Rozprawa doktorska

w dyscyplinie Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

Wirtualizacja procesu inspekcji obiektów mostowych

mgr inż. Mateusz Uściłowski

Promotor:
prof. dr hab. inż. Marek Salamak

Opiekun pomocniczy:
dr inż. Marcin Jasiński



Politechnika Śląska

Gliwice, wrzesień 2026



Wydział Budownictwa

Podziękowania

Przez ostatnie cztery lata, które poświęciłem realizacji tej pracy naukowej, wydarzyło się w moim życiu wiele - zarówno dobrego, jak i trudnego. Był to czas pełen emocji, zmian, wyzwań i ważnych doświadczeń. Zakończenie tej pracy, będące dla mnie zamknięciem ważnego etapu w życiu, chciałbym wykorzystać jako okazję do podziękowania wszystkim, którzy towarzyszyli mi w tym okresie i bez których wsparcia jej powstanie nie byłoby możliwe.

Na wstępie chciałbym podziękować mojemu promotorowi, Markowi Salamakowi, za cenne wskazówki i rozmowy, które prowadziły mnie po tej naukowej drodze. Dziękuję również Piotrowi Łazińskiemu, który już na etapie studiów inżynierskich jako pierwszy dostrzegł we mnie potencjał i zachęcił do dalszego rozwoju w obszarze mostów. Podziękowania kieruję także do Zespołu Mostów Politechniki Śląskiej, w szczególności do Kamila, Marcina, Dawida i Borysa, za spotkania, dyskusje i wsparcie merytoryczne - nadawaliście nową perspektywę moim działaniom i wspieraliście mnie radą.

Dziękuję całej załodze Mostoprojekt Katowice - Adrian, Asia, Damian, Dawid, Grzesiu, Maciek, Magda, Mati, Piotr, Ola i Zuza - bez Waszej otwartości na moje pomysły, wyrozumiałości i codziennego wsparcia ta praca by nie powstała. Osobne miejsce w tych podziękowaniach zajmuje Marcin Czech, który kiedyś we mnie uwierzył, a teraz umożliwił mi równoległą pracę naukową i inżynierską.

Chciałbym podziękować mojej rodzinie, która mnie kształtowała od urodzenia: mamie Małgosi i tacie Włodkowi, siostrom, dziadkom, a także rodzinie ze strony mojej żony, która dodatkowo kształtuje mnie od ponad dziesięciu lat, na czele z trzema energicznymi blondynkami.

Dziękuję również mojej drugiej rodzinie - wspaniałym przyjaciołom z grupy „Kajaki", którzy podczas licznych spotkań pozwalali mi zapominać o przytłaczającej i pełnej obowiązków rzeczywistości. Burek - nasze treningi i sparingi tenisowe były dla mnie ważnym elementem utrzymania równowagi w ostatnich latach, a Twoje dociekliwe pytania nieraz pozwoliły mi znaleźć drugie dno w moich - wydawałoby się - zamkniętych rozważaniach. Na koniec tego sportowo-towarzyskiego wątku dziękuję również Mikelowi Artecie i całej drużynie Arsenalu, któremu kibicuję od dziecka - pierwsze od 22 lat mistrzostwo Anglii było idealnym akcentem na finiszu pisania tej rozprawy.

Ostatni, ale najważniejsi.

Julia - Twoja cierpliwość, bezwarunkowe wsparcie i wszystkie wyrzeczenia są nieocenione. To Ty najlepiej wiesz, ile późnych wieczorów, wysiłku i odkładanych planów kosztowała praca nad tą rozprawą. Dziękuję, że byłaś w tym wszystkim ze mną.

Mikołaj - dziękuję Ci za nową perspektywę i dodatkową motywację, które pojawiły się razem z Tobą. Kończenie tej pracy było trudniejsze, ale dużo piękniejsze.

Tę pracę chciałbym zadedykować mojej mamie Małgosi,
która niestety nie doczekała jej końca – wiem jednak, że nikt
nie byłby ze mnie dumny tak jak Ty.

Streszczenie

Rozprawa dotyczy tematyki wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych w kontekście współczesnych wyzwań związanych z utrzymaniem infrastruktury transportowej. Obiekty mostowe są elementem infrastruktury krytycznej, a ich bezpieczne utrzymanie ma znaczenie techniczne, społeczne i gospodarcze. Punktem wyjścia pracy jest obserwacja, że tradycyjne metody inspekcji napotykają liczne ograniczenia związane m.in. z bezpiecznym dostępem do trudno dostępnych elementów konstrukcji, jakością i powtarzalnością dokumentacji oraz ograniczoną możliwością ponownej analizy pozyskanych danych. Celem rozprawy było wykazanie, że elementy wirtualizacji, oparte na integracji technik przechwytywania rzeczywistości i środowisk wirtualnych, pozwalają na niwelację ograniczeń podejścia tradycyjnego, stanowiąc dla niego skuteczne wsparcie i uzupełnienie.

W pracy przeprowadzono analizę krajowych oraz wybranych zagranicznych regulacji oraz praktyk dotyczących inspekcji obiektów mostowych, ze szczególnym uwzględnieniem problemów systemowych, stopnia cyfryzacji i możliwości wdrażania nowoczesnych technologii. Następnie przedstawiono przegląd stanu wiedzy z zakresu technik wspomagających inspekcję, obejmujący m.in. roboty mobilne, fotogrametrię, skanowanie laserowe oraz technologie immersyjne. Na tej podstawie opracowano autorską koncepcję piramidy wirtualizacji procesu inspekcji. Model ten obejmuje 9 poziomów rozwoju procesu, od inspekcji tradycyjnej po zintegrowany system diagnostyczno-predykcyjny. Uzupełnieniem koncepcji była propozycja standaryzacji identyfikacji elementów obiektów mostowych, ukierunkowana na stworzenie uniwersalnego i zrozumiałego maszynowo języka opisu, wspierającego porządkowanie oraz integrację danych diagnostycznych.

Badania skoncentrowano na dwóch etapach piramidy: cyfrowym odwzorowaniu obiektu oraz inspekcji w środowisku wirtualnym. Opracowano metodykę pozyskiwania, przetwarzania i integracji danych przestrzennych dla wybranych obiektów mostowych z wykorzystaniem fotogrametrii i skanowania laserowego. Wykazano, że możliwe jest tworzenie modeli cyfrowych o różnym stopniu szczegółowości, których jakość jest wystarczająca do prowadzenia inspekcji wizualnej oraz analiz geometrycznych. Następnie przeanalizowano wykorzystanie środowisk wirtualnych, zarówno platform komputerowych, jak i autorskiej aplikacji immersyjnej VR Inspector, do identyfikacji uszkodzeń, analizy elementów trudno dostępnych oraz pracy zespołowej na wspólnym modelu obiektu.

Uzyskane wyniki potwierdziły, że integracja danych w ramach cyfrowego modelu porządkuje informacje diagnostyczne oraz wspomaga proces inspekcji. Wykazano również, że inspekcja realizowana w środowisku wirtualnym może niwelować wybrane ograniczenia podejścia tradycyjnego, zwłaszcza w zakresie analizy trudno dostępnych miejsc. Praca nie zakłada pełnego zastąpienia metod tradycyjnych, lecz wskazuje kierunek ich rozwoju poprzez etapowe wdrażanie elementów wirtualizacji. Ostatecznie rozprawa stanowi zarówno próbę uporządkowania pojęciowego i metodycznego, jak i praktyczną podstawę do dalszych prac nad standaryzacją oraz wdrażaniem cyfrowych narzędzi inspekcyjnych w mostownictwie, wpisując się w szerszy proces transformacji cyfrowej budownictwa.

Abstract

The dissertation explores the issues of the virtualization of the bridge inspection process in the context of contemporary challenges related to the maintenance of transport infrastructure. Bridge structures constitute a component of critical infrastructure, and their safe maintenance is of technical, social, and economic importance. The starting point of the study is the observation that traditional inspection methods face numerous limitations related to safe access to hard-to-reach structural elements, the quality and reproducibility of documentation, and the limited possibility of re-analyzing the acquired data. The aim of the dissertation was to demonstrate that elements of virtualization, based on the integration of reality capture techniques and virtual environments, mitigate the deficiencies of the traditional approach, providing effective support and complementing it.

The work presents an analysis of domestic and selected foreign regulations and practices related to bridge inspections, with particular focus on systemic problems, the degree of digitalization, and the possibilities for implementing modern technologies. Subsequently, a review of the state of knowledge in the field of inspection-supporting techniques was presented, including mobile robots, photogrammetry, laser scanning, and immersive technologies. On this basis, the author developed an original concept of the Virtualization Pyramid of the inspection process. This model includes 9 levels of process development, from traditional inspection to an integrated diagnostic and predictive system. The concept was complemented by a proposal for the standardization of the identification of bridge structure elements, aimed at creating a universal and machine- interpretable description language, supporting the organization and integration of diagnostic data.

The research focuses on two stages of the pyramid: the digital representation of the structure and inspection in a virtual environment. A methodology for the acquisition, processing, and integration of spatial data for selected bridge structures was developed using photogrammetry and laser scanning. It was demonstrated that it is possible to create digital models with different levels of detail, the quality of which is sufficient for conducting visual inspections and geometric analyses. Subsequently, the use of virtual environments, both computer-based platforms and the author's immersive application, VR Inspector, was analyzed for the identification of damage, the analysis of hard-to-reach elements, and teamwork on a shared model of the structure.

The obtained results confirmed that the data integration within a digital model organizes diagnostic information and supports the inspection process. It was also demonstrated that inspection carried out in a virtual environment can reduce selected limitations of the traditional approach, especially in the analysis of hard-to-reach areas. The dissertation does not assume the full replacement of traditional methods but rather indicates the direction of their development through the phased implementation of virtualization elements. Ultimately, the dissertation constitutes both an attempt at conceptual and methodological systematization and a practical basis for further work on the standardization and implementation of digital inspection tools in bridge engineering, aligning with the broader process of the digital transformation of construction.

Spis treści

Streszczenie **5**

Abstract **7**

Lista tabel **13**

Lista grafik **15**

Wykaz skrótów i pojęć **21**

Skróty 21

Pojęcia 25

1 Wstęp **33**

1.1 Problematyka, motywacja i aktualne wyzwania 33

1.2 Tezy i cele pracy 36

1.3 Przyjęte założenia i struktura pracy 37

2 Wytyczne dotyczące inspekcji obiektów mostowych **39**

2.1 Regulacje krajowe i efekty ich praktycznego stosowania 39

2.1.1 Wprowadzenie 39

2.1.2 Klasyfikacja obiektów i rodzaje opracowań diagnostycznych 41

2.1.3 Dokumentacja wyników inspekcji okresowych 47

2.2 Regulacje i praktyki zagraniczne 58

2.2.1 Wprowadzenie 58

2.2.2 Słowacja 59

2.2.3 Włochy 61

2.2.4 Norwegia 66

2.2.5 Podsumowanie 71

2.3 Propozycje rozwoju i kierunki modernizacji polskiego systemu inspekcji 73

2.3.1 Ograniczenia praktyczne i problemy systemowe 73

2.3.2 Strategia modernizacji i kluczowe kierunki zmian 75

2.3.3 Ontologie i modele semantyczne w zarządzaniu informacją 78

3 Przegląd stanu wiedzy i technik inspekcji obiektów mostowych **83**

3.1 Wstęp 83

3.1.1 Aktualne scenariusze pracy inspektorów mostowych 83

3.1.2 Ograniczenia podejścia tradycyjnego 85

3.2 Współczesne technologie i narzędzia wspomagające inspektora 87
3.2.1 Wprowadzenie 87
3.2.2 Roboty mobilne 88
3.2.3 Skanowanie laserowe 91
3.2.4 Fotogrametria 94
3.2.5 Rzeczywistość wirtualna, rozszerzona i mieszana 96
3.2.6 Techniki badań nieniszczących 99
3.2.7 Monitoring sensoryczny 103
3.2.8 Sztuczna inteligencja 105
3.3 Wyzwania technologiczne i organizacyjne 109
3.3.1 Wprowadzenie 109
3.3.2 Bariery i czynniki decydujące o doborze techniki 109
3.3.3 Aspekty organizacyjne i prawne 115
4 Koncepcja wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych 119
4.1 Wprowadzenie 119
4.2 Piramida wirtualizacji procesu inspekcji 119
4.2.1 Założenia i struktura piramidy wirtualizacji 119
4.2.2 Poziom 0 – Tradycyjna inspekcja 121
4.2.3 Poziom 1 – Inspekcja wspomagana cyfrowo 122
4.2.4 Poziom 2 – Zintegrowana inspekcja cyfrowa 123
4.2.5 Poziom 3 – Cyfrowe odwzorowanie obiektu 124
4.2.6 Poziom 4 – Wirtualna inspekcja obiektu 125
4.2.7 Poziom 5 – Automatyczna detekcja uszkodzeń 127
4.2.8 Poziom 6 – Wspomagana inspekcja terenowa 128
4.2.9 Poziom 7 – Autonomiczna inspekcja zrobotyzowana 130
4.2.10 Poziom 8 – Zintegrowany system diagnostyczno-predykcyjny 131
4.3 Standaryzacja identyfikacji elementów obiektów mostowych 132
4.3.1 System identyfikacji elementów 132
4.3.2 Sposoby oznaczania elementów w terenie 144
4.4 Podsumowanie 150
5 Cyfrowe odwzorowanie obiektów mostowych 153
5.1 Założenia i struktura procesu 153
5.1.1 Usytuowanie procesu w piramidzie wirtualizacji 153
5.1.2 Przechwytywanie rzeczywistości a rekonstrukcja 3D 153
5.1.3 Etapy procesu cyfrowego odwzorowania obiektu 154
5.2 Narzędzia i środowisko badań 155
5.2.1 Sprzęt pomiarowy i rejestrujący 155
5.2.2 Oprogramowanie i środowisko informatyczne 158

5.3 Obiekty badawcze 161
5.3.1 Zakres i uzasadnienie wyboru obiektów 161
5.3.2 Obiekty drogowe 161
5.3.3 Obiekty kolejowe 164
5.4 Przygotowanie do badań terenowych 166
5.4.1 Analiza obiektu i uwarunkowań inspekcji 166
5.4.2 Dobór technik przechwytywania rzeczywistości 168
5.4.3 Planowanie pozyskiwania danych i organizacja prac terenowych 171
5.5 Pozyskiwanie danych w terenie 176
5.5.1 Fotogrametria 176
5.5.2 Naziemne skanowanie laserowe 179
5.5.3 Rekonstrukcja natychmiastowa 184
5.5.4 Pomiary uzupełniające i dane wspierające 187
5.6 Przetwarzanie i integracja danych 189
5.6.1 Wstępna obróbka i organizacja materiałów 189
5.6.2 Proces generowania modeli 3D – integracja skanowania i fotogrametrii 194
5.6.3 Rodzaje i charakterystyka opracowanych modeli 3D 205
5.7 Scenariusze pracy inspektora na etapie cyfrowego odwzorowania 208

6 Inspekcja w środowisku wirtualnym 215

6.1 Proces inspekcji w środowisku wirtualnym 215
6.1.1 Usytuowanie procesu w piramidzie wirtualizacji 215
6.1.2 Dobór środowisk inspekcyjnych 215
6.1.3 Schemat realizacji procesu 216
6.2 Narzędzia i środowisko badań 218
6.2.1 Sprzęt 218
6.2.2 Oprogramowanie 220
6.3 Wirtualna inspekcja w środowisku komputerowym 222
6.3.1 Wizualna ocena stanu technicznego na dedykowanej platformie 222
6.3.2 Analiza danych przestrzennych i ocena geometrii 232
6.4 Autorska aplikacja do inspekcji w środowisku immersyjnym 236
6.4.1 Założenia projektowe i architektura aplikacji 236
6.4.2 Dane wejściowe, interfejs użytkownika i mechanika nawigacji 239
6.4.3 Zarządzanie modelami, wizualizacja oraz narzędzia inspekcyjne 242
6.4.4 Weryfikacja działania aplikacji na wybranych obiektach mostowych 244
6.5 Scenariusze pracy inspektora na etapie wirtualnej inspekcji 247

7 Podsumowanie i wnioski 253

7.1 Podsumowanie 253

7.2 Wnioski 256
7.2.1 Ograniczenia podejścia tradycyjnego i potrzeba transformacji cyfrowej 256
7.2.2 Cyfrowe odwzorowanie i inspekcja w środowisku wirtualnym 257
7.2.3 Znaczenie praktyczne i kierunki wdrażania wirtualizacji 258
7.3 Stopień wdrożenia opracowanych rozwiązań 259
7.4 Kierunki dalszych badań 261
Bibliografia 263

Lista tabel

Tab. 2-1 Skala oceny obiektów mostowych wg [209] 49
Tab. 2-2 Skala oceny kolejowych obiektów inżynieryjnych wg [95] 50
Tab. 2-3 Katalog uszkodzeń wg Załącznika 2 [95] 51
Tab. 2-4 Skala ocen drogowych obiektów inżynierskich wg [260] 55
Tab. 2-5 Skala ocen izolacji przeciwwilgociowej wg [260] 55
Tab. 2-6 Katalog uszkodzeń elementów obiektów inżynierskich wg [260] 57
Tab. 2-7 Syntetyczne porównanie systemów zarządzania mostami 72
Tab. 4-1 Przykładowy zestaw danych identyfikacyjnych skanowanego elementu 145
Tab. 5-1 Podstawowe parametry techniczne wykorzystanych skanerów laserowych 157
Tab. 5-2 Charakterystyka jednostek obliczeniowych wykorzystanych w procesie przetwarzania danych 160
Tab. 5-3 Zestawienie technik przechwytywania rzeczywistości zastosowanych na wybranych obiektach 170
Tab. 5-4 Zestawienie zakresu i skali pozyskiwania danych fotogrametrycznych na wybranych obiektach mostowych 178
Tab. 5-5 Zestawienie zakresu i organizacji pomiarów naziemnym skanowaniem laserowym na wybranych obiektach 183
Tab. 5-6 Zestawienie parametrów końcowych zarejestrowanych chmur punktów 193
Tab. 5-7 Charakterystyka opracowanych modeli 3D w procesie cyfrowego odwzorowania 207
Tab. 6-1 Zestawienie kluczowych parametrów technicznych gogli Meta Quest 2 i Meta Quest 3 219
Tab. 6-2 Zestawienie autorskich skryptów C# aplikacji VR Inspector i ich roli w procesie inspekcyjnym 238

Lista grafik

Rys. 1-1 Wiadukt w Genui (góra) [115] oraz most w Dreźnie (dół) [66] po katastrofie 34
Rys. 1-2 Zamknięta estakada w Chorzowie 35
Rys. 2-1 Klasyfikacja kolejowych obiektów inżynieryjnych 41
Rys. 2-2 Rodzaje opracowań diagnostycznych kolejowych obiektów inżynieryjnych. 41
Rys. 2-3 Klasyfikacja drogowych obiektów inżynierskich 43
Rys. 2-4 Rodzaje opracowań diagnostycznych drogowych obiektów inżynierskich 44
Rys. 2-5 Wzór protokołu z kontroli okresowej pięcioletniej wg [95] 48
Rys. 2-6 Fragment wypełnionego protokołu z kontroli mostu kolejowego 48
Rys. 2-7 Przykładowe karty uszkodzeń wg Załącznika 5 instrukcji [95] 52
Rys. 2-8 Wzór protokołu z inspekcji wg [260] 53
Rys. 2-9 Fragment wypełnionego protokołu z inspekcji drogowego obiektu mostowego 54
Rys. 2-10 Zasady oceny stanu technicznego elementów wraz z przykładowymi uszkodzeniami wg [272, 273] ... 56
Rys. 2-11 Schemat systemu oznaczania uszkodzeń w słowackich przepisach technicznych [239] 60
Rys. 2-12 Przykładowa karta uszkodzeń w słowackich przepisach technicznych [239] 60
Rys. 2-13 Przykładowa karta uszkodzeń we włoskich przepisach technicznych [144] 63
Rys. 2-14 Interaktywna mapa obiektów publicznych na terenie Włoch [5] 64
Rys. 2-15 Roboty inspekcyjny i myjący zamontowane na nowym wiadukcie w Genui [34, 75] 65
Rys. 2-16 Oznaczenia wybranych elementów wg przewodnika V440 [246] 68
Rys. 2-17 Ustandaryzowany sposób numeracji osi i węzłów kratownicy wg przewodnika N-V441 [173] 69
Rys. 2-18 Przykładowe uszkodzenie opisane w Załączniku A przewodnika N-V441 [173] 69
Rys. 2-19 Fragment systemu Brutus [202] 70
Rys. 2-20 Diagram Ishikawy przedstawiający główne problemy polskiego systemu inspekcji mostów 74
Rys. 2-21 Fundament i filary efektywnego systemu inspekcji mostów 75
Rys. 2-22 Proponowana klasyfikacja obiektów inżynierskich 76
Rys. 2-23 Czynniki mogące mieć wpływ na częstotliwość wykonywania inspekcji. 77
Rys. 2-24 Ekosystem norm ISO wspierających proces inspekcji i zarządzania obiektami mostowymi 78
Rys. 2-25 Przykład hierarchicznego opisu uszkodzeń w wytycznych europejskich [86] 80
Rys. 2-26 Proponowana struktura polskiej ontologii mostowej z uwzględnieniem fazy operacyjnej 82
Rys. 3-1 Tradycyjne techniki badań NDT: (1) miernik powłok malarskich, (2) twardościomierz Vickersa, (3) skaner ferromagnetyczny, (4) młotek Schmidta. 83
Rys. 3-2 Dostęp inspektora mostowego do trudno dostępnych elementów konstrukcji 84
Rys. 3-3 Zestaw transportujący elementy maszyny TBM (po lewej) i jego ostateczna trasa przejazdu (po prawej) [103, 216] 85
Rys. 3-4 Ograniczenia w tradycyjnych inspekcjach obiektów mostowych 86

Rys. 3-5 Wybrane współczesne technologie i narzędzia wspomagające inspekcje obiektów mostowych 88
Rys. 3-6 Klasyfikacja robotów mobilnych 89
Rys. 3-7 Rodzaje skanowania laserowego 92
Rys. 3-8 Przykładowy proces skanowania laserowego wnętrza budynku 93
Rys. 3-9 Proces fotogrametryczny 95
Rys. 3-10 Kontinuum rzeczywistość-wirtualność 96
Rys. 3-11 Widok mieszanej (po lewej) i wirtualnej rzeczywistości (po prawej) w goglach Meta Quest 3 98
Rys. 3-12 Rodzaje badań NDT konstrukcji betonowych 100
Rys. 3-13 Rodzaje badań elektromagnetycznych konstrukcji betonowych 102
Rys. 3-14 Schemat typowej architektury systemu SHM 104
Rys. 3-15 Hierarchia rozwoju sztucznej inteligencji 106
Rys. 3-16 Hierarchia i wzajemne relacje w obrębie sztucznej inteligencji 107
Rys. 3-17 Architektura działania agenta AI 107
Rys. 3-18 Schemat pięciu grup kluczowych wskaźników efektywności (KPI) w diagnostyce mostów 111
Rys. 3-19 Ocena współczesnych technologii i narzędzi wspomagających inspekcję w odniesieniu do grup KPI 113
Rys. 3-20 Integracja fotogrametrii i skanowania laserowego na przykładzie mostu łukowego 114
Rys. 3-21 Interfejs aplikacji mobilnej DroneTower 117
Rys. 4-1 Autorska koncepcja piramidy wirtualizacji procesu inspekcji mostu 121
Rys. 4-2 Schemat tradycyjnej inspekcji (Poziom 0) 122
Rys. 4-3 Schemat inspekcji wspomaganej cyfrowo (Poziom 1) 123
Rys. 4-4 Schemat zintegrowanej inspekcji cyfrowej (Poziom 2) 124
Rys. 4-5 Schemat cyfrowego odwzorowania obiektu (Poziom 3) 125
Rys. 4-6 Schemat wirtualnej inspekcji obiektu (Poziom 4) 127
Rys. 4-7 Schemat automatycznej detekcji uszkodzeń (Poziom 5) 128
Rys. 4-8 Schemat wspomaganej inspekcji terenowej (Poziom 6) 129
Rys. 4-9 Schemat autonomicznej inspekcji zrobotyzowanej (Poziom 7) 131
Rys. 4-10 Schemat zintegrowanego systemu diagnostyczno-predykcyjnego (Poziom 8) 132
Rys. 4-11 Przykładowy lokalny układ współrzędnych do kodyfikacji 134
Rys. 4-12 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy A: Grunt i otoczenie 136
Rys. 4-13 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy B: Podpory 136
Rys. 4-14 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy C: Ustrój nośny 137
Rys. 4-15 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy D: Zabudowa pomostu 137
Rys. 4-16 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy E: Wyposażenie 138
Rys. 4-17 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy F: Konstrukcje oporowe, grupy G: Przepusty, grupy H: Urządzenia obce 138
Rys. 4-18 Most w Cieszynie nad rzeką Olzą – ujęcia z drona 140
Rys. 4-19 Most w Cieszynie nad rzeką Olzą – model 3D naniesiony na chmurę punktów 141
Rys. 4-20 Widok modelu 3D obiektu ze schematycznie naniesioną numeracją osi podpór i przęseł 141

Rys. 4-21 Widok na podporę pośrednią w osi nr 15 wraz z identyfikacją elementów 142

Rys. 4-22 Przekrój przez przęsło nr 15 w kierunku podpory nr 16 wraz z identyfikacją elementów ustroju nośnego (1) i wyposażenia (2) 143

Rys. 4-23 Przykładowe tabliczki identyfikacyjne z kodami QR 146

Rys. 4-24 Skanowanie znacznika NFC 147

Rys. 4-25 Schemat działania systemu RFID 149

Rys. 4-26 Dwukierunkowe działanie znaczników identyfikacyjnych 149

Rys. 5-1 Schemat procesu cyfrowego odwzorowania obiektu mostowego 154

Rys. 5-2 Używane drony: (1) DJI Mini 5 Pro, (2) DJI Matrice 210 RTK, (3) DJI Mavic 3 Enterprise z modułem RTK (a) i oświetleniem (b) 156

Rys. 5-3 Używane skanery laserowe od lewej: Leica BLK360, Trimble X9, Z+F IMAGER 5010X 157

Rys. 5-4 Most w Kurowie – główny poligon badawczy (zdjęcia ogólne) 162

Rys. 5-5 Most w Kurowie – główny poligon badawczy (dane techniczne i model bryłowy) 162

Rys. 5-6 Most w ciągu ul. Panewnickiej w Gliwicach – inicjalny poligon badawczy 163

Rys. 5-7 Pozostałe wybrane drogowe poligony badawcze (1) Bratysława (2) Chorzów, (3) Mysłowice, (4) Tychy 164

Rys. 5-8 Wybrane kolejowe poligony badawcze: (1) Zator, (2) Kędzierzyn-Koźle, (3) Jarocin 166

Rys. 5-9 Wirtualna wizja lokalna na wiaduktach kolejowych [77] 167

Rys. 5-10 Przykładowa inspekcja przy użyciu trybu punktowego (ang. waypoint route) na wiadukcie autostradowym 173

Rys. 5-11 Przykładowa inspekcja przy użyciu trybu obszarowego (ang. area route) na moście w Gliwicach 174

Rys. 5-12 Przykładowa inspekcja przy użyciu trybu pochyłego (ang. slope route) pylonu mostu w Kurowie 175

Rys. 5-13 Stanowisko robocze BSP na moście w Kurowie oraz przygotowania do lotu na moście w Gliwicach . 176

Rys. 5-14 Pozyskiwanie danych fotogrametrycznych na wybranych obiektach mostowych 177

Rys. 5-15 Typy markerów fotogrametrycznych (po prawej) oraz ich zastosowanie w terenie 178

Rys. 5-16 Pozyskiwanie danych z naziemnego skanowania laserowego na wybranych obiektach 179

Rys. 5-17 Rozmieszczenie stanowisk skanera laserowego w: (1) Zatorze, (2) Chorzowie, (3) Jarocinie i (4) Mysłowicach 181

Rys. 5-18 Proces łączenia chmur punktów z poszczególnych stanowisk w terenie 181

Rys. 5-19 Zastosowanie punktów referencyjnych dla skanowania laserowego w terenie 182

Rys. 5-20 Rekonstrukcja natychmiastowa fragmentu przyczółka przy użyciu Polycam 185

Rys. 5-21 Wybrane efekty rekonstrukcji natychmiastowej przy użyciu Polycam 185

Rys. 5-22 Rekonstrukcja natychmiastowa ciosów podłożyskowych na moście w Krakowie oraz ich stan po remoncie 186

Rys. 5-23 Klasyfikacja pomiarów uzupełniających proces cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych 187

Rys. 5-24 Pomiary geometryczne i referencyjne na wybranych obiektach badawczych: (1) domiary bezpośrednie, (2) pomiar stacją GNSS, (3) pomiar tachimetrem, (4) domiary precyzyjne 188

Rys. 5-25 Uzupełniające pomiary diagnostyczne NDT na moście w Kurowie 189

Rys. 5-26 Przykłady odrzuconych zdjęć niespełniających podstawowych wymagań fotogrametrii 191

Rys. 5-27 Przykład chmury punktów wiaduktu w Katowicach przed i po procesie czyszczenia.....192
Rys. 5-28 Wybrane chmury punktów po procesie rejestracji i oczyszczania 193
Rys. 5-29 Interfejs programu RealityCapture po procesie orientacji danych.....196
Rys. 5-30 Proces obejmujący tworzenie modelu siatkowego i fotogrametrycznego.....197
Rys. 5-31 Model siatkowy i fotogrametryczny wiaduktów kolejowych w Kędzierzynie-Koźlu.....198
Rys. 5-32 Wybrane widoki modeli fotogrametrycznych mostu w Kurowie po procesie upraszczania.....198
Rys. 5-33 Model fotogrametryczny skrzydła wiaduktu koło Łodzi.....199
Rys. 5-34 Modele fotogrametryczne mostu nad Dunajem w Bratysławie.....199
Rys. 5-35 Porównanie jakości geometrycznej modeli pozyskanych różnymi technikami 200
Rys. 5-36 Porównanie jakości teksturalnej modeli pozyskanych różnymi technikami 201
Rys. 5-37 Cechy modeli na uzyskanych na bazie fotogrametrii i skanowania laserowego 201
Rys. 5-38 Pomierzona bezpośrednio w terenie geometria filara (po lewej) oraz zestawienie pomiarów geometrii na modelach uzyskanych z poszczególnych technik (po prawej) 202
Rys. 5-39 Walidacja modelu fotogrametrycznego wybranego pylonu w Kurowie 203
Rys. 5-40 Tworzenie modelu bryłowego mostu kratowego w Zatorze 204
Rys. 5-41 Proces aktualizacji modelu BIM mostu w Kurowie 205
Rys. 5-42 Integracja danych z badań NDT betonu 206
Rys. 5-43 Uzyskane typy modeli 3D 207
Rys. 5-44 Schemat blokowy obejmujący scenariusze pracy inspektora na etapie cyfrowego odwzorowania. Widok ogólny obejmujący przygotowanie (1), pozyskiwanie (2) i przetwarzanie (3).....208
Rys. 5-45 Schemat blokowy dotyczący przygotowania badań przez inspektora w ramach cyfrowego odwzorowywania.....209
Rys. 5-46 Schemat blokowy dotyczący pozyskiwania danych przez inspektora w ramach cyfrowego odwzorowywania.....210
Rys. 5-47 Schemat blokowy dotyczący przetwarzania danych przez inspektora w ramach cyfrowego odwzorowywania.....211
Rys. 6-1 Schemat realizacji inspekcji w środowisku wirtualnym.....217
Rys. 6-2 Środowisko pracy do zespołowej inspekcji wirtualnej 218
Rys. 6-3 Gogle VR Meta Quest 2 i 3 wraz z akcesoriami 220
Rys. 6-4 Interfejs platform Twinspect i gNext (modele demonstracyjne producentów) 221
Rys. 6-5 Interfejs startowy platformy Nira 224
Rys. 6-6 Interfejs użytkownika platformy Nira w przestrzeni obsługi modelu 225
Rys. 6-7 Widok inspekcyjny modelu 3D z odpowiadającymi mu oryginalnymi zdjęciami 226
Rys. 6-8 Przykłady opisu uszkodzeń pylonu mostu w Kurowie na platformie Nira 228
Rys. 6-9 Przykłady opisu uszkodzeń wiaduktu kolejowego w Kędzierzynie-Koźlu na platformie Nira 228
Rys. 6-10 Porównanie uszkodzeń opisanych na modelu 3D oraz zdjęciu na platformie Nira 229
Rys. 6-11 Zespołowa inspekcja wirtualna przy użyciu monitora interaktywnego.....230
Rys. 6-12 Sposób przedstawienia uszkodzeń w raporcie generowanym z platformy Nira.....230

Rys. 6-13 Przykładowe efekty pomiarów odchyłek geometrycznych wiaduktu w Mysłowicach na podstawie chmury punktów 233

Rys. 6-14 Analiza geometrii wieszaków (Gliwice) oraz ocena deformacji dźwigara (Jarocin) na podstawie chmury punktów 234

Rys. 6-15 Proces projektowania i realizacji remontu wiaduktu w Tychach z wykorzystaniem chmury punktów 235

Rys. 6-16 Interfejs środowiska Unity 236

Rys. 6-17 Schemat architektury aplikacji VR Inspector 239

Rys. 6-18 Integracja modelu fotogrametrycznego i bryłowego w Unity 240

Rys. 6-19 Menu podręczne aplikacji VR Inspector 241

Rys. 6-20 Narzędzia inspekcyjne aplikacji VR Inspector 243

Rys. 6-21 Proces inspekcji filara wiaduktu w Chorzowie w środowisku immersyjnym 245

Rys. 6-22 Proces inspekcji pylonu mostu w Kurowie w środowisku immersyjnym 246

Rys. 6-23 Scenariusze pracy inspektora na etapie wirtualnej inspekcji 250

Rys. 7-1 Graficzne podsumowanie struktury rozprawy 254

Wykaz skrótów i pojęć

Niniejszy wykaz obejmuje skróty oraz pojęcia techniczne i specjalistyczne występujące w rozprawie. Ich definicje zostały opracowane na podstawie aktualnego stanu wiedzy, praktyki inżynierskiej oraz własnych analiz i założeń autorskich, dostosowanych do kontekstu badań i tematyki pracy.

W przypadku niektórych pojęć i skrótów wykorzystano sformułowania zgodne lub zbliżone do tych przedstawionych w dokumentach technicznych i regulacyjnych oraz w literaturze fachowej, w szczególności w publikacjach prof. J. Bienia [21, 22] oraz prof. M. Salamaka [215]. Pozostałe definicje stanowią autorską próbę uporządkowania i ujednolicenia terminologii w obszarze zagadnień technicznych i cyfrowych analizowanych w rozprawie.

Skróty

Akronim	Nazwa angielska	Nazwa polska
AE	Acoustic Emission	Emisja akustyczna
AI	Artificial Intelligence	Sztuczna inteligencja
ALS	Airborne Laser Scanning	Lotnicze skanowanie laserowe
AM	Asset Management	Zarządzanie aktywami
AR	Augmented Reality	Rozszerzona rzeczywistość
AUV	Autonomous Underwater Vehicle	Autonomiczny pojazd podwodny
AV	Augmented Virtuality	Rozszerzona wirtualność
BIM	Building Information Modeling	Modelowanie informacji o budowli
BMS	Bridge Management System	System zarządzania mostami
BPMN	Business Process Model and Notation	Modelowanie i notacja procesów biznesowych
BRiM	Bridge Information Modelling	Modelowanie informacji o mostach
BPN	-	Bezzałogowy pojazd naziemny
BSP	-	Bezzałogowy statek powietrzny
CAD	Computer-Aided Design	Projektowanie wspomagane komputerowo
CMK	-	Centralna Magistrala Kolejowa
CNN	Convolutional Neural Network	Konwolucyjna sieć neuronowa
CPK	-	Centralny Port Komunikacyjny

Akronim	Nazwa angielska	Nazwa polska
CV	Computer Vision	Wizja komputerowa
DEM	Digital Elevation Model	Numeryczny model wysokościowy
DIC	Digital Image Correlation	Cyfrowa korelacja obrazów
DIM	Damage Information Modeling,	Modelowanie informacji o uszkodzeniach
DSM	Digital Surface Model	Numeryczny model pokrycia terenu
DL	Deep Learning	Uczenie głębokie
DT	Digital Twin	Cyfrowy bliźniak
DTM	Digital Terrain Model	Numeryczny model terenu
EASA	European Union Aviation Safety Agency	Agencja Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego
EC	-	Eurokody
GCP	Ground Control Point	Naziemny punkt kontrolny
GDDKiA	-	Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad
GINB	-	Główny Inspektor Nadzoru Budowlanego
GIS	Geographic Information System	System informacji geograficznej
GML	Geography Markup Language	Format wymiany danych w GIS
GNSS	Global Navigation Satellite System	Globalny system nawigacji satelitarnej
GPR	Ground Penetrating Radar	Georadar
GPS	Global Positioning System	Globalny system pozycjonowania
GUNB	-	Główny Urząd Nadzoru Budowlanego
HITL	Human-in-the-Loop	Człowiek w pętli decyzyjnej
HMD	Head-mounted display	Wyświetlacz montowany na głowie
ICDD	Information Container for Data Delivery	Kontener informacji do wymiany danych
IDM	Information Delivery Manual	Instrukcja wymiany informacji
IDS	Information Delivery Specification	Specyfikacja wymiany informacji
IFC	Industry Foundation Classes	Format wymiany danych w BIM
INS	Inertial Navigation System	System nawigacji inercyjnej
IoT	Internet of Things	Internet rzeczy
IPD	Interpupillary Distance	Rozstaw źrenic

Akronim	Nazwa angielska	Nazwa polska
IRT	Infrared Thermography	Termografia w podczerwieni
ISO	International Organization for Standardization	Międzynarodowa Organizacja Normalizacyjna
KPI	Key Performance Indicators	Kluczowe wskaźniki efektywności
LCA	Life Cycle Assessment	Ocena cyklu życia
LCC	Life Cycle Cost	Koszt cyklu życia
LiDAR	Light Detection and Ranging	Skanowanie laserowe
LLM	Large Language Model	Duży model językowy
ML	Machine Learning	Uczenie maszynowe
MLS	Mobile Laser Scanning	Mobilne skanowanie laserowe
MR	Mixed Reality	Rzeczywistość mieszana
MVS	Multi-View Stereo	-
NDT	Non-Destructive Testing	Badania nieniszczące
NFC	Near Field Communication	Komunikacja bliskiego zasięgu
NIK	-	Najwyższa Izba Kontroli
OPZ	-	Opis Przedmiotu Zamówienia
OST	Optical see-through	Optycznie przezierne
PANSA	Polish Air Navigation Services Agency	Polska Agencja Żeglugi Powietrznej
PAŻP	Polish Air Navigation Services Agency	Polska Agencja Żeglugi Powietrznej
PIIB	-	Polska Izba Inżynierów Budownictwa
PINB	-	Powiatowy Inspektorat Nadzoru Budowlanego
PKP PLK S.A.	-	Polskie Koleje Państwowe Polskie Linie Kolejowe S.A.
PN	-	Polska Norma
POI	Point of Interest	Punkt zainteresowania
QR	Quick Response	-
RFID	Radio-Frequency Identification	Identyfikacja radiowa
RGB	Red-Green-Blue	Trójkanałowy model barw
ROV	Remotely Operated Vehicle	Zdalnie sterowany pojazd podwodny
RTK	Real-Time Kinematic	Kinematyka w czasie rzeczywistym
RVC	Reality-Virtuality Continuum	Kontinuum rzeczywistość-wirtualność

Akronim	Nazwa angielska	Nazwa polska
SfM	Structure from Motion	-
SGM	-	System Gospodarki Mostowej
SHM	Structural Health Monitoring	Monitorowanie stanu technicznego konstrukcji
SLAM	Simultaneous Localization and Mapping	Jednoczesna lokalizacja i mapowanie
SMOK	-	System Zarządzania Mostami Kolejowymi
SI	-	Sztuczna Inteligencja
SZOK	-	System Zarządzania Obiektami Komunikacyjnymi
TL	Transfer Learning	Uczenie transferowe
TLS	Terrestrial Laser Scanning	Naziemne skanowanie laserowe
ToF	Time-of-Flight	Metoda czasu przelotu
TRL	Technology Readiness Level	Poziom Gotowości Technologicznej
UAS	Unmanned Aerial System	Bezzałogowy system powietrzny
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	Bezzałogowy statek powietrzny
UGV	Unmanned Ground Vehicle	Bezzałogowy pojazd naziemny
UI	User Interface	Interfejs użytkownika
ULC	-	Urząd Lotnictwa Cywilnego
USV	Unmanned Surface Vehicle	Bezzałogowy pojazd nawodny
UUV	Unmanned Underwater Vehicle	Bezzałogowy pojazd podwodny
VST	Video see-through	Wizyjny tryb przezierny
VTOL	Vertical Take-Off and Landing	Pionowy start i lądowanie
WINB	-	Wojewódzki Inspektorat Nadzoru Budowlanego
WiS	-	Wzorce i standardy
VR	Virtual Reality	Wirtualna rzeczywistość
XAI	Explainable Artificial Intelligence	Wyjaśnialna sztuczna inteligencja
XR	Extended Reality	Rozszerzona rzeczywistość (zbiorczo)
YOLO	You Only Look Once	-

Pojęcia

AINOP – Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche (Narodowe Cyfrowe Archiwum Obiektów Publicznych). Centralny, publiczny rejestr cyfrowy prowadzony we Włoszech, obejmujący obiekty infrastruktury transportowej (m.in. mosty, tunele, wiadukty, przepusty).

ANAS S.p.A. – Azienda Nazionale Autonoma delle Strade, włoska spółka akcyjna zarządzająca drogami i autostradami we Włoszech, kontrolowana przez państwową grupę Ferrovie dello Stato Italiane. ANAS odpowiada za planowanie, budowę, utrzymanie i monitoring infrastruktury drogowej, w tym mostów.

Badania nieniszczące (ang. NDT) – grupa metod diagnostycznych umożliwiających ocenę stanu technicznego konstrukcji w sposób bezinwazyjny, bez jej uszkadzania lub ingerencji w jej strukturę.

Bezzałogowe pojazdy naziemne (BPN, ang. UGV) – pojazdy poruszające się po powierzchni terenu bez obecności operatora na pokładzie, sterowane zdalnie lub działające autonomicznie. Wykorzystywane m.in. do działań inspekcyjnych, transportowych, pomiarowych oraz w sytuacjach zagrażających bezpieczeństwu człowieka.

Bezzałogowe statki powietrzne (BSP, ang. UAV) – inaczej dron, statek powietrzny bez załogi na pokładzie, sterowany zdalnie lub wykonujący lot autonomicznie, stosowane m.in. do działań wojskowych, pozyskiwania zdjęć i danych przestrzennych.

Bieżące utrzymanie – podstawowe działania utrzymaniowe mające na celu wydłużenie okresu eksploatacji obiektu dzięki ograniczeniu jego degradacji.

Brutus – norweski system zarządzania obiektami mostowymi.

Chmura punktów – zbiór punktów określonych w przestrzeni trójwymiarowej reprezentujących geometrię obiektu lub terenu, uzyskiwany najczęściej ze skanowania laserowego lub fotogrametrii. Stanowi podstawę do tworzenia modeli 3D.

Cyfrowy bliźniak – ang. Digital Twin, wirtualny odpowiednik obiektu lub systemu, stale aktualizowany danymi rzeczywistymi, wykorzystywany m.in. do symulacji, diagnostyki i zarządzania.

Cyfryzacja – ang. digitalization, proces wdrażania technologii cyfrowych w działalności organizacji lub instytucji, takich jak systemy IT czy automatyzacja procesów, w celu uzyskania dostępu do informacji cyfrowych z wielu systemów i punktów danych oraz zwiększenia efektywności i szybszego przetwarzania informacji. Obejmuje m.in. digitalizację danych, rozwój infrastruktury czy szkolenia pracowników.

Digitalizacja – ang. digitization, cyfrowy, przekształcanie informacji analogowych (np. dokumentów, obrazów) w dane cyfrowe, aby umożliwić ich przechowywanie, wyszukiwanie, udostępnianie i dalsze przetwarzanie. Jest to węższy proces będący częścią cyfryzacji.

Ekspertyza – opracowanie obejmujące ocenę stanu technicznego obiektu lub jego części, wykonane na podstawie specjalistycznych badań, pomiarów i obliczeń, zawierające diagnozę i ocenę zaistniałych problemów technicznych oraz propozycję ich rozwiązania, w celu ustalenia przydatności do użytkowania i zasad utrzymania obiektu

Estakada – wieloprzęsłowy obiekt mostowy, służący przeprowadzeniu drogi lub torów kolejowych ponad rozległą przeszkodą lub zespołem przeszkód. Charakteryzuje się dużą długością i powtarzalną konstrukcją przęseł.

Fotogrametria – technika pozyskiwania danych przestrzennych o obiektach i terenie na podstawie zdjęć wykonanych z różnych lokalizacji. Umożliwia ona odtworzenie ich kształtu, położenia i wymiarów w przestrzeni trójwymiarowej.

Georadar (ang. GPR) – urządzenie diagnostyczne wykorzystujące fale elektromagnetyczne do analizy wewnętrznej struktury elementów konstrukcyjnych oraz podłoża gruntowego.

Gęsta chmura punktów – szczegółowa chmura punktów charakteryzująca się dużą liczbą punktów na jednostkę powierzchni, uzyskiwana na podstawie danych obrazowych (np. fotogrametrii) lub pomiarowych (np. skanowania laserowego). Stanowi dokładne odwzorowanie geometrii powierzchni obiektu lub terenu i służy jako podstawa do tworzenia modeli 3D czy ortofotomap.

Główny inżynier – inżynier posiadający stosowne uprawnienia, kierujący zespołem diagnostycznym ds. obiektów inżynieryjnych w Zakładzie Linii Kolejowych

Immersja – stan głębokiego zaangażowania użytkownika w środowisko cyfrowe, w którym doświadczenie interakcji z wirtualną rzeczywistością staje się psychologicznie zbliżone do obecności w świecie rzeczywistym. Immersja osiągana jest poprzez odpowiednie odwzorowanie bodźców zmysłowych co prowadzi do subiektywnego poczucia „zanurzenia" w środowisku cyfrowym.

Infrastruktura krytyczna – systemy, obiekty i usługi niezbędne do zapewnienia bezpieczeństwa państwa i obywateli, których zakłócenie mogłoby wywołać poważne skutki społeczne, gospodarcze lub polityczne. Obejmuje m.in. infrastrukturę energetyczną, transportową (w tym obiekty mostowe), telekomunikacyjną, zdrowotną, finansową oraz publiczną administrację.

