na podstawie 15 000 wartości minimalnych przepływów, która pozwala prognozować udział wody infiltracyjnej w całkowitym zrzucie ścieków. Analiza wyników prognozowania wody infiltracyjnej jest istotnym komponentem optymalizacji zarządzania linowymi obiektami kanalizacyjnymi.

Podsumowanie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Moją dotychczasową działalność naukowo-zawodowo-publicystyczną można podzielić na trzy charakterystyczne etapy. Pierwszy z nich obejmuje publikacje (zał. 4, [1]+[8]) dotyczące badań nt. stabilizacji podłoża gruntowego metodami iniekcijnymi i ich praktycznych zastosowań w celu zabezpieczania obiektów przemysłowych oraz drogowo-mostowych przed nierównomiernymi osiadaniem. Stabilizację podłoża gruntowego metodami iniekcijnymi wdrożono na szeroką skalę w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia w dwóch największych polskich elektrowniach węglowych – w Elektrowni Kozienice (3600 MW) i Dolna Odra (1600 MW). Zabezpieczanymi obiektami były bloki energetyczne o mocy 200 MW oraz młyny węglowe.

W kolejnym etapie opisano zagadnienia naukowo-techniczne związane z rozbudową oraz renowacją sieci kanalizacyjnej (zał. 4, [9]+[14]). Publikacje te poświęcono niekonwencjonalnym metodom budowy przewodów kanalizacyjnych bazujących na płynnym gruncie oraz technikom renowacyjnym. Początki renowacji sieci odprowadzającej ścieki ze zlewni ciek Hachinger Bach sięgają 2000 r. Okres ten można jeszcze zaliczyć do wstępnej fazy tej zupełnie nowej dziedziny techniki nie posiadającej dobrych regulacji prawno-technicznych. Dlatego konieczne było opracowanie wielu standardów dotyczących między innymi managementu jakości renowacji. Analiza zrealizowanej odnowy sieci kanalizacyjnej w gminie Unterhaching była genezą powstania pracy doktorskiej pt. „Metodyka prognozowania stanu technicznego sieci kanalizacyjnej” (zał. 4, [15]). Zaproponowaną metodykę oparto na korelacji stanu technicznego oraz wieku przewodów kanalizacyjnych. Stan techniczny 40 000 m sieci ustalono na podstawie pełnozakresowej inspekcji optycznej. Statystyczne badania modelowe umożliwiły szczegółową analizę jakościowo-ilościową stanu technicznego badanego obiektu. Opracowanie prognozy pozwoliło również określić zakres koniecznej odnowy gwarantujący pełną dyspozycyjność sieci w okresie założonej żywotności technicznej. Wyniki badań modelowych były generalnie zgodne z zakresem rzeczywiście zrealizowanej rehabilitacji technicznej sieci.

W trzecim etapie mojej działalności naukowo-zawodowej opublikowałem artykuły opisujące prognozy stanu technicznego różnych rodzajów przewodów funkcjonujących w różnych warunkach brzegowych (zał. 4, [16]+[44]). Oparto je na modelowaniu statystyczno-stochastycznym krytycznego stanu technicznego sieci łącząc rozkład Weibulla z metodą Monte-Carlo. Opracowana metodyka badawcza ma uniwersalny charakter i może być z powodzeniem zastosowana w innych dziedzinach gospodarki wodnej. Realizacja odnowy według zaproponowanej metodyki prognozowania stanu technicznego zapewnia racjonalną eksploatację liniowego obiektu kanalizacyjnego polegającą na minimalizacji kosztów przy osiągnięciu maksymalnie długiej dyspozycyjności obiektu.

W lutym b.r. zawarłem umowę wydawniczą z niemieckim wydawnictwem Spinger dotyczącą wydania książki p.t. „Kanalzustandsprognose” (Prognozowanie stanu technicznego sieci kanalizacyjnej).

Geneza i cele opublikowanych prac naukowych

Genezą powstania prac naukowych we wszystkich etapach mojej działalności naukowo-zawodowej była potrzeba rozwiązania praktycznych zadań stawianych przez przemysł energetyczny oraz Polskie Koleje Państwowe jak również próba optymalizacji zarządzania linowymi obiektami

kanalizacyjnymi. W pierwszym etapie badań wdrożono metody zabezpieczające duże obiekty przemysłowe oraz drogowo-mostowe przed nierównomiernymi osiadaniami. Zleceniodawca wymagał, aby realizacja zabezpieczeń uwzględniała specyfikę procesów produkcyjnych bez konieczności ich przerywania. Celem powyższych publikacji było opracowanie i wdrożenie metod iniekcyjnego wzmocnienia sypkiego podłoża gruntowego częściowo nasączonego wodą gruntową. W wyniku badań laboratoryjnych, in-situ oraz wdrożeniowych opracowano trójfazową metodę stabilizacji gruntu polegającą na iniekcji mieszanek cementowych, dwufazowej silikatytacji oraz iniekcji żywicy mocznikowo-formaldehydowej o nazwie handlowej klej iniekcyjny nr 116. Wykonanie robót stabilizacyjnych wymagało doboru specjalnych pomp oraz skonstruowania rurek umożliwiających iniekcję segmentową w zakresie głębokości 10÷17 m oraz przez dno rury ze stożkiem gubionym do głębokości 10 m.