Inspekcja – działanie kontrolne mające na celu ocenę zgodności obiektu lub procesu z określonymi wymaganiami, normami lub oczekiwaniami. W praktyce inżynierskiej pojęcie to często stosowane jest zamiennie z określeniami „przegląd" lub „ocena stanu technicznego", mimo że ich znaczenie i nomenklatura wskazują na odmienne rodzaje działań lub etapy procesu diagnostycznego. W rezultacie granice pomiędzy tymi pojęciami mają często charakter umowny i zależą od przyjętej terminologii, regulacji lub praktyki danego zarządcy infrastruktury.

Inspektor mostowy – wykwalifikowana osoba odpowiedzialna za wykonywanie inspekcji obiektów mostowych, ocenę ich stanu technicznego oraz formułowanie zaleceń dotyczących utrzymania i eksploatacji. Jego rola w zarządzaniu infrastrukturą ma kluczowe znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników poprzez identyfikację i reagowanie na zdarzenia krytyczne oraz symptomy, które je poprzedzają.

IOP – Codice Identificativo Opera Pubblica (Kod Identyfikacyjny Obiektu Publicznego). Unikalny kod przypisywany każdemu obiektowi infrastrukturalnemu we Włoszech, stanowiący element systemu ewidencji AINOP.

IS MCS – Informačný systém modelu cestnej siete (System informatyczny modelu sieci drogowej). Słowacki system informatyczny służący do ewidencji i zarządzania obiektami sieci drogowej, w tym mostami.

Katastrofa budowlana – zgodnie z zapisami Prawa budowlanego, jest to niezamierzone, gwałtowne zniszczenie obiektu budowlanego lub jego części, a także konstrukcyjnych elementów rusztowań, elementów urządzeń formujących, ścianek szczelnych i obudowy wykopów

Kluczowe wskaźniki efektywności (ang. Key Performance Indicators, KPI) – mierzalne wartości stosowane do oceny stopnia realizacji celów operacyjnych, strategicznych lub projektowych. Wskaźniki te pozwalają na obiektywne monitorowanie efektywności procesów, systemów lub organizacji w określonym kontekście czasowym i funkcjonalnym.

Kładka – obiekt mostowy przeznaczony wyłącznie dla ruchu pieszego lub rowerowego.

LiDAR (ang. Light Detecton and Ranging) – technologia zdalnych pomiarów oparta na wykorzystaniu impulsów światła laserowego do precyzyjnego określania odległości między sensorem a powierzchnią obiektu lub terenu. System LiDAR obejmuje emiter wiązki laserowej, odbiornik oraz jednostkę obliczeniową i może być zintegrowany z innymi systemami pomiarowymi (np. GNSS).

Mieszana rzeczywistość (ang. Mixed Reality, MR) – termin obejmujący technologie, które łączą świat rzeczywisty i wirtualny, tworząc nowe środowiska, w których obiekty fizyczne i cyfrowe współistnieją i mogą wchodzić ze sobą w interakcje w czasie rzeczywistym.

Monitoring stanu konstrukcji (ang. SHM) – ciągły lub okresowy proces zbierania danych diagnostycznych dotyczących stanu technicznego konstrukcji, realizowany poprzez zastosowanie czujników, systemów pomiarowych oraz analizę wyników w celu wczesnego wykrywania uszkodzeń.

Model bryłowy – cyfrowa reprezentacja obiektu w przestrzeni trójwymiarowej, zbudowana z zamkniętych brył geometrycznych o charakterze parametrycznym. Model ten powstaje po uprzednim zastosowaniu pewnych uproszczeń rzeczywistej geometrii, jednak umożliwia precyzyjne określenie parametrów geometrycznych, objętości oraz masy. Może zawierać dodatkowe informacje (np. materiałowe) i stanowi podstawę modeli informacyjnych.

Model fotogrametryczny –model siatkowy pokryty teksturą fotograficzną uzyskaną ze zdjęć wykonanych z różnych perspektyw. Charakteryzuje się wysoką szczegółowością wizualną i dobrą zgodnością geometryczną, dzięki czemu znajduje zastosowanie w wizualizacji i analizach przestrzennych.

Model pozycjonujący (indeksujący) – uproszczona reprezentacja obiektu lub przestrzeni o niskiej szczegółowości geometrycznej, wykorzystywana jako odniesienie przestrzenne do lokalizacji danych (np. zdjęć). Umożliwia szybkie orientowanie się w modelu i organizację informacji bez przeprowadzania szczegółowych analiz geometrycznych.

Model semantyczny – sposób organizacji danych, który dzięki powiązaniu z ontologią nadaje im jednoznaczny kontekst znaczeniowy. Dane opisane w modelu semantycznym stają się zrozumiałe dla systemów informatycznych, co umożliwia ich interpretację, wyszukiwanie, analizę i przetwarzanie w sposób zgodny z rzeczywistym znaczeniem.

Model siatkowy – cyfrowa reprezentacja obiektu w przestrzeni trójwymiarowej, zbudowana z siatki wielokątów (najczęściej trójkątów). Przy odpowiednio małych rozmiarach pojedynczych elementów siatki możliwe jest uzyskanie bardzo dokładnego odwzorowania kształtu i powierzchni rzeczywistego obiektu.

Most – obiekt budowlany przeznaczony do przeprowadzenia drogi nad przeszkodą, w której co najmniej jedno przęsło znajduje się nad przeszkodą wodną.

Nośność normowa – maksymalne obciążenie, określone na podstawie wybranych przepisów i norm technicznych, które może być bezpiecznie przeniesione przez obiekt w aktualnym stanie technicznym.

Nośność obiektu mostowego – maksymalne obciążenie, które może być bezpiecznie przeniesione przez obiekt mostowy w aktualnym stanie technicznym.

Nośność użytkowa – maksymalne obciążenie pojazdem dopuszczonym do ruchu publicznego bez ograniczeń, które może być bezpiecznie przeniesione przez obiekt w aktualnym stanie technicznym.

Obiekt inżynierski – ogólna nazwa obiektów infrastruktury drogowej obejmująca obiekty mostowe, tunele, przepusty i konstrukcje oporowe.

Obiekt inżynieryjny – ogólna nazwa obiektów infrastruktury kolejowej obejmująca obiekty mostowe, tunele, przepusty i konstrukcje oporowe.

Obiekt mostowy – budowla, której podstawowymi konstrukcyjnymi częściami składowymi są podpory i przęsła, umożliwiająca przeprowadzenie ciągu komunikacyjnego nad przeszkodą. Wyróżnia się mosty, wiadukty, estakady i kładki.

Ontologia – formalny, zrozumiały maszynowo model wiedzy odnoszący się do określonej dziedziny. Stanowi ona ustrukturyzowany słownik pojęć, który definiuje klasy obiektów, ich atrybuty oraz relacje między nimi.

Optymalizacja – poszukiwanie najbardziej korzystnego rozwiązania lub wariantu spośród możliwych opcji, ze względu na przyjęte kryterium, przy uwzględnieniu istniejących ograniczeń.

Ortofotomapa – obraz terenu otrzymany z przetworzenia zestawu zdjęć, pozbawionych błędów niejednolitości skali, wynikających z odchylenia osi optycznej kamery fotograficznej od pionu oraz z różnic wysokości różnych punktów obrazowanego terenu

Piksel – najmniejszy, pojedynczy element obrazu rastrowego, reprezentujący określoną wartość koloru i jasności w danym punkcie płaszczyzny.

Pokrycie – ang. overlap, w fotogrametrii, procentowy zakres wspólnego obszaru widocznego na dwóch lub więcej zdjęciach wykonanych z różnych pozycji. Wyróżnia się pokrycie wzdłużne oraz poprzeczne.

Proces – uporządkowany ciąg powiązanych ze sobą czynności lub działań prowadzących do osiągnięcia określonego celu lub rezultatu.

Proces inspekcji – uporządkowany i powtarzalny ciąg działań kontrolnych mających na celu ocenę zgodności obiektu lub jego stanu technicznego z określonymi wymaganiami, normami lub oczekiwaniami.

Przebudowa – zgodnie z zapisami Prawa budowlanego, jest to zmiana parametrów technicznych lub użytkowych istniejącego obiektu budowlanego poprzez prace modernizacyjne lub konstrukcyjne. wykonywanie robót budowlanych, w wyniku których następuje zmiana parametrów użytkowych lub technicznych istniejącego obiektu budowlanego, z wyjątkiem charakterystycznych parametrów, jak: kubatura, powierzchnia zabudowy, wysokość, długość, szerokość bądź liczba kondygnacji; w przypadku dróg są dopuszczalne zmiany charakterystycznych parametrów w zakresie niewymagającym zmiany granic pasa drogowego.

Przechwytywanie rzeczywistości – ang. reality capture, proces pozyskiwania danych z rzeczywistego świata w celu stworzenia jego cyfrowej reprezentacji. Obejmuje rejestrację geometrii i tekstur z wykorzystaniem technologii takich jak skanowanie laserowe czy fotogrametria. Przechwytywanie rzeczywistości stanowi pierwszy etap cyfryzacji obiektu lub środowiska, dostarczając danych wejściowych do dalszych analiz i procesów rekonstrukcyjnych.

Przegląd bieżący – regularnie wykonywane, podstawowe oględziny obiektu mostowego, mające na celu zidentyfikowanie zagrożeń w użytkowaniu obiektu i potrzeb w zakresie prac porządkowych.

Przegląd obiektu mostowego – ogólne określenie diagnostycznych działań inspekcyjnych wykonywanych w celu oceny stanu technicznego obiektów mostowych.

Przegląd podstawowy – jest to okresowa kontrola, wykonywana co najmniej raz w roku, polegająca na ocenie stanu technicznego obiektu budowlanego. Obowiązek jej przeprowadzania wynika z Prawa budowlanego.

Przegląd rozszerzony – jest to okresowa kontrola, wykonywana co najmniej raz na 5 lat, polegająca na ocenie stanu technicznego i przydatności do użytkowania obiektu budowlanego, estetyki obiektu budowlanego oraz jego otoczenia. Obowiązek jej przeprowadzania wynika z Prawa budowlanego.

Przegląd specjalny – wyszczególniona w polskich przepisach dotyczących infrastruktury kolejowej, szczegółowa kontrola obiektu inżynieryjnego przeprowadzana w sytuacjach, gdy wyniki rutynowych przeglądów nie dają wystarczającej podstawy do określenia parametrów użytkowych i dalszych działań utrzymaniowych. Zakres przeglądu ustalany jest indywidualnie i zazwyczaj obejmuje ocenę stanu technicznego obiektu lub jego elementów, opartą na specjalistycznych badaniach, pomiarach i obliczeniach. Przegląd zawiera diagnozę i ocenę zaistniałych problemów technicznych oraz propozycje ich rozwiązania, służąc ustaleniu dalszych zasad użytkowania i utrzymania obiektu. Jego charakter jest zbliżony do ekspertyzy technicznej.

Przegląd szczegółowy – wyszczególniona w polskich przepisach dotyczących infrastruktury drogowej, szczegółowa kontrola wszystkich elementów konstrukcji obiektu inżynierskiego z podstawowymi pomiarami i badaniami, dokonywana w celu oceny i udokumentowania stanu technicznego obiektu oraz określenia warunków bezpiecznej eksploatacji, rodzaju i zakresu remontu lub przebudowy.

Przepust – obiekt budowlany przeznaczony do przeprowadzenia przeszkody przez budowlę ziemną.

Rekonstrukcja 3D – proces tworzenia cyfrowej reprezentacji rzeczywistego obiektu lub terenu poprzez przetwarzanie danych pozyskanych w wyniku przechwytywania rzeczywistości. Obejmuje m.in. generowanie chmur punktów i trójwymiarowych modeli siatkowych, fotogrametrycznych i bryłowych.

Remont – zgodnie z zapisami Prawa budowlanego, jest to wykonywanie w istniejącym obiekcie budowlanym robót budowlanych polegających na odtworzeniu stanu pierwotnego, a niestanowiących bieżącej konserwacji, przy czym dopuszcza się stosowanie wyrobów budowlanych innych niż użyto w stanie pierwotnym.

Renderowanie – proces generowania obrazu z danych cyfrowych, polegający na przekształceniu trójwymiarowej sceny (zawierającej geometrię, tekstury, oświetlenie i materiały) w dwuwymiarowy obraz wyjściowy.

Retopologia – ang. retopology, proces przebudowy struktury siatki trójkątów modelu 3D w celu jej uproszczenia lub uporządkowania przy zachowaniu ogólnego kształtu obiektu.

Rozszerzona (lub poszerzona) rzeczywistość (ang. Augmented Reality, AR) – technologia umożliwiająca nałożenie w czasie rzeczywistym wirtualnych informacji lub obiektów na obraz rzeczywistego świata.

Rozszerzona rzeczywistość – zbiorczo (Extended Reality, ang. XR) – zbiorczy termin opisujący kontinuum świata rzeczywistego i wirtualnego, obejmujący technologie, rozszerzonej wirtualności (AV) oraz rzeczywistości wirtualnej (VR), rozszerzonej (AR) i mieszanej (MR).

Rozszerzona (lub poszerzona) wirtualność (ang. Augmented Virtuality, AV) – technologia umożliwiająca wzbogacenie wirtualnego środowiska o elementy świata rzeczywistego, np. obrazy z kamer, dane z czujników lub modele rzeczywistych obiektów, wprowadzane w czasie rzeczywistym.

Rzadka chmura punktów – chmura punktów o mniejszej liczbie punktów przypadających na jednostkę powierzchni, uzyskana zazwyczaj na wczesnym etapie procesu rekonstrukcji. Służy do wstępnej oceny poprawności połączenia danych, a następnie jest podstawą do ich dalszego zagęszczania.

Silnik gier (ang. game engine) – złożone środowisko programistyczne zawierające zestaw narzędzi, bibliotek i komponentów służących do tworzenia, zarządzania i renderowania interaktywnych aplikacji trójwymiarowych, przede wszystkim gier komputerowych.

Skanowanie laserowe – technika pozyskiwania danych przestrzennych polegająca na rejestracji współrzędnych punktów na powierzchni obiektu lub terenu za pomocą analizy odbić impulsów laserowych. Efektem skanowania jest chmura punktów odwzorowująca geometrię badanego obiektu.

Skrypt – plik lub fragment kodu źródłowego odpowiedzialny za realizację określonej funkcji aplikacji. W niniejszej rozprawie pojęcie to odnosi się przede wszystkim do autorskich skryptów C# opracowanych w środowisku Unity na potrzeby aplikacji *VR Inspector*. Nazwy skryptów, klas, funkcji oraz wybranych komponentów środowiska programistycznego zapisywane są w tekście czcionką techniczną, np. `ToolManager`, `MeasurementTool`, `MarkingTool` lub `XR Origin (VR)`, w celu odróżnienia ich od zwykłych nazw opisowych i pojęć ogólnych. Czcionki tej użyto również do opisu składowych systemu identyfikacji elementów obiektów mostowych w rozdziale 4.3.

Slovenská správa ciest (SSC) – państwowa administracja drogowa na Słowacji, podlegająca Ministerstvu dopravy Slovenskej republiky. Odpowiada za zarządzanie drogami na terenie kraju, w tym za utrzymanie, modernizację, inspekcje mostów oraz prowadzenie ewidencji infrastruktury drogowej.

Stałopłatowiec – rodzaj drona o konstrukcji przypominającej samolot, posiadający nieruchome skrzydła wytwarzające siłę nośną w locie poziomym. Cechuje się dużym zasięgiem i długim czasem lotu, co sprawia, że jest szczególnie przydatny w misjach obejmujących duże obszary, np. w mapowaniu terenu.

Statens vegvesen – Norweski Zarząd Dróg Publicznych, podlegający Ministerstwu Transportu (Samferdselsdepartementet). Jest głównym organem odpowiedzialnym za planowanie, budowę, utrzymanie i inspekcje dróg krajowych oraz mostów w Norwegii.

System gospodarowania mostami (SGM, ang. Bridge Management System, BMS) – kompleksowy system informatyczny wspomagający zarządzanie, diagnostykę oraz planowanie utrzymania infrastruktury mostowej.

Sztuczna inteligencja (SI, ang. Artificial Intelligence AI) – zbiór metod, algorytmów i modeli obliczeniowych umożliwiających maszynie samodzielną analizę danych, rozpoznawanie wzorców i podejmowanie decyzji na podstawie dostępnych informacji. Systemy oparte na SI umożliwiają automatyzację zadań trudnych do ujęcia w klasyczne ramy programistyczne lub znacząco zwiększają skuteczność istniejących rozwiązań.

Teksel – najmniejszy element tekstury stosowanej w grafice trójwymiarowej, odpowiadający fragmentowi obrazu przypisywanemu powierzchni modelu 3D. Teksele definiują sposób, w jaki tekstura pokrywa siatkę geometryczną i wpływają na wizualną jakość renderowanej powierzchni.

Termografia (ang. IRT) – technika diagnostyczna oparta na rejestracji promieniowania cieplnego emitowanego przez powierzchnie obiektów. Umożliwia wykrywanie defektów, niejednorodności materiałowych lub uszkodzeń poprzez analizę rozkładu temperatury.

Trójwymiarowe rozmycie Gaussa (ang. 3D Gaussian Splatting) – technika reprezentacji i renderowania scen 3D polegająca na opisie ich geometrii i wyglądu za pomocą zbioru trójwymiarowych funkcji Gaussa (tzw. splatów, ang. splats), rozmieszczonych w przestrzeni. Każda z nich zawiera informację o położeniu, kształcie, kolorze i przezroczystości, co umożliwia szybkie i realistyczne odtwarzanie sceny bez konieczności tworzenia klasycznej siatki trójkątów.

Tunel – obiekt budowlany umożliwiający przeprowadzenie drogi lub torów pod przeszkodą albo przez przeszkodę.

Uprawnienia budowlane – decyzja wydana przez organ samorządu zawodowego, stwierdzająca posiadanie przez daną osobę kwalifikacji do samodzielnego wykonywania funkcji technicznych w budownictwie. Obejmują one określone rodzaje działalności zawodowej (projektowanie, kierowanie robotami budowlanymi) i wymagają odpowiedniego wykształcenia technicznego oraz praktyki zawodowej, adekwatnych do rodzaju i stopnia skomplikowania tych funkcji.

Wiadukt – obiekt budowlany przeznaczony do przeprowadzenia drogi nad przeszkodą, w której żadne przęsło nie znajduje się nad przeszkodą wodną.

Wielowirnikowiec – inaczej multikopter, rodzaj drona wyposażonego w wiele wirników (najczęściej 4, 6 lub 8), które zapewniają pionowy start i lądowanie oraz stabilny lot. Charakteryzuje się wysoką

manewrowością i prostotą obsługi, przez co jest powszechnie wykorzystywany w fotogrametrii, inspekcjach technicznych i nagraniach wideo.

Wirtualizacja – ang. virtualization, proces tworzenia cyfrowej reprezentacji rzeczywistego obiektu, środowiska lub procesu, umożliwiającej interaktywną analizę, wizualizację, symulację lub integrację z systemami użytkowymi. Stanowi zaawansowany etap cyfryzacji, w którym dane zyskują postać dynamicznie przetwarzanej rzeczywistości cyfrowej.

Wirtualna rzeczywistość (ang. Virtual Reality, VR) – technologia tworząca całkowicie sztuczne, immersyjne środowisko wirtualne, w którym użytkownik może się poruszać i z którym może wchodzić w interakcję.

Woksel – trójwymiarowy odpowiednik piksela, najmniejszy element objętościowy w danych przestrzennych, zawierający informacje o właściwościach w danym fragmencie przestrzeni.

Zakład Linii Kolejowych – jednostka organizacyjna PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., której zadaniem jest, między innymi, zapewnienie utrzymania obsługi i rozwoju linii kolejowych oraz innych elementów infrastruktury kolejowej na podległym obszarze działania, w Polsce istnieją 23 takie jednostki.

1 Wstęp

1.1 Problematyka, motywacja i aktualne wyzwania

Utrzymanie bezpieczeństwa i niezawodności obiektów mostowych stanowi jedno z kluczowych wyzwań współczesnej inżynierii infrastrukturalnej. W Polsce liczbę obiektów mostowych szacuje się na około 34 tysiące drogowych oraz 8 tysięcy kolejowych. Obiekty te stanowią część infrastruktury krytycznej państwa, czyli systemów, obiektów i usług niezbędnych do zapewnienia bezpieczeństwa państwa i obywateli, których zakłócenie mogłoby wywołać poważne skutki społeczne, gospodarcze lub polityczne. W obliczu toczącej się za naszą wschodnią granicą wojny w Ukrainie, ostrożne i świadome zarządzanie takimi obiektami staje się obowiązkiem o strategicznym znaczeniu.

Infrastruktura transportowa w Polsce znajduje się obecnie w sytuacji podwójnego wyzwania. Z jednej strony znaczna część obiektów mostowych znajduje się w zaawansowanej fazie cyklu życia, a ich procesy degradacyjne ulegają intensyfikacji. Dotyczy to szczególnie konstrukcji wznoszonych w drugiej połowie XX wieku, zwłaszcza w latach 70-tych i 80-tych. W tym czasie, z powodu ograniczeń technologicznych i materiałowych oraz trudnej sytuacji gospodarczej i uwarunkowań politycznych, wiele mostów budowano w sposób oszczędny z obniżoną trwałością i niską jakością wykonania. Tego typu obiekty wymagają dziś intensywnych działań diagnostycznych, remontów lub nawet całkowitej wymiany. Z drugiej strony, w ostatnich dwóch dekadach obserwuje się dynamiczny rozwój sieci transportowej, zarówno drogowej, jak i kolejowej. Wciąż co roku budowanych jest wiele nowych obiektów mostowych. Rozbudowa sieci autostrad, dróg ekspresowych oraz modernizacja i budowa nowych tras kolejowych skutkują pojawieniem się bardziej nowoczesnych i skomplikowanych konstrukcji. Ta sytuacja stawia przed zarządcami nowe i złożone wyzwania. Z jednej strony konieczne jest opracowanie strategii ratunkowych dla starzejących się obiektów, które pozwoliłyby wydłużyć ich okres bezpiecznego użytkowania. Z drugiej, pojawia się szansa na wypracowanie i wdrożenie nowych modeli zarządzania infrastrukturą w oparciu o nowo wybudowane konstrukcje, które posiadają pełną dokumentację projektową i wykonawczą. I to coraz częściej już w postaci cyfrowej.

Sprzyja to zmianie podejścia środowiska inżynierów i administracji do całego cyklu życia obiektu mostowego. Obejmuje to projektowanie, realizację, ocenę stanu technicznego oraz podejmowanie decyzji dotyczących utrzymania, modernizacji lub rozbiórki. Nowe konstrukcje mogą stanowić wzorzec dla budowy spójnych systemów zarządzania obiektami, z uwzględnieniem nowoczesnych standardów cyfrowych opartych na narzędziach takich jak BIM (ang. Building Information Modeling) oraz metodach długofalowego zarządzania infrastrukturą.

Regularne działania diagnostyczne są nie tylko wymogiem formalnym, wynikającym z obowiązujących przepisów prawa, ale przede wszystkim warunkiem koniecznym dla skutecznego zarządzania ryzykiem eksploatacyjnym i przedłużania trwałości użytkowej konstrukcji. Zaniechanie lub niewłaściwe prowadzenie przeglądów technicznych może prowadzić do poważnych konsekwencji, zarówno technicznych, jak i społeczno-ekonomicznych. Skrajnym przykładem są niedawne katastrofy

budowlane, takie jak zawalenie się wiaduktu autostradowego w Genui (2018) [172, 214] czy mostu tramwajowego w Dreźnie (2024) [222], które pociągnęły za sobą ofiary śmiertelne i znaczące straty materialne (Rys. 1-1). Choć przyczyny tych zdarzeń były różne, ich wspólnym mianownikiem był brak skutecznego nadzoru technicznego oraz niedostateczna integracja danych diagnostycznych z procesem decyzyjnym.



Rys. 1-1 Wiadukt w Genui (góra) [115] oraz most w Dreźnie (dół) [66] po katastrofie

W latach 2021–2022 Najwyższa Izba Kontroli (NIK) przeprowadziła ogólnopolską kontrolę dotyczącą utrzymania i ochrony drogowych obiektów inżynierskich, obejmującą lata 2020–2022 [93]. Wyniki jednoznacznie wskazują na systemowe problemy w zarządzaniu tą infrastrukturą w Polsce. Aż 75% skontrolowanych zarządców nie przeprowadzało kontroli części zarządzanych obiektów inżynierskich. W wielu przypadkach brakowało również podstawowej wiedzy o istnieniu obiektów wymagających inspekcji. Dodatkowo, w 63% jednostek stwierdzono błędy w dokumentacji ewidencyjnej, a 56% zarządców nie prowadziło książek obiektów mostowych zgodnie z narzuconymi wymaganiami. Protokoły z przeprowadzanych przeglądów zawierały liczne błędy. Aż 69% z nich nie spełniało wymogów Prawa budowlanego [243]. Najczęściej pomijano w nich zalecenia naprawcze lub nie odnoszono się do wcześniejszych ustaleń. W 25% przypadków kontrole były przeprowadzane przez osoby nieposiadające wymaganych uprawnień budowlanych lub niewpisane do właściwej izby zawodowej. Najbardziej alarmujące jest to, że aż 31% obiektów poddanych bezpośrednim oględzinom przez NIK stwarzało zagrożenie dla bezpieczeństwa użytkowników, a 4% znajdowało się w stanie grożącym katastrofą budowlaną. Działania utrzymaniowe miały często charakter reaktywny i ograniczały się do interwencji w sytuacjach awaryjnych, bez oparcia na długofalowej strategii wykorzystującej wyniki inspekcji. Ustalenia te jednoznacznie wskazują na poważne luki w systemie nadzoru nad stanem technicznym infrastruktury mostowej, wynikające z braku spójnych procedur,

niewystarczających zasobów kadrowych oraz braku narzędzi umożliwiających skuteczne zarządzanie informacją diagnostyczną.

Jednym z wyraźnych przykładów konsekwencji niewłaściwego zarządzania obiektem mostowym na gruncie krajowym, jest sytuacja estakady drogowej nad rynkiem w Chorzowie, znajdującej się w ciągu drogi krajowej nr 79. Jest to 14-przęsłowa konstrukcja wybudowana w latach 1977-1979. Zastosowano w niej nietypowe i odważne, jak na tamte czasy, rozwiązanie konstrukcyjne. Była to sprężona konstrukcja o schemacie belki ciągłej. Ustrój nośny stanowiła płyta otworowa z lekkiego betonu sprężoną długimi kablami o zmiennej trajektorii.

W czerwcu 2025 roku estakada została nagle zamknięta w trybie awaryjnym. Powodem tej kontrowersyjnej decyzji było domniemanie ryzyka nagłej i niespodziewanej katastrofy, która może wynikać z korozji cięgien sprężających. Eliminacja wszelkiego ruchu na i pod estakadą spowodowała paraliż komunikacyjny w środkowej części Górnośląsko-Zagłębiowskiej Metropolii (Rys. 1-2). Decyzja ta była wynikiem ujawnionych, poważnych uszkodzeń konstrukcji nośnej obiektu, których charakter i zakres wskazywały na wieloletnie zaniedbania w zakresie dokumentowania i interpretowania wyników przeglądów technicznych oraz decyzji eksploatacyjnych zarządcy. Pomimo wcześniejszych wskazań dotyczących pogarszającego się stanu technicznego obiektu, brakowało w tym przypadku wielowątkowej analizy ryzyka i optymalnych decyzji utrzymaniowych.

Przykład ten pokazuje, że nawet w przypadku tak ważnych obiektów, położonych w gęsto zurbanizowanych i intensywnie użytkowanych ciągach komunikacyjnych, realizowane obecnie procesy diagnostyczne mogą być niewystarczające. Szczególnie, gdy nie towarzyszy im systematyczna archiwizacja, cyfryzacja i analiza danych. W efekcie decyzje o zamknięciu obiektu muszą być podejmowane nagle, w warunkach niepewności i presji czasu, co rodzi poważne konsekwencje dla użytkowników infrastruktury oraz lokalnej gospodarki.



Rys. 1-2 Zamknięta estakada w Chorzowie

W dobie zmian klimatycznych, napięć geopolitycznych i rosnącego natężenia ruchu, skuteczna diagnoza stanu technicznego obiektów jest fundamentem racjonalnego zarządzania. Zasoby mostowe

we wszystkich rozwiniętych krajach świata są bardzo liczne i zróżnicowane. Obejmują obiekty o różnej konstrukcji, funkcji i stanie technicznym. Każdego roku przeprowadza się tysiące przeglądów okresowych oraz setki ekspertyz. W takiej skali tradycyjne metody inspekcji stają się niewystarczające pod względem organizacyjnym i ekonomicznym.

Odpowiedzią na te problemy może być wirtualizacja procesu diagnostycznego. Zastosowanie współczesnych cyfrowych technologii, zrobotyzowanych platform mobilnych i systemów telemetrycznych daje szansę na powtarzalne zbieranie bardziej kompletnych danych dotyczących stanu technicznego obiektu mostowego. Po odpowiedniej obróbce, dane te mogą być łatwiej archiwizowane, skuteczniej przetwarzane oraz dokładniej analizowane i lepiej wizualizowane. I to niezależnie od problemów związanych z trudnościami w dostępie do krytycznych elementów konstrukcji, ich wielkością czy złożonością.

1.2 Tezy i cele pracy

W związku z aktualnymi wyzwaniami, z którymi mierzą się inspektorzy mostowi oraz zarządcy infrastruktury, zagadnienie wirtualizacji procesu diagnostycznego obiektów mostowych jawi się jako aktualne i istotne zarówno z punktu widzenia naukowego, jak i praktycznego. W warunkach równoczesnego przyrostu liczby nowo budowanych obiektów oraz zaawansowanego stopnia zużycia konstrukcji istniejących, a także ograniczonych zasobów kadrowych i finansowych, konieczne staje się poszukiwanie rozwiązań umożliwiających zwiększenie jakości i powtarzalności procesu diagnostycznego.

Niniejsza rozprawa podejmuje próbę systematycznego ujęcia problemu wirtualizacji inspekcji mostów, identyfikując kluczowe potrzeby, ograniczenia i potencjał współczesnych technologii cyfrowych. Celem jest nie tylko przegląd i analiza dostępnych metod oraz narzędzi, ale również zaproponowanie spójnego podejścia umożliwiającego rozwój nowych standardów diagnostycznych. W związku z tym poniżej sformułowano główną tezę badawczą.

Wdrożenie elementów wirtualizacji procesu inspekcji wybranych obiektów mostowych, opartych na integracji danych uzyskanych za pomocą technik przechwytywania rzeczywistości i środowisk wirtualnych, pozwala na skuteczne niwelowanie ograniczeń podejścia tradycyjnego.

Do wykazania tezy głównej posłużyły następujące tezy pomocnicze:

- Wykorzystanie technik przechwytywania rzeczywistości i rekonstrukcji 3D umożliwia opracowanie cyfrowych modeli wybranych obiektów mostowych o jakości wystarczającej do prowadzenia inspekcji wizualnej w środowisku wirtualnym.
- Wizualizacja danych inspekcyjnych w środowiskach wirtualnych wspomaga identyfikację uszkodzeń oraz analizę trudno dostępnych elementów konstrukcji.
- Integracja danych geometrycznych, fotograficznych i opisowych w ramach cyfrowego modelu porządkuje informacje diagnostyczne oraz ułatwia archiwizację i analizę danych diagnostycznych.
- Skuteczne zastosowanie wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych wymaga etapowego wdrażania, opartego na wcześniejszej cyfryzacji i odpowiednim przygotowaniu danych diagnostycznych.

W celu potwierdzenia powyższych tez sformułowano następujące cele pracy:

- przegląd krajowych i zagranicznych przepisów i wytycznych dotyczących inspekcji obiektów mostowych,
- identyfikacja ograniczeń tradycyjnych metod inspekcji,
- analiza współczesnych technik i narzędzi wspomagających inspekcję, możliwych do zastosowania w diagnostyce obiektów mostowych,
- opracowanie koncepcji wirtualizacji procesu inspekcji,
- opracowanie metodyki cyfrowego odwzorowania wybranych obiektów mostowych na potrzeby inspekcji w środowisku wirtualnym,
- wykorzystanie wybranych środowisk wirtualnych umożliwiających prowadzenie inspekcji na opracowanych modelach cyfrowych,
- ocena skuteczności inspekcji realizowanej w środowisku wirtualnym w niwelowaniu ograniczeń podejścia tradycyjnego, na podstawie przeprowadzonych prac doświadczalnych,
- sformułowanie wniosków oraz scenariuszy praktycznego zastosowania elementów wirtualizacji w procesie inspekcji obiektów mostowych.

Cele te ukierunkowano na wykazanie, że zastosowanie elementów wirtualizacji, opartych na integracji technik przechwytywania rzeczywistości i środowisk wirtualnych, może stanowić skuteczne uzupełnienie tradycyjnego procesu inspekcji obiektów mostowych. Praca nie dąży do pełnego zastąpienia metod tradycyjnych, lecz do wskazania obszarów, w których technologie cyfrowe i wirtualne mogą je uzupełniać. Uzyskane wyniki i obserwacje mają stanowić podstawę dalszych prac w zakresie standaryzacji oraz wdrażania cyfrowych narzędzi inspekcyjnych na szerszą skalę.

1.3 Przyjęte założenia i struktura pracy

Tematyka wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych ma charakter szeroki i interdyscyplinarny, obejmując zagadnienia z pogranicza inżynierii lądowej, cyfrowego modelowania, diagnostyki technicznej oraz technologii immersyjnych. Ze względu na złożoność problematyki i różnorodność powiązanych obszarów, całość procesu została opracowana w sposób systemowy i koncepcyjny, natomiast wybrane etapy, w szczególności przechwytywanie rzeczywistości z użyciem technik rekonstrukcji 3D oraz inspekcja w środowisku wirtualnym, zostały pogłębione w ramach badań doświadczalnych opartych na własnych pracach. Pozostałe elementy procesu, takie jak automatyczna klasyfikacja uszkodzeń czy integracja z bazami danych utrzymaniowych, omówiono w sposób przeglądowy jako możliwości adaptacji i kierunki dalszego rozwoju.

Rozprawa realizowana była w formule doktoratu wdrożeniowego, co oznacza, że istotnym elementem badań było zapewnienie możliwości praktycznego zastosowania opracowanych rozwiązań w przedsiębiorstwie partnerskim. W konsekwencji, szczególną uwagę poświęcono zagadnieniom, które były naturalnie wdrażane w ramach realizowanych projektów i których skuteczność mogła być weryfikowana w rzeczywistych warunkach pracy inspektora mostowego.

Dodatkowym utrudnieniem była ograniczona dostępność specjalistycznych narzędzi pomiarowych. Część technologii służących do precyzyjnego pozyskiwania i przetwarzania danych przestrzennych, ze względu na wysoki koszt, nie była dostępna ani w jednostce naukowej, ani

w przedsiębiorstwie partnerskim. Z tego względu niektóre rozwiązania, mimo ich znaczenia dla pełnego procesu wirtualizacji, nie mogły zostać zweryfikowane w warunkach doświadczalnych. Ostateczny zakres rozprawy stanowił zatem kompromis między badaniami naukowymi a praktycznymi uwarunkowaniami wdrożeniowymi.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów, w tym bieżącego przedstawiającego kontekst badawczy, cele, tezy i zakres pracy. Poniżej przedstawiona została krótka charakterystyka treści poszczególnych rozdziałów.

- **Rozdział 2** poświęcony jest przepisom prawnym, wytycznym i stosowanym praktykom w zakresie inspekcji obiektów mostowych. Uwzględniono zarówno regulacje krajowe, jak i zagraniczne, a także sposoby opisu uszkodzeń wykorzystywane w opracowaniach diagnostycznych.
- **Rozdział 3** stanowi przegląd stanu wiedzy z zakresu metod inspekcji mostów. Zaprezentowano tradycyjne metody inspekcji wraz z ich ograniczeniami oraz współczesne technologie i narzędzia wspomagające proces diagnostyczny, takie jak roboty mobilne, fotogrametria, skanowanie laserowe czy techniki immersyjne.
- **Rozdział 4** przedstawia autorską koncepcję wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych. Wprowadzono pojęcie piramidy wirtualizacji jako ramy modelu stopniowego wdrażania cyfrowych i wirtualnych rozwiązań diagnostycznych, obejmujących kolejne poziomy zaawansowania. Rozdział obejmuje również zagadnienie standaryzacji identyfikacji elementów obiektów mostowych.
- **Rozdział 5** dotyczy cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych na potrzeby diagnostyki. Opisano metodykę badań, zastosowany sprzęt i oprogramowanie, proces pozyskiwania i przetwarzania danych oraz scenariusze pracy inspektora na etapach przechwytywania rzeczywistości i rekonstrukcji 3D.
- **Rozdział 6** skupia się na praktycznym wykorzystaniu środowiska wirtualnego do realizacji inspekcji. Przedstawiono różne sposoby interakcji z modelem cyfrowym, zarówno na dedykowanych platformach komputerowych, jak i w środowisku immersyjnym. Opisano również scenariusze pracy inspektora w środowisku wirtualnym.
- **Rozdział 7** zawiera podsumowanie pracy oraz wnioski z przeprowadzonych badań i analiz. Przedstawiono w nim weryfikację tezy głównej i tez pomocniczych oraz ocenę realizacji celów pracy. Dokonano również oceny możliwości niwelowania ograniczeń metod tradycyjnych poprzez zastosowanie elementów wirtualizacji. Omówiono znaczenie praktyczne uzyskanych wyników i zaproponowano kierunki dalszych badań.

Układ pracy uzupełnia wykaz skrótów i pojęć, zawierający definicje najważniejszych terminów i akronimów stosowanych w rozprawie.

2 Wytyczne dotyczące inspekcji obiektów mostowych

2.1 Regulacje krajowe i efekty ich praktycznego stosowania

2.1.1 Wprowadzenie

Regularne oceny stanu technicznego obiektów mostowych w Polsce wynikają z wymogów Art. 62 Prawa budowlanego [243]. Zapis ten nakłada na zarządcę lub właściciela obowiązek przeprowadzania okresowych kontroli obiektów budowlanych raz w roku oraz raz na pięć lat. Zgodnie z Art. 62 pkt. 4, kontrole powinny przeprowadzać osoby posiadające uprawnienia budowlane w odpowiedniej specjalności.

Kontrola okresowa roczna powinna obejmować:

- ocenę stanu technicznego obiektu, o którym mowa w Art. 62 ust. 1 pkt 1 i 2,
- stwierdzenie uszkodzeń obiektu, które mogą spowodować zagrożenie życia lub zdrowia ludzi bezpieczeństwa mienia bądź środowiska, o których mowa w Art. 70 ust. 1 i 2,
- stwierdzenie uszkodzeń obiektu, które mogą spowodować katastrofę budowlaną, o których mowa w Art. 70 ust. 1 i 2,
- określenie metod i środków użytkowania elementów obiektu narażonych na szkodliwe działanie wpływów atmosferycznych i niszczące działanie innych czynników, o których mowa w Art. 62a ust. 2 pkt 8,
- kontrolę zakresu niewykonanych zaleceń określonych w protokołach z poprzednich kontroli, o którym mowa w Art. 62a ust. 2 pkt 9,
- sformułowania zaleceń pokontrolnych, które należy wykonać, aby przywrócić obiekt do należytego stanu technicznego i estetycznego, o którym mowa w Art. 5 ust. 2, w trakcie kolejnych kontroli należy wg Art. 62a ust. 2 pkt 9 dokonać sprawdzenia wykonania ww. zaleceń.

W ramach kontroli okresowej pięcioletniej, należy dodatkowo dokonać oceny:

- przydatności obiektu do użytkowania, o której mowa w Art. 62 ust. 1 pkt 2,
- estetyki obiektu i jego otoczenia, o której mowa w Art. 62 ust. 1 pkt 2,

Niestety, przepisy te dotyczą głównie tradycyjnych budynków, a ich bezpośrednie stosowanie w przypadku obiektów mostowych prowadzi do licznych niejednoznaczności. Jako przykład można tu przytoczyć art. 62a ust. 2 pkt 8, mówiący, iż protokół z kontroli powinien zawierać określenie „metod i środków użytkowania elementów obiektu narażonych na szkodliwe działanie wpływów atmosferycznych i niszczące działanie innych czynników". W przypadku obiektów mostowych niemal wszystkie elementy konstrukcyjne są stale narażone na działanie czynników niszczących, takich jak opady atmosferyczne, wahania temperatury czy agresja chemiczna. Formułowanie „metod i środków użytkowania" dla tych elementów jest często bezprzedmiotowe, ponieważ nie da się ich użytkować inaczej. Ich podstawowe przeznaczenie to właśnie funkcjonowanie w warunkach zewnętrznych. Tym

samym przepis ten w odniesieniu do mostów traci praktyczne znaczenie lub prowadzi do formułowania sztucznych zaleceń nieprzekładających się na realne działania utrzymaniowe.

W odpowiedzi na powyższe ograniczenia ustawowe, w praktyce inżynierskiej opracowano szczegółowe instrukcje i standardy branżowe regulujące sposób wykonywania przeglądów – odrębnie dla infrastruktury drogowej i kolejowej. Przy czym do stworzenia instrukcji dla infrastruktury drogowej wykorzystano również od dawna nieaktualizowane już Rozporządzenie [209] regulujące sposób prowadzenia ewidencji obiektów mostowych. W przypadku drogowych obiektów inżynierskich, pierwotnie były one przygotowane przez Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad [271–273]. Większość tych zapisów została potem powielona we Wzorcach i Standardach [260] utworzonych przez Ministerstwo Infrastruktury. Natomiast w odniesieniu do kolejowych obiektów inżynieryjnych podobne przepisy zostały opracowane przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. [95].

Obiekty mostowe w sieci drogowej i kolejowej wykazują liczne podobieństwa konstrukcyjne i funkcjonalne obejmujące m.in. typy konstrukcji, schematy statyczne czy ogólne przeznaczenie. Różnice dotyczą głównie rodzaju i intensywności obciążeń, typu nawierzchni, wymagań w zakresie utrzymania oraz akceptowalnych granic intensywności uszkodzeń. Te techniczne rozbieżności uzasadniają istnienie odrębnych wytycznych utrzymaniowych i diagnostycznych dla sieci drogowej i kolejowej. Nie wyjaśniają jednak ich niespójności, zarówno w zakresie metod oceny stanu technicznego, jak i samej nomenklatury. Zdaniem autora, potrzebne jest ujednolicenie tych zapisów, gdyż niepotrzebnie dublowane są pojęcia lub opisy procedur diagnostycznych.

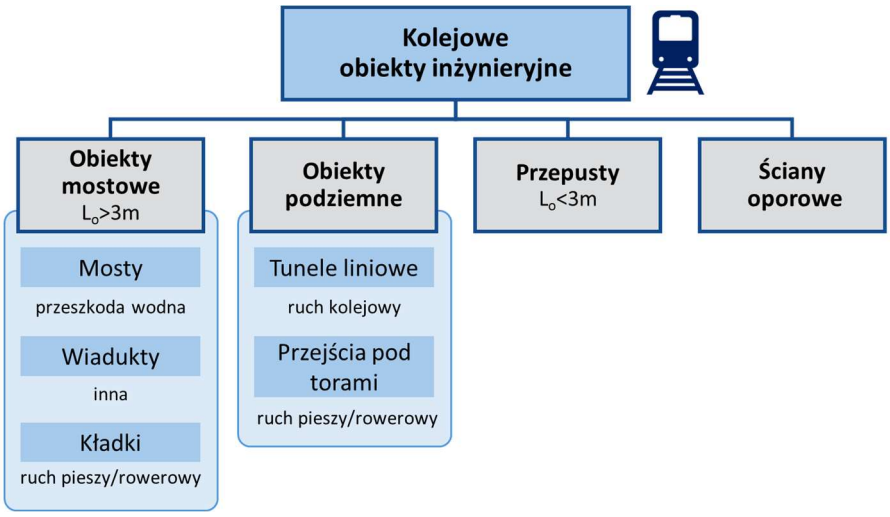
Do dziś utrzymuje się podstawowa rozbieżność terminologiczna: w dokumentacji dotyczącej infrastruktury drogowej stosuje się określenie „obiekty inżynierskie", natomiast w dokumentacji kolejowej – „obiekty inżynieryjne". Na podstawie analizy dostępnej literatury trudno jednoznacznie ustalić, kiedy dokładnie nastąpił ten terminologiczny rozłam. Pewne jest natomiast, że jego utrwalenie w dokumentach urzędowych miało miejsce pod koniec lat 90. XX wieku. Termin „obiekty inżynieryjne" został użyty w rozporządzeniu dotyczącym budowli kolejowych z 1998 r. [212] i od tego czasu konsekwentnie pojawia się w kolejnych instrukcjach oraz dokumentach technicznych PKP. w odniesieniu do infrastruktury drogowej, w pierwotnym brzmieniu Ustawy o drogach publicznych z 1985 r. [244] wszystkie obiekty, łącznie z tunelami i przepustami, określane były mianem „obiektów mostowych". Termin „obiekty inżynierskie" został wprowadzony w rozporządzeniu dotyczącym dróg publicznych z 1999 r. [211], a następnie potwierdzony w rozporządzeniu dotyczącym obiektów inżynierskich w 2000 r. [213]. Istotna zmiana nastąpiła w 2003 r., kiedy w znowelizowanym Art. 4 Ustawy o drogach publicznych [244] doprecyzowano, że do obiektów mostowych zalicza się wyłącznie mosty i wiadukty, natomiast wszystkie pozostałe obiekty infrastrukturalne określa się mianem drogowych obiektów inżynierskich. Najnowsze rozporządzenie z 2022 r. [210], które łączy wcześniejsze wytyczne dotyczące dróg [211] i obiektów inżynierskich [213] podtrzymuje ten sposób nazewnictwa. Oba terminy, inżynierskie i inżynieryjne, nadal funkcjonują równolegle w praktyce technicznej, co utrudnia standaryzację procedur diagnostycznych oraz prowadzenie spójnych rejestrów i analiz.

2.1.2 Klasyfikacja obiektów i rodzaje opracowań diagnostycznych

2.1.2.1 Obiekty kolejowe

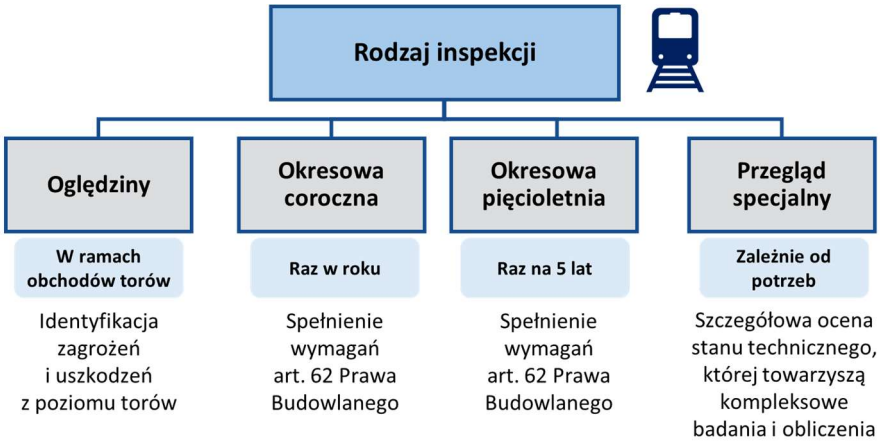
Klasyfikacja kolejowych obiektów inżynieryjnych została przedstawiona w instrukcji Id-2 [259], opracowanej przez PKP Polskie Linie Kolejowe. Dokument ten stanowi rozwinięcie i uszczegółowienie zapisów wcześniej wspomnianego rozporządzenia dotyczącego budowli kolejowych [212].

W instrukcji [259] podstawowym kryterium kwalifikacyjnym jest szerokość w świetle, tj. pozioma odległość między podporami lub ścianami przęsła, mierzona wzdłuż jego osi. Jeśli pod co najmniej jednym przęsłem jest ona większa od 3,0 m obiekt kwalifikuje się jako mostowy. Obiekty te dzieli się na: mosty, wiadukty oraz kładki. Obiekty o mniejszej szerokości klasyfikowane są jako przepusty. Dodatkowo, instrukcja wyróżnia obiekty podziemne, służące do prowadzenia ruchu kolejowego – tunele liniowe i ruchu pieszego – przejścia pod torami. Klasyfikację uzupełniają jeszcze ściany oporowe. Graficzną reprezentację tego podziału pokazano na Rys. 2-1.



Rys. 2-1 Klasyfikacja kolejowych obiektów inżynieryjnych

Rodzaje opracowań diagnostycznych oraz wytyczne ich przeprowadzania przedstawiono w opracowanej również przez PKP Polskie Linie Kolejowe instrukcji utrzymania kolejowych obiektów inżynieryjnych Id-16 [95]. Wyszczególnia się cztery rodzaje inspekcji, które schematycznie pokazano na Rys. 2-2.



Rys. 2-2 Rodzaje opracowań diagnostycznych kolejowych obiektów inżynieryjnych.

Najczęstszym i najmniej szczegółowym rodzajem inspekcji są oględziny. Obejmują one wszystkie obiekty znajdujące się na eksploatowanych liniach kolejowych. Ich celem jest ocena czy obiekt nie stwarza zagrożenia dla bezpiecznej eksploatacji poprzez identyfikację widocznych uszkodzeń oraz określenie wpływu warunków atmosferycznych. Przeprowadza je dróżnik obchodowy lub toromistrz podczas obchodów torów, zgodnie z częstotliwością określoną w Id-7 [94], oceniając wizualnie stan elementów widocznych z poziomu toru. Częstotliwość ta zależy od kategorii toru i intensywności obciążenia. W przypadku torów czynnych wynosi ona od 14 dni do dwóch razy w tygodniu, a dla torów wyłączonych z eksploatacji nie rzadziej niż raz na 6 miesięcy. Dokumentację oględzin stanowi wpis w Książce kontroli obchodów D803, w którym pracownik zespołu diagnostycznego może wskazać elementy wymagające szczególnej obserwacji. Na podstawie oględzin mogą zostać zalecone dodatkowe działania, takie jak kontrola coroczna poza harmonogramem oraz wprowadzenie ograniczeń eksploatacyjnych.

Kluczowymi są kontrole okresowe wykonywane co najmniej raz w roku i raz na 5 lat nazywane kontrolami corocznymi i pięcioletnimi, które mają na celu spełnienie wymagań Art. 62 Prawa budowlanego [243]. Kontrole wykonują pracownicy zespołu diagnostycznego, zgodnie z planem opracowanym przez głównego inżyniera Zakładu Linii Kolejowych.

W ramach kontroli corocznej ocenie podlegają wszystkie elementy obiektu. Zarówno wizualnie, jak i poprzez podstawowe pomiary i badania. Realizowane są przy użyciu zestawu narzędzi diagnostycznych (m.in. aparat fotograficzny, lupa Brinella, latarka, miarki, młotek). Na podstawie analizy wyników formułowane są zalecenia dotyczące konieczności wykonania przeglądu specjalnego lub kontroli pięcioletniej poza harmonogramem, robót bieżącej konserwacji i określenia warunków eksploatacji obiektu.

Stopień szczegółowości kontroli pięcioletniej jest wyższy, przy czym obejmuje ona wszystkie działania wykonywane w ramach kontroli corocznej. Jej głównym celem jest uściślenie oceny stanu technicznego wykonanej podczas kontroli rocznej, oszacowanie zakresu i kosztów robót utrzymaniowych oraz określenie dalszej przydatności obiektu do użytkowania. W ramach tej kontroli dokonuje się szczegółowej oceny wizualnej wszystkich elementów obiektu oraz w razie potrzeby kontrolne badania właściwości mechanicznych i chemicznych materiałów oraz pomiary parametrów geometrycznych.

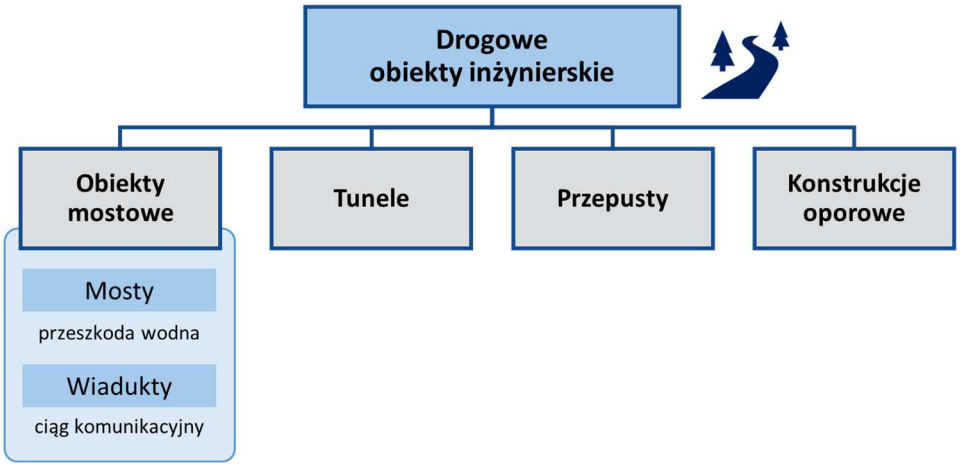
Ostatnim z rodzajów inspekcji określonych w [95] jest przegląd specjalny, stanowiący odpowiednik ekspertyzy technicznej. Jest to działanie nieregularne, podejmowane w sytuacjach wymagających pogłębionej oceny technicznej obiektu. Do przeglądu specjalnego mogą zostać zakwalifikowane obiekty wskazane przez głównego inżyniera w ramach zadań inwestycyjnych, jak również te objęte zakresem działań Centrum Realizacji Inwestycji, za zgodą właściwego Zakładu Linii Kolejowych. Zakres przeglądu specjalnego ustalany jest indywidualnie, a jego celem może być np. weryfikacja aktualnej nośności użytkowej (eksploatacyjnej) obiektu. W tym celu wykonuje się badania materiałowe, pomiary geometrii oraz analizy z użyciem modeli obliczeniowych. Szczególnym przypadkiem są przeglądy specjalne przeprowadzane w sytuacjach nadzwyczajnych, związanych z działaniem sił natury (takimi jak: intensywne opady atmosferyczne, trzęsienia ziemi, osuwiska, pożary, powodzie, ekstremalne temperatury) lub działalnością człowieka (np. wykolejenia taboru, uderzenia pojazdów). Wówczas mają one na celu weryfikację bezpieczeństwa użytkowania po wystąpieniu

czynników zewnętrznych. Przegląd specjalny wykonuje wyspecjalizowana jednostka zewnętrzna na podstawie zatwierdzonego przez głównego inżyniera projektu przeglądu, określającego program, sposób realizacji i planowane wykorzystanie sprzętu. Wyniki przeglądu dokumentowane są w formie protokołu i raportu, które analizuje główny inżynier w celu podjęcia decyzji dotyczących dalszego postępowania. Na ich podstawie może on zlecić m.in. wykonanie kolejnego przeglądu specjalnego, ponowne badania przez inny zespół, sprecyzowanie robót utrzymaniowych lub określenie warunków dalszej eksploatacji obiektu.

Warto zauważyć, że w obu aktualnych instrukcjach [95, 259] nie pojawia się ani razu jakiekolwiek odniesienie do pojęć związanych z cyfryzacją, takich jak digitalizacja, modelowanie informacji o obiektach (BIM) czy wirtualizacji procesu diagnostycznego. Jest to szczególnie wymowne w kontekście faktu, że instrukcja Id-16 [95] została zaktualizowana w maju 2025 r. Wskazuje to na konserwatywne podejście największego zarządcy infrastruktury kolejowej w Polsce do transformacji cyfrowej. Niemniej jednak, istnieją sygnały świadczące o podejmowanych działaniach w zakresie wdrażania nowoczesnych technologii [164], co może zapowiadać przyszłą zmianę podejścia w kolejnych edycjach dokumentów.

2.1.2.2 Obiekty drogowe

Zgodnie z obowiązującym Rozporządzeniem [210] i Ustawą [244] drogowe obiekty inżynierskie dzieli się na: obiekty mostowe (obejmujące mosty i wiadukty), tunele, przepusty oraz konstrukcje oporowe (Rys. 2-3). Warto zauważyć, że w odróżnieniu od wcześniejszego rozporządzenia [213] aktualna wersja nie posługuje się już pojęciami takimi jak kładka czy estakada. Obiekty mostowe przeznaczone do przeprowadzania ruchu pieszego nad przeszkodą określa się, w zależności od jej charakteru jako mosty dla pieszych lub wiadukty dla pieszych. Nie występuje również powszechnie stosowane określenie przejście podziemne, zgodnie z aktualną nomenklaturą należy używać terminu tunel dla pieszych. W przeciwieństwie do przepisów kolejowych, brakuje jednoznacznego kryterium pozwalającego na zakwalifikowanie obiektu jako przepustu - definicja ogranicza się do określenia go jako „budowli przeznaczonej do przeprowadzenia przeszkody przez drogową budowlę ziemną”.



Rys. 2-3 Klasyfikacja drogowych obiektów inżynierskich

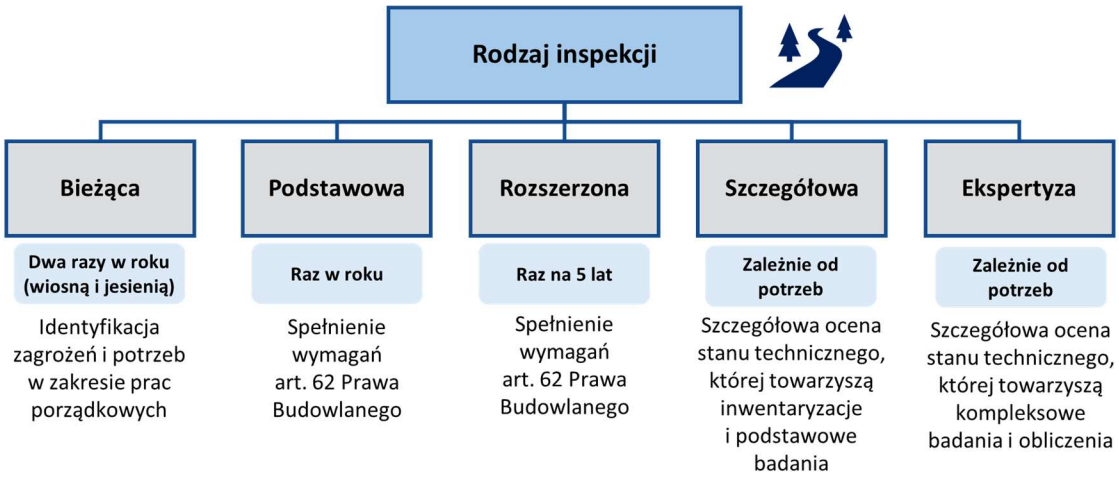
Na przełomie lat 2020 i 2021 Ministerstwo Infrastruktury rozpoczęło wdrażanie Wzorców i Standardów (WiS), opracowywanych na podstawie Art. 17 ust. 3 Ustawy o drogach publicznych [244]. Dokumenty te mają charakter rekomendacyjny, co oznacza, że nie stanowią obligatoryjnych przepisów

techniczno-budowlanych. Zgodnie z Art. 3 rozporządzenia dotyczącego dróg publicznych [210], w przypadku braku lub ogólności zapisów technicznych zawartych w rozporządzeniu, projektowanie, budowa, przebudowa lub użytkowanie drogi powinny odbywać się zgodnie z zasadami wiedzy technicznej, w szczególności tymi zawartymi we wzorcach i standardach rekomendowanych przez ministra właściwego do spraw transportu lub w Polskich Normach (PN).

W ramach WiS opublikowano m.in. „WR-M-81. Wytyczne oceny stanu technicznego drogowych obiektów inżynierskich" [260], które stanowią obecnie najbardziej aktualne zalecenia dotyczące diagnostyki infrastruktury mostowej. Równolegle, wciąż powszechnie wykorzystywane są wcześniejsze wytyczne opracowane przez GDDKiA (ostatnia wersja z 2020 r.) [271–273]. Pomimo że niektóre ich zapisy pozostają niespójne z WR-M-81, dokumenty GDDKiA cechują się znacznie większą szczegółowością i w dalszym ciągu są powszechnie stosowane i rekomendowane do stosowania przez wielu zarządców dróg.

Dobrym przykładem tej niespójności jest zapis zawarty w pkt 5.1 WR-M-81, zgodnie z którym przepusty o świetle poziomym mniejszym niż 3,0 m nie powinny podlegać inspekcjom, jako elementy budowli drogowej, w którą zostały wbudowane. W praktyce jednak obiekty tego typu są nadal kontrolowane, zgodnie z wcześniejszymi wytycznymi GDDKiA. Paradoksalnie, w dokumentach kolejowych obiekty o świetle większym niż 3,0 m przestają być kwalifikowane jako przepusty, co jeszcze bardziej uwypukla brak jednoznaczności w systemie prawnym i technicznym dotyczącym infrastruktury liniowej w Polsce. Warto dodać, że zgodnie z Art. 62 ust. 2 pkt 2b oraz Art. 29 ust. 2 pkt 12 Prawa budowlanego [243], obowiązek kontroli okresowej dotyczy przepustów o przekroju wewnętrznym większym niż 0,85 m², co odpowiada okręgowi o średnicy ok. 104 cm lub kwadratowi o boku ok. 93 cm.

Według [260, 271] wyszczególniamy pięć rodzajów inspekcji (wg GDDKiA, przeglądów) drogowych obiektów inżynierskich: bieżącą, podstawową, rozszerzoną, szczegółową oraz ekspertyzę. Schemat podziału pokazano na Rys. 2-4. W dalszej części każda z inspekcji zostanie omówiona w sposób ogólny na podstawie WR-M [260], natomiast bardziej szczegółowe wytyczne zostaną przytoczone na podstawie zaleceń zawartych w dokumentach GDDKiA [271]. Warto zaznaczyć, że w WR-M-81 stosuje się termin inspekcja, podczas gdy w wytycznych GDDKiA odpowiadające im działania określane są jako przeglądy.



Rys. 2-4 Rodzaje opracowań diagnostycznych drogowych obiektów inżynierskich

Inspekcje bieżące wg [260] mają na celu zidentyfikowanie potencjalnych zagrożeń w użytkowaniu obiektu i potrzeb w zakresie prac porządkowych. Powinny być wykonywane co najmniej dwa razy w roku (wiosną i jesienią) przez wyznaczonego pracownika zarządcy obiektu. Szczegółowe zasady realizacji inspekcji bieżących określa instrukcja GDDKiA [271]. Zgodnie z nią przeglądy bieżące prowadzone są każdorazowo w ramach patrolowych objazdów sieci drogowej. Dodatkowo, powinny być wykonywane po każdym zdarzeniu mogącym mieć wpływ na stan obiektu, np. trzęsieniu ziemi, pożarze, powodzi, przejeździe pojazdu nienormatywnego, czy uderzeniu pojazdu w konstrukcję. Inspekcja polega na wizualnej ocenie konstrukcji, wyposażenia i otoczenia z poziomu jezdni, a w razie potrzeby również z poziomu terenu pod obiektem. Ich celem jest wykrycie uszkodzeń, które mogą bezpośrednio zagrażać bezpieczeństwu ruchu, znacząco obniżać komfort użytkowania lub wskazujących na konieczność wykonania prac porządkowych lub wymagających dalszej diagnostyki. Rezultaty inspekcji powinny być dokumentowane w protokole i niezwłocznie przekazywane do dalszej analizy w przypadku wykrycia nieprawidłowości.

Inspekcja podstawowa i rozszerzona wg [260] mają na celu spełnienie wymagań Art. 62 Prawa budowlanego [15]. Wykonywane są odpowiednio raz w roku i raz na 5 lat przez inspektora mostowego, który spełnia wymagania stawiane mu przez Prawo budowlane (opisane w pkt. 2.1.1) oraz odbył kurs inspektorów mostowych dotyczący danego rodzaju inspekcji na wyższej uczelni technicznej. W przypadku wykonania przeglądu rozszerzonego w danym roku, nie ma obowiązku realizacji przeglądu podstawowego.

Zasady oraz sposób przeprowadzania przeglądów uszczegółowiono w instrukcji GDDKiA [271]. W zakresie obu inspekcji znajduje się sprawdzenie stanu technicznego konstrukcji obiektu, jego wyposażenia, otoczenia oraz urządzeń i instalacji służących ochronie środowiska. Dodatkowo przegląd rozszerzony obejmuje ocenę estetyki obiektu i jego otoczenia oraz analizę przydatności do dalszego użytkowania zgodnie z budowlanego [15]. W ramach przeglądów określa się również ewentualną potrzebę wykonania ekspertyzy. Oprócz oględzin wykonuje się podstawowe badania i pomiary: m.in. ostukiwanie młotkiem (o masie 0,5 kg), odkuwanie skorodowanych warstw, nawiercanie wybranych elementów, pomiar rozwarcia rys oraz dokumentację fotograficzną.

Przegląd podstawowy prowadzi się z poziomu jezdni i terenu. W przypadku przeglądu rozszerzonego dokonuje się oceny kontrolowanego elementu z odległości około 1 m, pozwalając na stwierdzenie uszkodzeń nieuzbrojonym okiem. Jeśli to konieczne, wykorzystuje się sprzęt do bezpośredniego dostępu do konstrukcji (np. rusztowania, windy, drabiny, lornetki). W przypadku obiektów o długości przekraczającej 50 m, obiektów zabytkowych, z przęsłami dłuższymi niż 30 m lub przęsłami ruchomymi, zaleca się prowadzenie przeglądów w obecności przedstawicieli GDDKiA. W przypadku mostów z dużym natężeniem ruchu (powyżej 20 tys. pojazdów na dobę) oraz konstrukcji z prefabrykatów starego typu, zaleca się skrócenie okresu między przeglądami rozszerzonymi (np. co 3 lata)

Inspekcja szczegółowa zgodnie z [260], służy precyzyjnej ocenie stanu technicznego obiektu i inwentaryzacji jego uszkodzeń. Na tej podstawie podejmuje się decyzje dotyczące remontu, przebudowy lub ograniczeń użytkowych. Inspekcja ta jest wykonywana przez inspektora mostowego posiadającego uprawnienia zgodne z wymaganiami dotyczącymi przeglądów okresowych, a jej częstotliwość zależy od decyzji zarządcy.

Zgodnie z instrukcją GDDKiA [271], przegląd szczegółowy dotyczy wybranych obiektów mostowych, tuneli, przepustów i konstrukcji oporowych, w szczególności tych o dużych rozpiętościach, zawierających przęsła ruchome, wykonanych z prefabrykatów lub wskazanych jako wymagające szczególnej uwagi na podstawie wcześniejszych przeglądów. Zakres inspekcji obejmuje: oględziny obiektu i jego otoczenia, dokumentację fotograficzną i szkice uszkodzeń, kontrolne badania mechaniczne, prace pomiarowe oraz badania z użyciem specjalistycznej aparatury.

W ramach pomiarów wykonuje się przede wszystkim pomiary niwelacyjne, służące określeniu osiadań podpór i ugięć przęseł. Wykonywane są również pomiary wymiarów, kształtu i położenia elementów konstrukcji oraz pomiary inwentaryzacyjne przekrojów elementów, które uległy uszkodzeniom. Dodatkowo, sprawdzana jest szerokość rys i pęknięć (np. za pomocą lupy Brinella), grubość otuliny zbrojeniowej oraz grubość powłok malarskich. Pomiary te mogą być uzupełniane sondowaniem dna cieku oraz innymi pracami pomiarowymi, uznanymi za niezbędne.

Badania kontrolne prowadzone są zarówno metodami mechanicznymi, jak i z wykorzystaniem specjalistycznej aparatury. W konstrukcjach drewnianych stosuje się m.in. nawiercanie wybranych elementów w celu określenia głębokości przegnicia oraz opukiwanie elementów młotkiem w celu wykrycia pustek. W konstrukcjach stalowych opukuje się nity i spoiny, oczyszcza skorodowane powierzchnie oraz dokonuje kontroli dokręcenia śrub sprężających. W przypadku konstrukcji betonowych wykonuje się opukiwanie powierzchni oraz odkucie skorodowanych warstw. Uzupełnieniem są badania przy użyciu specjalnych przyrządów, takich jak sklerometr do oceny wytrzymałości i jednorodności betonu, defektoskop ultradźwiękowy do badania spoin i stali, testy chemiczne określające zawartość chlorków i siarczanów, a także pomiary pH betonu.

Ekspertyza, będąca ostatnim z typów inspekcji wg [260], obejmuje badania, pomiary lub obliczenia dotyczące obiektu lub jego otoczenia. Wykonywana powinna być przez osobę z wykształceniem wyższym, posiadającą uprawnienia budowlane w specjalności właściwej dla przedmiotu ekspertyzy i pełniącą samodzielną funkcję techniczną w budownictwie. Częstotliwość wykonywania ekspertyz zależy od potrzeb lub zaleceń wynikających z pozostałych typów przeglądów. Instrukcja [271] nie zawiera dodatkowych wytycznych dotyczących przeprowadzania ekspertyz.

Podobnie jak w przypadku wytycznych kolejowych, w obu instrukcjach [260, 271] nie pojawia się ani razu jakiekolwiek odniesienie do pojęć związanych z cyfryzacją, takich jak digitalizacja, modelowanie informacji o obiektach (BIM) czy wirtualizacja procesu diagnostycznego. Najbliższe takiej terminologii jest sformułowanie „aparat cyfrowy" użyte w [19], w kontekście wykonywania dokumentacji fotograficznej. Natomiast w ramach WiS opracowany został dokument „BIM-M-01. Powiązanie wymagań technicznych dotyczących drogowych obiektów inżynierskich z technologią BIM" [25], w której pkt 5.4. odnosi się do cyfrowego zarządzania i utrzymania obiektów inżynierskich.

W dokumencie przedstawiono szereg korzyści wynikających z wykorzystania modeli BIM na etapie eksploatacji, w tym również w zakresie prowadzenia inspekcji. Model BIM może pełnić funkcję graficznej bazy wiedzy o obiekcie, repozytorium dokumentów oraz źródła danych o stanie technicznym i historii obiektu. Dzięki temu możliwa staje się bardziej przejrzysta organizacja procesu zarządzania, integracja z systemami Asset Management (Systemy Gospodarki Mostowej – SGM) oraz lepsze planowanie działań remontowych. Umożliwia to nie tylko poprawę jakości danych, lecz także ich bieżącą aktualizację w oparciu o wyniki inspekcji i pomiarów prowadzonych w terenie.

Wskazano również konkretne rozwiązania, które mogą wspierać diagnostykę obiektów inżynierskich, takie jak narzędzia mobilne czy technologia rozszerzonej rzeczywistości (AR). Podkreślono przy tym, że przejście na cyfrowe narzędzia inspekcyjne oparte na BIM, w swojej podstawowej wersji, nie powinno eliminować dotychczas stosowanych metod raportowania, lecz je rozszerzać i integrować z nowymi systemami zarządzania infrastrukturą. Przedstawiono koncepcyjny scenariusz, w którym inspektor dokonuje oględzin obiektu z wykorzystaniem tabletu lub gogli AR, rejestrując uszkodzenia bezpośrednio w modelu BIM. System umożliwiałby śledzenie historii usterek, porównywanie stanu aktualnego z poprzednimi ocenami oraz automatyczne generowanie raportów.

Dodatkowo podkreślono rolę dronów, fotogrametrii i skanowania laserowego jako źródeł danych wykorzystywanych w cyfrowej diagnostyce. Wskazano przykład, w którym za pomocą chmury punktów pozyskanej z nalotów fotogrametrycznych stworzono model 3D filara mostu. Zilustrowano to przykładem pozyskiwania chmury punktów w celu identyfikacji rysy na filarze mostu. Następnie z pomocą algorytmów rozpoznawania obrazu zidentyfikowano występującą tam rysę, a jej lokalizacja i parametry zostały odwzorowane w modelu BIM.

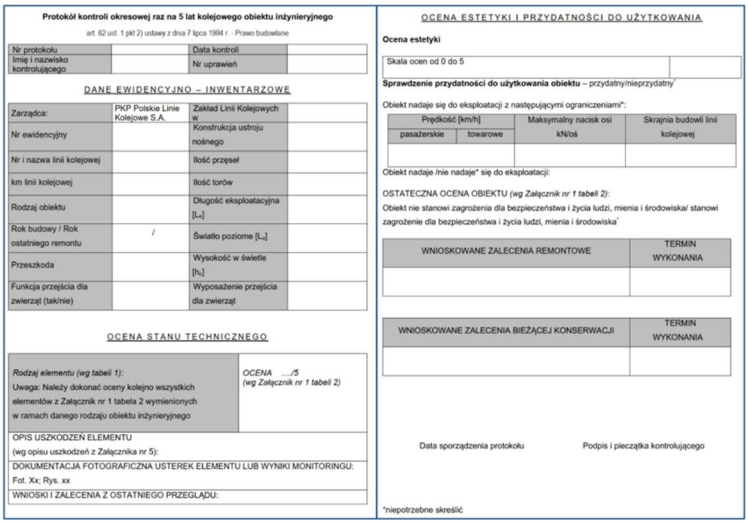
2.1.3 Dokumentacja wyników inspekcji okresowych

2.1.3.1 Obiekty kolejowe

Sposób dokumentowania wyników okresowych kontroli rocznych i pięcioletnich kolejowych obiektów inżynieryjnych został określony w instrukcji Id-16 [95]. Dla kontroli corocznej stosuje się protokół okresowej kontroli według wzoru zawartego w Załączniku nr 6 [95], a dla kontroli pięcioletniej, protokół według wzoru określonego w Załączniku 7 [95]. Protokoły te powinny być archiwizowane przez cały cykl życia obiektu w Zakładzie Linii Kolejowych. Przykładowy wzór protokołu pięcioletniego przedstawiono na Rys. 2-5.

Zakres informacji zawartych w protokołach obejmuje:

- numer protokołu i datę przeprowadzenia kontroli,
- dane kontrolującego,
- dane ewidencyjne obiektu,
- ocenę stanu technicznego poszczególnych elementów obiektu wraz z dokumentacją fotograficzną,
- określenie przydatności obiektu do eksploatacji oraz ewentualne ograniczenia,
- ostateczną ocenę obiektu,
- zalecenia dotyczące prac remontowych i konserwacyjnych wraz z proponowanymi terminami ich wykonania,
- dodatkową ocenę estetyki oraz przydatności do dalszego użytkowania, w przypadku kontroli pięcioletniej.



Protokół kontroli okresowej raz na 5 lat kolejowego obiektu inżynieryjnego

art. 62 ust. 1 pkt 2) ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. - Prawo budowlane

Nr protokołu		Data kontroli	
Imię i nazwisko kontrolującego		Nr uprawnień	

DANE EWIDENCYJNO – INWENTARZOWE

Zarządca:	PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.	Zakład Linii Kolejowych w	
Nr ewidencyjny		Konstrukcja ustroju nośnego	
Nr i nazwa linii kolejowej		Ilość przęseł	
km linii kolejowej		Ilość torów	
Rodzaj obiektu		Długość eksploatacyjna [L_e]	
Rok budowy / Rok ostatniego remontu	/	Światło poziome [L_o]	
Przeszkoda		Wysokość w świetle [h_o]	
Funkcja przejścia dla zwierząt (tak/nie)		Wyposażenie przejścia dla zwierząt	

OCENA STANU TECHNICZNEGO

Rodzaj elementu (wg tabeli 1): Uwaga: Należy dokonać oceny kolejno wszystkich elementów z Załącznik nr 1 tabela 2 wymienionych w ramach danego rodzaju obiektu inżynieryjnego	*OCENA ...../5* *(wg Załącznik nr 1 tabeli 2)*
OPIS USZKODZEŃ ELEMENTU (wg opisu uszkodzeń z Załącznika nr 5):	
DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA USTEREK ELEMENTU LUB WYNIKI MONITORINGU: Fot. Xx; Rys. xx	
WNIOSKI I ZALECENIA Z OSTATNIEGO PRZEGLĄDU:	

OCENA ESTETYKI I PRZYDATNOŚCI DO UŻYTKOWANIA

Ocena estetyki

Skala ocen od 0 do 5	

Sprawdzenie przydatności do użytkowania obiektu – przydatny/nieprzydatny*

Obiekt nadaje się do eksploatacji z następującymi ograniczeniami*:

Prędkość [km/h]		Maksymalny nacisk osi kN/oś	Skrajnia budowli linii kolejowej
pasażerskie	towarowe		

Obiekt nadaje /nie nadaje* się do eksploatacji:

OSTATECZNA OCENA OBIEKTU *(wg Załącznik nr 1 tabeli 2)*:

Obiekt nie stanowi zagrożenia dla bezpieczeństwa i życia ludzi, mienia i środowiska/ stanowi zagrożenie dla bezpieczeństwa i życia ludzi, mienia i środowiska*

WNIOSKOWANE ZALECENIA REMONTOWE	TERMIN WYKONANIA

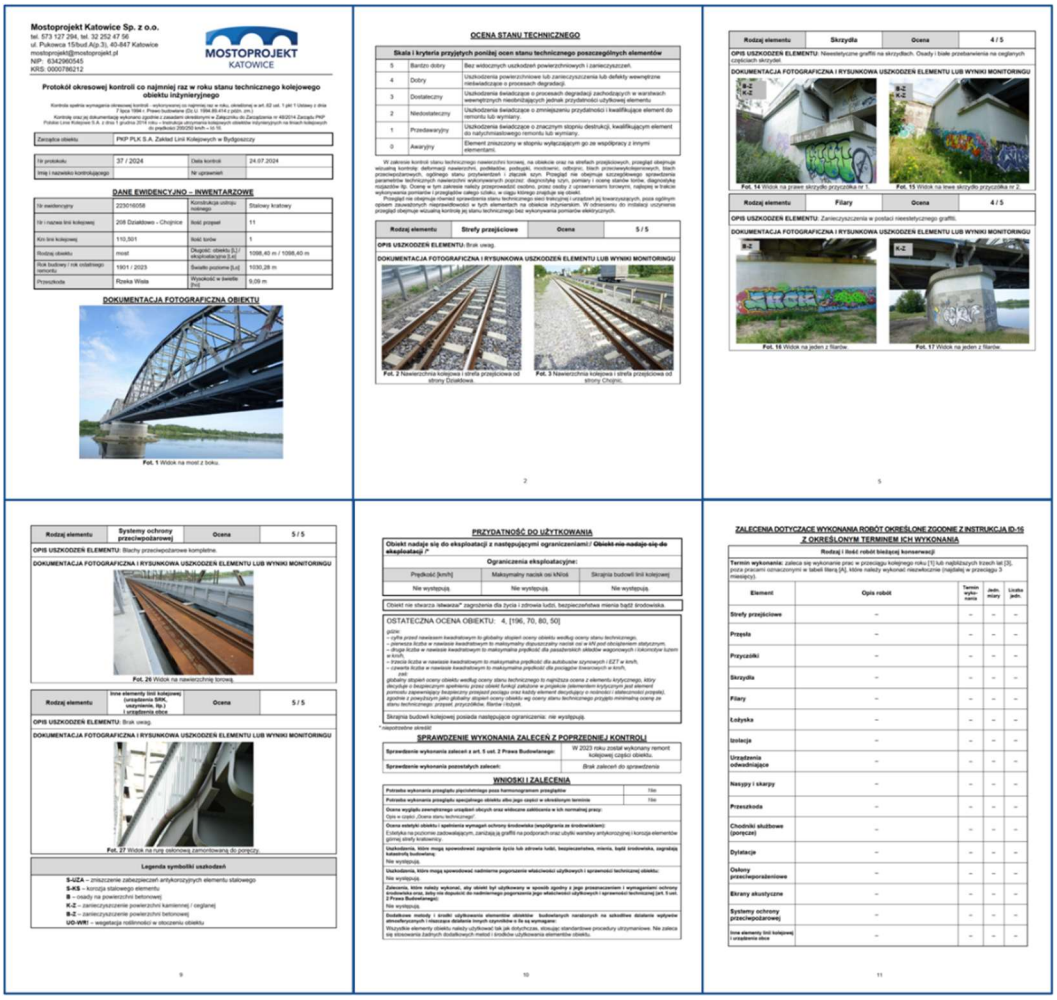
WNIOSKOWANE ZALECENIA BIEŻĄCEJ KONSERWACJI	TERMIN WYKONANIA

Data sporządzenia protokołu — Podpis i pieczątka kontrolującego

*niepotrzebne skreślić

Rys. 2-5 Wzór protokołu z kontroli okresowej pięcioletniej wg [95]

Pomimo istnienia wzorów protokołów określonych w instrukcji, w praktyce inżynierskiej często podlegają one modyfikacjom, ponieważ nie spełniają w pełni wymagań wynikających z Prawa budowlanego [243]. W konsekwencji prowadzi to do braku jednolitego standardu dokumentacji przekazywanej zarządcy, której forma i zakres są zależne od autora opracowania. Rys. 2-6 przedstawia fragment rzeczywistego, wypełnionego protokołu stworzonego w ramach pracy zawodowej.



Mostoprojekt Katowice Sp. z o.o.
tel. 573 127 294, tel. 32 252 47 56
ul. Pokrzewia 15/bud.Alp.3), 40-847 Katowice
mostoprojekt@mostoprojekt.pl
NIP: 6342960545
KRS: 0000736212

MOSTOPROJEKT KATOWICE

Protokół okresowej kontroli co najmniej raz w roku stanu technicznego kolejowego obiektu inżynieryjnego

Kontrola spełnia wymagania okresowej kontroli , wykonywanej co najmniej raz w roku, określonej w art. 62 ust. 1 pkt 1 Ustawy z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane (Dz.U. 1994.89.414 z późn. zm.).
Kontrolę oraz jej dokumentację wykonano zgodnie z zasadami określonymi w Załączniku do Zarządzenia nr 48/2014 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. z dnia 1 grudnia 2014 r. w sprawie wykonywania okresowych kontroli obiektów inżynieryjnych na liniach kolejowych do prędkości 200/250 km/h – cz. IV.

Zarządca obiektu:	PKP PLK S.A. Zakład Linii Kolejowych w Bydgoszczy

Nr protokołu	37 / 2024	Data kontroli	24.07.2024
Imię i nazwisko kontrolującego:		Nr uprawnień	

DANE EWIDENCYJNO – INWENTARZOWE

Nr ewidencyjny	203616058	Konstrukcja ustroju nośnego	Stalowy kratowy
Nr i nazwa linii kolejowej	208 Działdowo - Chojnice	Ilość przęseł	11
Km linii kolejowej	110,501	Ilość torów	1
Rodzaj obiektu	most	Długość obiektu [L1] eksploatacyjna [L-e]	1098,40 m / 1098,40 m
Rok budowy / rok ostatniego remontu	1901 / 2023	Światło poziome [Lo]	1030,28 m
Przeszkoda	Rzeka Wisła	Wysokość w świetle [ho]	9,09 m

DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA OBIEKTU

Fot. 1 Widok na most z boku.

2

OCENA STANU TECHNICZNEGO

Skala i kryteria przyjętych poniżej ocen stanu technicznego poszczególnych elementów		
5	Bardzo dobry	Bez widocznych uszkodzeń powierzchniowych i zanieczyszczeń.
4	Dobry	Uszkodzenia powierzchniowe lub zanieczyszczenia lub defekty wewnętrzne niebezpieczne o procesach degradacji.
3	Dostateczny	Uszkodzenia świadczące o procesach degradacji zachodzących w warstwach wewnętrznych niedobrudzących jednak przydatności użytkowej elementu.
2	Niedostateczny	Uszkodzenia świadczące o zmniejszeniu przydatności i kwalifikujące element do remontu lub wymiany.
1	Przedawaryjny	Uszkodzenia świadczące o znacznym stopniu destrukcji, kwalifikującym element do natychmiastowego remontu lub wymiany.
0	Awaryjny	Element zniszczony w stopniu wykluczającym go ze współpracy z innymi elementami.

W zakresie kontroli stanu technicznego nawierzchni torowej, na obiekcie oraz na strefach przejściowych, przegląd obejmuje wizualną kontrolę: deformacji nawierzchni, podkładów, podsypki, mocowania, odbojnic, błach przeciwwykolejeniowych, błach przeciwpełzawych, ogólnego stanu przytwierdzeń i złączek szyn. Przegląd nie obejmuje szczegółowego sprawdzenia parametrów geometrycznych toru, które powinno być wykonywane przez uprawnionych pracowników i ocenę stanów torów, diagnostyką rozjazdów itp. Ocena w tym zakresie należy przeprowadzić osobno, przez kadry z uprawnieniami torowymi, najlepiej w trakcie wykonywania pomiarów i przeglądów całego szlaku, w ciągu którego znajduje się obiekt.
Przegląd ma obejmować również sprawdzenie stanu technicznego sieci trakcyjnej i urządzeń jej towarzyszących, poza ogólnym opisem zauważonych nieprawidłowości w tym elementach na obiekcie inżynierskim. W odniesieniu do instalacji uzyskanie przeglądu obejmuje wizualną kontrolę jej stanu technicznego bez wykonywania pomiarów elektrycznych.

Rodzaj elementu	Strefy przejściowe	Ocena	5 / 5

OPIS USZKODZEŃ ELEMENTU: Brak uwag.

DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA I RYSUNKOWA USZKODZEŃ ELEMENTU LUB WYNIKI MONITORINGU

Fot. 2 Nawierzchnia kolejowa i strefa przejściowa od strony Działdowa.

Fot. 3 Nawierzchnia kolejowa i strefa przejściowa od strony Chojnic.

Rodzaj elementu	Skrzydła	Ocena	4 / 5

OPIS USZKODZEŃ ELEMENTU: Nieestetyczne graffiti na skrzydłach. Osady i białe przebarwienia na ceglanych częściach skrzydeł.

DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA I RYSUNKOWA USZKODZEŃ ELEMENTU LUB WYNIKI MONITORINGU

Fot. 14 Widok na prawe skrzydło przyczółka nr 1.

Fot. 15 Widok na lewe skrzydło przyczółka nr 2.

Rodzaj elementu	Filary	Ocena	4 / 5

OPIS USZKODZEŃ ELEMENTU: Zanieczyszczenia w postaci nieestetycznego graffiti.

DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA I RYSUNKOWA USZKODZEŃ ELEMENTU LUB WYNIKI MONITORINGU

Fot. 16 Widok na jeden z filarów.

Fot. 17 Widok na jeden z filarów.

5

Rodzaj elementu	Systemy ochrony przeciwpodzarowej	Ocena	5 / 5

OPIS USZKODZEŃ ELEMENTU: Blachy przeciwpożarowe kompletne.

DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA I RYSUNKOWA USZKODZEŃ ELEMENTU LUB WYNIKI MONITORINGU

Fot. 26 Widok na nawierzchnię torową.

Rodzaj elementu	Inne elementy linii kolejowej (urządzenia SRK, uszynienia, itp.) i urządzenia obce	Ocena	5 / 5

OPIS USZKODZEŃ ELEMENTU: Brak uwag.

DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA I RYSUNKOWA USZKODZEŃ ELEMENTU LUB WYNIKI MONITORINGU

Fot. 27 Widok na rurę osłonową zamontowaną do pomostu.

Legenda symboliki uszkodzeń
S-UZA – zniszczenie zabezpieczeń antykorozyjnych elementu stalowego
S-KS – korozja stalowego elementu
B – ubytki na powierzchni betonowej
K-Z – zanieczyszczenie powierzchni kamiennej / ceglanej
B-Z – zanieczyszczenie powierzchni betonowej
UO-WR – wegetacja roślinności w otoczeniu obiektu

9

PRZYDATNOŚĆ DO UŻYTKOWANIA

Obiekt nadaje się do eksploatacji z następującymi ograniczeniami / Obiekt nie nadaje się do eksploatacji /*

Ograniczenia eksploatacyjne:

Prędkość [km/h]	Maksymalny nacisk osi kN/oś	Skrajnia budowli linii kolejowej
Nie występują.	Nie występują.	Nie występują.

Obiekt nie stwarza tzw. "zagrożenia dla życia i zdrowia ludzi, bezpieczeństwa mienia bądź środowiska.

OSTATECZNA OCENA OBIEKTU: 4, [196, 70, 80, 50]

gdzie:
- cyfra przed nawiasem świadczącym o globalnej stopień oceny obiektu według oceny stanu technicznego,
- pierwsza liczba w nawiasie świadczących o maksymalnej dopuszczalnej nacisk osi w kN jest obciążeniem statycznym,
- druga liczba w nawiasie świadczących o maksymalnej prędkości dla pasażerskich składów wagonowych i lokomotyw tuzem pasażerskich,
- trzecia liczba w nawiasie świadczących o maksymalnej prędkości dla autobusów szynowych i EZT w km/h,
- czwarta liczba w nawiasie świadczących o maksymalnej prędkości dla posiągów towarowych w km/h,

gdzie:
globalny stopień oceny obiektu według oceny stanu technicznego to najniższa ocena z elementu krytycznego, który decyduje o bezpiecznym spełnieniu przez obiekt funkcji założone w projekcie (elementem krytycznym jest element pomocny zapewniający bezpieczny przejazd pociągu oraz każdy element decydujący o możności i dalszemości przejaz, zgodnie z powyższym jako globalny stopień oceny obiektu wg oceny stanu technicznego przyjęto minimalną ocenę ze stanu technicznego: przęseł, przyczółków, filarów i łożysk.

Skrajnia budowli kolejowej posiada następujące ograniczenia: nie występują.

*niepotrzebne skreślić

SPRAWDZENIE WYKONANIA ZALECEŃ Z POPRZEDNIEJ KONTROLI

Sprawdzenie wykonania zaleceń z art. 5 ust. 2 Prawa Budowlanego:	W 2023 roku został wykonany remont kolejowej części obiektu.
Sprawdzenie wykonania pozostałych zaleceń:	Brak zaleceń do sprawdzenia

WNIOSKI I ZALECENIA

Potrzeba wykonania przeglądu pięciotletniego poza harmonogramem przeglądów	Nie
Potrzeba wykonania przeglądu specjalnego obiektu albo jego części w określonym terminie	Nie
Ocena wyglądu zewnętrznego urządzeń obcych oraz widoczne zakłócenia w ich normalnej pracy: Opis w części „Ocena stanu technicznego"	
Ocena estetyki obiektu / spełnienia wymagań ochrony środowiska (wspólgrania ze środowiskiem): Estetyka na poziomie zadowalającym, zarówno ją graffiti na podporach oraz usytki warstwy antykorozyjnej i korozja elementów górnej strefy krańcowej.	
Uszkodzenia, które mogą spowodować zagrożenie życia lub zdrowia ludzi, bezpieczeństwa, mienia, bądź środowiska, zagrożą kolejności użytkowej: Nie występują.	
Uszkodzenia, które mogą spowodować nadmierne pogorszenie właściwości użytkowych i sprawności technicznej obiektu: Nie występują.	
Zalecenia, które należy wykonać, aby obiekt był użytkowany w sposób zgodny z jego przeznaczeniem i wymaganiami ochrony środowiska do upływu terminu następnej okresowej kontroli (nie dłuższego niż 5 lat) / do upływu terminu następnego przeglądu specjalnego: Nie występują.	
Uszkodzenia metalu i kruchi użytkowania elementów obiektów budowlanych narażonych na szkodliwe działanie wpływów atmosferycznych i niszczące działania innych czynników o ile są wymagane: Wszystkie elementy stalowe obiektu należy użytkować tak jak dotychczas, stosując standardowe procedury utrzymaniowe. Nie zaleca się stosowania żadnych dodatkowych metod i środków użytkowania elementów obiektu.	

10

ZALECENIA DOTYCZĄCE WYKONANIA ROBÓT OKREŚLONE ZGODNIE Z INSTRUKCJĄ ID-16 Z OKREŚLONYM TERMINEM ICH WYKONANIA

Rodzaj i ilość robót bieżącej konserwacji

Termin wykonania: zaleca się wykonanie przez w przeciągu kolejnego roku [1] lub najbliższych trzech lat [3], poza pracami oznaczonymi w tabeli literą [k], które należy wykonać niezwłocznie (najdalej w przeciągu 3 miesięcy).