Genezą drugiego etapu była konieczność wdrożenia niekonwencjonalnych metod budowy przewodów kanalizacyjnych w trudnych warunkach gruntowo-wodnych, jak również konieczność opracowania standardów prawno-technicznych renowacji kamionkowych przewodów kanalizacyjnych i kamionkowych przyłączy. Celem publikacji drugiego etapu było wdrożenie technologii płynnego gruntu do budowy przewodów kanalizacyjnych w centrach miejskich o gęstej zabudowie. Istotnym aspektem wdrożenia tej techniki było zabezpieczenie przed wyporem ułożonych rur w wykopie podczas jego wypełniania płynnym gruntem. Celem publikacji dotyczących odnowy było opracowanie wytycznych dla renowacji przewodów funkcjonujących w strefie wahań wody gruntowej oraz standardów w zakresie managementu jakości realizacji odnowy sieci kanalizacyjnej.

Natomiast genezą trzeciego etapu były próby zoptymalizowania eksploatacji sieci kanalizacyjnej w oparciu o prognozę jej stanu technicznego. Refleksja ta powstała na podstawie analizy wyników odnowy sieci odprowadzającej ścieki bytowo-gospodarcze ze zlewni ciekłu Hachinger Bach w Bawarii. Celem artykułów opublikowanych w ostatnim okresie działalności była optymalizacja zarządzania dużą siecią kanalizacyjną. Statystyczno-stochastyczna prognoza stanu technicznego eksploatowanego obiektu umożliwiła realizację tak zdefiniowanego zadania. Nowatorskim rozwiązaniem tego zagadnienia okazała się redukcja prognozy do krytycznego stanu technicznego opisującego granicę między konserwacją a rehabilitacją techniczną. Do opisu funkcji granicznej wykorzystano rozkład Weibulla w połączeniu z symulacjami matematycznymi metodą Monte-Carlo.

Celem generalnym pozostałych publikacji było rozwiązanie zagadnień technicznych o dużej skali trudności sygnalizowanych przez przemysł oraz eksploatatorów liniowych obiektów kanalizacyjnych. Opracowane przez autora metody oraz metodyki, jak również praktyczne wdrożenia spełniły w pełni oczekiwania ich zleceniodawców. Metody te charakteryzuje duża aplikacyjność oraz uniwersalność, co stwarza korzystne warunki ich zastosowania w wielu dziedzinach techniki i gospodarki wodnej.

6. Informacja o współpracy naukowej popularyzacji nauki i osiągnięciach dydaktycznych

W 2007 r. Bawarskie Ministerstwo Ochrony Środowiska zwróciło się do mnie z prośbą o wygłoszenie referatu nt. odnowy sieci w gminie Unterhaching w ramach szkolenia polskiej kadry technicznej. Kurs ten organizuje od wielu lat niemieckie Stowarzyszenie Naukowo-Techniczne DWA. Delegacja polska odwiedziła gminę Unterhaching, której sieć eksploatuje nasz Związek Celowy.

W 2011 r. Stowarzyszenie DWA - Oddział Bawarski zwróciło się do mnie z prośbą o zorganizowanie kursu „Rzeczoznawca DWA ds. renowacji przykanalików”. Opracowany przeze mnie program został oficjalnie przyjęty przez Bawarski Urząd Ochrony Środowiska. W 2014 roku opracowałem i przeprowadziłem Seminarium-DWA nt. „Renowacja przykanalików” oraz przygotowałem dla firmy HTI Gienger KG z Mark Schwaben dwa seminaria nt. „Metodyka prognozowania stanu technicznego przykanalików” oraz „Metodyka prognozowania zwierciadła wody gruntowej w celu projektowania urządzeń filtracyjnych”. Następnie wystąpiłem na niemieckim forum specjalistów ds. renowacji przewodów kanalizacyjnych „Münchner Runde” w Garchingu z referatem nt. „Stan techniczny przyłączy kamionkowych” oraz wygłosiłem dwa referaty „Odnowa przykanalików” i „Odnowa przewodów kanalizacyjnych” dla grupy oczyszczalni ścieków skupionych wokół oczyszczalni monachijskiej (pn. Kläranlagennachbarschaft).