Element	Opis robót	Termin wykon. remont.	Jedn. miary	Liczba jedn.
Strefy przejściowe	–	–	–	–
Przęsła	–	–	–	–
Przyczółki	–	–	–	–
Skrzydła	–	–	–	–
Filary	–	–	–	–
Łożyska	–	–	–	–
Izolacje	–	–	–	–
Urządzenia odwadniające	–	–	–	–
Nasypy i skarpy	–	–	–	–
Przeszkoda	–	–	–	–
Chodniki służbowe (poręcze)	–	–	–	–
Dylatacje	–	–	–	–
Osłony przeciwoślaniowe	–	–	–	–
Ekrany akustyczne	–	–	–	–
Systemy ochrony przeciwpożarowej	–	–	–	–
Inne elementy linii kolejowej i urządzenia obce	–	–	–	–

11

Rys. 2-6 Fragment wypełnionego protokołu z kontroli mostu kolejowego

Istotnym aspektem z punktu widzenia dokumentowania wyników inspekcji są zasady klasyfikacji uszkodzeń oraz kryteria oceny stanu technicznego elementów obiektu. W Załączniku nr 1 do instrukcji Id-16 [95] przedstawiono ogólne zasady oceny obiektów inżynieryjnych. Wyszczególnione zostały elementy, które mają podlegać ocenie w podziale na rodzaj obiektu inżynieryjnego m.in. strefy przejściowe, przęsła, przyczółki, filary, łożyska czy izolacja. Określono również skalę ocen stanu technicznego (Tab. 2-2), która co ciekawe, oparta została na rozporządzeniu dotyczącym dróg publicznych [209], gdzie zastosowano skalę ocen od 0 do 5 (Tab. 2-1). Skala przedstawiona w Id-16 jest jej adaptacją. Zachowano zakres ocen, jednak wprowadzono pewne zmiany w nazewnictwie (np. ocena 5 to „bardzo dobra", a nie „odpowiednia", jak w [209]) oraz w opisach poszczególnych stanów elementów. Różnice dotyczą głównie sformułowań i układu zdań, lecz nie samej merytorycznej treści.

Tab. 2-1 Skala oceny obiektów mostowych wg [209]

Stopień oceny	Określenie stanu	Opis stanu elementu
5	odpowiedni	bez uszkodzeń i zanieczyszczeń możliwych do stwierdzenia podczas przeglądu
4	zadowalający	wykazuje zanieczyszczenia lub pierwsze objawy uszkodzeń pogarszających wygląd estetyczny
3	niepokojący	wykazuje uszkodzenia, których nienaprawienie spowoduje skrócenie okresu bezpiecznej eksploatacji
2	niedostateczny	wykazuje uszkodzenia obniżające przydatność użytkową, ale możliwe do naprawy
1	przedawaryjny	wykazuje nieodwracalne uszkodzenia dyskwalifikujące przydatność użytkową
0	awaryjny	uległ zniszczeniu lub przestał istnieć

Tab. 2-2 Skala oceny kolejowych obiektów inżynieryjnych wg [95]

Stopień oceny	Określenie stanu	Opis stanu elementu
5	bardzo dobry	bez widocznych uszkodzeń powierzchniowych i zanieczyszczeń
4	dobry	uszkodzenia powierzchniowe lub zanieczyszczenia lub defekty wewnętrzne nie świadczące o procesach degradacji
3	dostateczny	uszkodzenia świadczące o procesach degradacji zachodzących w warstwach wewnętrznych nie obniżających jednak przydatności użytkowej elementu
2	niedostateczny	uszkodzenia świadczące o zmniejszeniu przydatności i kwalifikujące element do remontu lub wymiany
1	przedawaryjny	uszkodzenia świadczące o znacznym stopniu destrukcji, kwalifikującym element do natychmiastowego remontu lub wymiany
0	awaryjny	element zniszczony w stopniu wyłączającym go ze współpracy z innymi elementami

Co istotne, zdefiniowanej w instrukcji [95] skali ocen nie towarzyszą żadne obiektywne i wymierne kryteria. Instrukcja [95] nie podaje ilościowych progów dla intensywności uszkodzeń (np. procentowych lub metrycznych), których przekroczenie determinowałoby wystawienie konkretnej oceny dla danego elementu. W praktyce pozostawia to ogromne pole do interpretacji i sprawia, że ocena staje się w dużej mierze uznaniowa, zależna od indywidualnego doświadczenia i subiektywnego osądu inspektora.

Ostateczna ocena obiektu jest równa najniższej ocenie uzyskanej przez element krytyczny, czyli taki, który decyduje o bezpiecznym użytkowaniu konstrukcji. Lista elementów krytycznych nie jest wprost wskazana. Można do niej zaliczyć elementy pomostu, zapewniający bezpieczny przejazd pociągu oraz każdy element decydujący o nośności i stateczności przęsła.

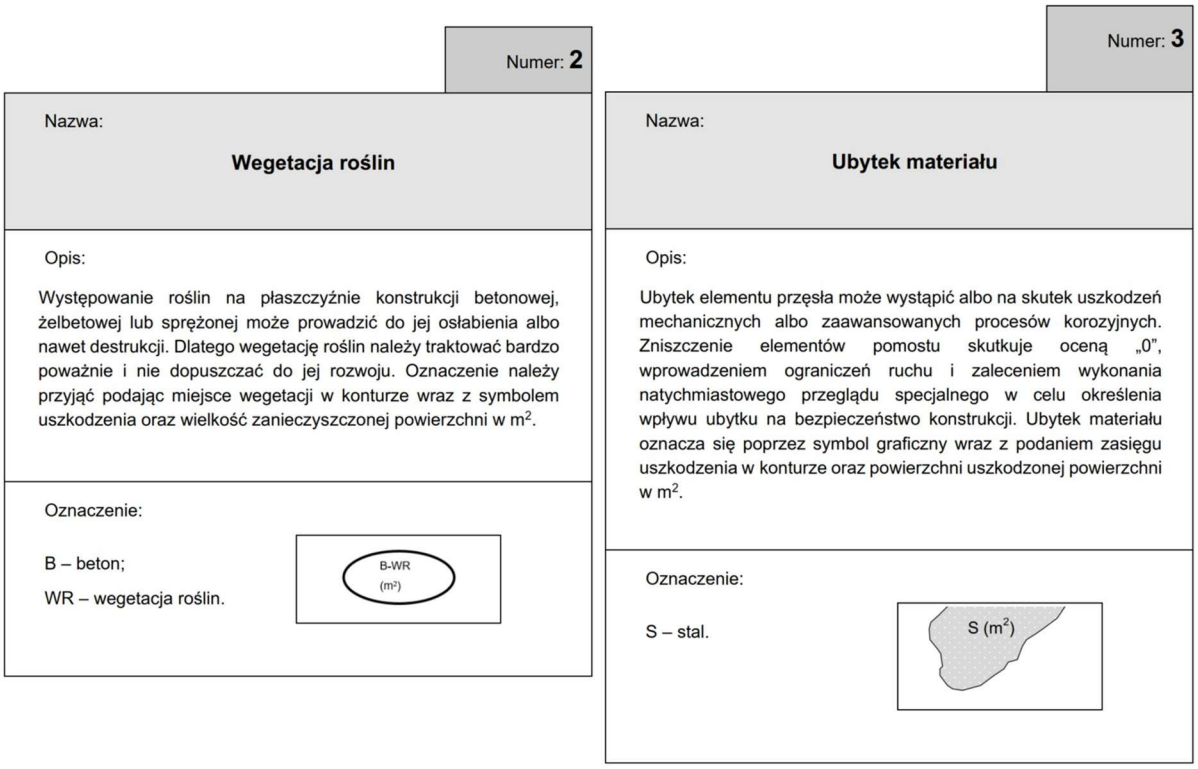
W Załącznikach nr 2, 4 i 5 instrukcji Id-16 [95] podjęto próbę systematyzacji opisu uszkodzeń poprzez ich kategoryzację i kodyfikację, w celu ujednolicenia dokumentacji z inspekcji. Analiza tych załączników ujawnia jednak fundamentalne niespójności, które podważają integralność całego systemu.

Instrukcja wprowadza pozornie ujednolicony system kodowania, którego zasady różnią się w zależności od załącznika. Główny katalog uszkodzeń, przedstawiony w Tabeli 2 Załącznika nr 2 (Tab. 2-3), opiera się na prostym, dwuliterowym kodzie, gdzie pierwsza litera oznacza rodzaj uszkodzenia, a druga materiał (np. KS oznacza korozję stali). Jednak Załączniki nr 4 i 5 zawierające szczegółowe opisy i karty uszkodzeń, wprowadzają już inną logikę. Dwuczłonowy symbol w formacie X-Y, gdzie X to kod materiału, a Y to kod uszkodzenia. Zgodnie z tym podejściem, to samo uszkodzenie (korozja stali konstrukcyjnej) powinno być opisane kodem S-KS. Co więcej, dla niektórych wad, jak np. ubytki materiału czy przecieki, instrukcja zaleca jeszcze inne podejście. Należy oznaczać uszkodzenia na fotografii za pomocą kodu materiału i dedykowanego symbolu graficznego (prawa strona Rys. 2-7).

Rozdźwięk w obrębie instrukcji potwierdza również przykład wegetacji roślin na elemencie betonowym: zgodnie z Tab. 2-3 uszkodzenie to powinno mieć kod WB, podczas gdy karty uszkodzeń (lewa strona Rys. 2-7) nakazują jego opis w formacie B-WR.

Tab. 2-3 Katalog uszkodzeń wg Załącznika 2 [95]

Rodzaj uszkodzenia		**Materiał**								
		Drewno	Cegła	Kamień	Beton	Stal			Grunt	Tworzywo sztuczne
						Konstrukcyjna	Zbrojeniowa	Sprężająca		
		D	**C**	**K**	**B**	**S**	**Z**	**SP**	**G**	**TS**
Zanieczyszczenia	**N**	ND	NC	NK	NB	NS	NZ	NSP	NG	NTS
Wegetacja roślin	**W**	WD	WC	WK	WB	WS	-	-	WG	WTS
Przecieki	**C**	-	CC	CK	CB	CS	-	CSP	CG	CTS
Osady i wykwity	**O**	OD	OC	OK	OB	OS	OZ	OSP	OG	OTS
Zniszczenie zabezpieczeń antykorozyjnych	**A**	-	-	-	AB	AS	-	-	-	-
Korozja	**K**	KD	KC	KK	KB	KS	KZ	KSP	-	KTS
Zniszczenie struktury materiału	**Z**	ZD	ZC	ZK	ZB	ZS	ZZ	ZSP	-	ZTS
Zarysowania i pęknięcia	**R**	RD	RC	RK	RB	RS	RZ	RSP	-	RTS
Uszkodzenia łączników	**Ł**	ŁD	-	-	-	ŁS	-	-	-	ŁTS
Deformacje	**D**	DD	-	-	DB	DS	DZ	DSP	-	DTS
Przemieszczenia i osiadania	**P**	PD	PC	PK	PB	PS	PZ	PSP	PG	PTS
Ograniczenie ruchu	**B**	-	-	-	BB	BS	-	-	-	BTS
Ubytki, braki materiału	**U**	UD	UC	UK	UB	US	UZ	USP	UG	UTS
Starzenie	**S**	SD	-	-	-	-	-	-	-	STS



Rys. 2-7 Przykładowe karty uszkodzeń wg Załącznika 5 instrukcji [95]

W rezultacie, zamiast jednego, zunifikowanego standardu, inspektor otrzymuje dwa różne, wzajemnie wykluczające się sposoby opisu tego samego zjawiska. Brak jednoznacznej semantyki opisu i chaos w ramach kluczowego dokumentu regulacyjnego nie tylko utrudnia pracę, ale uniemożliwia stworzenie spójnej, cyfrowej bazy danych o stanie obiektów.

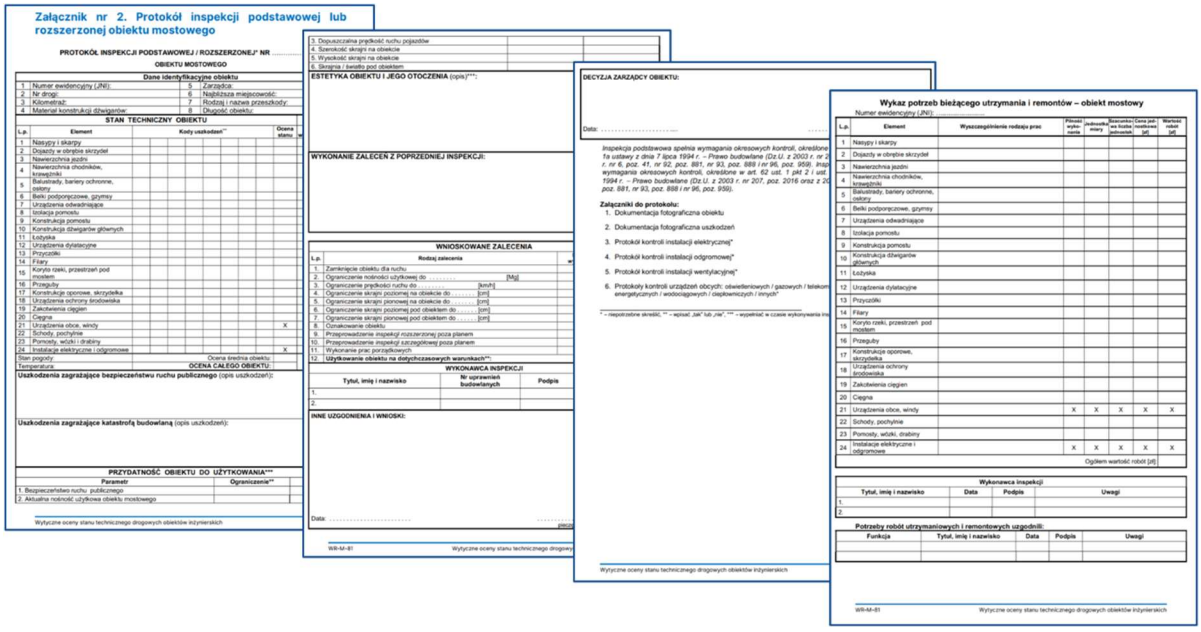
2.1.3.2 Obiekty drogowe

System dokumentowania wyników okresowych kontroli drogowych obiektów inżynierskich został określony w wytycznych WR-M-81 [260], które bazują w dużej mierze na wytycznych GDDKiA [271]. Zgodnie z zapisami WR-M-81 [260], wyniki inspekcji powinny być dokumentowane z użyciem załączonych wzorów, rzekomo zgodnych z tymi wymaganymi przez GDDKiA [271]. Twierdzenie to nie jest jednak w pełni zgodne z prawdą, gdyż we wzorach z [260] brakuje pewnych informacji wymaganych przez [271] m.in. metod i środków użytkowania elementów obiektu narażonych na szkodliwe działanie wpływów atmosferycznych, których określenie jest obligatoryjne w świetle Prawa budowlanego [243]. Wytyczne [260] dopuszczają również dokumentowanie wyników na innych formularzach, o ile zawierają one ten sam zakres informacji i zostały ustalone przez zarządcę obiektu.

Szczegółowe wzory protokołów dla inspekcji podstawowej i rozszerzonej zawarto w Załącznikach 2-5 [260], a sposób umieszczania dokumentacji fotograficznej w Załączniku 6 [260]. Co istotne, oba dokumenty [260, 271] formalnie wymagają dokumentacji fotograficznej jedynie przy inspekcjach rozszerzonych. W praktyce jednak większość zarządców wymaga ich również przy inspekcjach podstawowych, a wymogi takie umieszczane są w Opisach Przedmiotu Zamówienia (OPZ). W WR-M-81 [260] nie ma informacji odnośnie archiwizowania protokołów. Instrukcja GDDKiA [271] precyzuje, że protokoły z okresowych kontroli powinien przechowywać terenowy inspektor mostowy w rejonie dróg

GDDKiA przez cały okres eksploatacji obiektu. Przykładowy wzór protokołu z inspekcji wg [260] przedstawiono na Rys. 2-8. Zakres informacji zawartych w protokołach wg [260] obejmuje m.in.:

- numer protokołu,
- dane kontrolującego,
- dane identyfikacyjne obiektu,
- ocenę stanu technicznego poszczególnych elementów obiektu wraz z informacją o ewentualnej konieczności wykonania ekspertyzy,
- ocenę całego obiektu,
- opis uszkodzeń zagrażającym bezpieczeństwu ruchu publicznego oraz katastrofą budowlaną,
- kontrolę wykonania zaleceń z poprzedniej inspekcji,
- wnioskowane zalecenia oraz wykaz potrzeb bieżącego utrzymania i remontów z przedmiarami,
- dane kontrolującego i datę przeprowadzenia inspekcji,
- ocenę estetyki oraz przydatności do użytkowania, w przypadku inspekcji rozszerzonej,
- dokumentacją fotograficzną, w przypadku inspekcji rozszerzonej.



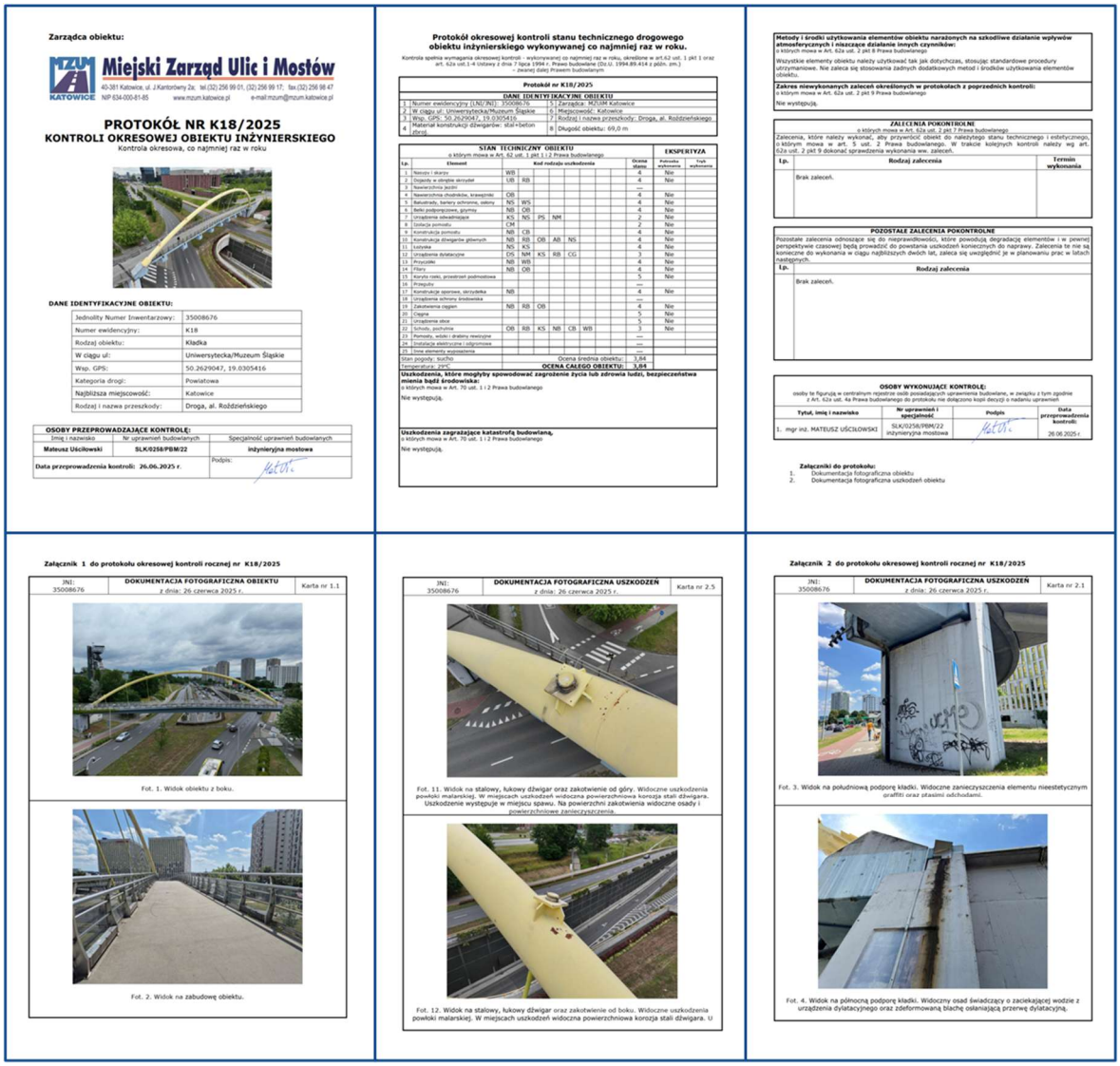
Rys. 2-8 Wzór protokołu z inspekcji wg [260]

Podobnie jak w przypadku obiektów kolejowych, pomimo istnienia wzorów, w praktyce inżynierskiej podlegają one częstym modyfikacjom. O ile zarządcy dróg krajowych, tacy jak GDDKiA czy Stalexport Autostrada Małopolska S.A., rygorystycznie przestrzegają stosowania dedykowanych wzorów, o tyle zarządcy dróg niższego szczebla (wojewódzcy, powiatowi, gminni) często dopuszczają lub wręcz wymagają stosowania własnych, zmodyfikowanych formularzy.

Wynika to z tego, że te przedstawione w [260, 271] nie spełniają w pełni wymagań wynikających z Prawa budowlanego [243] lub narzucają interpretacje, które w praktyce okazują się nieefektywne. Doskonałym tego przykładem jest kwestia zaleceń pokontrolnych, które powinny być wykonywane, aby przywrócić obiekt do należytego stanu technicznego i estetycznego. Zgodnie z wymogami Prawa budowlanego [243], ich wykonanie powinno być weryfikowane w kolejnych latach. Tymczasem

standardowe protokoły traktują wszystkie zalecenia jednakowo, od drobnych prac porządkowych, jak usunięcie roślinności, po kluczowe naprawy, np. znacznie uszkodzonego dźwigara. Takie ujęcie wymusza formalną weryfikację wszystkich, nawet najdrobniejszych zaleceń, co jest niepraktyczne, a zarazem problematyczne podczas kontroli prowadzonych przez organy nadzoru budowlanego (PINB, WINB, GINB), które drobiazgowo weryfikują ten aspekt. Zdaniem Autora, system byłby znacznie bardziej funkcjonalny, gdyby zalecenia podzielono na dwie kategorie: te krytyczne, wynikające wprost z wymogów Prawa budowlanego [243] oraz te związane z bieżącym utrzymaniem i dobrym gospodarowaniem obiektem.

W konsekwencji, analogicznie do systematyki kolejowej, stosowanie różnych, zmodyfikowanych wzorów protokołów prowadzi do braku jednolitego standardu dokumentacji. Jej forma i zakres stają się zależne od autora opracowania i wymagań lokalnego zarządcy, co uniemożliwia efektywne, zautomatyzowane zarządzanie danymi w szerszej skali. Rys. 2-9 przedstawia fragment rzeczywistego protokołu, stworzonego w ramach pracy zawodowej dla Miejskiego Zarządu Ulic i Mostów w Katowicach, lokalnego zarządcy o stosunkowo dużej bazie obiektów inżynierskich, który stosuje własny wzór dokumentacji.


Zarządca obiektu:

Miejski Zarząd Ulic i Mostów

PROTOKÓŁ NR K18/2025
KONTROLI OKRESOWEJ OBIEKTU INŻYNIERSKIEGO
Kontrola okresowa, co najmniej raz w roku

DANE IDENTYFIKACYJNE OBIEKTU:

Jednolity Numer Inwentarzowy:	35008676
Numer ewidencyjny:	K18
Rodzaj obiektu:	Kładka
W ciągu ul:	Uniwersytecka/Muzeum Śląskie
Wsp. GPS:	50.2629047, 19.0305416
Kategoria drogi:	Powiatowa
Najbliższa miejscowość:	Katowice
Rodzaj i nazwa przeszkody:	Droga, al. Roździeńskiego

OSOBY PRZEPROWADZAJĄCE KONTROLĘ:

Imię i nazwisko	Nr uprawnień budowlanych	Specjalność uprawnień budowlanych
Mateusz Uściłowski	SLK/0256/PBM/22	inżynieryjna mostowa

Data przeprowadzenia kontroli: 26.06.2025 r. Podpis:

Protokół okresowej kontroli stanu technicznego drogowego obiektu inżynierskiego wykonywanej co najmniej raz w roku.

Protokół nr K18/2025

DANE IDENTYFIKACYJNE OBIEKTU

1	Numer ewidencyjny (LNI/ZNI): 35008676	5	Zarządca: MZUiM Katowice
2	W ciągu ul.: Uniwersytecka/Muzeum Śląskie	6	Miejscowość: Katowice
3	Wsp. GPS: 50.2629047, 19.0305416	7	Rodzaj i nazwa przeszkody: Droga, al. Roździeńskiego
4	Materiał konstrukcji dźwigarów: stal+beton zbroj.	8	Długość obiektu: 69,0 m

STAN TECHNICZNY OBIEKTU — EKSPERTYZA

l.p.	Element	Kod rodzaju uszkodzenia							Ocena dośw.	Potrzeba wykonania	Tryb wykonania
1	Nurcący i dolny	WB							—	Nie	
2	Dojazdy w obrębie skrzydeł	UB	RB						4	Nie	
3	Nawierzchnia jezdni								—		
4	Nawierzchnia chodników, krawężniki	OB							4	Nie	
5	Balustrady, bariery ochronne, osłony	NS	WS						4	Nie	
6	Belki podporzyszowe, gzymsy	NB	OB						4	Nie	
7	Urządzenia odwadniające	KS	NS	PS	NM				2	Nie	
8	Izolacja pomostu	CM							2	Nie	
9	Konstrukcja pomostu	NB	CB						4	Nie	
10	Konstrukcja dźwigarów głównych	NB	RB	OB	AB	NS			4	Nie	
11	Łożyska	NS	KS						4	Nie	
12	Urządzenia dylatacyjne	OS	NM	KS	RB	CG			3	Nie	
13	Przyczółki	NB	WB						4	Nie	
14	Filary	NB	OB						4	Nie	
15	Korytka rzeki, przedmioty podmostowe								5	Nie	
16	Przęsła								—		
17	Konstrukcje oporowe, skrzydełka	NB							4	Nie	
18	Urządzenia ochrony środowiska								—		
19	Zakrzewienia cieków	NB	RB	OB					4	Nie	
20	Cieyna								5	Nie	
21	Urządzenia obce								5	Nie	
22	Schody, pochylnie	OB	RB	KS	NB	CB	WB		3	Nie	
23	Pomosty, wiśki i drabiny rewizyjne								—		
24	Instalacje elektryczne i sygnalizacja								—		
25	Inne elementy wyposażenia								—		

Stan pogody: bucho — Ocena średnia obiektu: 3,84
Temperatura: 29°C — OCENA CAŁEGO OBIEKTU: 3,84

Uszkodzenia, które mogłyby spowodować zagrożenie życia lub zdrowia ludzi, bezpieczeństwa mienia bądź środowiska:
o których mowa w Art. 70 ust. 1 i 2 Prawa budowlanego
Nie występują.

Uszkodzenia zagrażające katastrofą budowlaną,
o których mowa w Art. 70 ust. 1 i 2 Prawa budowlanego
Nie występują.

Metody i środki użytkowania elementów obiektu narażonych na szkodliwe działanie wpływów atmosferycznych i niszczące działanie innych czynników:
o których mowa w Art. 62a ust. 2 pkt 8 Prawa budowlanego
Wszystkie elementy obiektu należy użytkować tak jak dotychczas, stosując standardowe procedury utrzymaniowe. Nie zaleca się stosowania żadnych dodatkowych metod i środków użytkowania elementów obiektu.

Zakres niewykonanych zaleceń określonych w protokołach z poprzednich kontroli:
o których mowa w Art. 62a ust. 3 pkt 9 Prawa budowlanego
Nie występują.

ZALECENIA POKONTROLNE
o których mowa w Art. 62a ust. 2 pkt 7 Prawa budowlanego
Zalecenia, które należy wykonać, aby przywrócić obiekt do należytego stanu technicznego i estetycznego, o którym mowa w art. 5 ust. 2 Prawa budowlanego. W trakcie kolejnych kontroli należy wg art. 62a ust. 2 pkt 9 dokonać sprawdzenia wykonania ww. zaleceń.

l.p.	Rodzaj zalecenia	Termin wykonania
	Brak zaleceń.	

POZOSTAŁE ZALECENIA POKONTROLNE
Pozostałe zalecenia odnoszące się do nieprawidłowości, które powodują degradację elementów i w pewnej perspektywie czasowej będą prowadzić do powstania uszkodzeń koniecznych do naprawy. Zalecenia te nie są konieczne do wykonania w ciągu najbliższych dwóch lat, zaleca się uwzględnić je w planowaniu prac w latach następnych.

l.p.	Rodzaj zalecenia
	Brak zaleceń.

OSOBY WYKONUJĄCE KONTROLĘ:
osoby te figurują w centralnym rejestrze osób posiadających uprawnienia budowlane, w związku z tym zgodnie z Art. 62a ust. 4a Prawa budowlanego do protokołu nie dołączono kopii decyzji o nadaniu uprawnień

Tytuł, imię i nazwisko	Nr uprawnień i specjalność	Podpis	Data przeprowadzenia kontroli
1. mgr inż. MATEUSZ UŚCIŁOWSKI	SLK/0256/PBM/22 inżynieryjna mostowa		26.06.2025 r.

Załączniki do protokołu:
1. Dokumentacja fotograficzna obiektu
2. Dokumentacja fotograficzna uszkodzeń obiektu

Załącznik 1 do protokołu okresowej kontroli rocznej nr K18/2025

JNI: 35008676 — DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA OBIEKTU z dnia: 26 czerwca 2025 r. — Karta nr 1.1

Fot. 1. Widok obiektu z boku.

Fot. 2. Widok na zabudowę obiektu.

JNI: 35008676 — DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA USZKODZEŃ z dnia: 26 czerwca 2025 r. — Karta nr 2.5

Fot. 11. Widok na stalowy, łukowy dźwigar oraz zakotwienie od góry. Widoczne uszkodzenia powłoki malarskiej. W miejscach uszkodzeń widoczna powierzchniowa korozja stali dźwigara. Uszkodzenie występuje w miejscu spawu. Na powierzchni zakotwienia widoczne osady i powierzchniowe zanieczyszczenia.

Fot. 12. Widok na stalowy, łukowy dźwigar oraz zakotwienie od boku. Widoczne uszkodzenia powłoki malarskiej. W miejscach uszkodzeń widoczna powierzchniowa korozja stali dźwigara. U

Załącznik 2 do protokołu okresowej kontroli rocznej nr K18/2025

JNI: 35008676 — DOKUMENTACJA FOTOGRAFICZNA USZKODZEŃ z dnia: 26 czerwca 2025 r. — Karta nr 2.1

Fot. 3. Widok na południową podporę kładki. Widoczne zanieczyszczenia elementu nieestetycznym graffiti oraz zbasmi odchodami.

Fot. 4. Widok na północną podporę kładki. Widoczny osad świadczący o zaciekającej wodzie z urządzenia dylatacyjnego oraz zdeformowaną blachę odaniającą przerwę dylatacyjną.

Rys. 2-9 Fragment wypełnionego protokołu z inspekcji drogowego obiektu mostowego

Zasady klasyfikacji uszkodzeń oraz kryteria oceny stanu technicznego elementów obiektów inżynierskich przedstawione są w sposób ogólny w wytycznych WR-M-81 [260] oraz bardziej szczegółowo w wymaganiach GDDKiA [271–273]. Podobnie jak w systemie kolejowym, wyszczególniono kluczowe elementy podlegające ocenie m.in. konstrukcja pomostu, dźwigarów głównych, przyczółki, filary czy łożyska. Określono również sześciostopniową skalę ocen stanu technicznego (Tab. 2-4), która podobnie jak w przypadku obiektów kolejowych oparta została na rozporządzeniu dotyczącym ewidencji dróg publicznych [209] (Tab. 2-1). Skala zawarta w [209] została zaadaptowana w wytycznych GDDKiA [271] literalnie, natomiast w wytycznych WR-M-81 [260] uległa ona drobnym modyfikacjom. Zmieniono nazewnictwo oceny 3 jako „dostateczną", a nie „niepokojącą" oraz subtelnie skorygowano opisy kryteriów. Dodatkowo, w obu dokumentach [260, 271] wprowadzono uproszczoną, trzystopniową skalę ocen (0, 2 i 5) dedykowaną izolacjom przeciwwilgociowym (Tab. 2-5).

Tab. 2-4 Skala ocen drogowych obiektów inżynierskich wg [260]

Stopień	Ocena	Kryteria oceny stanu elementu
5	odpowiedni	Nie stwierdzono uszkodzeń i zanieczyszczeń elementu, możliwych do zaobserwowania podczas inspekcji.
4	zadowalający	Stwierdzono uszkodzenia lub zanieczyszczenia obniżające wyłącznie estetykę elementu.
3	dostateczny	Stwierdzono uszkodzenia, których nienaprawienie spowoduje skrócenie okresu użytkowania elementu.
2	niedostateczny	Stwierdzono uszkodzenia, których nienaprawienie spowoduje skrócenie okresu użytkowania i zagrozi bezpieczeństwu elementu.
1	przedawaryjny	Stwierdzono uszkodzenia, które w sposób nieodwracalny obniżyły przydatność użytkową i bezpieczeństwo elementu.
0	awaryjny	Element uległ zniszczeniu lub przestał istnieć.

Tab. 2-5 Skala ocen izolacji przeciwwilgociowej wg [260]

Stopień	Ocena	Kryteria oceny stanu izolacji przeciwwilgociowej
5	odpowiedni	Nie stwierdzono objawów nieszczelności izolacji.
2	niedostateczny	Stwierdzono lokalne przecieki, możliwe do miejscowej naprawy.
0	awaryjny	Stwierdzono rozległe przecieki skutkujące obniżeniem trwałości izolowanego elementu.

Kluczową różnicą w stosunku do systemu kolejowego jest podejście do obiektywizacji ocen. O ile same wytyczne WR-M-81 [260] nie zawierają wymiernych kryteriów, o tyle wprost odsyłają w tej kwestii do szczegółowych „Zasad stosowania skali ocen punktowych…" opracowanych w 2018 r. przez GDDKiA [272, 273]. Dokument ten stanowi próbę ograniczenia subiektywizmu inspektora, podając

wskazówki dotyczące przypisywania ocen w zależności od rodzaju i procentowego zakresu uszkodzeń. Zasady te wzbogacono licznymi przykładami fotograficznymi, mającymi ułatwić identyfikację i klasyfikację wad. Wybraną tabelę z zasadami oraz wytypowane przykłady uszkodzeń przedstawiono na Rys. 2-10. Zdaniem Autora, jest to krok we właściwym kierunku, jednak jego wartość obniża fakt, że dokument ten, choć powstał w 2018 roku, nie był od tamtej pory aktualizowany. Tego typu wytyczne powinny podlegać cyklicznej weryfikacji, uwzględniającej chociażby informacje zwrotne od inspektorów regularnie z nich korzystających.

Lp.	Rodzaj uszkodzeń			Zakres uszkodzeń [%]					Przykładowe kody uszkodzeń
				0	≤ 5	10	20	≥ 30	
1	Zanieczyszczenia mające wpływ na:	a	estetykę	5		4			NB, NS, NM
		b	trwałość	5	4	3			
2	Wegetacja roślin			5	4	3			WB, WS, WM
3	Uszkodzenie zabezpieczeń antykorozyjnych			5	4	3			AB, AS, AM
4	Przecieki, zacieki			5	4		3		CB, CS, CM, OB, OS, OM
5	Korozja materiału:	a	osady, wykwity	5	4	3		2	KB, OB, UB, ZB, KS, OS, OM
		b	łuszczenie, miejscowe zniszczenie struktury materiału	5	4	3	2		
6	Korozja zbrojenia:	a	strzemion	5	4	3	2		KZ
		b	prętów głównych	5	3	2		1	
7	Rysy, pęknięcia:	a	skurczowe, siatka spękań	5	4		3		RB, RM
		b	wzdłuż korodującego zbrojenia	5	3		2		
		c	naprężeniowe w elementach monolitycznych	5	4	3			RB, RM, RS
		d	naprężeniowe w elementach prefabrykowanych	5	4			3	
8	Ubytki, odpadanie fragmentów materiału			5	4	3	2	1	UB, US, UM
9	Uszkodzenie elementów mocujących deski gzymsowe			5	3	2		1	LS, KS, US



Rys. 3.175. Ubytki betonu, korozja prętów zbrojeniowych powodująca zmniejszenie ich przekroju o ok. 20%

Kod uszkodzenia: UB, KZ

Ocena: 1



Rys. 3.212. Łożysko stalowe wałkowe skorodowane i zanieczyszczone, położenie wałka nieadekwatne do temperatury otoczenia, wskazujące na wyczerpanie możliwości przemieszczeń w sytuacji wzrostu temperatury (ocena dokonana w temperaturze +15°C)

Kod uszkodzenia: KS, NS, AS, BS

Ocena: 2

Rys. 2-10 Zasady oceny stanu technicznego elementów wraz z przykładowymi uszkodzeniami wg [272, 273]

Kryteria oceny całego obiektu w [260] oparto bezpośrednio na zapisach rozporządzenia [209]. Zasady te zaadaptowano niemal dosłownie, dodatkowo je rozbudowując o szczegółowe wytyczne dla tuneli, przepustów i konstrukcji oporowych. Zgodnie z tą metodyką, za ostateczną ocenę obiektu należy przyjąć najniższą z niżej wymienionych wartości:

- średnia arytmetyczna z ocen wszystkich elementów,
- ocena pomostu obiektu mostowego,
- ocena dźwigarów głównych obiektu mostowego,
- średnia arytmetyczna z ocen przyczółków i filarów obiektu mostowego,
- średnia arytmetyczna z ocen ścian tunelu albo ocena ścian przepustu,
- ocena stanu stropu lub sklepienia tunelu albo przepustu,
- ocena płyty dennej tunelu albo przepustu,
- średnia arytmetyczna z ocen urządzeń zabezpieczających tunel,
- ocena elementów rurowych lub ramowych przepustu,
- ocena głowic przepustu,
- ocena korpusu konstrukcji oporowej,
- ocena urządzeń odwadniających konstrukcję oporową.

W przeciwieństwie do chaotycznego systemu kolejowego, drogowy katalog uszkodzeń wraz z systemem ich kodowania (Tab. 2-6) jest jednolity i spójny we wszystkich przywołanych instrukcjach [260, 271–273].

Tab. 2-6 Katalog uszkodzeń elementów obiektów inżynierskich wg [260]

Oznaczenie i rodzaj uszkodzenia		Uszkodzony materiał										
		Beton	Drewno	Cegła	Kamień	Stal			Guma	Asfalt	Grunt	Inny materiał
						Konstrukcyjna	Sprężająca	Zbrojeniowa				
		B	**D**	**C**	**K**	**S**	**P**	**Z**	**G**	**A**	**T**	**M**
N	Zanieczyszczenia	NB	ND	NC	NK	NS	NP	-	NG	NA	NT	NM
W	Wegetacja roślin	WB	WD	WC	WK	WS	-	-	WG	WA	WT	WM
C	Przecieki wody	CB	CD	CC	CK	CS	CP	-	CG	CA	CT	CM
O	Osady lub wykwity	OB	OD	OC	OK	OS	OP	-	OG	-	-	OM
A	Zniszczenie zabezpieczeń antykorozyjnych	AB	AD	AC	AK	AS	AP	AZ	-	-	-	AM
K	Korozja, gnicie, starzenie	KB	KD	KC	KK	KS	KP	KZ	KG	KA	-	KM
R	Zarysowania i pęknięcia	RB	RD	RC	RK	RS	RP	RZ	RG	RA	-	RM
L	Uszkodzenia spojeń lub łączników	LB	LD	LC	LK	LS	LP	LZ	LG	-	-	LM
D	Deformacje	DB	DD	-	-	DS	DP	DZ	DG	DA	-	DM
P	Przemieszczenia, osiadanie	PB	PD	PC	PK	PS	PP	PZ	PG	PA	PT	PM
B	Zablokowanie lub ograniczenie ruchu	BB	BD	-	-	BS	BP	-	BG	BA	BT	BM
U	Ubytki, braki lub erozja materiału	UB	UD	UC	UK	US	UP	UZ	UG	UA	UT	UM
Z	Zniszczenie struktury materiału	ZB	ZD	ZC	ZK	ZS	ZP	ZZ	ZG	ZA	-	ZM

System dokumentowania inspekcji drogowych obiektów inżynierskich, mimo iż również nie jest wolny od wad, takich jak niespójności między regulacjami czy brak standaryzacji protokołów na niższych szczeblach zarządców, jawi się jako system znacznie dojrzalszy i bardziej ustrukturyzowany niż jego kolejowy odpowiednik. Świadczą o tym przede wszystkim dwa kluczowe elementy: istnienie ilościowych kryteriów oceny opartych na procentowym zakresie uszkodzeń oraz jednolity, spójny system kodowania wad. Szkoda tylko, że kryteria opisane zostały w formie osobnego i nieaktualizowanego tradycyjnego dokumentu, a nie elektronicznej i multimedialnej bazy wiedzy.

2.2 Regulacje i praktyki zagraniczne

2.2.1 Wprowadzenie

W celu uzyskania szerszego kontekstu dla problemów i wyzwań zidentyfikowanych w polskim systemie inspekcji, w niniejszym rozdziale dokonano przeglądu regulacji i praktyk stosowanych w wybranych krajach. Analiza ta ma na celu nie tylko przedstawienie odmiennych podejść, ale przede wszystkim identyfikację dobrych praktyk oraz rozwiązań, które mogłyby zostać zaadaptowane na gruncie krajowym.

Przyjęty zestaw państw europejskich o zbliżonej charakterystyce infrastrukturalnej został dobrany w taki sposób, aby odzwierciedlał zróżnicowany, lecz ewolucyjny rozwój systemów zarządzania mostami. Od podejścia do inspekcji bliskiego polskim realiom, po bardziej zaawansowane rozwiązania europejskie, które uwzględniają również procesy cyfryzacji. Dla zapewnienia większej wiarygodności w porównywaniu danych źródłowych, analiza pozyskanych informacji z każdego kraju została ustandaryzowana i przeprowadzona w oparciu o pięć kluczowych kryteriów:

1) **Ramy organizacyjno-prawne.** Identyfikacja głównych instytucji publicznych i zarządców odpowiedzialnych za infrastrukturę mostową oraz wskazanie fundamentalnych aktów prawnych i norm technicznych regulujących proces inspekcji.
2) **Metodyka inspekcji i oceny stanu technicznego.** Porównanie typów i częstotliwości przeprowadzanych inspekcji (np. bieżące, podstawowe, szczegółowe) oraz analiza stosowanych systemów klasyfikacji uszkodzeń i oceny stanu technicznego (np. skale ocen, wskaźniki, kody uszkodzeń).
3) **Poziom cyfryzacji danych ewidencyjnych i diagnostycznych.** Ocena stopnia, w jakim dokumentacja inspekcyjna jest tworzona i archiwizowana w formie cyfrowej. Analiza istnienia i funkcjonowania centralnych baz danych oraz zintegrowanych systemów do zarządzania informacją o obiektach.
4) **Obecność elementów wirtualizacji w praktyce inspekcyjnej.** Weryfikacja, czy i w jakim zakresie w praktyce inspekcyjnej wykorzystywane są nowoczesne techniki przechwytywania rzeczywistości (fotogrametria, skanowanie laserowe, drony) oraz technologie interakcji z modelem cyfrowym (BIM, VR, AR, cyfrowe bliźniaki).
5) **Analiza porównawcza i wnioski dla krajowych administracji.** Podsumowanie wskazujące na kluczowe podobieństwa i różnice w stosunku do praktyk krajowych, identyfikujące najbardziej wartościowe rozwiązania i strategie możliwe do adaptacji w polskich warunkach.

2.2.2 Słowacja

Analiza słowackiego systemu inspekcji obiektów mostowych stanowi wartościowy punkt odniesienia ze względu na bliskość geograficzną oraz podobieństwa w historii rozwoju infrastruktury. Mimo że system ten w dużej mierze bazuje na tradycyjnych metodach, wprowadza pewne rozwiązania, zwłaszcza w zakresie klasyfikacji stanu technicznego i centralizacji danych, które mogą stanowić inspirację dla Polski. Szczegółowe omówienie praktyk stosowanych w tym kraju, wynika z osobistych doświadczeń autora, zdobytych podczas realizacji inspekcji obiektów mostowych w okolicach Bratysławy w ramach działalności zawodowej.

Ramy organizacyjno-prawne

Za zarządzanie i inspekcje obiektów mostowych na Słowacji odpowiadają trzy główne, wyspecjalizowane instytucje publiczne, co stanowi strukturę analogiczną do polskiej:

- Národná diaľničná spoločnosť (NDS) – zarządza siecią autostrad i dróg ekspresowych.
- Slovenská správa ciest (SSC) – administruje drogami I, II i III klasy.
- Železnice Slovenskej republiky (ŽSR) – jest zarządcą państwowej infrastruktury kolejowej, w tym obiektów kolejowych.

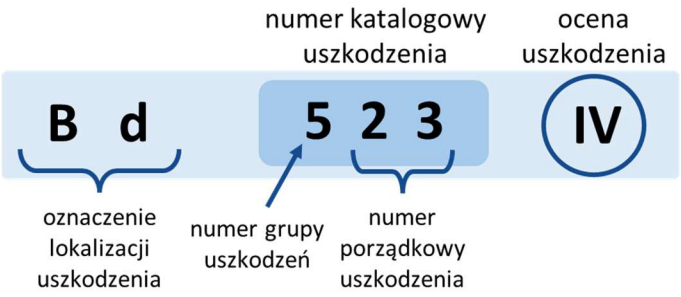
Podstawowym aktem prawnym jest Ustawa o drogach (Zákon č. 135/1961 Zb. [270]). Jednak przepisy techniczne (Technické Podmienky) definiują szczegółowe ramy dla praktyki inżynierskiej. Kluczowe znaczenie dla inspekcji mostów mają przepisy TP 059 [237] i TP 060 [238] dotyczące ogólnych wytycznych diagnostyki mostów oraz TP 061 [239] zawierający katalog uszkodzeń. Natomiast dla obiektów kolejowych kluczowe znaczenie mają wewnętrzne regulacje i przepisy zarządcy, czyli ŽSR.

Metodyka inspekcji i oceny stanu technicznego

Przepis TP 060 [238] wyróżnia cztery rodzaje przeglądów:

- Bežné prehliadky (przeglądy bieżące): Podstawowa kontrola wizualna, wykonywana co najmniej raz w roku.
- Hlavné prehliadky (przeglądy główne): Najwyższa forma regularnej, szczegółowej inspekcji, wykonywana cyklicznie, w częstotliwości od 2 do 4 lat w zależności od typu obiektu.
- Mimoriadne prehliadky (przeglądy nadzwyczajne): Realizowane doraźnie w sytuacjach awaryjnych lub po wystąpieniu zdarzeń losowych, które mogły wpłynąć na stan obiektu.
- Kontrolné prehliadky (przeglądy kontrolne): Służą weryfikacji wyników innych przeglądów lub kontroli jakości wykonanych prac utrzymaniowych i remontowych.

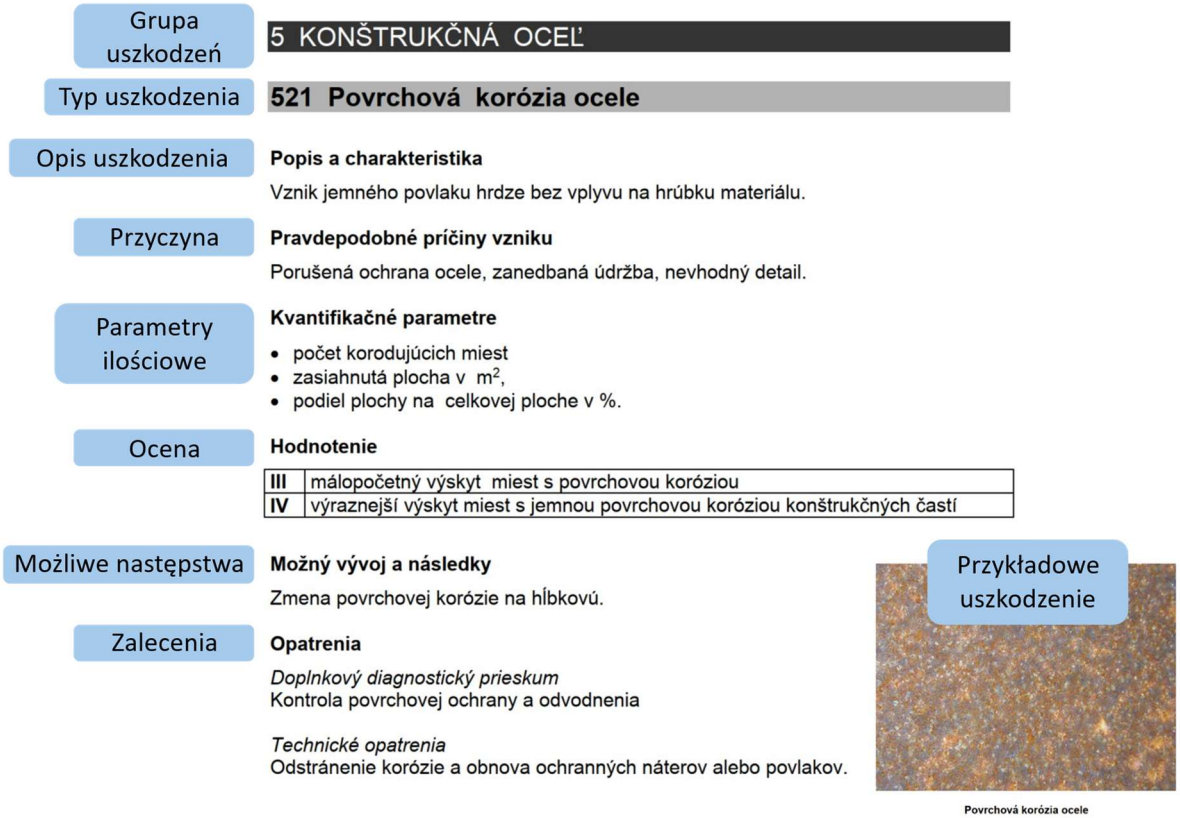
Najważniejszym elementem odróżniającym słowacki system od polskiego jest sposób oceny stanu technicznego. Stosowana jest 7-stopniowa skala ocen (I-VII), gdzie stopień I to „Bezchybný" (bezbłędny), a VII – „Havarijný" (awaryjny). Skala ta, opisana w TP 060 [238], jest bardziej szczegółowa od polskiej i pozwala na lepsze różnicowanie stanu obiektów. Co istotne, proces oceny jest ściśle powiązany z dedykowanym dokumentem TP 061 „Katalóg porúch mostných objektov…" [239]. Katalog ten zawiera ustandaryzowany system kodowania uszkodzeń, który składa się z oznaczenia lokalizacji, numeru katalogowego usterki oraz oceny w skali I-VII (Rys. 2-11). Taki zintegrowany system zapewnia wysoką powtarzalność i większą obiektywność ocen.



Rys. 2-11 Schemat systemu oznaczania uszkodzeń w słowackich przepisach technicznych [239]

System kodowania składa się z trzech głównych komponentów:

- Oznaczenie lokalizacji (np. B d): Dwuliterowy kod precyzyjnie określa miejsce wystąpienia uszkodzenia. Wielka litera oznacza główną część konstrukcyjną obiektu, np. B to spodná stavba (konstrukcja podpierająca). Mała litera wskazuje na konkretny element w obrębie tej części, np. d to podpery (podpory, filary). Pełna, hierarchiczna lista lokalizacji zawarta jest katalogu będącym załącznikiem do przepisów.
- Numer katalogowy uszkodzenia (np. 523): Trzy- lub czterocyfrowy kod identyfikuje konkretną usterkę. Pierwsza cyfra (lub dwie) oznacza jedną z 13 głównych grup uszkodzeń, które są pogrupowane głównie według materiału lub części obiektu. Dwie kolejne cyfry to numer porządkowy uszkodzenia w danej grupie.
- Ocena uszkodzenia (np. IV). Kryteria przypisania konkretnej oceny do poszczególnych usterek są szczegółowo opisane w indywidualnych kartach katalogowych dołączonych do przepisów (Rys. 2-12).



Rys. 2-12 Przykładowa karta uszkodzeń w słowackich przepisach technicznych [239]

Poziom cyfryzacji danych ewidencyjnych i diagnostycznych

Dokumentacja inspekcyjna na Słowacji jest częściowo cyfrowa i archiwizowana w centralnym systemie informatycznym IS MCS (Informačný systém modelu cestnej siete). Jest to krajowa baza danych, w której gromadzone są informacje ewidencyjne oraz wyniki przeglądów obiektów drogowych. Przepis TP 060 [238] wprost nakłada na zarządcę obowiązek niezwłocznego, elektronicznego wprowadzenia wyników przeglądu głównego do centralnej ewidencji. Mimo to, poziom zaawansowania systemu jest podstawowy. Służy on głównie jako cyfrowe archiwum i narzędzie ewidencyjne i nie oferuje jeszcze zaawansowanych funkcji analitycznych, integracji z modelami BIM czy wsparcia dla cyfrowego zarządzania cyklem życia obiektów. Jest jednak gotowy na dalszy proces rozwijania narzędzi cyfrowego przetwarzania gromadzonych danych.

Obecność elementów wirtualizacji w praktyce inspekcyjnej

Poziom wdrożenia nowoczesnych technologii w standardowej praktyce inspekcyjnej na Słowacji jest niski. Narzędzia takie jak drony, fotogrametria czy skanowanie laserowe nie są rutynowo wykorzystywane przez zarządców infrastruktury. Zastosowanie tych technologii ogranicza się głównie do działalności akademickiej i badawczej. Te prowadzone są przez uczelnie techniczne i firmy konsultingowe. Najczęściej w ramach specjalistycznych ekspertyz technicznych najbardziej złożonych i odpowiedzialnych obiektów.

Jednakże najnowszy przepis TP 059 [237], obowiązujący od 1 stycznia 2024 roku, dotyczący zaawansowanej diagnostyki, oficjalnie wprowadza nowoczesne techniki przechwytywania rzeczywistości. W punkcie opisującym metody geodezyjne do pomiaru deformacji wprost wymieniono „trojrozmerné (3D) skenovanie konštrukcie mosta" (trójwymiarowe (3D) skanowanie konstrukcji mostu), którego wynikiem jest chmura punktów.

Analiza porównawcza i wnioski dla krajowych administracji

Słowacki system, mimo wielu podobieństw do polskiego, wyróżnia się kilkoma kluczowymi elementami, które mogą stanowić wzorzec do adaptacji. Podobieństwa w strukturze organizacyjnej zarządców oraz w typologii przeglądów świadczą o wspólnych korzeniach inżynierskich. Jednak słowackie rozwiązania w zakresie standaryzacji i cyfryzacji są już bardziej zaawansowane.

Najważniejszą przewagą jest spójny i szczegółowy ekosystem diagnostyczny, oparty na trzech filarach. Po pierwsze, 7-stopniowa skala ocen (I-VII) jest bardziej precyzyjna niż polska skala 0-5, co pozwala na lepsze różnicowanie stanu technicznego i obiektywniejszą priorytetyzację działań utrzymaniowych. Po drugie, ocena ta jest nierozerwalnie związana z hierarchicznym systemem skatalogowanych uszkodzeń. Każda zidentyfikowana usterka otrzymuje unikalny, alfanumeryczny kod oparty na jasnych wytycznych. Trzecim, kluczowym elementem jest scentralizowany system ewidencyjny IS MCS. Wszystkie dane z przeglądów, sklasyfikowane według opisanej metodyki, są obowiązkowo wprowadzane w formie elektronicznej do jednej, ogólnokrajowej bazy danych.

2.2.3 Włochy

Analiza włoskiego systemu jest szczególnie istotna, ponieważ obrazuje, jak tragiczne wydarzenie, czyli katastrofa wiaduktu Morandiego w Genui w 2018 r. [214], stało się katalizatorem dla jednej z najgłębszych i najszybszych reform w zakresie zarządzania bezpieczeństwem mostów w Europie.

Wprowadzone rozwiązania systemowe, oparte na analizie ryzyka i centralizacji danych, stanowią obecnie jeden z najnowocześniejszych modeli na kontynencie.

Ramy organizacyjno-prawne

Za nadzór i tworzenie regulacji odpowiada Ministerstwo Infrastruktury i Transportu. Kluczowymi zarządcami infrastruktury są:

- ANAS S.p.A. (część grupy Ferrovie dello Stato Italiane) – zarządca głównej sieci dróg krajowych.
- Rete Ferroviaria Italiana (RFI) – zarządca państwowej infrastruktury kolejowej.

Fundamentalną zmianę w podejściu do inspekcji drogowych wprowadziły „Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio…" (Wytyczne dotyczące klasyfikacji i zarządzania ryzykiem…) [143], przyjęte Dekretem Ministerialnym nr 578 z 17 grudnia 2020 roku [58]. Aktem wykonawczym, który precyzuje i rozszerza obowiązki na wszystkich zarządców i ustanawia ramy dla cyfrowego raportowania, jest Dekret nr 204 z 1 lipca 2022 roku [57]. RFI posiada własny, niezwykle rozbudowany zestaw wewnętrznych przepisów, norm technicznych i instrukcji, które są traktowane jako wewnętrzne standardy firm i generalnie nie są publicznie dostępne.

Metodyka inspekcji i oceny stanu technicznego

Włoskie wytyczne [143, 144] redefiniują tradycyjny podział na przeglądy okresowe na rzecz wielopoziomowego procesu oceny bezpieczeństwa, który obejmuje:

- Poziom 0: Spis i podstawowa klasyfikacja wszystkich obiektów w sieci.
- Poziom 1: Inspekcje wizualne, podstawowe badania i zebranie podstawowych danych o każdym obiekcie.
- Poziom 2: Wstępna ocena ryzyka, której wynikiem jest przypisanie obiektu do jednej z Klas Uwagi (Classe di Attenzione – CdA). Na podstawie tej klasyfikacji, przechodzi się następnie do jednego z kolejnych poziomów.
- Poziom 3: Szczegółowa analiza oceniająca bezpieczeństwo obiektu. Obejmuje przeprowadzenie oceny mającej na celu określenie, wraz z analizą rodzaju i zakresu uszkodzeń wykrytych podczas inspekcji Poziomu 1, czy konieczne jest przejście do inspekcji Poziomu 4.
- Poziom 4: Zaawansowana, pogłębiona analiza, która obejmuje najwyższy poziom, wymagający zaawansowanych metod obliczeniowych (np. analizy nieliniowe, czasowe) w celu precyzyjnego określenia rezerw nośności i wdrożenia działań naprawczych.

Dla obiektów o kluczowym znaczeniu strategicznym przewidziano dodatkowo Poziom 5 obejmujący najbardziej pogłębione analizy. Nie jest już opisany szczegółowo w głównych wytycznych [143].

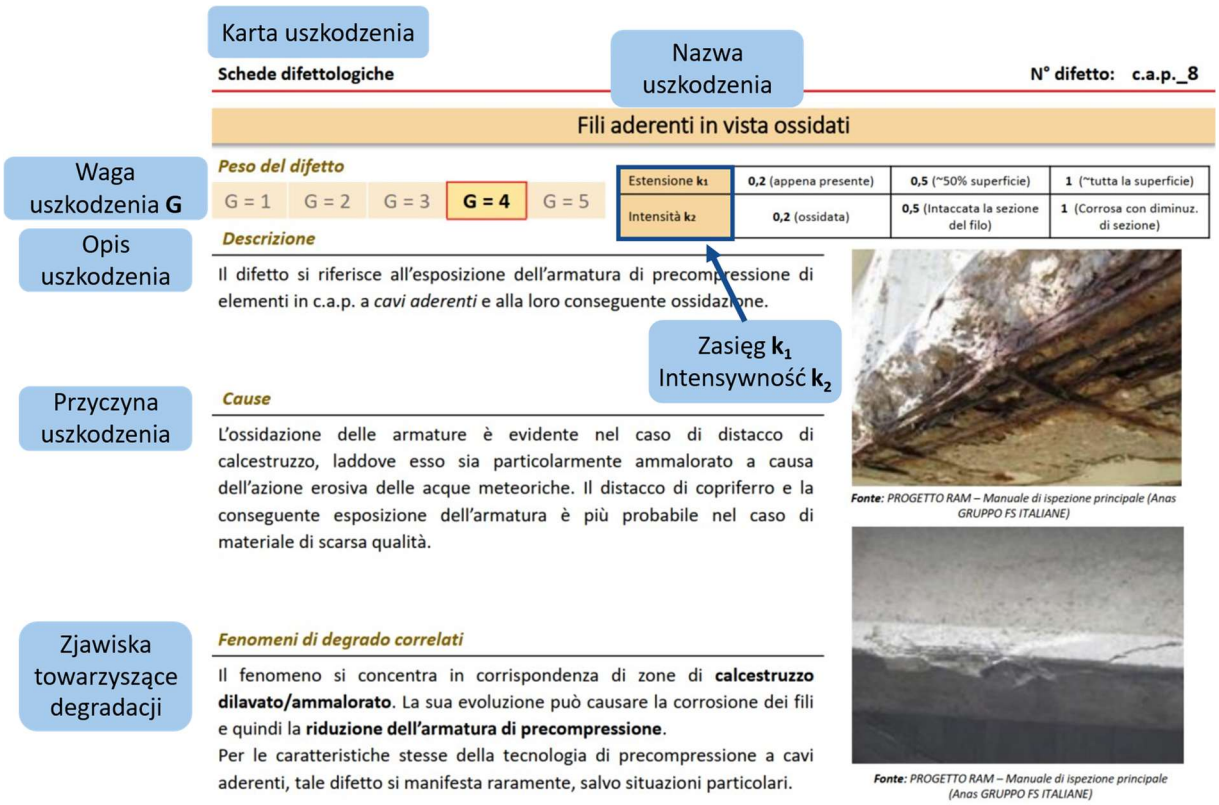
Formularze Inspekcji z Poziomu 1 (Allegato B wg [144]), to główne narzędzie pracy inspektora podczas inspekcji wizualnej w terenie. Składają się one z dwóch kluczowych części: formularza oceny ryzyka zewnętrznego (osuwiska i zagrożenia hydrologiczne) oraz szczegółowego formularza oceny uszkodzeń (scheda di valutazione dei difetti). Ten drugi, to ustandaryzowana lista kontrolna, podzielona

na elementy konstrukcyjne (np. podpory, łożyska, dźwigary) i materiały, na której inspektor zaznacza zaobserwowane usterki.

Najważniejszym elementem odróżniającym włoski system od polskiego jest metodyka oceny stanu technicznego. Zamiast subiektywnej oceny w skali punktowej, inspektor, korzystając z kart uszkodzeń (Allegato C wg [144]), przypisuje każdemu zidentyfikowanemu uszkodzeniu trzy parametry:

- **G** - Peso del difetto (waga uszkodzenia): Z góry zdefiniowana wartość (w skali 1-5), określająca wagę danego typu uszkodzenia dla bezpieczeństwa elementu.
- **k1** - Estensione (zasięg): Współczynnik określający rozległość uszkodzenia (np. 0.2 dla uszkodzenia ledwo obecnego, 1.0 dla uszkodzenia na całej powierzchni).
- **k2** - Intensità (intensywność): Współczynnik określający stopień zaawansowania uszkodzenia (np. 0.2 dla drobnych rys, 1.0 dla rys o rozwartości >2 mm).

Te trzy wartości (G, k1, k2), przypisane uszkodzeniom, stają się danymi wejściowymi dla algorytmu, który oblicza wskaźnik stanu technicznego. Podobny schemat opisu uszkodzeń, bazujący na ich rozległości i intensywności prezentował również w licznych pracach prof. Bień [21, 23, 24]. Przykładową kartę uszkodzeń pokazano na Rys. 2-13.



Rys. 2-13 Przykładowa karta uszkodzeń we włoskich przepisach technicznych [144]

Na Poziomie 2 przeprowadzana jest analiza ryzyka, której ostatecznym wynikiem jest przypisanie Klasy Uwagi (CdA), która określa pilność i priorytet interwencji. Istnieje pięć klas: Niska, Średnio-niska, Średnia, Średnio-wysoka i Wysoka. Przypisanie do danej klasy jest wynikiem analizy trzech składowych ryzyka, których definicja zmienia się w zależności od analizowanego parametru:

- Pericolosità (zagrożenie): Ocenia czynniki zewnętrzne, przy czym jego definicja jest inna dla każdego typu ryzyka. Dla ryzyka strukturalnego jest to intensywność i masa ruchu

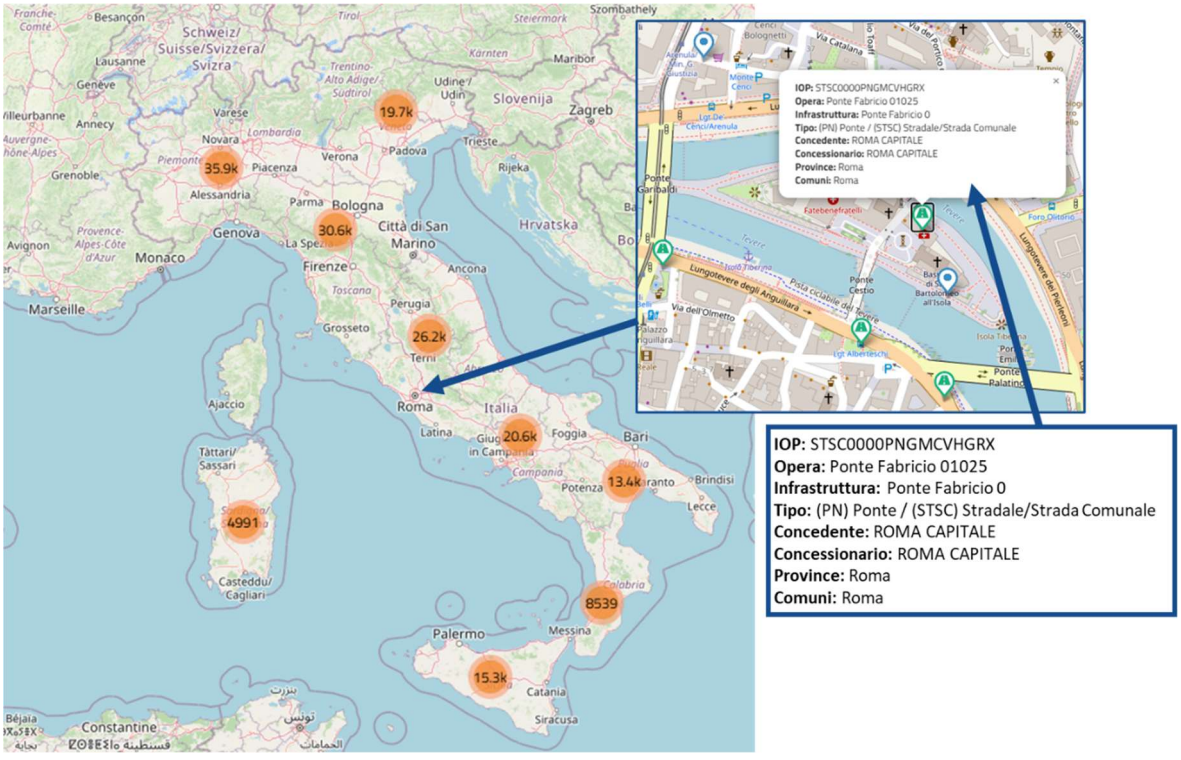
ciężarowego na moście. Natomiast dla ryzyk środowiskowych (sejsmicznego, osuwiskowego, hydraulicznego) parametr ten opisuje prawdopodobieństwo wystąpienia zjawisk naturalnych w danej lokalizacji, takich jak trzęsienie ziemi, niestabilność zbocza czy powódź.

- Vulnerabilità (podatność): Określa wewnętrzną skłonność konstrukcji do uszkodzeń. Zawsze jest oceniana na podstawie schematu statycznego, materiału i poziomu stwierdzonych uszkodzeń, ale z uwzględnieniem specyficznych czynników. Przykładowo, dla ryzyka sejsmicznego kluczowe jest to, czy most był projektowany według odpowiednich norm, a dla ryzyka hydraulicznego i osuwiskowego decydujący jest rodzaj i stan fundamentów.
- Esposizione (ekspozycja): Ocenia potencjalne konsekwencje awarii. Bazowym kryterium jest zawsze natężenie ruchu i znaczenie mostu w sieci dróg (np. istnienie objazdów). Jednak dla ryzyk środowiskowych ocenia się dodatkowo, czy most ma znaczenie strategiczne dla działań ratunkowych i obrony cywilnej w sytuacjach kryzysowych.

Poziom cyfryzacji danych ewidencyjnych i diagnostycznych

Poziom cyfryzacji we Włoszech jest bardzo wysoki i scentralizowany. Opiera się on na dwóch kluczowych, stworzonych w 2018 r. elementach: kodzie IOP (Codice Identificativo Opera Pubblica – Kod Identyfikacyjny Obiektu Publicznego) i archiwum AINOP (Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche - Narodowe Cyfrowe Archiwum Obiektów Publicznych).

- IOP to unikalny, nadawany dożywotnio numer identyfikacyjny dla każdej budowli publicznej we Włoszech (mostu, tunelu, drogi itp.).
- AINOP to centralna, cyfrowa baza danych, która gromadzi wszystkie informacje o tych obiektach, tworząc dla nich cyfrową kartotekę. W kartotece znajduje się cała historia obiektu, od danych technicznych i dokumentacji projektowej, przez wyniki inspekcji i monitoringu, aż po historię remontów.



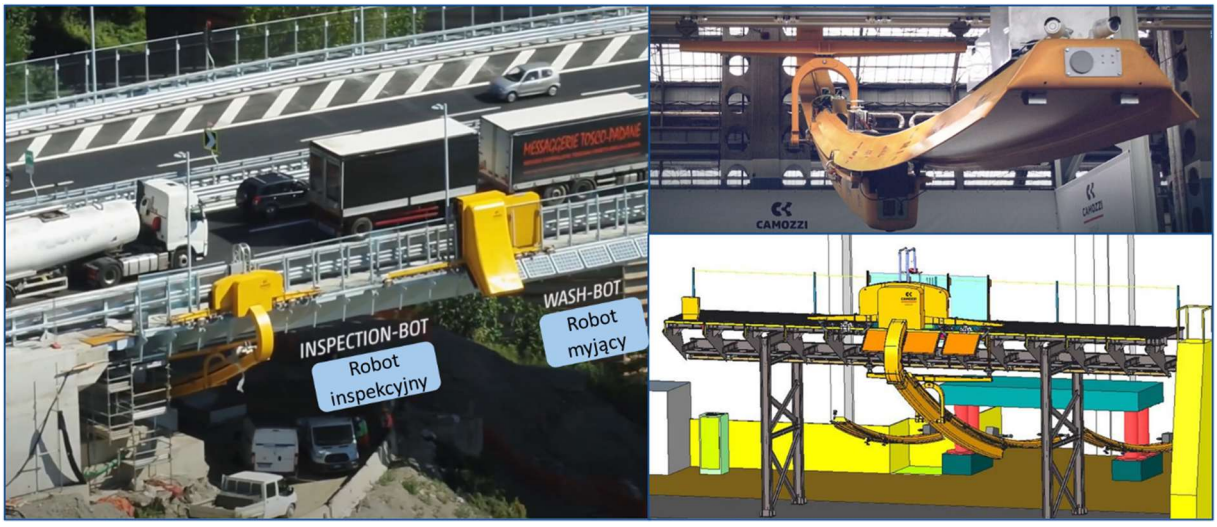
Rys. 2-14 Interaktywna mapa obiektów publicznych na terenie Włoch [5]

Głównym celem systemu jest stworzenie kompletnej ewidencji obiektów infrastrukturalnych w skali kraju, co umożliwia ich skuteczne monitorowanie, zapobieganie awariom oraz planowanie napraw w oparciu o rzeczywiste dane i jasno określone priorytety. Wybrane informacje, takie jak mapa obiektów wraz z kodami IOP (Rys. 2-14), są udostępniane publicznie w celu zwiększenia przejrzystości działań administracji.

Obecność elementów wirtualizacji w praktyce inspekcyjnej

Wirtualizacja jest integralną częścią nowego włoskiego systemu, zwłaszcza na wyższych poziomach analizy (3 i 4). Technologie takie jak skanowanie laserowe 3D, fotogrametria z użyciem dronów oraz monitoring sensoryczny (ang. Structural Health Monitoring, SHM) są używane jako narzędzia do precyzyjnej oceny geometrii, identyfikacji uszkodzeń i monitorowania zachowania konstrukcji. Dane z tych pomiarów zasilają AINOP i są wykorzystywane do tworzenia i kalibracji modeli BIM.

Flagowym przykładem zastosowania wirtualizacji na przestrzeni całego cyklu życia obiektu jest nowy wiadukt w Genui. W pierwszej, niezwykle przyspieszonej fazie projektowo-budowlanej, firma Italferr przy współpracy z Bentley Systems, wykorzystała zaawansowany model BIM i cyfrowego bliźniaka 4D [100]. Pozwoliło to na zautomatyzowanie procesów, lepsze wykrywanie kolizji i przede wszystkim na zarządzanie złożonym harmonogramem prac, by ukończyć projekt w zaledwie trzy miesiące. Jednak prawdziwa innowacja ujawnia się dopiero w fazie eksploatacyjnej. Most wyposażono w zaawansowany system monitoringu (SHM), a jego integralną częścią jest flota dwóch typów robotów, które autonomicznie poruszają się po konstrukcji. Powstały one w wyniku współpracy Grupy Camozzi i Włoskiego Instytutu Technologii (IIT) (Rys. 2-15). Pierwszy z nich, to robot inspekcyjny, który waży ponad 2200 kg i skanuje powierzchnię mostu w poszukiwaniu anomalii, wykonując tysiące zdjęć w wysokiej rozdzielczości. Drugi, to robot myjący. Waży ponad 2000 kg, a odpowiada za czyszczenie paneli fotowoltaicznych i barier. Wykorzystuje do tego celu wodę deszczową, zbieraną z infrastruktury mostu. Oba typy robotów, zbudowane z włókna węglowego przy użyciu technologii druku 3D, poruszają się autonomicznie po zewnętrznych szynach konstrukcji, są zasilane bateryjnie i ładują się w stacjach dokujących co 200 metrów. Cały system jest zdalnie sterowany z pokoju kontrolnego, a zebrane dane trafiają do cyfrowej bazy danych, gdzie wspierają procesy utrzymania predykcyjnego.



Rys. 2-15 Roboty inspekcyjny i myjący zamontowane na nowym wiadukcie w Genui [34, 75]

Analiza porównawcza i wnioski dla krajowych administracji

Zreformowany po katastrofie w Genui włoski system stanowi dla Polski wzorzec radykalnej, ale i spójnej transformacji. Choć oba systemy służą ocenie bezpieczeństwa, włoskie podejście jest fundamentalnie inne, opierając się na analizie ryzyka i centralizacji danych.

Najważniejszą różnicą i przewagą jest odejście od oceny stanu technicznego na rzecz kompleksowego systemu zarządzania ryzykiem, opartego na trzech filarach. Po pierwsze, ocena nie jest prostą notą, lecz wielowymiarową i ogólną Klasą Uwagi (CdA), będącą syntezą analiz ryzyka strukturalnego i środowiskowego. Każda z nich ocenia ryzyko, biorąc pod uwagę podatność konstrukcji, czynniki zewnętrzne oraz konsekwencje awarii.

Po drugie, system ten jest nierozerwalnie związany z obowiązkowym, scentralizowanym archiwum cyfrowym AINOP. Każdy obiekt otrzymuje unikalny kod IOP, co eliminuje problem rozproszenia i niekompatybilności danych, z którym zmaga się Polska.

Trzecim, kluczowym elementem są próby wdrożenia cyfryzacji wirtualizacji inspekcji w całym cyklu życia obiektu. Przykład mostu w Genui pokazuje, jak model BIM z fazy projektowej ewoluuje w operacyjnego cyfrowego bliźniaka, zasilanego na bieżąco danymi z monitoringu SHM i zautomatyzowanych inspekcji robotycznych, co w Polsce nie jest jeszcze rozwijane.

2.2.4 Norwegia

Analiza norweskiego systemu zarządzania mostami pozwala na zapoznanie się z jednym z najbardziej zaawansowanych systemów w Europie, który charakteryzuje się wysokim stopniem cyfryzacji. Jest to system Brutus. Podobny poziom zaawansowania technologicznego prezentują również Wielka Brytania i Holandia, jednak ich szczegółowe wytyczne operacyjne dotyczące inspekcji i cyfryzacji nie zawsze są w pełni dostępne publicznie, co utrudnia ich pełną analizę. Z tego względu zdecydowano się na szczegółowe opisanie systemu norweskiego, którego kluczowe standardy i podręczniki są jawne i ogólnodostępne. System ten został ukształtowany przez potrzebę zarządzania rozległą infrastrukturą w surowym klimacie. Oparty jest na głębokiej cyfryzacji, ustandaryzowanych procesach i silnym nacisku na zapewnienie trwałości przez cały cykl życia konstrukcji.

Ramy organizacyjno-prawne

Nadrzędnym organem państwowym, odpowiedzialnym za całą politykę transportową w Norwegii, jest Ministerstwo Transportu (Samferdselsdepartementet). Podlegają mu wyspecjalizowane agencje wykonawcze, odpowiedzialne za poszczególne gałęzie transportu. Kluczowymi instytucjami w zakresie infrastruktury lądowej są:

- Statens vegvesen (Norweski Zarząd Dróg Publicznych) – jest to główna agencja rządowa, która pełni podwójną rolę, jest zarówno zarządcą dróg krajowych i regionalnych, jak i organem tworzącym i egzekwującym standardy techniczne.
- Bane NOR – państwowa agencja odpowiedzialna za budowę, utrzymanie i zarządzanie krajową infrastrukturą kolejową.

Podobnie jak w innych krajach, zarządca infrastruktury kolejowej (Bane NOR) posiada własny, odrębny od drogowego, zestaw wewnętrznych regulacji i standardów technicznych, które na ogół nie są publicznie dostępne.

Podstawą prawno-techniczną dla drogownictwa są standardy wydawane przez Statens vegvesen w formie norm (z prefiksem N), wytycznych (R) oraz przewodników (V). Strategiczne ramy dla zarządzania mostami definiują dwa kluczowe dokumenty: wytyczna R411 Bruforvaltning riksveg [199] (Zarządzanie mostami na drogach krajowych) oraz norma N401 Bruforvaltning fylkesveg [169] (Zarządzanie mostami na drogach regionalnych).

Z kolei kluczowym dokumentem operacyjnym pod kątem diagnostyki mostów jest przewodnik N-V441 Bruinspeksjon [173] (Inspekcja mostów). W swojej najnowszej wersji z 2023 roku stanowi kompleksowe ujednolicenie. Zastąpił on i połączył w jeden dokument cztery wcześniej funkcjonujące pozycje: podręcznik Håndbok V441 z 2019 roku oraz jego trzy obszerne załączniki, czyli katalog uszkodzeń V1, metody pomiarowe V2 oraz wzór raportu V3, które obecnie stanowią odpowiednio Załączniki A, B i C do nowej instrukcji.

Metodyka inspekcji i oceny stanu technicznego

Przewodnik N-V441 [173] wyróżnia 4 rodzaje inspekcji

- Generell inspeksjon (inspekcja ogólna): rutynowa kontrola w ramach utrzymania dróg, wykonywana przez wykonawcę robót utrzymaniowych, mająca na celu monitorowanie funkcji sieci drogowej (nieopisana szczegółowo w [173]).
- Enkelinspeksjon (inspekcja uproszczona): uproszczona kontrola wizualna, bez specjalistycznego sprzętu, mająca na celu wykrycie widocznych uszkodzeń, które w krótkim terminie mogą wpłynąć na nośność, bezpieczeństwo ruchu lub środowisko. Jej głównym celem jest rejestracja wyłącznie tych usterek, które wymagają podjęcia działań naprawczych przed terminem następnej, bardziej szczegółowej inspekcji.
- Hovedinspeksjon (inspekcja główna): szczegółowa kontrola wizualna wszystkich elementów mostu z bliskiej odległości, która w razie potrzeby może być uzupełniona o dodatkowe pomiary i badania materiałowe. Jej celem jest kompleksowa rejestracja stanu technicznego obiektu oraz opisanie niezbędnych działań naprawczych wraz z szacunkiem kosztów, co stanowi podstawę do aktualizacji przyszłych planów inspekcyjnych i utrzymaniowych.
- Spesialinspeksjon (inspekcja specjalna): wykonywana po zdarzeniach nadzwyczajnych lub w celu dokładniejszego zbadania uszkodzeń, obejmuje szczegółową kontrolę (wizualną, pomiary, badania materiałowe) wybranych elementów lub całego mostu, aby ustalić typ, przyczynę i zakres uszkodzeń oraz przygotować rekomendacje działań.

Zgodnie z wytycznymi R411 [199] i N401 [169], częstotliwość inspekcji jest precyzyjnie zdefiniowana, ale jednocześnie elastyczna. Standardowo Enkelinspeksjon przeprowadzana jest co roku, natomiast Hovedinspeksjon co 5 lat dla większości obiektów lub co 3 lata dla konstrukcji specjalnych (np. nabrzeża promowe i mosty ruchome). Kluczowe znaczenie ma jednak wykonywana niezależnie analiza ryzyka i wrażliwości (ROS-analyse), która może modyfikować te interwały. Na jej podstawie częstotliwość Hovedinspeksjon może zostać zarówno skrócona, jak i wydłużona do maksymalnie 10 lat, a Enkelinspeksjon może zostać nawet całkowicie pominięta, jeśli analiza wykaże, że jest to w pełni uzasadnione.

System oceny uszkodzeń w N-V441 opiera się na dwóch głównych kryteriach: skadegrad (stopień uszkodzenia) i skadekonsekvens (konsekwencje uszkodzenia). W pierwszej kolejności przypisuje się uszkodzeniu stopień w 4-stopniowej skali:

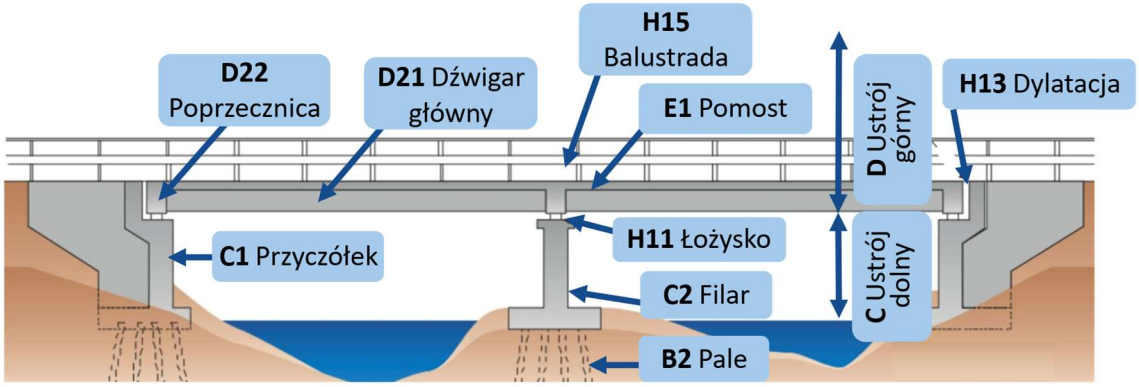
- Stopień 1: Liten skade (małe uszkodzenie)
- Stopień 2: Middels skade (średnie uszkodzenie)
- Stopień 3: Stor skade (duże uszkodzenie)
- Stopień 4: Svært stor skade (bardzo duże uszkodzenie)

Następnie określa się konsekwencję uszkodzenia jako kombinację typu i stopnia konsekwencji. Typy konsekwencji dotyczą B – nośności, T – bezpieczeństwa ruchu, V – kosztów utrzymania, M – środowiska/estetyki. Stopnie konsekwencji mają następującą skalę:

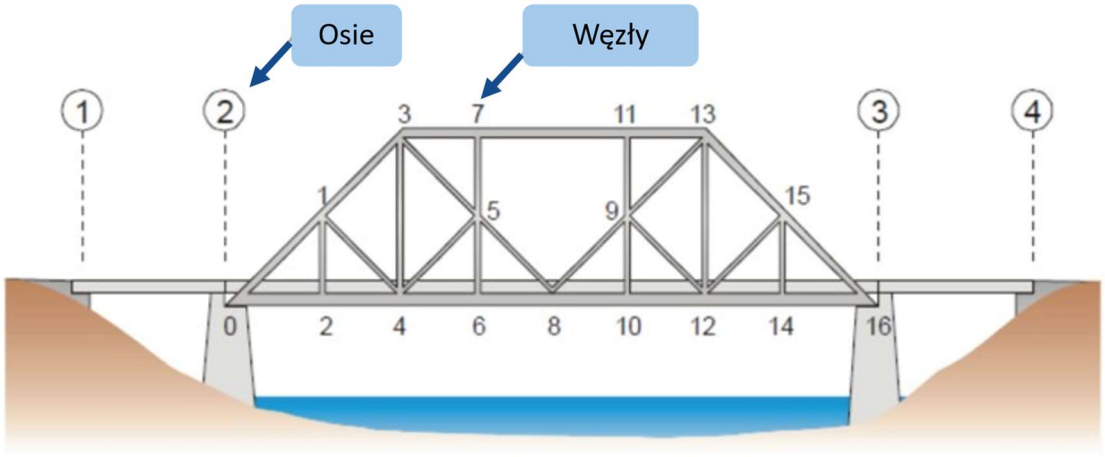
- Stopień 1: Liten konsekvens (niewielkie konsekwencje) – brak potrzeby podejmowania działań.
- Stopień 2: Middels konsekvens (średnie konsekwencje) – należy rozważyć, czy działanie powinno zostać zarejestrowane w systemie Brutus.
- Stopień 3: Vesentlige konsekvens (znaczne konsekwencje) – propozycja działania jest rejestrowana w systemie Brutus, należy ocenić interwał inspekcji.
- Stopień 4: Stor konsekvens (poważne konsekwencje) – należy natychmiast skontaktować się z zarządcą mostu/zleceniodawcą.

W efekcie powstaje zapis typu: Skadegrad 3, Skadekonsekvens 2B, 1T, 3V, co oznacza: uszkodzenie duże, z konsekwencjami średnimi dla nośności, małymi dla bezpieczeństwa ruchu i znacznymi dla kosztów utrzymania.

W celu ustandaryzowania sposobu opisu uszkodzeń wprowadzono ich zdefiniowane typy. Uszkodzenia reprezentowane są przez unikalne dwucyfrowe kody. Jeśli ten sam typ uszkodzenia występuje w wielu miejscach tego samego elementu, opisuje się wybrane o najwyższym stopniu degradacji. Dodatkowo, w celu ich lokalizacji, korzysta się z metody nazewnictwa i numeracji elementów wg przewodnika V440 [246], który każdemu elementowi przypisuje unikalny numeryczny lub alfanumeryczny kod, np. D21 to belka główna. Oznaczenia wybranych elementów z wytycznych [246] pokazano na (Rys. 2-16). Przewodnik N-V441 [173] dodatkowo standaryzuje sposób szczegółowej numeracji elementów, jak np. węzłów kratownicy czy belek w przekroju poprzecznym (Rys. 2-17).



Rys. 2-16 Oznaczenia wybranych elementów wg przewodnika V440 [246]



Rys. 2-17 Ustandaryzowany sposób numeracji osi i węzłów kratownicy wg przewodnika N-V441 [173]

W praktyce inspektor opisuje uszkodzenia, korzystając ze szczegółowego, ilustrowanego katalogu zawartego w dokumencie Załącznik A do N-V441 [173]. Katalog ten zawiera setki zdjęć referencyjnych dla różnych materiałów i typów uszkodzeń, co ułatwia klasyfikację. Dla wybranych typów uszkodzeń wyszczególniono ogólne kryteria przydzielania stopnia uszkodzenia (skadegard), a następnie przedstawiono przykładową oceną zawierającą: kod, opis i przyczynę, stopień oraz konsekwencje uszkodzenia (Rys. 2-18).



Figur A.3.8—3 — Armeringskorrosjon

Typ uszkodzenia	**Skadetype**	36 - Armeringskorrosjon	
Opis	**Beskrivelse**	Ett felt med avskalling på grunn av armeringskorrosjon. Armeringens yttersjikt kan skrapes av og det er tverrsnittsreduksjoner. Brua er bygd i 1955 og skadeårsaken kan komme av lokal svikt i armeringsoverdekningen og karbonatisert betong.	
Stopień uszkodzenia	**Skadegrad**	4	Ståloverflate der glødeskallet er rustet bort. Synlige rustgroper i stor utstrekning
Konsekwencje uszkodzenia	**Skadekonsekvens**	3V	Vedlikeholdskostnadene vil øke raskt dersom tiltak ikke gjøres.
		2B	Bæreevnen er noe redusert. Skaden kan utvikle seg. Skadeårsak kartlegges for å hindre at bæreevnen svekkes ytterligere.

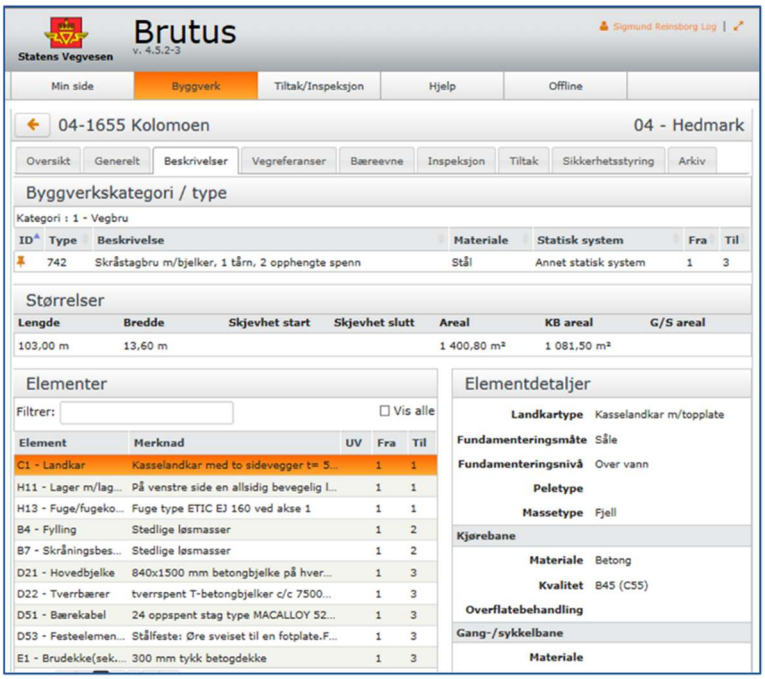
Rys. 2-18 Przykładowe uszkodzenie opisane w Załączniku A przewodnika N-V441 [173]

Poziom cyfryzacji danych ewidencyjnych i diagnostycznych

Norwegia posiada jeden z najbardziej zaawansowanych w Europie systemów cyfrowego zarządzania infrastrukturą. Jego fundamentem jest narodowy system zarządzania mostami Brutus (Rys. 2-19), który pełni rolę centralnej bazy danych dla wszystkich obiektów w kraju. Każdy obiekt ma

przypisaną pozycję w bazie, zawierającą podstawowe informacje konstrukcyjne, historię napraw, wyniki inspekcji oraz dokumentację fotograficzną i opisową. Dzięki temu Brutus jest nie tylko narzędziem do archiwizacji danych, ale również centralną bazą wiedzy o stanie technicznym mostów, służącą do aktywnego planowania działań utrzymaniowych.

Spójność i jakość danych w systemie Brutus gwarantuje ich pełna standaryzacja, oparta na podręczniku V440 [246], który definiuje jednolity system klasyfikacji i nazewnictwa dla wszystkich komponentów mostowych. Dzięki temu inspektorzy i projektanci posługują się wspólnym zestawem kodów i pojęć, co eliminuje niejednoznaczności i ułatwia porównywanie informacji w skali całego kraju. W ostatnich latach rozwijana jest także maszynowo odczytywalna wersja standardu V440 [246], umożliwiająca płynną wymianę danych między Brutus, systemami GIS (ang. Geographic Information System) oraz środowiskami BIM. Proces inspekcji jest w pełni zintegrowany z cyfrowym obiegiem informacji. Inspektorzy wprowadzają dane bezpośrednio do systemu, często wykorzystując aplikacje mobilne w terenie, co pozwala na natychmiastową archiwizację i przetwarzanie.



Rys. 2-19 Fragment systemu Brutus [202]

Obecność elementów wirtualizacji w praktyce inspekcyjnej

W norweskim systemie wirtualizacja jest integralną częścią strategii utrzymaniowej, a jej celem jest osiągnięcie pełnej integracji danych w całym cyklu życia obiektu. Norwescy zarządcy od lat prowadzą projekty badawcze, w których modele BIM stają się podstawą dokumentacji, a rozwój platformy Brutus zmierza w stronę coraz ściślejszej integracji z technologiami BIM oraz cyfrowymi bliźniakami. Innowacyjnym przedsięwzięciem w tym zakresie jest Bjørnafjorden Open Live Center (BOLC) [158]. Jest to platforma eksperymentalna, na której testowana jest integracja różnych źródeł danych: modeli BIM 3D, systemu Brutus, pomiarów geodezyjnych oraz czujników monitorujących w czasie rzeczywistym.

Norwegia jest również europejskim pionierem w praktycznym wykorzystywaniu nowoczesnych technik inspekcyjnych. Statens vegvesen (Norweski Zarząd Dróg Publicznych) przeprowadził

szczegółowe badania nad wykorzystaniem dronów, które zostały podsumowane w Raporcie nr 224 „Bruinspeksjon med drone" [32]. Raport ten jasno stwierdza, że drony są już sprawdzonym i efektywnym narzędziem w norweskiej praktyce, jednak traktowane są jako uzupełnienie metod klasycznych, a nie ich całkowite zastępstwo. Ponadto, oficjalny przewodnik inspekcyjny N-V441 [173], w Załączniku B dotyczącym metod pomiarowych, wprost wskazuje na możliwość wykorzystania skanerów laserowych do precyzyjnego monitorowania przemieszczeń i deformacji elementów mostu.

Analiza porównawcza i wnioski dla krajowych administracji

Norweski system, ukształtowany przez długofalową strategię cyfrową i potrzebę zarządzania infrastrukturą w trudnych warunkach, stanowi dla Polski wzorzec dojrzałej, proaktywnej i w pełni zintegrowanej gospodarki mostowej. Jego fundamentalną przewagą jest kompletny i transparentny system zarządczy, oparty na rozbudowanym systemie publicznie dostępnych wytycznych, na czele z przewodnikiem N-V441 [173]. Definiuje on obiektywną metodykę oceny, która w przeciwieństwie do polskiej skali jest wielowymiarowa. Bazuje nie tylko na stopniu uszkodzenia, ale również na jego konsekwencjach dla nośności, bezpieczeństwa i trwałości mostów. Co więcej, ocena oraz częstotliwość inspekcji obiektów opierają się na analizie ryzyka, co pozwala na racjonalne planowanie prac i koncentrację środków tam, gdzie jest to najbardziej potrzebne.

Kluczowym atutem, który umożliwia tak zaawansowane podejście, jest rygorystyczna standaryzacja nazewnictwa i numeracji elementów (przewodnik V440 [246]). Stanowi ona wspólny, cyfrowy język, będący podstawą dla drugiego ważnego elementu systemu, czyli centralnej bazy danych Brutus. To właśnie synergia między ustandaryzowanymi danymi, a potężnym systemem informatycznym, pozwala na efektywne wdrażanie metodyki BIM w procesy gospodarowania zasobami mostowymi. Norwegia prowadzi liczne projekty badawcze mające na celu dalsze rozwijanie tej integracji i tworzenie operacyjnych cyfrowych bliźniaków. Systematycznie oswaja też środowisko inżynierów i inspektorów mostowych z tymi wszystkimi nowoczesnymi narzędziami. Stosowanie takich technologii, jak drony czy skanery laserowe, jest stopniowo wprowadzane do oficjalnych wytycznych oraz szczegółowo badane w ramach programów pilotażowych.

2.2.5 Podsumowanie

Przeprowadzona analiza systemów zarządzania mostami w Słowacji, Włoszech i Norwegii ukazuje różne ścieżki rozwoju, które mogą stanowić cenne wzorce dla Polski. Każdy z tych krajów, zmagając się z własnymi wyzwaniami, wypracował zaawansowane rozwiązania. Rozpoczynając od ewolucyjnego rozwoju w Słowacji, przez radykalną reformę we Włoszech będącą odpowiedzią na katastrofę, aż po długofalową strategię cyfrową w Norwegii, podyktowaną surowym klimatem i skomplikowaną geografią.

Na tym tle, polski system, choć oparty na solidnych podstawach inżynierskich, od wielu lat pozostaje w stagnacji. Szczególnie w obszarze standaryzacji i cyfryzacji. Dostępne wzorce europejskie dowodzą jednak, że modernizacja jest możliwa i wskazują kierunki niezbędnych zmian. W przyszłości można również rozważyć dążenie do ujednolicenia wytycznych na poziomie Unii Europejskiej. Jednak z uwagi na aktualne, głębokie zróżnicowanie krajowych systemów w Europie, wdrożenie takiego rozwiązania byłoby obecnie niezwykle kłopotliwe. W Tab. 2-7 przedstawiono syntetyczne porównanie kluczowych aspektów analizowanych systemów.

Tab. 2-7 Syntetyczne porównanie systemów zarządzania mostami

Kryterium	Polska	Słowacja	Włochy	Norwegia
Główne organy zarządzające	GDDKiA (drogi), PKP PLK (koleje)	NDS, SSC (drogi), ŽSR (koleje)	ANAS (drogi), RFI (koleje)	Statens vegvesen (drogi), Bane NOR (koleje)
Metodyka inspekcji obiektów drogowych	Główny dokument WR-M-81. Przeglądy: bieżące, okresowe, szczegółowe, specjalne. Częstotliwość stała.	Przepisy techniczne (Technické Podmienky). Inspekcje: bieżące, główne, nadzwyczajne, kontrolne. Zmienna częstotliwość zależna od rodzaju obiektu.	Dekret ministerialny ("Linee Guida..."). Wielopoziomowy proces oceny (Poziomy 0-4) oparty na analizie ryzyka. Częstotliwość modyfikowana analizą ryzyka.	Główny dokument N-V441. Inspekcje: ogólna, uproszczona, główna, specjalna. Częstotliwość modyfikowana analizą ryzyka ROS.
System oceny stanu obiektów drogowych	Subiektywna skala 0-5, kody uszkodzeń łączące element i uszkodzenie.	Quasi-subiektywna skala 1-7, powiązana z kodem z katalogu uszkodzeń.	Klasa Uwagi (CdA), wynikająca z analizy ryzyka (zagrożenie, podatność, ekspozycja).	Wielowymiarowa: stopień uszkodzenia 1-4 + ocena konsekwencji 1-4, analiza ryzyka (ROS)
Poziom cyfryzacji	Brak jednego systemu. Rozproszone, niekompatybilne bazy danych (SGM, SZOK, systemy lokalne).	Centralna baza IS MCS, podstawowe archiwum cyfrowe dla dróg.	Centralna baza AINOP, archiwum cyfrowe, unikalny kod IOP dla każdego obiektu.	Centralny system zarządzania, Brutus, integrujący wszystkie dane w całym cyklu życia obiektu. V440 standaryzuje nazewnictwo.
Wirtualizacja i BIM	Ograniczone, pojedyncze projekty pilotażowe. Powstają pierwsze instrukcje BIM.	Wzmianki w wytycznych, w praktyce rzadko stosowana.	Integralna część systemu (BIM, SHM, robotyka); flagowy przykład mostu w Genui.	Rozwijany standard w całym cyklu życia; integracja modeli BIM z bazą Brutus; powszechne użycie dronów i skanerów.
Ocena względem Polski	Odniesienie. System o solidnych podstawach, ale przestarzały, zdecentralizowany i niedofinansowany.	Bardziej spójny i obiektywny system oceny; scentralizowane dane, ale niski poziom wirtualizacji.	Wzorcowy model radykalnej reformy opartej na analizie ryzyka, centralizacji i wirtualizacji.	Warty naśladowania. Jeden z najdojrzalszych systemów w Europie. Integracja z BIM, silna cyfryzacja i system oparty na publicznie dostępnych standardach.

2.3 Propozycje rozwoju i kierunki modernizacji polskiego systemu inspekcji

2.3.1 Ograniczenia praktyczne i problemy systemowe

Analiza krajowych przepisów i praktyk (pkt 2.1), w zestawieniu z zaawansowanymi modelami zagranicznymi (pkt 2.2), ujawnia szereg głęboko zakorzenionych problemów, które hamują rozwój i efektywność polskiego systemu zarządzania mostami. Problemy te mają charakter zarówno regulacyjny, jak i systemowy, tworząc środowisko, w którym trudno jest zapewnić spójne i optymalne zarządzanie infrastrukturą. Fundamentalnym problemem jest archaiczność i stagnacja przepisów. Podstawowe akty prawne oraz wytyczne, zarówno drogowe, jak i kolejowe, od lat powielają te same sformułowania, niektóre pochodzące jeszcze z lat osiemdziesiątych XX wieku. Powoduje to, że przepisy nie nadążają za rozwojem nowoczesnych metod diagnostycznych, cyfryzacją ani systemami zarządzania ryzykiem. Prowadzi to do poważnych rozbieżności i chaosu. Dla obiektów drogowych i kolejowych stosuje się nie tylko odmienne systemy oceny, ale również inną terminologię do klasyfikacji samych obiektów, ich elementów, typów inspekcji oraz klasyfikacji i opisu uszkodzeń. Taki dualizm znacząco utrudnia porównywalność danych i tworzenie jednolitej strategii w skali kraju.

Kolejnym krytycznym ograniczeniem, jednoznacznie zdiagnozowanym w raporcie NIK [93], jest chaos ewidencyjny i brak spójnego systemu cyfrowego. Dane o obiektach mostowych są rozproszone pomiędzy różne, często niekompatybilne i przestarzałe bazy, a część dokumentacji wciąż prowadzona jest tylko w formie papierowej. Brak jednego, centralnego repozytorium na wzór norweskiego Brutusa, włoskiego AINOP czy słowackiego IS MCS uniemożliwia efektywną analizę stanu technicznego całej sieci, prowadzenie skoordynowanej polityki utrzymaniowej i racjonalne planowanie budżetowe.

System oceny obiektów mostowych w Polsce nadal opiera się w dużej mierze na subiektywnej wiedzy i doświadczeniu inspektora. Co istotne, polskiemu systemowi brakuje fundamentalnego elementu nowoczesnego zarządzania, jakim jest zintegrowana metodyka analizy ryzyka, bazująca na algorytmach i uznanych normach (np. ISO 31000 [97]). Podczas gdy systemy włoskie i norweskie uzależniają częstotliwość i zakres inspekcji od oceny ryzyka, polskie procedury opierają się na sztywnych interwałach kalendarzowych. Ocena skupia się na stanie technicznym, często ignorując tak kluczowe czynniki jak znaczenie obiektu w sieci, konsekwencje społeczne i ekonomiczne awarii oraz zagrożenia środowiskowe. Takie podejście prowadzi do nieefektywnej alokacji zasobów i może skutkować kryzysami, których można było uniknąć. Dobrym przykładem jest przypadek estakady w Chorzowie, który unaocznił, w jaki sposób brak systemowego podejścia do ryzyka może prowadzić do nagłych i kontrowersyjnych decyzji zarządczych, skutkujących paraliżem komunikacyjnym całej aglomeracji.

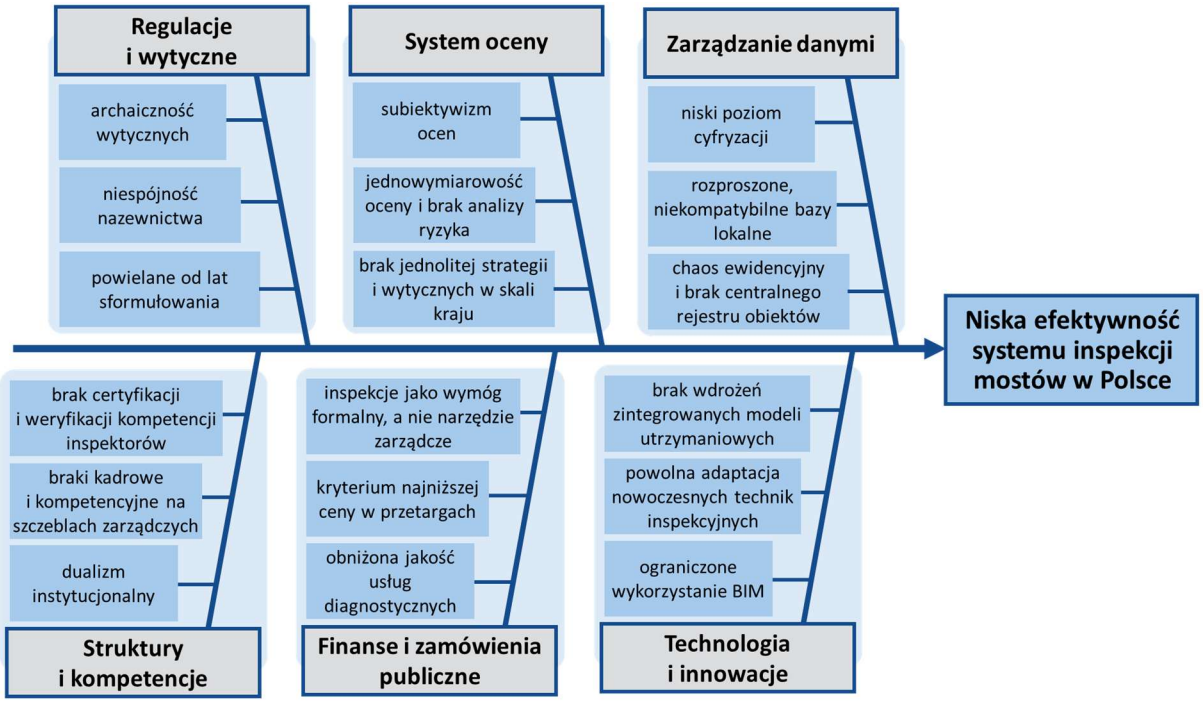
Na problemy regulacyjne i informacyjne nakładają się patologie systemowe, które są już głęboko zakorzenione w praktyce. Najważniejszą z nich jest wadliwy system zamówień publicznych, w którym dominujące kryterium najniższej ceny często prowadzi do wyboru wykonawców oferujących niską jakość usług. W praktyce, inspekcje bywają realizowane jedynie w celu spełnienia formalnych wymogów, zamiast stanowić narzędzie do rzetelnej oceny ryzyka i strategicznego zarządzania infrastrukturą. Zjawisko to było wielokrotnie podnoszone zarówno przez środowiska branżowe, jak i przez NIK [93], która wskazywała na niewystarczającą jakość i użyteczność dokumentacji inspekcyjnej.

Zjawisko to dodatkowo potęgują braki kadrowe i kompetencyjne, zarówno po stronie administracji, jak i wykonawców, na co wskazano również w raporcie NIK [93]. Polska nie posiada

spójnego systemu certyfikacji i weryfikacji inspektorów mostowych. Oznacza to, że jakość prowadzonych inspekcji w dużej mierze zależy od doświadczenia zespołów, a nie od jednolitych standardów. W przeciwieństwie do systemów opartych na normach akredytacyjnych (np. ISO/IEC 17020 [99]), gdzie weryfikacja kompetencji i niezależność inspektora stanowią podstawę wiarygodności procesu, w Polsce nadal brakuje takiej struktury. Prowadzi to do sytuacji, w której nawet szczegółowe wytyczne nie gwarantują spójności i porównywalności wyników.

Istotnym ograniczeniem jest także niski poziom innowacyjności i powolna adaptacja nowych technologii. Wprawdzie wprowadzane są pilotażowe projekty z wykorzystaniem dronów czy skanerów laserowych, jednak nie stały się one jeszcze częścią rutynowej praktyki inspekcyjnej. Wykorzystanie metodyki BIM, choć coraz częstsze, w polskiej praktyce jest w dużej mierze ograniczone do fazy projektowej. Brakuje spójnej strategii i standardów, które umożliwiłyby efektywne przeniesienie modeli cyfrowych do fazy utrzymania. W konsekwencji, zaawansowane koncepcje, takie jak wdrożenie operacyjnych cyfrowych bliźniaków ze zintegrowanym monitoringiem (SHM) do predykcyjnego zarządzania obiektami, pozostają w Polsce w tylko sferze teoretycznej, podczas gdy w wiodących systemach europejskich stają się one standardem.

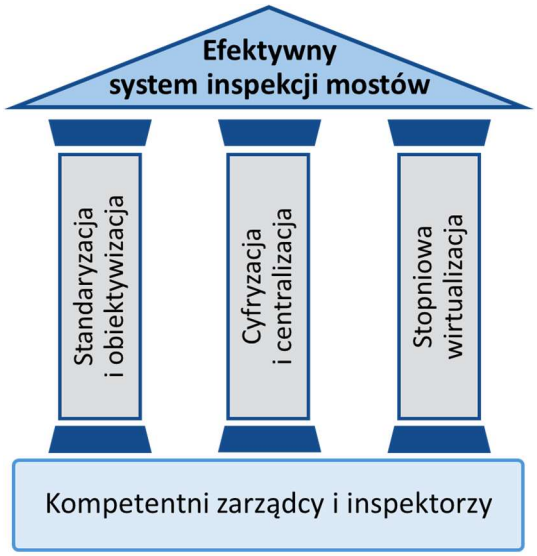
Podsumowując, analiza krajowych regulacji i praktyk na tle rozwiązań stosowanych w Europie ujawnia, że źródła niskiej efektywności polskiego systemu inspekcji mostów mają charakter wieloaspektowy. Problemy te dotyczą fundamentalnych obszarów, począwszy od archaicznych i niespójnych wytycznych, przez subiektywizm ocen i niedostateczne zarządzanie danymi, aż po braki kadrowe, patologie systemu zamówień publicznych i powolną adaptację nowoczesnych technologii. Wszystkie te czynniki wzajemnie się interferują, tworząc system trudny do modernizacji i nieprzystający do standardów europejskich. Graficzną reprezentację głównych problemów przedstawiono w formie diagramu Ishikawy (Rys. 2-20), który w syntetyczny sposób obrazuje przyczyny ograniczonej skuteczności polskiego systemu inspekcji.



Rys. 2-20 Diagram Ishikawy przedstawiający główne problemy polskiego systemu inspekcji mostów

2.3.2 Strategia modernizacji i kluczowe kierunki zmian

Przedstawione poniżej propozycje nie stanowią szczegółowych zapisów legislacyjnych, lecz zarysowują ogólną, strategiczną wizję i wskazują kluczowe kierunki niezbędnych zmian. Modernizacja polskiego systemu diagnostyki obiektów mostowych powinna opierać się na trzech wzajemnie powiązanych filarach: standaryzacji i obiektywizacji oceny, cyfryzacji i centralizacji danych oraz stopniowym wdrażaniu wirtualizacji procesu inspekcyjnego. System powinien stopniowo zbliżać się do rozwiązań stosowanych w bardziej zaawansowanych krajach europejskich, a jednocześnie uwzględniać krajową specyfikę infrastrukturalną. Fundamentem, na którym opiera się cały system, pozostają inspektorzy i zarządcy, dysponujący odpowiednimi kwalifikacjami, narzędziami oraz wsparciem instytucjonalnym (Rys. 2-21).

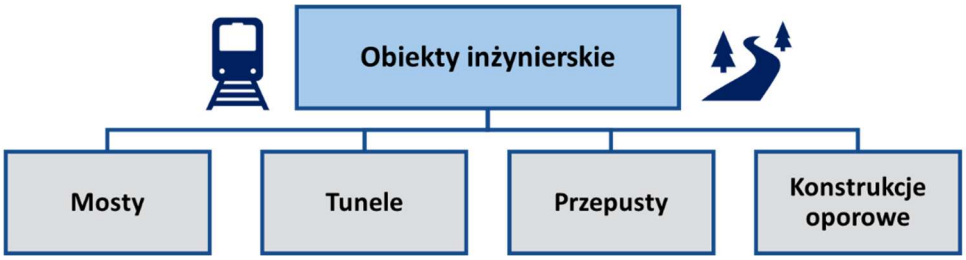


Rys. 2-21 Fundament i filary efektywnego systemu inspekcji mostów

Pierwszy filar stanowi standaryzacja i obiektywizacja oceny. Podstawowym krokiem jest uwzględnienie w Prawie budowlanym [243] jednoznacznych zapisów dotyczących obiektów mostowych, w szczególności w odniesieniu do obowiązków inspekcyjnych. Stworzyłoby to ramy nadrzędne, które umożliwiałyby systematyczne modyfikacje przepisów drogowych i kolejowych bez ryzyka rozbieżności interpretacyjnych. Niezbędna jest również aktualizacja rozporządzenia dotyczącego ewidencji [209], tak aby stało się ono podstawą do budowy nowoczesnych baz danych i repozytoriów cyfrowych.

Konieczna jest standaryzacja nazewnictwa obiektów inżynierskich. Obecnie w Polsce funkcjonują dwa odrębne podziały dla infrastruktury kolejowej i drogowej, które różnią się zakresem i stosowaną terminologią (pkt 2.1.2). Różnice te powodują niepotrzebne komplikacje, zwłaszcza że w praktyce i tak dominującym terminem w języku polskim pozostaje słowo „most". Podobnie w innych językach europejskich stosuje się jedno proste określenie obejmujące różne typy konstrukcji: „bridge" (ang.), „puente" (hiszp.) czy „ponte" (wł.). Chaos terminologiczny jest dodatkowo potęgowany przez stosowanie niemal identycznych, a jednak formalnie odrębnych ogólnych nazw, jak „obiekt inżynierski" dla drogownictwa oraz „obiekt inżynieryjny" dla kolejnictwa.

Zasadne wydaje się przyjęcie uproszczonej klasyfikacji obejmującej cztery podstawowe grupy: mosty, tunele, przepusty i konstrukcje oporowe (Rys. 2-22). Takie rozwiązanie jest wystarczająco szerokie, aby objąć całość infrastruktury liniowej, a jednocześnie klarowne dla użytkowników systemu. Dodatkowo należałoby jednoznacznie rozgraniczyć pojęcie mostu i przepustu, co mogłoby zostać powiązane z parametrem rozpiętości, np. przyjęciem wartości granicznej 3 m, analogicznie jak w aktualnej instrukcji kolejowej [259].



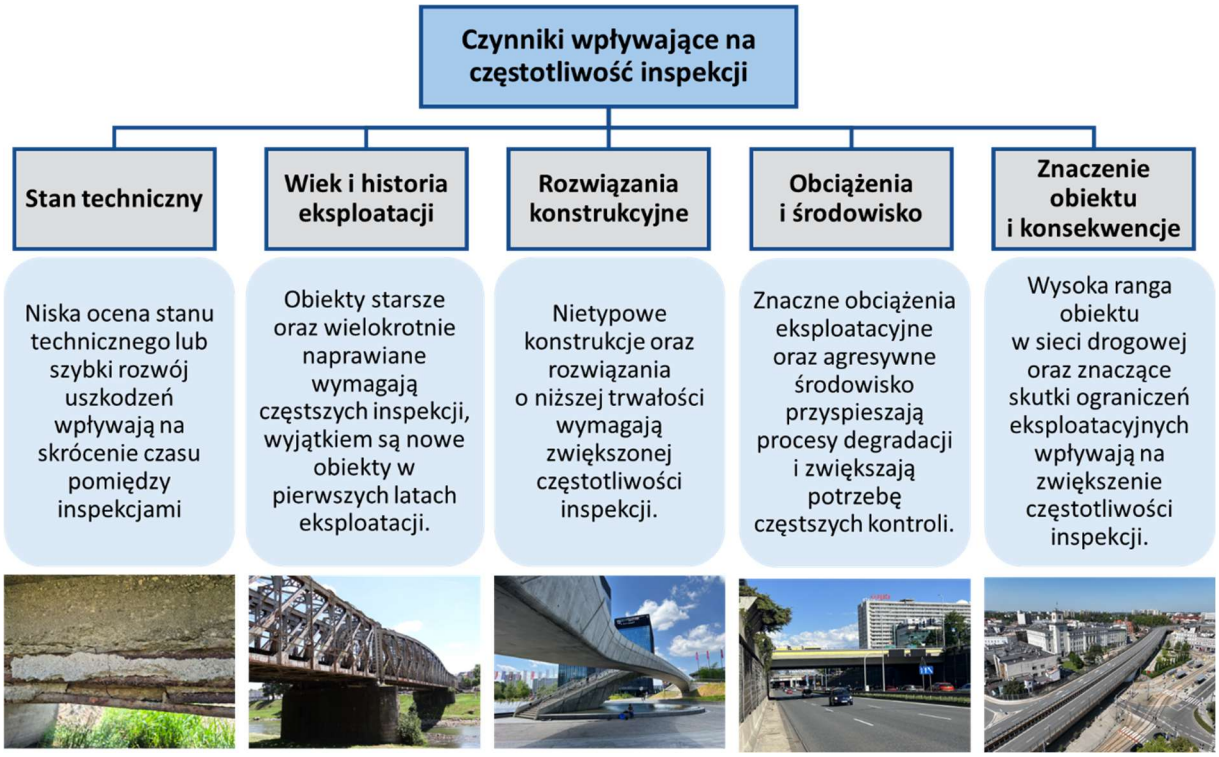
Rys. 2-22 Proponowana klasyfikacja obiektów inżynierskich

Standaryzacja powinna objąć również nazewnictwo elementów konstrukcyjnych. Jako wzór można przyjąć norweski przewodnik V440 [246]. Może to też być bardziej uniwersalny i otwarty standard, taki jak IFC (ang. Industry Foundation Classes) [96], który rozwijany jest przez organizację buildingSmart [92]. Każdy element powinien mieć przypisane jednoznaczne oznaczenie, co eliminuje dowolność interpretacyjną i ułatwia integrację danych pomiędzy zarządcami, a także powiązanie wyników inspekcji z modelami BIM i cyfrowymi bliźniakami.

Kolejnym krokiem powinna być budowa jednolitego, ogólnokrajowego katalogu uszkodzeń, obejmującego obiekty drogowe i kolejowe. Inspiracją mogą być m. in. rozwiązania słowackie [239], włoskie [143] czy norweskie [173], a także propozycje przedstawiane przez prof. Bienia [21]. Chociaż specyfika obiektów drogowych i kolejowych różni się, katalog powinien być utrzymany w jednym, spójnym standardzie, z możliwością rozbudowy o podrozdziały. Taka standaryzacja znacząco ułatwiłaby nie tylko pracę inżynierów, ale również komunikację między zarządcami, która na styku infrastruktury drogowej i kolejowej jest obecnie często utrudniona.

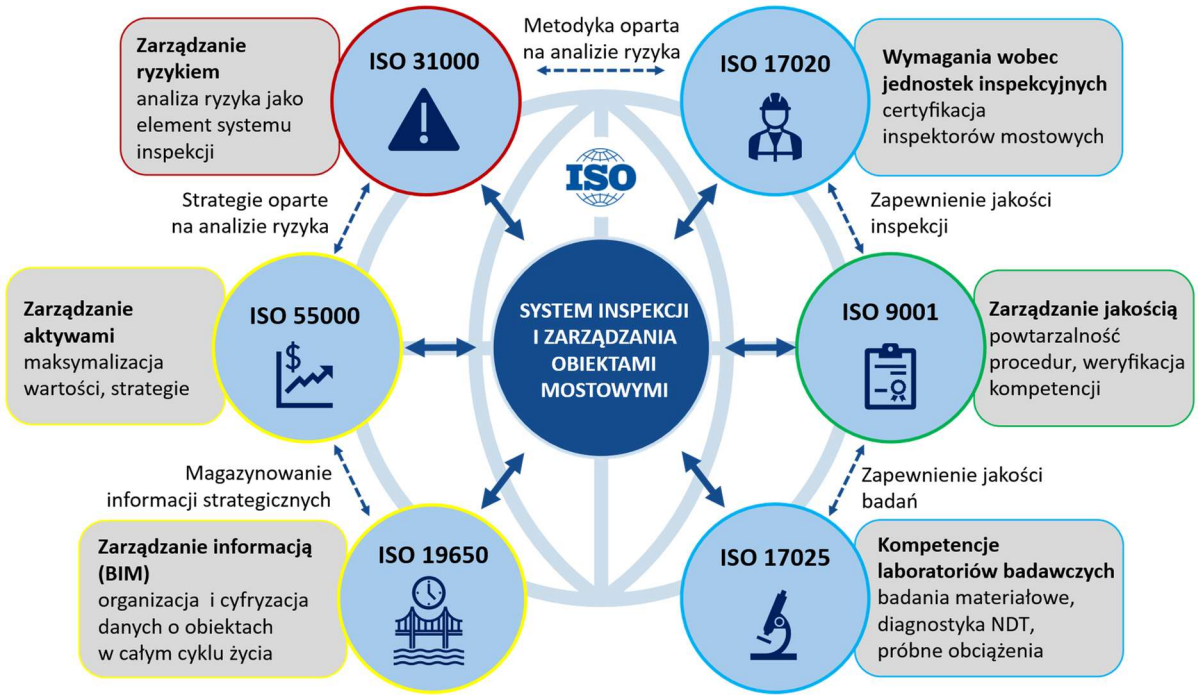
Równie ważne jest odejście od stosowanej obecnie subiektywnej, ogólnej skali ocen 0–5 na rzecz systemu bardziej obiektywnego i wielowymiarowego. Należy rozważyć wdrożenie modelu wzorowanego na rozwiązaniach norweskich lub włoskich, w których fundamentem oceny jest analiza ryzyka. W takim podejściu stan techniczny obiektu pozostaje elementem kluczowym, ale jest tylko jednym z wielu czynników wpływających na ostateczną ocenę i decyzję o dalszych działaniach. Kluczową rolę odgrywałby algorytm, który na podstawie jasno zdefiniowanych i ustandaryzowanych danych wejściowych wprowadzanych przez inspektora lub zarządcę, klasyfikowałby obiekt i wskazywałby rekomendowane działania. Włączenie analizy ryzyka do systemu oceny pozwoliłoby również na uelastycznienie harmonogramu inspekcji. W praktyce oznaczałoby to, że częstotliwość kontroli byłaby powiązana z realnym poziomem ryzyka, co mogłoby skutkować m.in. częstszymi inspekcjami obiektów nowych (w fazie ujawniania się wad wykonawczych) oraz starych (w końcowej fazie cyklu życia), a rzadszymi w okresie stabilnej eksploatacji. Takie podejście zapewniłoby znacznie bardziej racjonalne wydatkowanie środków publicznych. Główne grupy czynników determinujących częstotliwość wykonywania inspekcji, obejmujące m.in. stan techniczny, historię eksploatacji,

rozwiązania konstrukcyjne, oddziaływania oraz szeroko pojęte znaczenie obiektu, przedstawiono na Rys. 2-23.



Rys. 2-23 Czynniki mogące mieć wpływ na częstotliwość wykonywania inspekcji

Warto, aby polski system odnosił się także do międzynarodowych norm ISO, które mogłyby stanowić ramę dla dalszej profesjonalizacji i unifikacji procesu inspekcyjnego. Norma ISO 31000 [97] definiuje zasady zarządzania ryzykiem i mogłaby zostać zaadaptowana jako podstawa do włączenia analizy ryzyka do systemu oceny obiektów. Z kolei norma ISO/IEC 17020 [99] określa wymagania wobec jednostek inspekcyjnych i mogłaby stać się podstawą systemu certyfikacji inspektorów mostowych w Polsce, zapewniając ich niezależność, kompetencje i jednolite standardy pracy. Uzupełnić je mogą m.in. normy: ISO 9001 [190] (określająca ogólne wymagania dla systemu zarządzania jakością), ISO 19650 [191] (dotycząca zarządzania informacją o obiektach budowlanych w całym cyklu życia) oraz ISO 55000 [98] (odnosząca się do zarządzania aktywami, procesami i strategiami w celu maksymalizacji wartości np. infrastruktury). Listę dopełnia norma ISO/IEC 17025 [192], która dotyczy kompetencji laboratoriów badawczych i pomiarowych, istotnych m.in. przy badaniach materiałowych, diagnostyce NDT czy próbnych obciążeniach obiektów mostowych. Wspólnie tworzą one spójny ekosystem norm wspierających zarządzanie zasobami, inspekcje i oceny stanu technicznego oraz zarządzanie informacją, analizę ryzyka i podejmowanie decyzji utrzymaniowych (Rys. 2-24). Odniesienie się do tego typu międzynarodowych norm zwiększyłoby obiektywizm ocen i pozwoliłoby wpisać polskie praktyki w szerszy, globalny kontekst zarządzania infrastrukturą.



Rys. 2-24 Ekosystem norm ISO wspierających proces inspekcji i zarządzania obiektami mostowymi

Drugim filarem strategii powinna być budowa jednego, centralnego systemu informatycznego do zarządzania obiektami inżynierskimi w Polsce (Rys. 2-21). Wzorując się na norweskim systemie Brutus czy włoskim AINOP, należy stworzyć publiczne repozytorium cyfrowe, obejmujące zarówno obiekty drogowe, jak i kolejowe. Przykładem takiej integracji jest wskazana w pkt. 2.2.3 publicznie dostępna włoska mapa obiektów wraz z kodami IOP (Rys. 2-14), która gromadzi dane z obu sektorów. Obecne rozporządzenie dotyczące ewidencji powinno zostać zaktualizowane tak, aby stanowiło podstawę prawną dla repozytoriów cyfrowych, a nie jedynie dla zbiorów arkuszy papierowych czy plików PDF. Baza danych, zasilana przez wszystkich zarządców, umożliwiłaby nie tylko spójne analizy i długofalowe planowanie, lecz także bardziej efektywne zarządzanie ryzykiem i środkami utrzymaniowymi.

Trzecim filarem jest stopniowe wprowadzanie elementów wirtualizacji do praktyki inspekcyjnej (Rys. 2-21). Dotyczy to zarówno wdrożenia potencjału, jaki oferują drony i skanery laserowe w zakresie efektywnego i precyzyjnego zbierania danych, jak i integracji danych z systemami BIM w fazie utrzymania. Nie jest to wyłącznie wizja docelowa. Technologie te mogą być wdrażane stopniowo, począwszy od projektów pilotażowych i obiektów o największym znaczeniu strategicznym. Takie podejście pozwalałoby branży na stopniowe oswajanie się z nowymi narzędziami, równolegle z budową odpowiednich standardów i procedur. Celem jest, aby model cyfrowy towarzyszył obiektowi przez cały cykl jego życia, stając się dynamicznym narzędziem zarządczym, integrującym proces inspekcji, monitoringu i planowania działań utrzymaniowych. Zagadnienia te zostaną szczegółowo rozwinięte w kolejnych rozdziałach niniejszej rozprawy.

2.3.3 Ontologie i modele semantyczne w zarządzaniu informacją

Zaproponowana w poprzednich punktach strategia modernizacji, oparta na standaryzacji, centralizacji i wirtualizacji, stanowi nie tylko rozwiązanie zdiagnozowanych problemów systemowych, ale również fundament pod budowę docelowego, w pełni zintegrowanego systemu zarządzania informacją. Prowadzi to w kierunku ontologii i modeli semantycznych, które umożliwiają systemom

komputerowym nie tylko przechowywanie danych, ale również rozumienie ich znaczenia i kontekstu. Otwiera to drogę do rzeczywistej interoperacyjności systemów i wykorzystania zaawansowanych narzędzi analitycznych, w tym sztucznej inteligencji, w utrzymaniu predykcyjnym.

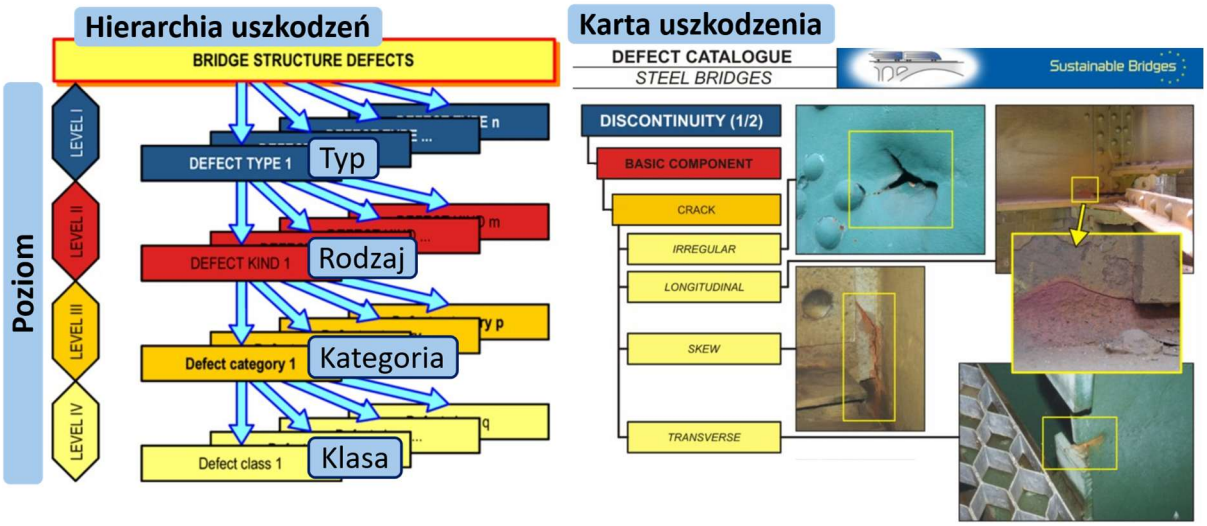
W ujęciu ogólnym, ontologia to formalny, zrozumiały maszynowo model wiedzy odnoszący się do określonej dziedziny. W kontekście inżynierii mostowej stanowi ona ustrukturyzowany słownik pojęć, który definiuje nie tylko klasy obiektów (np. filar, dźwigar, zarysowanie, skurcz), ale również ich atrybuty (np. materiał, z którego wykonany jest filar) oraz, co szczególnie istotne, relacje między nimi (np. filar podpiera dźwigar, zarysowanie znajduje się na filarze, skurcz jest przyczyną zarysowania filara). Z kolei model semantyczny, to sposób organizacji danych, który dzięki powiązaniu z ontologią nadaje im jednoznaczny kontekst znaczeniowy. Dane stają się wówczas zrozumiałe nie tylko dla człowieka, lecz także dla systemów informatycznych.

W literaturze naukowej pojawia się coraz więcej propozycji wykorzystania ontologii w zarządzaniu mostami i ich inspekcjach. Prace te koncentrują się na różnych aspektach, od wsparcia pracy inspektorów w terenie po kompleksowe zarządzanie projektami. Rozwijane są m.in. metody wyszukiwania informacji, takie jak BIontology, w ramach których algorytm na podstawie ostatnio sprawdzonych elementów i relacji przestrzennych, przewiduje i rekomenduje listę najbardziej prawdopodobnych kolejnych elementów do inspekcji [279]. Inni badacze zaproponowali ontologię wspierającą zarządzanie projektami modernizacji mostów betonowych, umożliwiającą integrację dynamicznych danych i usprawnienie procesów decyzyjnych w trakcie realizacji prac [261]. Powstają także całościowe bazy wiedzy, jak BrMontology, które wspomagają proces oceny stanu technicznego mostu poprzez implementację wytycznych w postaci reguł logicznych oraz wspierają podejmowanie decyzji wielokryterialnych [203]. Istotnym kierunkiem badań jest także integracja ontologii z modelami uczenia maszynowego, pozwalająca na automatyczną ekstrakcję szczegółowych danych o uszkodzeniach i działaniach konserwacyjnych z nieustrukturyzowanych, tekstowych raportów inspekcyjnych [145].

Na poziomie praktyki krajowej elementy podejścia semantycznego są już widoczne m.in. w Norwegii i we Włoszech. Norweskie ustandaryzowane przewodniki V440 [246] (nazewnictwo elementów) i N-V441 [173] (inspekcja mostów) tworzą de facto ujednolicony słownik pojęć, będący fundamentem pod budowę krajowej ontologii mostowej, zasilającej system Brutus. Co istotne, obie instrukcje rozwijane są w wersjach maszynowo czytelnych (maskinlesbar), co wprost oznacza budowę modelu semantycznego na bazie standardów. Dzięki temu, dane inspekcyjne stają się natychmiast dostępne w systemach cyfrowych i mogą być wykorzystywane w analizach opartych na sztucznej inteligencji. Włochy z kolei rozwijają system AINOP i kody IOP, które tworzą jednolity język opisu obiektów publicznych, obejmujący zarówno infrastrukturę drogową, jak i kolejową. Oba przypadki pokazują, że semantyczne podejście do danych mostowych przestaje być eksperymentem badawczym, a staje się praktycznym narzędziem wspierającym zarządzanie infrastrukturą.

Warto podkreślić, że koncepcje te mają również swoje korzenie w polskiej myśli technicznej. Prace prof. Jana Bienia i jego współpracowników z Politechniki Wrocławskiej od lat wskazywały na konieczność tworzenia hierarchicznych systemów oceny uszkodzeń i ustandaryzowanej terminologii jako podstawy dla spójnych systemów informatycznych, co stanowi bezpośrednie nawiązanie do logiki ontologii. Znalazło to odzwierciedlenie m.in. w wytycznych dotyczących inspekcji kolejowych obiektów

mostowych [86], stworzonych w ramach europejskiego projektu Sustainable Bridges (Rys. 2-25). Opracowanie dotyczy ujednolicenia procedur oceny stanu technicznego i badań konstrukcji, a prof. Bień był jednym z jego głównych redaktorów. Polski system, rozproszony i niespójny terminologicznie, wymaga wdrożenia ontologii jako narzędzia integrującego. Dzięki niej możliwe byłoby powiązanie danych inspekcyjnych, projektowych, kosztowych i przestrzennych w jedną sieć wiedzy. Umożliwiłoby to nie tylko eliminację chaosu terminologicznego, ale także przejście od systemu reaktywnego do proaktywnego, predykcyjnego utrzymania.



Rys. 2-25 Przykład hierarchicznego opisu uszkodzeń w wytycznych europejskich [86]

Punktem wyjścia dla polskiej ontologii mostowej powinno być zdefiniowanie jednego, wspólnego języka opisu dla zarządców drogowych i kolejowych, zapewniającego spójność pojęciową w obu sektorach. Dane dotyczące inspekcji i utrzymania obiektów mostowych powinny być od początku projektowane jako odczytywalne maszynowo oraz gotowe do wykorzystania w zaawansowanych analizach. Istotną cechą takiej ontologii powinna być również skalowalność, umożliwiająca ewolucję systemu od prostego katalogu elementów i uszkodzeń aż po w pełni funkcjonalne cyfrowe bliźniaki. Kluczowe znaczenie ma także zapewnienie interoperacyjności z istniejącymi standardami międzynarodowymi i formatami wymiany danych, takimi jak IFC w obszarze BIM oraz GML w obszarze GIS.

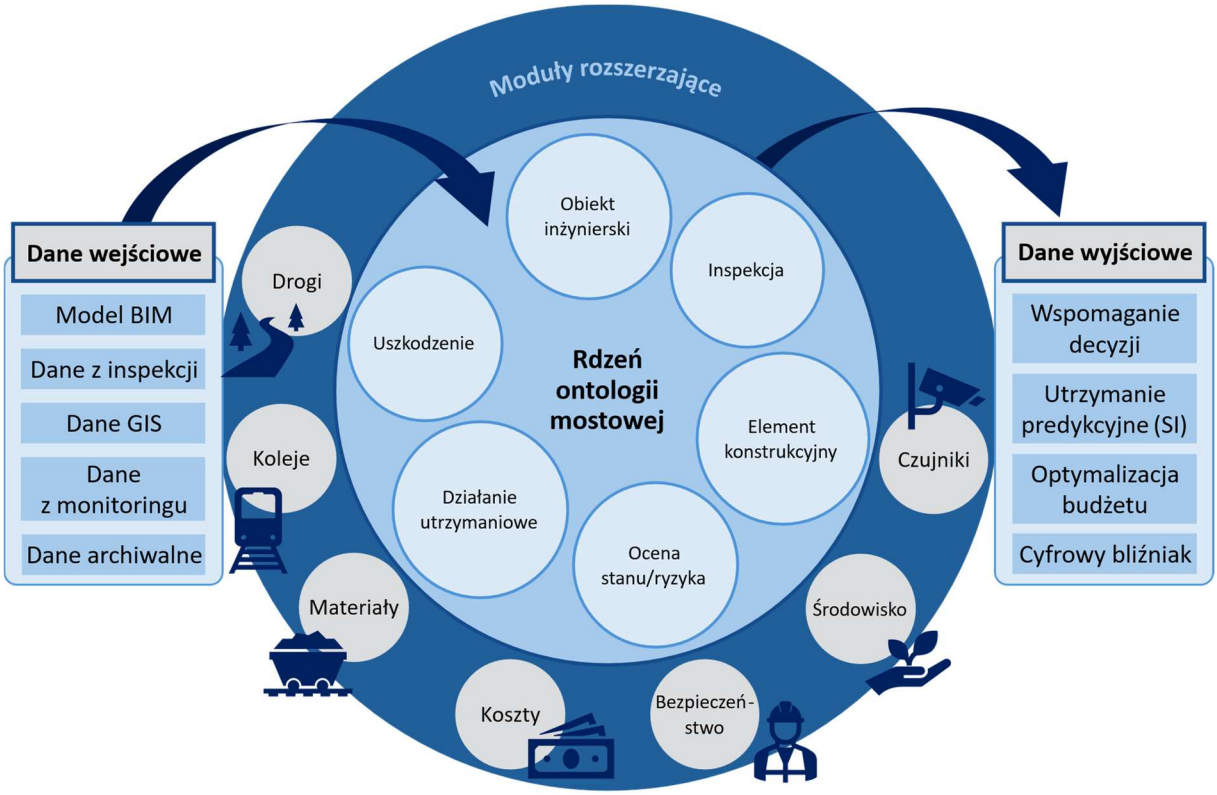
W aktualnych schematach standardu IFC istnieją już klasy umożliwiające opis uszkodzeń i zmian stanu elementów konstrukcyjnych poprzez cechy komponentów (ang. features). Jako dwa kluczowe przykłady można wskazać klasy `IfcSurfaceFeature` [20] oraz `IfcVoidingFeature` [74]. Klasa `IfcSurfaceFeature` stosowana jest do geometrycznego i semantycznego opisu wad powierzchniowych (np. zarysowań, zanieczyszczeń, wykwitów czy śladów korozji powierzchniowej), a kluczowy jest jej atrybut wewnętrzny `PredefinedType`, który przyjmuje wartość `DEFECT`. Z kolei `IfcVoidingFeature` służy do parametryzacji ubytków objętościowych (np. ubytków betonu czy wżerów korozyjnych stali), których objętość jest odejmowana od elementu nadrzędnego. W tym przypadku atrybut wewnętrzny `PredefinedType` może przyjąć np. wartość `CUTOUT` lub `USERDEFINED` dla dedykowanych rozszerzeń semantycznych. Klasy te są przestrzennie powiązane z nadrzędnymi elementami konstrukcyjnymi mostu, a ich atrybuty i dane diagnostyczne są rozszerzane za pomocą dedykowanych zbiorów właściwości `IfcPropertySet`, tworząc podstawy dla

zaawansowanego modelowania informacji o uszkodzeniach (ang. Damage Information Modeling, DIM) [20].

Nowoczesna ewolucja systemów zarządzania infrastrukturą mostową i wspomagania decyzji zarządczych coraz wyraźniej wykracza jednak poza samą przestrzenną i semantyczną parametryzację komponentów czy uszkodzeń obiektu. Kluczowego znaczenia nabierają formalizacja procesów wymiany informacji, walidacja danych i zarządzanie informacją w całym cyklu życia konstrukcji, z wykorzystaniem technologii semantycznych i połączonych kontenerów danych [81]. Fundamentem takiego podejścia stają się standardy openBIM [6], takie jak IDM (ang. Information Delivery Manual), definiujący procesy i wymagania informacyjne na poszczególnych etapach cyklu życia obiektu, ICDD (ang. Information Container for Linked Document Delivery), odpowiadający za strukturyzację i zarządzanie rozproszonymi kontenerami dokumentów oraz powiązanych danych, a także IDS (ang. Information Delivery Specification), umożliwiający definiowanie maszynowo czytelnych i automatycznie weryfikowalnych specyfikacji wymiany informacji. W podejściu tym model IFC staje się jedynie jednym z elementów większego ekosystemu danych, obejmującego również ontologie, relacyjne bazy danych, dokumentację, modele procesów biznesowych (ang. Business Process Model and Notation, BPMN) oraz reguły walidacyjne. W perspektywie systemowej oznacza to, że poprawność, struktura oraz kompletność cyfrowego raportu z inspekcji mostu będą weryfikowane automatycznie przez algorytmy sprawdzające zgodność pliku ze specyfikacją dostarczoną przez zarządcę, ograniczając ryzyko błędów edytorskich i interpretacyjnych wynikających z ręcznego wprowadzania danych z przeglądów.

Proponowana ontologia, pokazana na Rys. 2-26, mogłaby mieć strukturę „rdzeń + moduły" (ang. core + extensions). Rdzeń obejmowałby podstawowe pojęcia: obiekt inżynierski (most, tunel, przepust, konstrukcja oporowa), jego elementy w ujęciu hierarchicznym, uszkodzenia wraz z ich atrybutami (typ [21], rodzaj [21], kategoria [21], intensywność [143], zasięg [143], konsekwencje [173]), inspekcje i obserwacje, oceny stanu i ryzyka, działania utrzymaniowe, zdarzenia nadzwyczajne, dokumenty i zdjęcia oraz odniesienia do geolokalizacji i modeli BIM. Moduły rozszerzające pozwalałyby doprecyzować słownictwo i reguły dla potrzeb specyficznych, np. oddzielnie dla dróg i kolei, materiałów i mechanizmów degradacji, kosztów i programów utrzymaniowych, bezpieczeństwa i krytyczności sieciowej, warunków środowiskowych czy rodzaju technologii (np. systemy sensoryczne).

Relacje w modelu semantycznym musiałyby odzwierciedlać przebieg procesu diagnostycznego: obiekt składa się z elementów, na elementach występują uszkodzenia, które są rejestrowane w inspekcjach, a ich ocena wpływa na wyniki analizy ryzyka i warunkuje decyzje o działaniach utrzymaniowych. Krytyczne znaczenie ma także opracowanie kontrolowanych słowników, hierarchii elementów i ich kodów (na wzór V440 [246]), katalogu uszkodzeń oraz jasnych algorytmów oceniania. Każdy obiekt, element czy defekt powinien posiadać jednoznaczny identyfikator oraz etykiety w języku polskim i angielskim. Dzięki temu możliwe stanie się przejście od dzisiejszych niespójnych raportów w formie plików PDF do zautomatyzowanego przepływu danych, które można analizować, porównywać i integrować z modelami BIM, GIS czy systemami SHM. Ontologia w tym ujęciu stworzyłaby realne podstawy do budowy cyfrowych bliźniaków oraz wdrażania systemów wspomagania decyzji i narzędzi sztucznej inteligencji w zarządzaniu infrastrukturą mostową w Polsce.



Rys. 2-26 Proponowana struktura polskiej ontologii mostowej z uwzględnieniem fazy operacyjnej

3 Przegląd stanu wiedzy i technik inspekcji obiektów mostowych

3.1 Wstęp

3.1.1 Aktualne scenariusze pracy inspektorów mostowych

Współczesna praktyka inspekcyjna obiektów mostowych w Polsce, mimo rosnącej świadomości potencjału technologii cyfrowych, wciąż opiera się na tradycyjnych, ugruntowanych przez lata metodach. Typowy proces jest silnie uzależniony od bezpośrednich oględzin wizualnych, manualnych pomiarów oraz fizycznego dostępu do konstrukcji.

Podstawą pracy inspektora, zgodnie z wytycznymi kolejowymi [95] i drogowymi [271], są oględziny wizualne wspierane zestawem narzędzi pomiarowych i badawczych. Do standardowego wyposażenia należą przyrządy służące do podstawowej weryfikacji geometrii, takie jak miarki, taśmy miernicze i dalmierze laserowe. W ramach inspekcji szczegółowych wykorzystuje się już precyzyjniejsze, ale wciąż manualne geodezyjne narzędzia miernicze, takie jak tachimetry i niwelatory, do pomiarów przemieszczeń czy osiadań. Ocenę uszkodzeń materiałowych wspierają specjalistyczne narzędzia, m.in. suwmiarki, lupy Brinella, macki pomiarowe czy szczelinomierze. Istotnym narzędziem do oceny organoleptycznej pozostaje zwykły młotek, używany do opukiwania betonu w celu wykrycia odspojenia materiału i pustek. Całość uzupełnia sprzęt dokumentacyjny w postaci aparatu fotograficznego, lornetki i latarki. W zależności od zakresu prac, ten podstawowy zestaw jest rozszerzany o tradycyjne techniki badań nieniszczących (NDT), opisane m.in. w monografii [65]. Należą do nich np. sklerometr (młotek Schmidta) do oceny wytrzymałości betonu, twardościomierz (np. Vickersa) do oceny wytrzymałości stali czy detektory zbrojenia i mierniki grubości powłok malarskich (Rys. 3-1). W uzasadnionych przypadkach, gdy metody nieniszczące są niewystarczające, stosuje się również badania niszczące, polegające m.in. na pobraniu próbek betonu lub wycięciu fragmentów stali do analizy laboratoryjnej.



Rys. 3-1 Tradycyjne techniki badań NDT: (1) miernik powłok malarskich, (2) twardościomierz Vickersa, (3) skaner ferromagnetyczny, (4) młotek Schmidta.

Kluczowym wyzwaniem w pracy inspektora jest zapewnienie bezpiecznego i skutecznego dostępu do wszystkich, w tym trudno dostępnych, elementów konstrukcji. W zależności od obiektu stosuje się różne rozwiązania, od najpopularniejszych podnośników koszowych, po drogie w wynajmie specjalistyczne pojazdy inspekcyjne, które z poziomu jezdni opuszczają pod przęsło długi pomost roboczy (Rys. 3-2). W sytuacjach, gdy użycie ciężkiego sprzętu jest niemożliwe, inspektorzy posiadający odpowiednie uprawnienia wykorzystują alpinistyczne techniki dostępu linowego (Rys. 3-2). Inspekcja elementów obiektu znajdujących się w wodzie często wymaga natomiast użycia sprzętu pływającego, a niekiedy zaangażowania nurków. Niemal wszystkie te metody generują wysokie koszty, wiążą się z ograniczeniem w prowadzeniu ruchu w obrębie obiektu (np. zamknięcia pasów drogowych), co stanowi istotne utrudnienie logistyczne, ale też zwiększają ryzyko dla zdrowia i życia samych inspektorów, którzy muszą pracować w nieraz bardzo trudnych warunkach.



Rys. 3-2 Dostęp inspektora mostowego do trudno dostępnych elementów konstrukcji

Przejście od prac terenowych do opracowania dokumentacji stanowi kolejny krytyczny etap tego procesu. Presja czasu oraz trudne warunki pracy sprawiają, że notatki i obserwacje sporządzane w terenie mają z reguły charakter wstępny. Z tego powodu właściwa analiza i interpretacja zebranych danych odbywają się dopiero w warunkach biurowych. Powoduje to, że ostateczna dokumentacja powstaje z opóźnieniem, a jej opracowaniem nierzadko zajmują się osoby, które wcale nie uczestniczyły w inspekcji, co znacząco zwiększa ryzyko błędów interpretacyjnych i nieścisłości. Proces raportowania zależy od przyjętej praktyki danego inspektora lub zespołu i sprowadza się zazwyczaj do wypełniania papierowych lub elektronicznych formularzy albo dokumentów tekstowych z niejednoznacznym opisem stwierdzonego stanu technicznego. Jak szczegółowo opisano w rozdziale 2, z uwagi na wymogi wszystkich zarządców, wynikiem są najczęściej tradycyjne, papierowe protokoły lub ich cyfrowe odpowiedniki w postaci plików PDF. Ważniejszym od zawartości merytorycznej stają się formalne wymagania dotyczące oryginalności ręcznego podpisu inspektora oraz udokumentowanie faktu opłacenia składki w izbie inżynierów.

Mimo dominacji tradycyjnych metod, istnieją w Polsce jednostkowe przykłady zaawansowanych, cyfrowo zintegrowanych procesów inspekcyjnych. Wzorcowym studium przypadku jest projekt związany z transportem nienormatywnym maszyny drążącej TBM (ang. Tunnel Boring Machine) na budowę tunelu w ciągu drogi S19 [103], w którym autor niniejszej rozprawy brał czynny udział.

Transport drogowy, ze względu na gabaryty ładunku, odbywał się drogą lądową od portu rzecznego w okolicy Opola do miejscowości Babica koło Rzeszowa. Ze względu na ograniczenia nośności i stanu technicznego mostów na odcinku autostrady A4 między Katowicami a Krakowem, konwój musiał jechać okrężną drogą o długości ponad 700 km (Rys. 3-3). Na tej trasie zidentyfikowanych zostało około 400 obiektów mostowych. Duża skala tego przedsięwzięcia, w ramach którego ponad 200 obiektów wymagało analizy nośności, a blisko 100 doraźnej oceny stanu technicznego, w połączeniu z krótkim terminem realizacji, wymusiła zastosowanie kilku innowacyjnych rozwiązań.



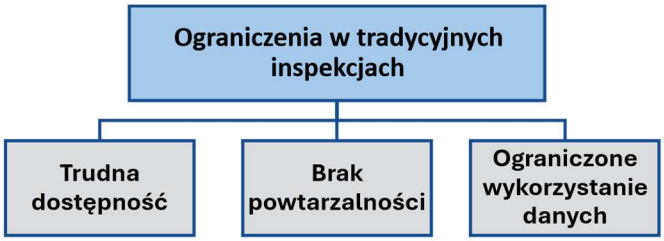
Rys. 3-3 Zestaw transportujący elementy maszyny TBM (po lewej) i jego ostateczna trasa przejazdu (po prawej) [103, 216]

Kluczowym elementem systemu była centralna, chmurowa baza wiedzy o obiektach na trasie, która została zintegrowana z interaktywną mapą GIS. Pozwoliło to na szybką lokalizację obiektów i efektywne zarządzanie dokumentacją. Inspektorzy terenowi zostali wyposażeni w mobilne aplikacje, umożliwiające ustandaryzowane wprowadzanie danych z inspekcji w czasie rzeczywistym bezpośrednio do centralnej bazy [216]. Aplikacja prowadziła inspektora przez proces oceny kluczowych elementów konstrukcyjnych (dźwigarów, pomostu, podpór, łożysk), istotnych z perspektywy przejazdu transportu nienormatywnego. Dzięki takiemu rozwiązaniu, koordynator projektu miał stały, bieżący wgląd w postęp prac, a po ich zakończeniu system umożliwiał automatyczne generowanie ujednoliconych protokołów. Każdy raport zawierał podstawowe dane ewidencyjne, lokalizację, wyniki oceny stanu technicznego oraz dokumentację fotograficzną.

Podejście to, choć zrealizowane na potrzeby jednego, specyficznego zadania, stanowi dowód, że cyfryzacja i automatyzacja procesu inspekcji mogą w polskich warunkach przynieść wymierne korzyści, skracając czas pracy i redukując koszty. Jest to jednak wciąż zastosowanie jednostkowe, znacząco odbiegające od powszechnej, codziennej praktyki zarządców infrastruktury w skali kraju, dla których wciąż najważniejsze są tylko zalegające w archiwach papierowe dokumenty.

3.1.2 Ograniczenia podejścia tradycyjnego

Tradycyjny scenariusz pracy inspektora, opisany w poprzednim punkcie, choć skuteczny w podstawowym zakresie, charakteryzuje się znacznymi ograniczeniami w kontekście efektywności, powtarzalności i zaawansowanej analizy danych. Główne problemy, zilustrowane na Rys. 3-4, można skategoryzować w trzech obszarach: trudnej dostępności, braku powtarzalności oraz ograniczonego wykorzystania danych.



Rys. 3-4 Ograniczenia w tradycyjnych inspekcjach obiektów mostowych

Pierwszym i najbardziej oczywistym ograniczeniem jest trudna dostępność do kluczowych elementów konstrukcyjnych. Elementy takie jak łożyska, głowice pylonów czy przęsła znajdujące się wysoko nad terenem lub przeszkodami wodnymi stanowią poważne wyzwanie logistyczne. Dotarcie do nich jest nie tylko kosztowne, ale przede wszystkim wiąże się z narażeniem zdrowia i życia inspektorów, którzy często muszę posiadać specjalistyczne szkolenia i sprzęt alpinistyczny. W skrajnych przypadkach rzetelna ocena stanu technicznego jest wręcz niemożliwa. Warto przy tym podkreślić, że część wymogów formalnych nakłada na inspektora obowiązek bezpośredniego kontaktu z ocenianym elementem. Rodzi to pytanie, czy kontakt ten powinien być warunkiem koniecznym w każdym przypadku. W wielu sytuacjach wystarczająca może być precyzyjna obserwacja z bliskiej odległości, ale niekoniecznie nieuzbrojonym okiem, lecz wsparta zobrazowaniami o wysokiej rozdzielczości. Bezpośrednia obserwacja lub interwencja powinna być stosowana jedynie w uzasadnionych przypadkach dla elementów lub uszkodzeń, które budzą wątpliwości.

Drugim istotnym problemem jest brak powtarzalności kolejnych inspekcji. Proces oceny w tradycyjnym modelu jest silnie uzależniony od subiektywnej interpretacji i indywidualnego doświadczenia inspektora. W sytuacji, gdy w kolejnych latach przeglądy wykonują różne osoby, opierając się jedynie na protokołach z poprzednich lat, trudno o obiektywną ocenę zmian w czasie. Prowadzi to do rozbieżności w interpretacjach i ogranicza możliwość rzetelnego monitorowania procesów degradacji konstrukcji. Co istotne, jak wskazano w pkt. 2.3.1, problem nie leży wyłącznie po stronie inspektorów, lecz ma charakter systemowy. Obowiązujące procedury oceny same w sobie nie promują obiektywizmu ani nie wymuszają spójności wyników.

Ostatnim, lecz kluczowym z perspektywy strategicznego zarządzania, ograniczeniem jest brak możliwości pełnego wykorzystania danych. Ogromna ilość informacji generowanych podczas inspekcji, zapisywana w formie analogowej lub w nieustrukturyzowanych plikach cyfrowych, trafia do rozproszonych archiwów. Dane w tej postaci tracą swój potencjał analityczny, nie nadają się do automatycznego przetwarzania, filtrowania czy zaawansowanej analizy. W konsekwencji zarządca infrastruktury nie jest w stanie wykorzystać tej wiedzy do optymalizacji działań utrzymaniowych, predykcji degradacji czy podejmowania strategicznych decyzji dotyczących całej sieci obiektów.

3.2 Współczesne technologie i narzędzia wspomagające inspektora

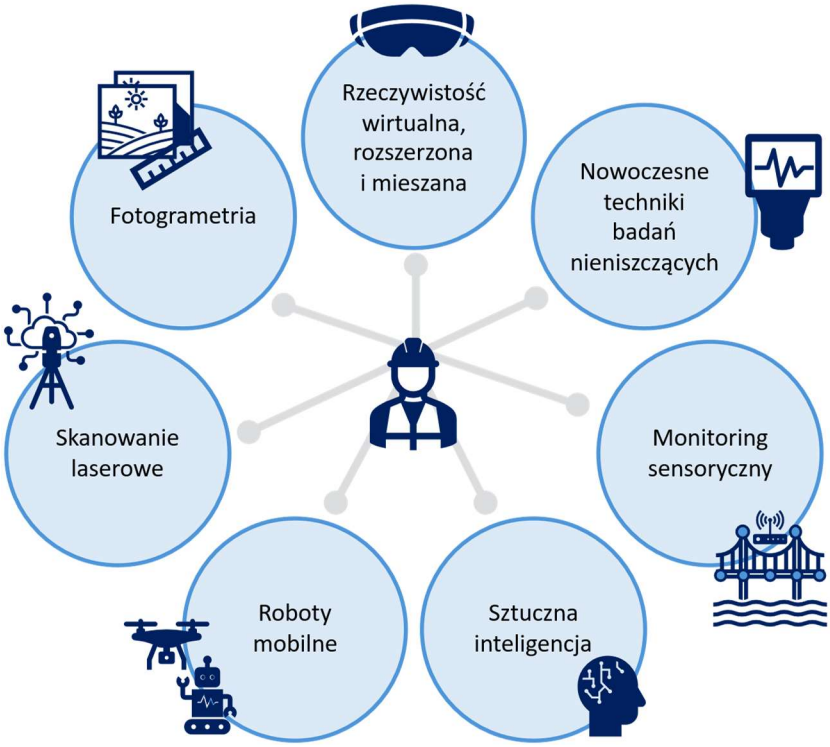
3.2.1 Wprowadzenie

Odpowiedzią na zidentyfikowane w pkt. 3.1.2 ograniczenia tradycyjnego podejścia, może być wirtualizacja procesu diagnostycznego. Jej fundament stanowi środowisko cyfrowe, oparte na dużej mocy obliczeniowej nowoczesnych stacji roboczych oraz wyspecjalizowanym oprogramowaniu (np. do modelowania w środowiskach CAD, BIM, GIS). Wdrożenie współczesnych technologii cyfrowych, zrobotyzowanych platform mobilnych oraz systemów telemetrycznych umożliwia powtarzalne i obiektywne gromadzenie danych dotyczących stanu technicznego obiektów mostowych. Dane te, po odpowiedniej obróbce, mogą być łatwiej archiwizowane, skuteczniej przetwarzane oraz dokładniej analizowane i lepiej wizualizowane. I to niezależnie od problemów związanych z trudno dostępnymi elementami konstrukcji, ich wielkością czy złożonością.

Koncepcja wirtualizacji opiera się na synergicznym wykorzystaniu grupy technologii, które tworzą spójny łańcuch diagnostyczny: od pozyskania danych, przez ich analizę, aż po interakcję z cyfrową reprezentacją obiektu. W niniejszej pracy wybrano siedem kluczowych grup technologii i narzędzi, które odgrywają fundamentalną rolę w tym procesie (Rys. 3-5). Są to:

- roboty mobilne (powietrzne, naziemne i wodne),
- skanowanie laserowe,
- fotogrametria,
- rzeczywistość wirtualna, rozszerzona i mieszana (ang. VR/AR/MR),
- nowoczesne techniki badań nieniszczących (ang. NDT),
- monitoring sensoryczny (ang. SHM),
- sztuczna inteligencja (SI, ang. AI).

Dobór ten nie jest przypadkowy. Technologie te reprezentują komplementarne elementy nowoczesnego systemu inspekcyjnego: roboty zapewniają dostęp do konstrukcji i stanowią platformy nośne dla sensorów, skanowanie laserowe i fotogrametria to kluczowe metody przechwytywania rzeczywistości i stanowią bazę do skutecznej rekonstrukcji 3D, nowoczesne techniki NDT oraz monitoring sensoryczny dostarczają danych o stanie materiału i zachowaniu konstrukcji w czasie, sztuczna inteligencja umożliwia automatyczną analizę ogromnych zbiorów danych (np. identyfikację uszkodzeń). Podstawowym narzędziem interakcji z tak powstałym modelem cyfrowym pozostaje wysokowydajna komputerowa stacja robocza, umożliwiająca analityczną interpretację i precyzyjne pomiary, natomiast technologie VR/AR/MR wynoszą tę interakcję na poziom immersyjny, ułatwiając percepcję przestrzenną. W dalszej części rozdziału, każda z wymienionych technologii zostanie szczegółowo omówiona, bazując na doświadczeniach własnych autora oraz przeglądzie międzynarodowej literatury naukowej.

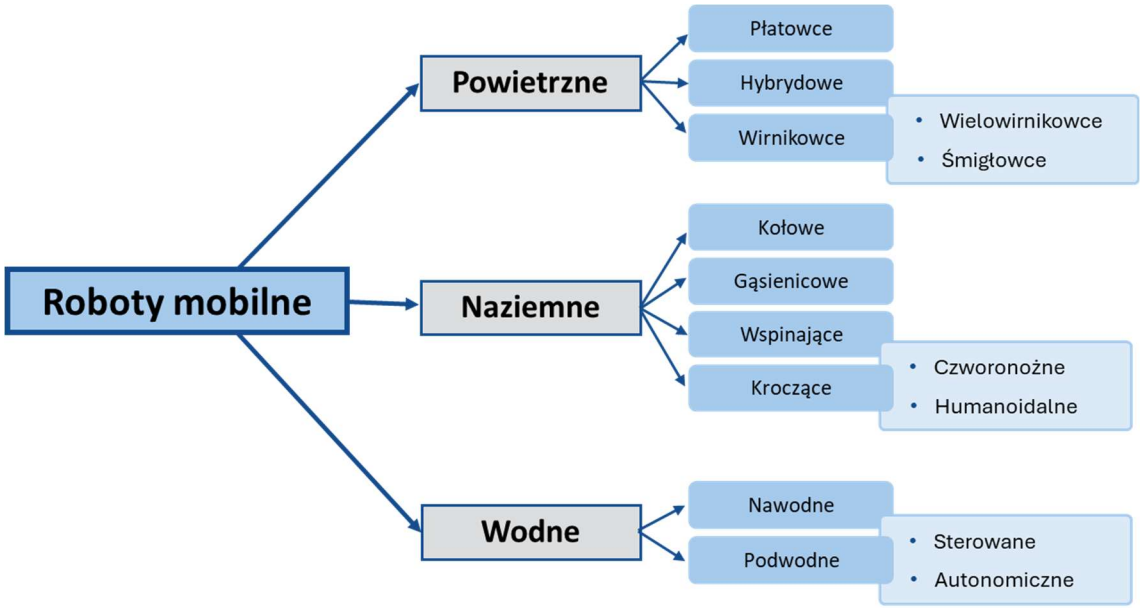


Rys. 3-5 Wybrane współczesne technologie i narzędzia wspomagające inspekcje obiektów mostowych

3.2.2 Roboty mobilne

Robotyka mobilna stanowi jedną z kluczowych odpowiedzi na ograniczenia tradycyjnych inspekcji wskazane w pkt. 3.1.2. Zastosowanie bezzałogowych zrobotyzowanych platform w diagnostyce obiektów mostowych pozwala fundamentalnie zmienić sposób pozyskiwania danych o stanie technicznym konstrukcji. W odniesieniu do zdiagnozowanych problemów, roboty bezpośrednio odpowiadają na wyzwanie utrudnionej dostępności, ale również, poprzez zautomatyzowane i zaplanowane procedury zbierania danych, wspierają powtarzalność wyników. W licznych studiach przypadków i porównaniach terenowych wykazano także, że robotyzacja nierzadko podnosi efektywność i skraca czas inspekcji [118, 236]. Oczywiście nie dzieje się tak w każdym scenariuszu, a korzyści są silnie zależne od geometrii obiektu, warunków środowiskowych oraz dojrzałości wdrożenia. Natomiast, co najważniejsze, zwiększa się bezpieczeństwo inspektorów poprzez eliminację lub ograniczenie pracy w miejscach niebezpiecznych [8, 64, 118]. Szeroki przegląd literatury naukowej, m.in. [71, 134, 182], wskazuje na dynamiczny rozwój tej dziedziny i jej rosnące znaczenie w cyklu życia obiektów infrastruktury. Jedną z analizowanych ścieżek rozwoju jest dążenie do automatyzacji procesu inspekcji stanu technicznego obiektów infrastruktury [141, 167, 279].

Przedstawiona na Rys. 3-6 klasyfikacja robotów mobilnych ma charakter autorski, ale opiera się na dostępnej literaturze i praktyce inżynierskiej [71, 134]. Należy zaznaczyć, że liczba dostępnych typów robotów i ich kombinacji może być znacznie większa, jednak te omówione poniżej stanowią podstawowe grupy o największym potencjale wdrożeniowym z punktu widzenia inspekcji mostów. Roboty te można sklasyfikować ze względu na środowisko operacyjne, w którym się poruszają. Są to więc platformy powietrzne, naziemne i wodne.



Rys. 3-6 Klasyfikacja robotów mobilnych

Bezzałogowe statki powietrzne (BSP, ang. Unmanned Aerial Vehicles, UAV) są obecnie najczęściej stosowaną i najlepiej opisaną w literaturze grupą robotów wykorzystywanych w inspekcjach mostów [2, 83, 104]. Standaryzacja metodyki ich wykorzystania, obejmująca planowanie lotu, zbieranie danych i ich przetwarzanie, jest przedmiotem wielu badań [19, 112, 223]. W praktyce wyróżnia się trzy główne typy BSP: wirnikowce (w tym wielowirnikowce i śmigłowce), płatowce oraz statki hybrydowe.

Najpopularniejszym typem BSP stosowanym w inspekcjach są wielowirnikowce. Dzięki zdolności do precyzyjnego zawisu i powolnego lotu w bliskiej odległości od obiektu, stanowią one idealne narzędzie do szczegółowej inspekcji wizualnej [35, 147]. Coraz częściej rozwijane są również wielowirnikowce zdolne do inspekcji kontaktowej, umożliwiające stabilizację w ograniczonych przestrzeniach [109, 218]. Drugą grupę stanowią płatowce (ang. fixed-wing), które działają podobnie do samolotów i są bardzo efektywne na długich dystansach. Z uwagi na brak możliwości zawisu, ich rola w inspekcji pojedynczych mostów jest ograniczona. Mimo to są one użyteczne w monitorowaniu całych korytarzy transportowych [71, 250]. Statki hybrydowe łączą cechy obu powyższych typów. Określa je skrót VTOL (ang. Vertical Take-Off and Landing), co oznacza zdolność do pionowego startu i lądowania [177]. Umożliwia to start z ograniczonej przestrzeni, tak jak w przypadku wielowirnikowca, a następnie przejście do wydajnego lotu poziomego, który charakterystyczny jest dla płatowca.

Bezzałogowe pojazdy naziemne (BPN, ang. Unmanned Ground Vehicles, UGV) stanowią ważne uzupełnienie dla robotów latających, oferując dłuższy czas pracy i większy udźwig. Przyjęty podział, oparty m.in. na [134], obejmuje roboty kołowe, gąsienicowe, wspinające oraz kroczące (w tym czworonożne i humanoidalne). Roboty kołowe i gąsienicowe wykorzystuje się zarówno do inspekcji z poziomu jezdni, jak i z poziomu terenu. Kołowe zapewniają szybki i stosunkowo prosty przegląd powierzchni mostów tam, gdzie podłoże jest zwarte i równe [159, 185] lub gdzie wyznaczono odseparowane trasy inspekcyjne [232]. Z kolei platformy gąsienicowe [179] lepiej radzą sobie na podłożach nierównych. Zwykle są jednak większe gabarytowo i przez to mniej zwrotne, co utrudnia im poruszanie się w ograniczonych przestrzeniach (np. we wnętrzu skrzynkowych dźwigarów). W praktyce często stosuje się rozwiązania hybrydowe lub roboty o specjalnej konstrukcji dostosowanej do

konkretnego mostu i zakresu inspekcji. Na przykład wykorzystujące wysięgniki do inspekcji bocznych ścian i spodów przęseł [231].

Roboty kroczące, najczęściej czworonożne (np. Spot firmy Boston Dynamics), mają przewagę w pokonywaniu trudnego terenu, przeszkód i schodów, co czyni je użytecznymi pod mostami oraz w miejscach, gdzie inne typy platform mają ograniczoną manewrowość [82]. Roboty humanoidalne pozostają na razie w sferze koncepcyjnej, jeśli chodzi o zastosowanie w inspekcji mostów. Szczególną kategorię stanowią roboty wspinające, które wykorzystują mechanizmy adhezyjne (magnetyczne, podciśnieniowe itp.) do pokonywania pionowych, pochyłych czy odwróconych powierzchni, zapewniając stały kontakt z podłożem. Umożliwia to inspekcję wysokich filarów czy rozległych dźwigarów: stalowych [131, 142] oraz betonowych [137], a także innych trudno dostępnych elementów, w tym lin czy kabli.

Platformy wodne obejmują jednostki nawodne (ang. Unmanned Surface Vehicles, USV) oraz podwodne (ang. Unmanned Underwater Vehicles, UUV). Pojazdy operujące pod wodą dzieli się dalej na zdalnie sterowane (ang. Remotely Operated Vehicle, ROV), połączone przewodem z operatorem, oraz autonomiczne (ang. Autonomous Underwater Vehicle, AUV). Rozwój tych ostatnich, zwłaszcza w zakresie autonomicznej nawigacji, pozwala na realizację złożonych misji inspekcyjnych bez stałej kontroli operatora. Badania wskazują na znaczącą poprawę bezpieczeństwa w stosunku do tradycyjnych metod nurkowych, a także na szybki rozwój metod analizy danych w czasie rzeczywistym przy wykorzystaniu algorytmów sztucznej inteligencji [152]. Z kolei USV wyposażone w wysokorozdzielcze sonary 3D umożliwiają szczegółową rekonstrukcję trójwymiarową podwodnych części podpór i fundamentów mostowych, co znacząco zwiększa dokładność i skuteczność inspekcji elementów zanurzonych [90, 266]. W praktyce USV często pełnią też rolę jednostki głównej dla ROV (zasilanie, łączność, pozycjonowanie), a ROV, dzięki przewodowi, zapewniają stabilne przesyłanie danych i precyzyjne manewrowanie, również w wodach mętnych lub o silnym nurcie.

Należy podkreślić, że niezależnie od typu, roboty mobilne stanowią przede wszystkim platformy dla sensorów i bazę dla technologii takich jak fotogrametria czy skanowanie laserowe [118, 250], które zostaną szczegółowo omówione w dalszych podrozdziałach. Umożliwiają zbieranie precyzyjnych danych geometrycznych i wizualnych za pomocą fotogrametrii, skanowania laserowego czy ich integracji [108]. Pozwalają także na stosowanie zaawansowanych metod, jak cyfrowa korelacja obrazu do pomiaru zmian geometrycznych [201] czy integracji z badaniami NDT, jak np. termografia do wykrywania pęknięć i nieciągłości [232].

Wdrożenie robotów mobilnych wiąże się z szeregiem wyzwań technicznych i organizacyjnych. Najlepiej rozpoznane są one w przypadku platform powietrznych, które obecnie najczęściej wykorzystuje się w inspekcjach obiektów mostowych [250]. Jednym z kluczowych zagadnień jest planowanie tras przelotu. Badania w tym obszarze koncentrują się na optymalizacji tras pod kątem pełnego pokrycia inspekcyjnego, gospodarki energią drona i bezpieczeństwie lotu [28, 29, 120, 139, 141], a także na tworzeniu algorytmów umożliwiających w przyszłości w pełni autonomiczne misje [167, 225, 277]. Innym istotnym wyzwaniem jest utrzymanie precyzyjnej lokalizacji i sterowania w środowiskach bez dostępu do sygnału GNSS (ang. Global Navigation Satellite System), jak przede wszystkim przestrzenie pod przęsłami [120, 123, 253].

Operacje zrobotyzowane wymagają ponadto systemowej analizy ryzyka i jasno zdefiniowanych procedur [8]. Przyszłość inspekcji nie sprowadza się jednak wyłącznie do pełnej autonomii. Obecnie najbardziej efektywnym okazuje się model współpracy człowiek-robot, który łączy doświadczenie inspektora z automatycznym lub półautomatycznym i powtarzalnym pozyskiwaniem danych [11, 64, 82]. Równolegle, intensywnie rozwijane jest przetwarzanie danych wizualnych uzyskanych przez roboty za pomocą algorytmów sztucznej inteligencji, co pozwala na automatyczną detekcje i kwantyfikację uszkodzeń. Zarówno w czasie rzeczywistym, jak i w późniejszej obróbce, co przedstawiono m.in. w [9, 14, 41, 46, 105, 153, 263]. Zagadnienia te zostaną szerzej omówione w podrozdziale poświęconym sztucznej inteligencji.

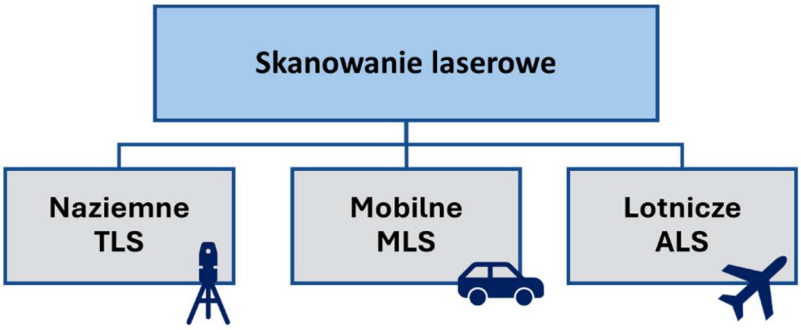
3.2.3 Skanowanie laserowe

Skanowanie laserowe, którego technologicznym rdzeniem jest LiDAR (ang. Light Detection and Ranging), to aktywna i teledetekcyjna technika pomiarowa, która mocno zmieniła sposób pozyskiwania precyzyjnych danych geometrycznych o obiektach i terenie.

Działanie techniki opiera się na emisji wiązki lasera i rejestracji jej odbicia od napotkanego obiektu. Poprzez precyzyjny pomiar kąta oraz odległości, urządzenie określa współrzędne milionów punktów na powierzchni konstrukcji z milimetrową dokładnością. Nowoczesne skanery wykorzystują do pomiaru odległości najczęściej dwie metody: czasu przelotu (ang. Time-of-Flight, ToF), mierzącą czas powrotu impulsu, oraz przesunięcia fazowego (ang. phase-shift), porównującą fazę fali wysłanej i odbitej. Oprócz współrzędnych 3D (XYZ) częstym wynikiem jest intensywność odbicia od danego elementu oraz jego barwa RGB, co pozwala łączyć odwzorowanie geometryczne z informacją wizualną. W praktyce skanowanie laserowe odpowiada na dwa kluczowe ograniczenia podejścia tradycyjnego z pkt 3.1.2: dostępność (umożliwiając zdalny, bezpieczny pomiar) oraz powtarzalność (dzięki kontrolowanym parametrom zbierania danych). Wzrost znaczenia tej technologii w nowoczesnej diagnostyce i monitoringu infrastruktury jest szeroko opisywany w literaturze [204, 240].

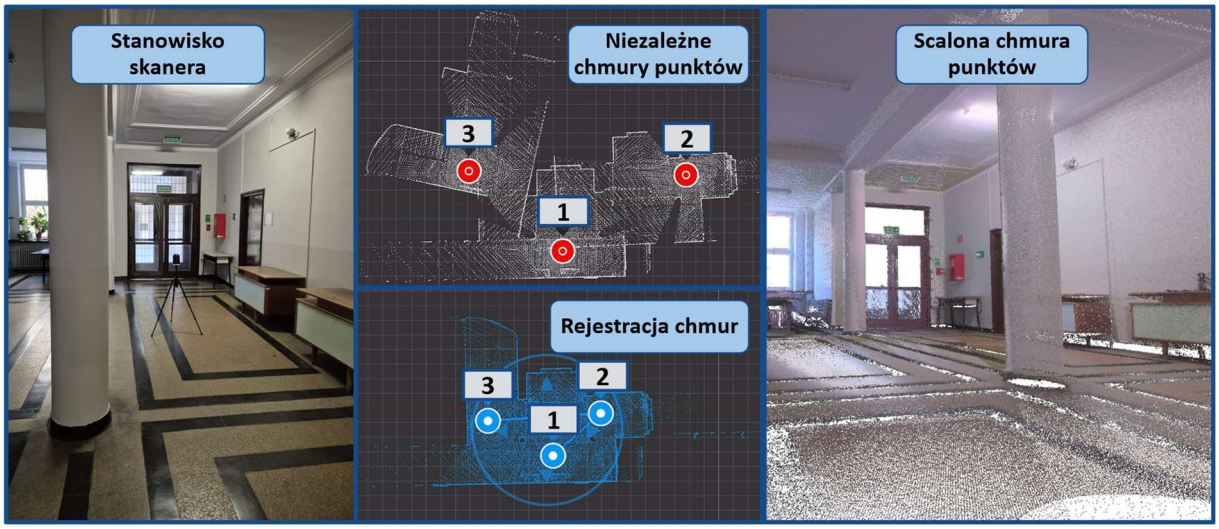
Technologia ta wywodzi się bezpośrednio z badań wojskowych i kosmicznych, gdzie LiDAR używany był do pomiaru odległości Ziemi od Księżyca. Jej pierwsze zastosowania w branży inżynierskiej, to geodezja, kartografia i pomiary geometrii. Dziś, w zależności od platformy wyróżnia się trzy główne grupy (Rys. 3-7):

- Naziemne skanowanie laserowe (ang. Terrestrial Laser Scanning, TLS) – stacjonarne jednostki na statywie, cechujące się najwyższą dokładnością, co czyni je podstawowym narzędziem w szczegółowych inspekcjach mostów [252].
- Mobilne skanowanie laserowe (ang. Mobile Laser Scanning, MLS) – montowane na ruchomych platformach (np. pojazdach), pozwalają m.in. na szybkie mapowanie korytarzy infrastrukturalnych, np. torowisk kolejowych [126].
- Lotnicze skanowanie laserowe (ang. Airborne Laser Scanning, ALS) – stosowane na samolotach lub dronach (UAV-LiDAR [37]), służą do pozyskiwania danych na dużych obszarach [208].



Rys. 3-7 Rodzaje skanowania laserowego

Bezpośrednim wynikiem pomiaru jest chmura punktów, czyli zbiór punktów o współrzędnych przestrzennych (X, Y, Z) oraz atrybutach (np. intensywność, RGB, czas rejestracji). Dane zapisuje się najczęściej w formatach LAS/LAZ, E57, PLY, XYZ i formatach producenckich. Z uwagi na ogromne objętości danych (dziesiątki, a nawet setki GB), kluczowe stają się metody ich redukcji [227]. Skuteczność skanowania zależy od starannego planowania kampanii pomiarowej w celu minimalizacji okluzji (tzw. cieni pomiarowych, czyli obszarów zasłoniętych z perspektywy skanera) [193] oraz stosowania wydajnych strategii, np. poprzez adaptacyjną zmianę rozdzielczości kątowej (lokalne zwiększenie gęstości siatki pomiarowej w strefach złożonej geometrii) [264]. Ponieważ pojedyncze stanowisko pomiarowe rzadko pozwala na zobrazowanie całego obiektu, w praktyce wykonuje się serię skanów z różnych pozycji. Kluczowym etapem obróbki jest połączenie tych indywidualnych chmur w jeden spójny system współrzędnych w procesie zwanym rejestracją. Proces ten opiera się na identyfikacji wspólnych, tożsamych punktów lub obszarów w nakładających się na siebie skanach. Może być realizowany z wykorzystaniem specjalnych punktów referencyjnych (tarcz lub sfer) [129] rozmieszczonych na obiekcie, lub w sposób automatyczny, za pomocą algorytmów dopasowujących do siebie geometrię chmur [37]. Po zebraniu i przetworzeniu danych, możliwa jest ich segmentacja, czyli automatyczny podział chmury na logiczne komponenty, często z wykorzystaniem metod uczenia maszynowego [89, 108]. W zależności od potrzeb chmury punktów mogą być georeferencjonowane [12, 178], czyli osadzone w układzie odniesienia powiązanym z rzeczywistym terenem, lub zlokalizowane w układzie lokalnym [12]. Georeferencja jest niezbędna, gdy model ma być integrowany z innymi danymi geoprzestrzennymi, natomiast układ lokalny jest wystarczający w przypadku analiz geometrycznych prowadzonych niezależnie od lokalizacji rzeczywistej. Na Rys. 3-8 przedstawiony został przykładowy proces skanowania laserowego i tworzenia chmury punktów wnętrza budynku.



Rys. 3-8 Przykładowy proces skanowania laserowego wnętrza budynku

Nadrzędnym celem przetwarzania chmury jest uzyskanie użytecznych danych geometrycznych skanowanych elementów. W praktyce wykorzystywanych zarówno w produktach 2D (rzuty, przekroje), jak i w modelach 3D w standardzie BIM (bryły parametryczne). Pomiar bezpośrednio na chmurze bywa czasochłonny i nieintuicyjny, co wpływa na rozwój badań nad narzędziami do automatycznej segmentacji i parametryzacji elementów (Scan-to-BIM) [257], a w dalszym kroku do budowy modeli gotowych do obliczeń (Scan-to-BIM-to-Sim) [69]. Proces ten stanowi kluczowy komponent w budowie cyfrowych bliźniaków [127], czyli koncepcji wielokrotnie przywoływanej w niniejszej rozprawie, która integruje dane geometryczne i sensoryczne w celu symulacji i optymalizacji utrzymania obiektu [53, 226, 265, 268].

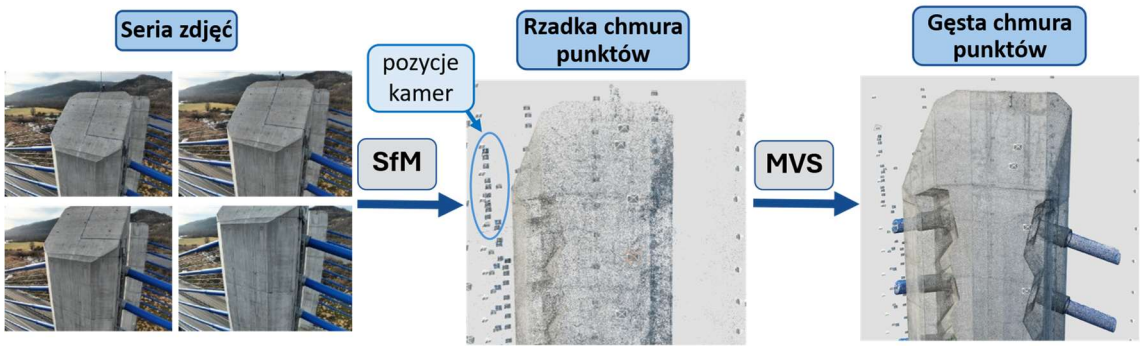
Zastosowania skanowania laserowego w diagnostyce mostów są wszechstronne. Technologia ta jest przede wszystkim nieocenionym narzędziem do inwentaryzowania obiektów istniejących, m.in. o skomplikowanej geometrii jak mosty łukowe [89] czy obiektów zabytkowych [130], gdzie może być integrowana np. z badaniami NDT, jak georadar (ang. ground-penetrating radar GPR) [186]. Służy również do kontroli jakości, geometrii elementów i zgodności z projektem na etapie budowy, jak np. przewidywania i kontroli ułożenia segmentów prefabrykowanych w mostach betonowych (wirtualny montaż wstępny) [140], czy weryfikacji ułożenia zbrojenia z pomocą rozszerzonej rzeczywistości (AR) [45]. Prowadzone są też szeroko zakrojone badania dotyczące analizy deformacji, zarówno podczas próbnych obciążeń [129, 146] jak i w monitoringu długoterminowym poprzez wykrywane subtelne zmiany w geometrii w czasie [116, 233]. Dane te stanowią również cenny wkład do modeli numerycznych, analizujących wpływ obciążeń dynamicznych na konstrukcję [280]. Skanowanie laserowe umożliwia identyfikację zarówno globalnych przemieszczeń, jak i lokalnych deformacji, np. spowodowanych uderzeniem pojazdu, co jest niezwykle trudne przy użyciu tradycyjnych technik. Badania koncentrują się również na wykrywaniu i kwantyfikacji uszkodzeń, takich jak ubytki betonu [119] czy korozja lin w mostach wantowych [267]. W detekcji zarysowań wykorzystuje się zaawansowane metody, jak ortorektyfikacja obrazów na podstawie danych z TLS oraz analiza intensywności odbicia lasera [247]. Skanowanie pozwala też na dokładną weryfikację skrajni pod obiektem [206] i na samym moście, np. w infrastrukturze kolejowej [126]. W celu uzyskania pełnego

modelu obiektu, w inspekcjach części podwodnych stosuje się sonary 3D, które umożliwiają rekonstrukcję fundamentów i ocenę rozmyć dna [90, 266].

Wyniki skanowania laserowego cechują się wysoką dokładnością, a dane pozyskane w ten sposób są obiektywne, odwzorowując wprost geometrię badanego obiektu. Do głównych ograniczeń metody należą jednak przede wszystkim okluzje, wrażliwości na właściwości skanowanej powierzchni (materiały błyszczące, mokre, ciemne) oraz w przypadku systemów mobilnych, drgania i jakość systemów nawigacji. W tym kontekście skanowanie laserowe często zestawia się z fotogrametrią [40, 73, 117]. Badania porównawcze [37, 206] wskazują na komplementarność obu technik, co zostanie szerzej omówione w dalszych częściach pracy. Choć istotnym wyzwaniem pozostają koszt sprzętu i obsługa dużych wolumenów danych, to dzięki upowszechnieniu skanerów oraz postępowi w zakresie technologii Big Data, trudności te są sukcesywnie redukowane [106, 195].

3.2.4 Fotogrametria

Fotogrametria, to technologia polegająca na odtwarzaniu trójwymiarowej geometrii obiektów na podstawie serii zdjęć. W przeciwieństwie do aktywnej techniki jaką jest skanowanie laserowe, jest to metoda pasywna, która analizuje obrazy w celu utworzenia metrycznej reprezentacji rzeczywistości. Jej rosnące znaczenie w zdalnych inspekcjach infrastruktury jest szeroko omawiane w literaturze [204]. Współczesną fotogrametrię, zwłaszcza realizowaną z niewielkiej odległości od obiektu, określa się mianem fotogrametrii niskopułapowej. Zebrane zdjęcia są przetwarzane w wyspecjalizowanym oprogramowaniu (np. Agisoft Metashape, RealityScan – dawniej RealityCapture, Pix4D. Oprogramowania fotogrametryczne opierają się na dwóch kluczowych, następujących po sobie algorytmach. Pierwszym jest Structure from Motion (SfM), który analizuje serię nachodzących na siebie zdjęć, automatycznie identyfikując na nich tysiące wspólnych punktów. Na podstawie przesunięcia tych punktów względem siebie na kolejnych fotografiach, algorytm jest w stanie jednocześnie odtworzyć pozycję i orientację aparatu w momencie wykonania każdego zdjęcia oraz obliczyć trójwymiarowe współrzędne tych wspólnych punktów, tworząc tzw. rzadką chmurę punktów. Następnie, algorytm Multi-View Stereo (MVS) wykorzystuje ustalone pozycje kamer do intensywnej analizy stereoskopowej wielu zdjęć, określa mapy głębokości zgodne z wieloma widokami, zagęszcza model i generuje gęstą chmurę punktów, która precyzyjnie odwzorowuje geometrię obiektu (Rys. 3-9). Na jej podstawie możliwe jest wygenerowanie siatki trójkątów z teksturą (model fotogrametryczny) oraz produktów 2D, takich jak ortomozaiki, czyli pojedynczy, duży obraz powstały ze złożenia wielu fotografii, z których każdą skorygowano geometrycznie (ortorektyfikacja), aby usunąć efekty perspektywy i pochylenia kamery oraz nadać wspólną skalę i układ współrzędnych. Wysokiej jakości tekstury (rzeczywiste obrazy nałożone na siatkę 3D) są jedną z największych zalet fotogrametrii, umożliwiając intuicyjną identyfikację wizualną uszkodzeń [1].



Rys. 3-9 Proces fotogrametryczny

Jakość końcowego modelu fotogrametrycznego jest nierozerwalnie związana z jakością i sposobem wykonania zdjęć. Kluczowe jest tu zapewnienie odpowiedniego pokrycia kolejnych zdjęć (ang. overlap) [245, 254]. Zazwyczaj powinno ono wynosić ok. 70-80%, aby algorytmy SfM mogły stabilnie powiązać ze sobą obrazy. Równie ważna jest zmiana pozycji aparatu, a nie tylko jego kąta. Ujęcia muszą być wykonywane z różnych miejsc, aby uzyskać informację o głębi i uniknąć błędów rekonstrukcji. Zdjęcia mogą być wykonywane różnymi urządzeniami, natomiast najwyższą jakość zapewniają BSP z wbudowanymi odbiornikami GNSS czy RTK (ang. Real-Time Kinematic), co pozwala osadzić fotografie w przestrzeni i ułatwia georeferencję. Należy podkreślić, że choć „zrobić zdjęcia" można niemal dowolnym narzędziem, jakość optyki, rozdzielczość matrycy i precyzja geolokalizacji bezpośrednio wpływają na dokładność ostatecznego modelu [60]. W procesie tym często wykorzystuje się automatycznie wykrywane markery referencyjne (ang. Ground Control Point, GCP) umieszczone na obiekcie w celu skalowania, kontroli i walidacji modelu [1, 63].

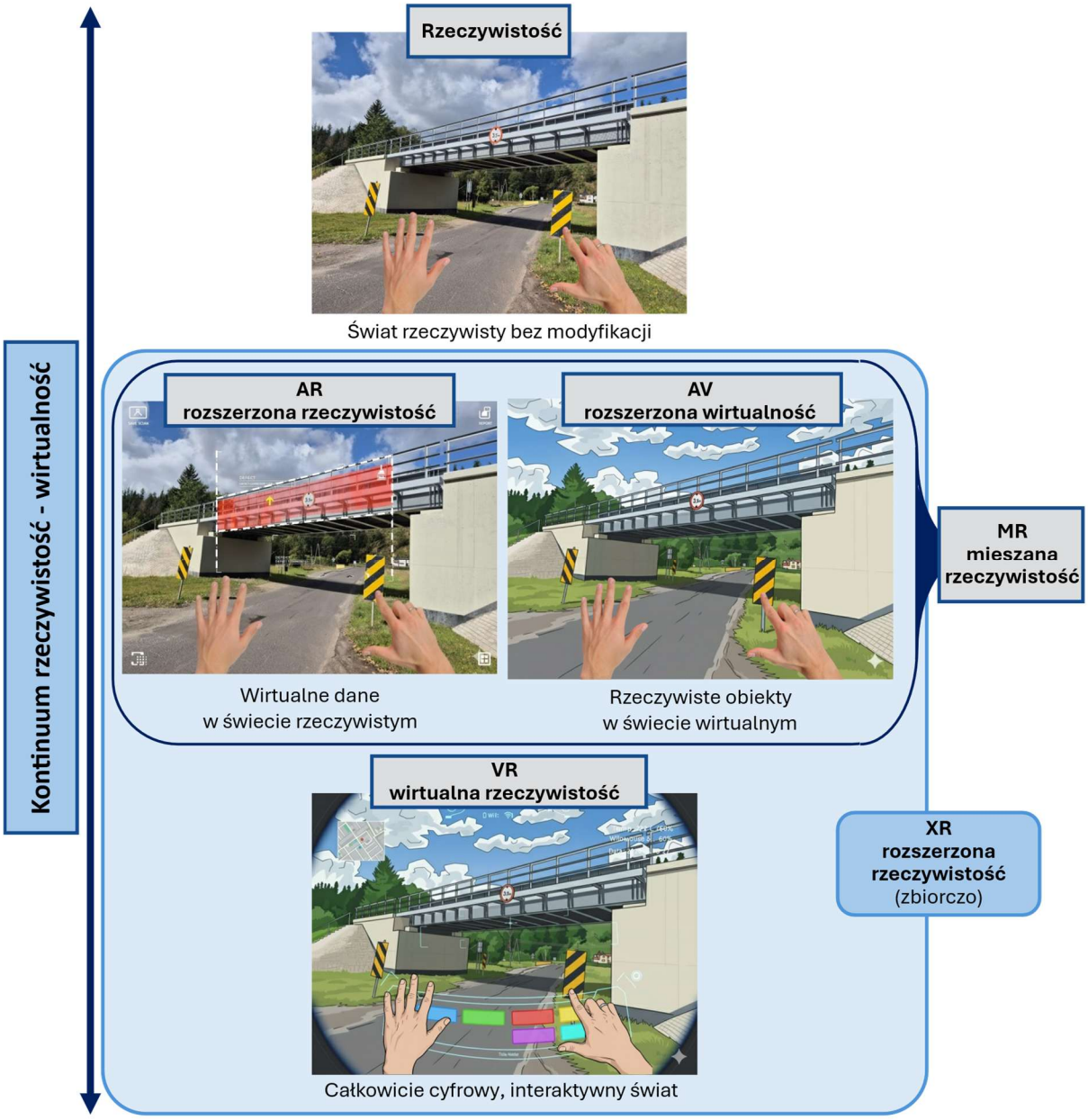
Fotogrametria, zwłaszcza z wykorzystaniem BSP, jest wszechstronnym narzędziem do tworzenia szczegółowych, trójwymiarowych modeli mostów [207]. Zakres zastosowań jest zbliżony do opisanego w poprzednim podrozdziale skanowania laserowego, przy czym główną różnicę stanowi możliwość nałożenia fotorealistycznej tekstury, która wspiera wizualną ocenę stanu technicznego [40] i ułatwia identyfikację uszkodzeń, takich jak spękania czy zawilgocenia [117]. Metoda ta znajduje zastosowanie także w przypadku obiektów zabytkowych [181]. Dane obrazowe stanowią również podstawę dla automatycznej detekcji i kwantyfikacji uszkodzeń z wykorzystaniem algorytmów uczenia maszynowego [18] oraz zaawansowanych metod, takich jak obiektowa analiza obrazu [281].

Jak wspomniano wcześniej, fotogrametria i skanowanie laserowe są technikami komplementarnymi. Największą zaletą fotogrametrii jest efektywność kosztowa, zwłaszcza przy wykorzystaniu niedrogich systemów BSP [188]. Do jej atutów należą również elastyczność i szybkość pozyskiwania danych oraz tworzenie fotorealistycznych modeli, które mogą być wykorzystywane m.in. do zaawansowanej wizualizacji w środowisku wirtualnej rzeczywistości (VR) [268], przy czym kluczowe jest zapewnienie wysokiej wierności wizualnej [125]. Dodatkowo, fotogrametria może dostarczać danych topograficznych o otoczeniu mostu, wspierając ocenę ryzyka [80], co jest rozwinięciem jej szerszego zastosowania do mapowania terenu. Metoda sprawdza się również w scenariuszach awaryjnych, gdzie po optymalizacji parametrów pozwala szybko ocenić uszkodzenia [73]. Głównymi ograniczeniami pozostają zależność od warunków oświetleniowych i potencjalnie niższa dokładność geometryczna w porównaniu do skanowania laserowego, dlatego obie techniki często są ze sobą integrowane [40, 73, 117].

3.2.5 Rzeczywistość wirtualna, rozszerzona i mieszana

Technologie omówione w poprzednich podrozdziałach koncentrowały się na tworzeniu cyfrowych reprezentacji obiektów mostowych. Niniejszy podrozdział skupia się na metodach zaawansowanej interakcji z tymi modelami. Technologie te, zbiorczo określane jako rzeczywistość rozszerzona (ang. Extended Reality, XR) [224], wywodzą się z branży gier komputerowych [203], wojskowości [50] i medycyny [168], a obecnie znajdują coraz szersze zastosowanie również w przemyśle motoryzacyjnym [48], edukacji [61], rolnictwie [13], turystyce [135] oraz handlu [241].

Koncepcję tę najlepiej opisuje kontinuum rzeczywistość-wirtualność (ang. Reality-Virtuality Continuum, RVC) [36, 72, 161], które klasyfikuje technologie w zależności od stopnia, w jakim cyfrowe treści zastępują percepcję świata realnego (Rys. 3-10).



Rys. 3-10 Kontinuum rzeczywistość-wirtualność

Na jednym krańcu kontinuum znajduje się środowisko rzeczywiste, a na drugim w pełni cyfrowe środowisko wirtualne, pomiędzy nimi leżą technologie pośrednie. Poniżej przedstawiono opis poszczególnych terminów:

- Rozszerzona (lub poszerzona) rzeczywistość (ang. Augmented Reality, AR) – nakłada generowane komputerowo obrazy na obraz świata rzeczywistego. Użytkownik widzi realne otoczenie wzbogacone o cyfrowe informacje [54].
- Rozszerzona (lub poszerzona) wirtualność (ang. Augmented Virtuality, AV) – użytkownik zanurzony jest w środowisku wirtualnym, ale wprowadzane są do niego obiekty ze świata realnego (np. obraz rąk operatora) [101].
- Mieszana rzeczywistość (ang. Mixed Reality, MR) – jest to szeroka kategoria obejmująca wszystkie technologie, które w pewnym stopniu łączą świat realny i wirtualny, jej kluczową cechą jest to, że obiekty cyfrowe i fizyczne nie tylko współistnieją, ale są ze sobą powiązane i mogą na siebie wzajemnie oddziaływać w czasie rzeczywistym [156].
- Wirtualna rzeczywistość (ang. Virtual Reality, VR) – całkowicie zastępuje percepcję świata realnego cyfrowym, w pełni immersyjnym środowiskiem. Użytkownik jest odizolowany od otoczenia i zanurzony w wirtualnej przestrzeni [268].

Należy podkreślić, że w polskiej terminologii nazwa "rzeczywistość rozszerzona" jest zarówno bezpośrednim tłumaczeniem terminu ang. Augmented Reality (AR), jak i terminu ang. Extended Reality (XR). Dla zachowania klarowności i uniknięcia niejednoznaczności, w dalszej części pracy używane będą wyłącznie międzynarodowe skróty dla poszczególnych technik (XR, AR, AV, MR, VR). Interakcja z modelami cyfrowymi w ramach XR realizowana jest za pomocą różnorodnych urządzeń, różniących się sposobem łączenia świata realnego z wirtualnym [224]. Można je podzielić na trzy główne, opisane niżej kategorie sprzętowe.

Pierwszą kategorię stanowią urządzenia oparte na wyświetlaczach nieprzeziernych charakterystycznych dla VR. Są to głównie gogle typu HMD (ang. head-mounted display), które całkowicie izolują użytkownika od otoczenia, zastępując jego pole widzenia renderowaną sceną. Działają one w dwóch podstawowych trybach. W trybie autonomicznym (np. Meta Quest) gogle wykorzystują własny, wbudowany procesor. Zapewnia to pełną swobodę ruchów, jednak ich ograniczona moc obliczeniowa stanowi wyzwanie przy przetwarzaniu złożonych modeli. Dlatego w zastosowaniach profesjonalnych kluczowe jest ich funkcjonowanie trybie połączenia z PC, w którym gogle (np. HTC Vive, czy te same Meta Quest w innym trybie) działają jako zaawansowany wyświetlacz, a wszystkie obliczenia wykonuje wydajna stacja robocza. Rzadziej wykorzystuje się również smartfony jako ekran i procesor (np. Samsung Gear VR [175, 176]).

Drugą kategorię tworzą urządzenia optycznie przezierne (ang. optical see-through, OST) [180], typowe dla MR i AR. Wykorzystują one specjalne przezroczyste wyświetlacze, na które rzutowany jest obraz cyfrowy, co pozwala na jego integrację z niezakłóconym widokiem świata rzeczywistego. Czołowym przykładem takiego rozwiązania są samodzielne gogle holograficzne, jak Microsoft HoloLens, wyposażone we własne procesory i systemy kamer do skanowania otoczenia [10].

Trzecią, najbardziej uniwersalną kategorią, są urządzenia oparte na wizyjnym trybie przeziernym (ang. video see-through, VST). Technologia ta polega na przechwyceniu obrazu z wbudowanej kamery,

nałożeniu na niego grafiki 3D i wyświetleniu całości na nieprzeziernym ekranie. Jest to podstawa działania AR i MR na smartfonach i tabletach [278]. Ta sama zasada jest również wykorzystywana w nowoczesnych goglach hybrydowych (np. Meta Quest 3), które dzięki wysokiej jakości kamerom zewnętrznym mogą płynnie przełączać się między trybem pełnej wirtualizacji (VR) a trybem mieszanym (MR), w którym cyfrowe obiekty łączą się ze światem widzianym przez kamerę [224]. Przykładowy widok tych trybów w goglach Meta Quest 3 pokazano na Rys. 3-11.



Rys. 3-11 Widok mieszanej (po lewej) i wirtualnej rzeczywistości (po prawej) w goglach Meta Quest 3

Zastosowanie technologii XR w inżynierii lądowej, a w szczególności w mostownictwie, stanowi dynamicznie rozwijającą się dziedzinę, która ma na celu transformację tradycyjnych metod i wsparcie inżyniera w codziennej pracy. Jak wskazuje przegląd literatury, zastosowania te można podzielić na kilka kluczowych grup tematycznych, które odpowiadają na różne potrzeby na poszczególnych etapach cyklu życia obiektu [38]. Obejmują one zdalną inspekcję i narady w środowisku wirtualnym, wsparcie dla inspektora pracującego w terenie oraz integrację z innymi procesami i technologiami.

Pierwsza grupa zastosowań koncentruje się na przeniesieniu procesu inspekcji z mostu do biura, co może znacząco podnieść bezpieczeństwo, zredukować koszty i wyeliminować wiele ograniczeń logistycznych [176]. W tym modelu, inżynierowie wykorzystują VR [175] oraz MR [49] do nawigacji po trójwymiarowych modelach cyfrowych. W immersyjnym środowisku wirtualnym możliwa jest szczegółowa analiza danych o moście [221, 245], czy wizualizacja wyników z systemów monitoringu konstrukcji (ang. SHM) [70, 151]. Nowsze prace integrują z kolei wyniki automatycznej detekcji rys z cyfrowym modelem, aby upraszczać przeglądy i podejmowanie decyzji [268]. Jakość wizualna modeli fotogrametrycznych ma tu kluczowe znaczenie Rozwijane są ramy oceny wierności wizualnej tak, aby pomiary i wnioski formułowane w VR były wiarygodne [125]. Co więcej, technologia VR otwiera drogę do efektywnej, zdalnej współpracy wieloosobowych zespołów, które mogą wspólnie analizować model i podejmować decyzje w czasie rzeczywistym, niezależnie od swojej fizycznej lokalizacji [165]. Technika VR może znaleźć również zastosowanie do trenowania inspektorów mostowych w bezpiecznych, wirtualnych warunkach [248, 256].

Druga grupa tematyczna skupia się na wykorzystaniu AR i MR do wzmacniania percepcji i efektywności inspektora bezpośrednio w terenie. Podstawowa funkcjonalność polega na nakładaniu cyfrowych warstw informacyjnych na obraz rzeczywistego obiektu [157, 166]. Najczęstszym zastosowaniem jest integracja z modelem BIM, co pozwala na wyświetlanie w czasie rzeczywistym danych o elementach konstrukcyjnych, historii uszkodzeń czy zaplanowanych pracach konserwacyjnych [54, 111]. Testowane są również dedykowane aplikacje MR, które mają na celu ułatwienie lokalizacji

uszkodzeń i planowanie napraw [156, 183, 269]. Technika AR jest badana również jako wsparcie dla etapów budowy nowych obiektów, np. do monitorowania i kontroli precyzji wierceń [7] czy inspekcji ukrytego zbrojenia w połączeniu z danymi ze skanowania laserowego [45].

Trzecia grupa zastosowań dotyczy integracji XR z innymi technologiami i procesami. Technologie immersyjne stają się interfejsem do współpracy człowieka z maszyną, umożliwiając intuicyjne sterowanie robotami inspekcyjnymi w bezpiecznych warunkach i analizę zbieranych przez nie danych w czasie rzeczywistym [11, 82]. Potencjał ten jest dodatkowo wzmacniany przez połączenie z algorytmami sztucznej inteligencji. W badaniach rozwijane są systemy mogące w czasie rzeczywistym identyfikować uszkodzenia na obrazie z kamery, a wyniki ich pracy są natychmiast wizualizowane dla inspektora w środowisku AR [113, 258, 269].

Mimo ogromnego potencjału, technologie XR wciąż napotykają na szereg wyzwań natury sprzętowej, środowiskowej i systemowej. Jak wskazują autorzy w różnych pozycjach literaturowych, główne problemy to integracja różnorodnych danych, jakość interakcji z modelem oraz ograniczenia sprzętowe, takie jak wysoki koszt, krótki czas pracy na baterii, a także kwestie ergonomiczne, w tym ograniczone pole widzenia [10, 38, 224].

Szczególnym wyzwaniem dla AR i MR jest praca w terenie. Jak szczegółowo opisują autorzy [157], problemem jest przede wszystkim praca w jasnym świetle słonecznym. Wyświetlacze w goglach działają na zasadzie dodawania światła, co sprawia, że w słoneczny dzień generowane hologramy stają się trudne do zauważenia. Co więcej, systemy pomiaru głębi, kluczowe dla osadzenia hologramów w przestrzeni, również zawodzą w takich warunkach. Zarówno starsze metody oparte na świetle strukturalnym, jak i nowsze sensory ToF, operują w paśmie podczerwieni. Intensywne promieniowanie podczerwone pochodzące od słońca zakłóca ich działanie, prowadząc do znacznego pogorszenia lub całkowitej utraty zdolności skanowania otoczenia [157].

Kolejną istotną barierą jest dokładność i rozdzielczość pomiarowa. Obecnie komercyjnie dostępne gogle MR są w stanie rejestrować geometrię otoczenia z dokładnością rzędu kilku centymetrów, co jest niewystarczające do precyzyjnych pomiarów wielu typów uszkodzeń, gdzie wymagana jest nawet milimetrowa dokładność [157]. Dochodzą do tego problemy z obsługą dużych plików czy dokładnością cyfrowych modeli [10]. W efekcie wszystkich wymienionych tu wyzwań, AR i MR obecnie częściej funkcjonują w warunkach laboratoryjnych lub szkoleniowych, aniżeli w pełni profesjonalnych inspekcjach terenowych [38, 157]. Mimo to, rozwój tej dziedziny jest niezwykle dynamiczny i jak wskazują autorzy [11, 38, 157, 166, 221], technologie te będą odgrywać coraz większą rolę również w inspekcjach stanu technicznego.

3.2.6 Techniki badań nieniszczących

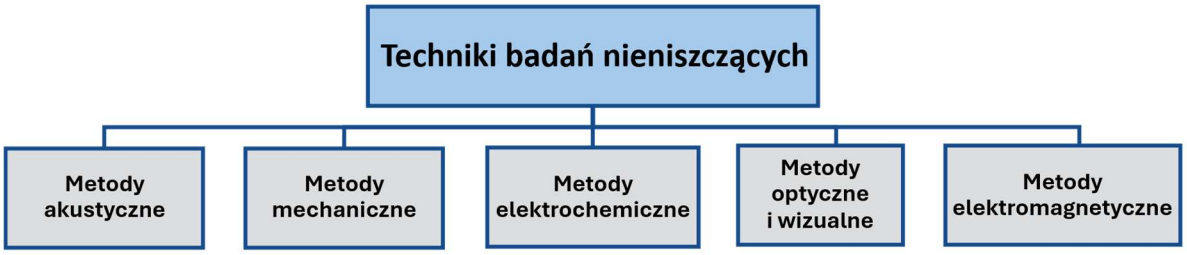
Techniki badań nieniszczących (ang. non-destructive testing, NDT) stanowią zbiór metod diagnostycznych umożliwiających ocenę właściwości materiałów oraz wykrywanie ich wewnętrznych nieciągłości bez naruszania integralności konstrukcji. Choć wiele z tych metod znanych jest od dziesięcioleci, to rozwój technologii cyfrowych, miniaturyzacja sensorów oraz pojawienie się nowych algorytmów przetwarzania danych sprawiły, że ich potencjał w diagnostyce obiektów mostowych jest obecnie odkrywany na nowo.

Pomimo dynamicznego postępu w tej dziedzinie, w praktyce inżynierskiej wykorzystuje się jedynie ograniczony zestaw technik. Stopniowe wdrażanie nowoczesnych metod NDT jest w dużej mierze wynikiem przenoszenia doświadczeń i rozwiązań z innych obszarów inżynierii lądowej, przemysłu materiałowego, a nawet medycyny. W warunkach krajowych techniki te dopiero zyskują praktyczne zastosowanie, a ich potencjał pozostaje w dużej mierze niewykorzystany. Co więcej, nawet w skali międzynarodowej, zastosowanie części zaawansowanych metod NDT często ogranicza się do projektów badawczych lub diagnostyki największych obiektów.

Niniejszy podrozdział koncentruje się przede wszystkim na technikach NDT stosowanych w diagnostyce konstrukcji betonowych, które stanowią obecnie najczęściej analizowaną grupę w badaniach z zakresu mostownictwa. Wspomniane zostaną również wybrane metody dedykowane konstrukcjom stalowym, wykorzystywane głównie do oceny połączeń spawanych i stopnia korozji elementów. W zakończeniu przedstawiono najbardziej innowacyjne kierunki rozwoju badań nieniszczących, obejmujące integrację różnych technik NDT oraz ich powiązanie z innymi technologiami cyfrowymi, w tym także ze zrobotyzowanymi platformami mobilnymi i systemami przetwarzania danych.

W diagnostyce konstrukcji betonowych i żelbetowych, metody NDT dzieli się zazwyczaj na pięć podstawowych grup opartych na zjawiskach fizycznych [26, 65] co przedstawiono na Rys. 3-12.

- Metody akustyczne – polegają na analizie propagacji fal sprężystych w materiale w celu oceny jego wewnętrznej struktury i jednorodności [219].
- Metody mechaniczne – wykorzystują oddziaływanie sił mechanicznych (np. uderzenia, docisku) na powierzchnię betonu do oceny jego twardości, jednorodności oraz pośredniego oszacowania wytrzymałości na ściskanie [197].
- Metody elektrochemiczne – opierają się na pomiarze potencjałów elektrycznych i rezystancji w celu oceny stopnia aktywności korozyjnej stali zbrojeniowej [62].
- Metody optyczne i wizualne – obejmują techniki rejestracji obrazu i pomiaru przemieszczeń powierzchniowych, które umożliwiają detekcję i analizę zarysowań oraz odkształceń konstrukcji [76].
- Metody elektromagnetyczne – wykorzystują fale elektromagnetyczne do obrazowania struktury i identyfikacji jej wewnętrznych anomalii oraz geometrii [132].



Rys. 3-12 Rodzaje badań NDT konstrukcji betonowych

Metody akustyczne należą do najstarszych i najczęściej stosowanych technik badań nieniszczących betonu. Umożliwiają ocenę jego wewnętrznej struktury, wykrywanie rys i pustek, a także określanie jednorodności i stopnia degradacji materiału [91]. Zasadniczo dzielą się one na metody transmisyjne, w których sygnał przechodzi przez cały element między nadajnikiem

a odbiornikiem, oraz metody odbiciowe (refleksyjne), w których fala jest odbijana od granic ośrodków lub nieciągłości wewnętrznych. Do najbardziej rozpowszechnionych technik należą techniki aktywne, tj. ultradźwiękowa metoda pomiaru prędkości fali (ang. Ultrasonic Pulse Velocity, UPV), stosowana do oceny jednorodności i pośredniego szacowania wytrzymałości betonu [197] oraz metoda echa impulsowego (ang. Pulse-Echo) [102], pozwalająca na lokalizację defektów bez dostępu do przeciwległej powierzchni elementu. Przekładem techniki pasywnej jest emisja akustyczna (ang. Acoustic Emission, AE) [76], rejestrująca w czasie rzeczywistym fale generowane przez procesy mikro spękania w materiale, co pozwala na wczesne wykrycie uszkodzeń.

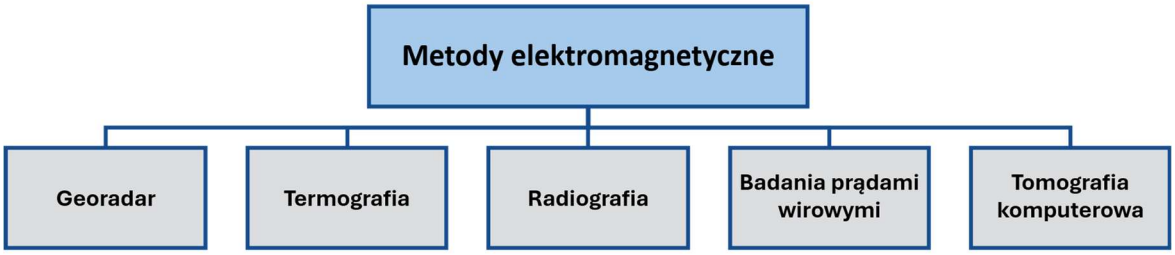
Metody mechaniczne, w przeciwieństwie do akustycznych, koncentrują się na ocenie właściwości powierzchniowych betonu. Najczęściej wykorzystuje się je do szacowania jego wytrzymałości na ściskanie, twardości oraz jednorodności. Powszechnie stosowanym narzędziem jest sklerometr, zwany młotkiem Schmidta, w którym na podstawie wysokości odbicia bijaka od powierzchni betonu określa się jego twardość, a pośrednio także wytrzymałość [197, 249]. Metody te, mimo że charakteryzują się ograniczoną dokładnością i dużą zależnością od warunków powierzchniowych, są szybkie i łatwe w użyciu. Z tego względu należą do najczęściej wykonywanych badań NDT w diagnostyce obiektów mostowych, zwłaszcza jako badania uzupełniające wstępne inspekcje wizualne.

Metody elektrochemiczne umożliwiają ocenę stanu zbrojenia w konstrukcjach żelbetowych oraz ryzyka jego korozji. Opierają się na pomiarach potencjałów elektrycznych lub oporu właściwego betonu, co pozwala na określenie warunków sprzyjających procesom korozyjnym. Najczęściej stosowaną techniką jest pomiar potencjału półogniwa [62], pozwalający na identyfikację obszarów, w których proces korozji prawdopodobnie już występuje. Uzupełnieniem są metody oparte na pomiarze rezystywności betonu, które dostarczają informacji o stopniu nasycenia wilgocią i zawartości jonów chlorkowych, a tym samym o podatności konstrukcji na korozję [122].

Metody optyczne i wizualne obejmują zarówno tradycyjne inspekcje, jak i zaawansowane techniki obrazowania oraz monitorowania deformacji. Wykorzystują zjawiska optyczne do detekcji i analizy uszkodzeń powierzchniowych, takich jak rysy, ubytki, korozja czy przebarwienia. Nowoczesne systemy umożliwiają również ciągły monitoring odkształceń w czasie rzeczywistym. Jednym z przykładów jest cyfrowa korelacja obrazu (ang. Digital Image Correlation, DIC) [76], która pozwala na analizę przemieszczeń powierzchniowych na podstawie porównania serii zdjęć. Innym innowacyjnym rozwiązaniem są światłowodowe czujniki optyczne, które umożliwiają precyzyjny pomiar odkształceń, temperatury i naprężeń z bardzo wysoką częstotliwością próbkowania [62].

Metody elektromagnetyczne stanowią jedną z kluczowych grup badań nieniszczących stosowanych w diagnostyce elementów betonowych, są również coraz częściej używane zarówno w badaniach, jak i w praktyce mostowej. Oparte są na wykorzystaniu zjawisk związanych z emisją, propagacją lub odbiciem fal elektromagnetycznych w materiale, co pozwala na identyfikację anomalii geometrycznych, pustek, zbrojenia, korozji czy zawilgocenia. Do podstawowych technik należą przedstawione na Rys. 3-13: georadar (GPR) [132], termografia w podczerwieni (ang. infrared thermography, IRT) [162], radiografia [76], badania prądami wirowymi [62] oraz tomografia komputerowa [62]. Spośród nich GPR i termografia, ze względu na swoją efektywność, zyskują

największą popularność, przy czym w polskiej praktyce mostowej ich zastosowanie wciąż w dużej mierze ogranicza się do sfery badawczej i projektów pilotażowych.



Rys. 3-13 Rodzaje badań elektromagnetycznych konstrukcji betonowych

Georadar (GPR) jest jedną z najpowszechniej stosowanych metod elektromagnetycznych w diagnostyce konstrukcji betonowych i żelbetowych [26]. Jego działanie opiera się na emisji krótkich impulsów elektromagnetycznych i rejestracji fal odbitych od granic materiałów o różnej przenikalności dielektrycznej, takich jak granica między betonem a stalą, powietrzem czy wodą. Analiza czasu propagacji i amplitudy odbitych sygnałów pozwala na stworzenie obrazu przekroju konstrukcji [132]. W diagnostyce mostów technika ta pozwala na szybkie i nieinwazyjne skanowanie dużych powierzchni m.in. w celu lokalizacji zbrojenia i kabli sprężających, oceny grubości otuliny i warstw konstrukcyjnych [219] oraz identyfikacji wewnętrznych nieciągłości [128, 187]. Metoda ta jest stosowana również w ocenie stanu konstrukcji historycznych [52, 133, 186, 280]. Należy jednak podkreślić, że interpretacja wyników pomiaru (tzw. radarogramów) jest złożona i wymaga dużej wiedzy eksperckiej, aby prawidłowo odróżnić sygnał pochodzący od zbrojenia od anomalii wskazującej na wadę materiałową [154].

Termografia (IRT) jest metodą polegającą na analizie rozkładu temperatury promieniowania podczerwonego emitowanego przez powierzchnię konstrukcji. Technika ta nie mierzy bezpośrednio uszkodzeń, lecz anomalie termiczne, które te uszkodzenia powodują. Wady takie jak nieciągłości powierzchniowe i pustki podpowierzchniowe działają jak izolator termiczny, co sprawia, że w trakcie nagrzewania przez słońce obszary te nagrzewają się szybciej. Z kolei zawilgocenie betonu zmienia jego bezwładność cieplną, taki obszar będzie nagrzewał się i stygł wolniej niż suchy beton [31]. Termografia może być realizowana w trybie pasywnym, opartym na naturalnych zmianach temperatury lub aktywnym, w którym stosuje się sztuczne nagrzewanie badanej powierzchni [162]. Metoda ta znajduje zastosowanie w szybkiej identyfikacji odspojeń w betonowych płytach pomostowych [67, 174] oraz w wykrywaniu pęknięć zmęczeniowych w stalowych pomostach ortotropowych [121, 232]. W ostatnich latach metoda ta jest coraz częściej integrowana ze zrobotyzowanymi platformami mobilnymi, zarówno naziemnymi [232], jak i powietrznymi [31]. Jej ograniczeniem pozostaje silna zależność od warunków, które mogą znacząco wpływać na rozkład temperatur powierzchniowych i interpretację wyników.

Techniki NDT stanowią jeden z filarów nowoczesnej diagnostyki obiektów mostowych, umożliwiając ocenę stanu materiałów bez ingerencji w ich strukturę. W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania tymi metodami w kontekście ich cyfrowej transformacji oraz integracji z innymi technologiami. Miniaturyzacja czujników i rozwój systemów komunikacji bezprzewodowej pozwalają na ich coraz szersze wykorzystanie w połączeniu z platformami mobilnymi [137, 232, 250].

Takie rozwiązania sprzyjają automatyzacji procesu pomiarowego, zwiększając bezpieczeństwo inspektorów i umożliwiając dostęp do trudno osiągalnych elementów konstrukcji. Równolegle rozwijane są koncepcje integracji wyników badań NDT z modelami BIM, które pozwalają na ich przestrzenne odwzorowanie i archiwizację w cyfrowych bazach danych [196].

Mimo tych postępów, pełna automatyzacja interpretacji danych pozostaje wyzwaniem. Jak podkreślają liczni autorzy [91, 162], skuteczność metod NDT w wielu przypadkach nadal zależy w dużym stopniu od konkretnego eksperta, który osobiście interpretuje wyniki pomiarowe, do czego potrzebne jest intensywne szkolenie i duże doświadczenie. Warto jednak zauważyć, że skuteczność poszczególnych technik NDT, zwłaszcza elektromagnetycznych, w diagnostyce obiektów mostowych bywa ograniczona z przyczyn fizycznych. Konstrukcje mostowe charakteryzują się masywnymi przekrojami betonowymi, dużą grubością otuliny oraz gęstym zbrojeniem o znacznych średnicach, które tworzą niemal ciągłą barierę dla fal elektromagnetycznych. W efekcie następuje silne tłumienie i rozpraszanie sygnału, co znacząco utrudnia analizę głębszych partii przekroju i lokalizację cięgien sprężających. W takich przypadkach techniki te sprawdzają się przede wszystkim jako narzędzia uzupełniające, użyteczne przy ocenie stref przypowierzchniowych, ale niewystarczające jako samodzielne źródło danych diagnostycznych. W ostatnim okresie rośnie liczba badań nad łączonym wykorzystaniem różnych technik NDT (np. IRT oraz GPR), co pozwala kompensować ograniczenia pojedynczych metod [234]. Rozwój badań nieniszczących zmierza zatem w kierunku ich większej integracji, automatyzacji i cyfryzacji, umożliwiając łączenie danych pomiarowych z ich analizą i wizualizacją w jednym środowisku. Może to prowadzić do uzyskania bardziej kompletnych, wielowymiarowych danych diagnostycznych, stanowiących podstawę do bardziej rzetelnej i obiektywnej oceny stanu technicznego konstrukcji mostowych.

3.2.7 Monitoring sensoryczny

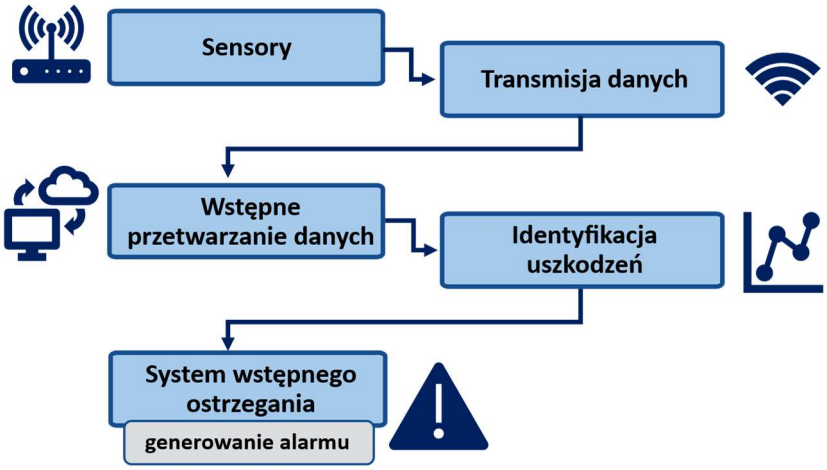
Większość omówionych dotychczas metod, takich jak robotyka, skanowanie laserowe, fotogrametria czy NDT, dostarcza informacji o stanie obiektu w konkretnym momencie, stanowiąc chwilowy zapis jego kondycji. Rodzi to naturalne pytanie o możliwość ciągłej obserwacji zmian w czasie. Odpowiedzią na tę potrzebę jest monitoring sensoryczny (ang. Structural Health Monitoring, SHM).

System SHM, to zautomatyzowany proces ciągłego zbierania i analizy danych z sieci sensorów zainstalowanych na stałe na konstrukcji, mający na celu ocenę jej stanu technicznego w czasie zbliżonym do rzeczywistego. W przeciwieństwie do subiektywnej inspekcji wizualnej, SHM dostarcza obiektywnych, ilościowych danych o zachowaniu obiektu pomiędzy planowanymi inspekcjami [3]. Jak wskazują prace przeglądowe [228, 275], typowy system SHM składa się z pięciu głównych komponentów (Rys. 3-14):

- Systemu sensorycznego, czyli sieci czujników (np. akcelerometrów, tensometrów, światłowodów) rozmieszczonych w wybranych punktach konstrukcji w celu zbierania danych.
- Systemu transmisji danych, który odpowiada za odczyt sygnałów z sensorów i ich przesłanie (coraz częściej bezprzewodowo) do centralnej jednostki.
- Modułu wstępnego przetwarzania danych (ang. preprocessing), gdzie surowe dane są czyszczone z szumów, uzupełniane i normalizowane.

- Systemu analizy i identyfikacji uszkodzeń, w którym za pomocą zaawansowanych algorytmów przetworzone dane są analizowane w poszukiwaniu anomalii.
- Systemu wczesnego ostrzegania, który na podstawie wyników analizy generuje alarmy o zagrożeniach, zarówno tych wynikających z degradacji konstrukcji, jak i nagłych katastrof.

Nowoczesne systemy SHM często opierają się na skalowalnych platformach chmurowych, które umożliwiają zdalne zarządzanie i analizę ogromnych zbiorów danych [106].



Rys. 3-14 Schemat typowej architektury systemu SHM

W kontekście niniejszej rozprawy, SHM odgrywa bardzo istotną rolę, ponieważ dostarcza dużej ilości danych, które w sposób ciągły i automatyczny zasilają cyfrowego bliźniaka mostu [110], wspierając automatyczną ocenę ryzyka, predykcję uszkodzeń i planowanie działań utrzymaniowych. Integracja danych z SHM z modelami BIM pozwala na precyzyjną, przestrzenną lokalizację wyników pomiarów w kontekście całej konstrukcji [27]. Dane z sensorów mogą być również wizualizowane w środowiskach immersyjnych, będąc istotnym komponentem wirtualnego systemu inspekcyjnego [70, 151].

Analiza danych z SHM jest skomplikowana z uwagi na wpływ czynników środowiskowych i operacyjnych, które mogą maskować sygnały świadczące o uszkodzeniu [275]. Dlatego coraz częściej do analizy tych złożonych sygnałów wykorzystuje się sztuczną inteligencję. Metody oparte na głębokim uczeniu pozwalają na automatyczne wykrywanie subtelnych anomalii w danych, które mogą świadczyć o uszkodzeniu lub awarii samego czujnika [16, 150]. Oprócz analizy danych z tradycyjnych czujników, rozwija się również wizja komputerowa jako forma SHM, służąca do bezkontaktowego pomiaru przemieszczeń i detekcji uszkodzeń powierzchniowych [155]. Kluczowe dla modeli analitycznych są również precyzyjne dane o obciążeniach, które mogą być dostarczane np. przez systemy ważenia pojazdów w ruchu oparte na uczeniu maszynowym [189].

Należy podkreślić, że SHM nie zastępuje tradycyjnych inspekcji, lecz stanowi ich istotne uzupełnienie [3]. Jego główną rolą jest ciągłe monitorowanie stanu obiektu pomiędzy przeglądami oraz dostarczanie danych, które pozwalają na wczesne wykrywanie niepokojących zmian i ukierunkowanie bardziej szczegółowych badań w konkretne, podejrzane miejsca. Pełen potencjał SHM jest uwalniany w połączeniu z cyfrowymi bliźniakami i zaawansowaną analityką [275].

Mimo tego potencjału, wdrożenie i efektywne wykorzystanie systemów SHM napotyka na szereg istotnych wyzwań. Kluczowym problemem jest złożoność interpretacji ogromnych zbiorów danych i potrzeba automatyzacji ich analizy [106]. Na wiarygodność wyników istotny wpływ mają także zmienne warunki środowiskowe, które mogą wprowadzać zakłócenia do odczytów z czujników [228]. Dodatkową barierą pozostają wysokie koszty instalacji i utrzymania rozbudowanych sieci sensorów [3]. Istotnym ograniczeniem pozostaje również brak interoperacyjności i standaryzacji danych. Różnorodność urządzeń pomiarowych, formatów plików i oprogramowania utrudnia integrację wyników oraz ich dalsze wykorzystanie w centralnych systemach zarządzania infrastrukturą.

W warunkach krajowych problemy te są szczególnie widoczne. Zamiast służyć jako narzędzie wspierające świadome utrzymanie obiektu, systemy monitoringu bywają instalowane głównie w celu spełnienia wymogów formalnych narzucanych przez zamawiających w dokumentach dotyczących wymagań projektowych lub wykonawczych. W praktyce prowadzi to do sytuacji, w których systemy są wdrażane bez jasno określonych celów pomiarowych i bez zdefiniowania, jakie zjawiska mają być obserwowane oraz jakie decyzje mają wynikać z rejestrowanych danych. Zarządcy, z uwagi na ograniczoną znajomość zasad działania tych systemów, często koncentrują się na pomiarach wybranych elementów głównych, pomijając elementy o kluczowym znaczeniu eksploatacyjnym, takie jak urządzenia dylatacyjne czy łożyska, których awarie są jednymi z najczęstszych przyczyn konieczności remontu lub czasowego wyłączenia obiektu z użytkowania. Brak precyzyjnego określenia celu monitoringu powoduje, że pozyskane dane nie przekładają się na skuteczne decyzje utrzymaniowe, a ich potencjał diagnostyczny pozostaje w dużej mierze niewykorzystany.

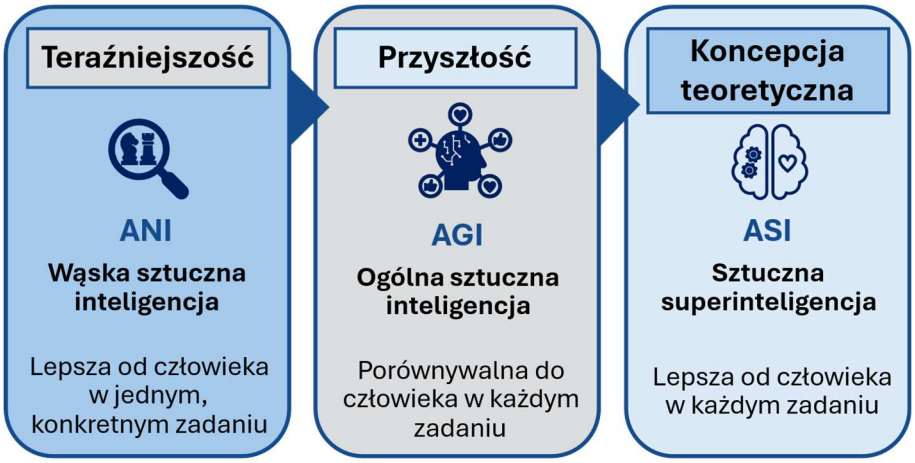
W kontekście rozwoju cyfrowych metod diagnostyki kluczowe staje się nie tyle zwiększanie liczby czujników, co projektowanie inteligentnych, zintegrowanych systemów pomiarowych, opartych na optymalnej liczbie sensorów dostarczających wszystkie niezbędne informacje. Wstępna obróbka danych powinna być wspierana przez algorytmy sztucznej inteligencji, umożliwiające automatyczną filtrację i kondensację pomiarów, tak aby do użytkownika trafiały dane przetworzone, istotne decyzyjnie. Właściwie zaprojektowany system SHM nie powinien być zbiorem przypadkowych urządzeń, lecz spójnym, celowo zaprojektowanym narzędziem, które w sposób efektywny wspiera proces podejmowania decyzji w utrzymaniu infrastruktury mostowej.

3.2.8 Sztuczna inteligencja

Obecne zjawisko rozpowszechniania sztucznej inteligencji (SI, ang. Artificial Intelligence, AI), zarówno pod względem liczby użytkowników, jak i różnorodności zastosowań, jest często porównywane do rewolucji internetowej z lat 90-tych. Rzeczywiście, niemal 30 lat po upowszechnieniu Internetu, AI zapoczątkowuje kolejną transformację technologiczną, której skala wpływu na naukę i przemysł jest równie fundamentalna. Z uwagi na powszechność stosowania skrótu AI, będzie on używany w dalszej części rozdziału.

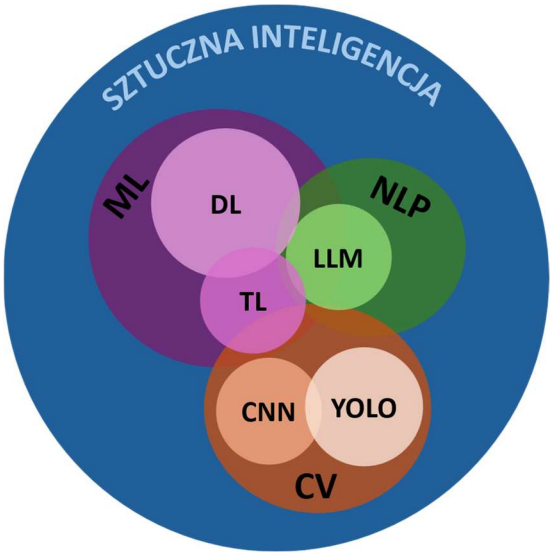
Sztuczna inteligencja to nadrzędna dziedzina informatyki, której celem jest tworzenie systemów zdolnych do wykonywania zadań wymagających inteligencji. Obecnie, ze względu na zakres zdolności, AI dzieli się na trzy główne, opisane dalej kategorie [51] (Rys. 3-15). Niemal wszystkie istniejące systemy klasyfikuje się jako tzw. wąską AI (ang. Artificial Narrow Intelligence, ANI) [85], czyli systemy wyspecjalizowane w konkretnym zadaniu. W sferze intensywnych badań pozostaje ogólna AI

(ang. Artificial General Intelligence, AGI) [68], czyli system o zdolnościach poznawczych porównywalnych z człowiekiem. W ramach koncepcji teoretycznych mówi się również o sztucznej superinteligencji (ang. Artificial Super Intelligence, ASI) [149], czyli formie AI przewyższającej intelektualnie człowieka w każdej dziedzinie.



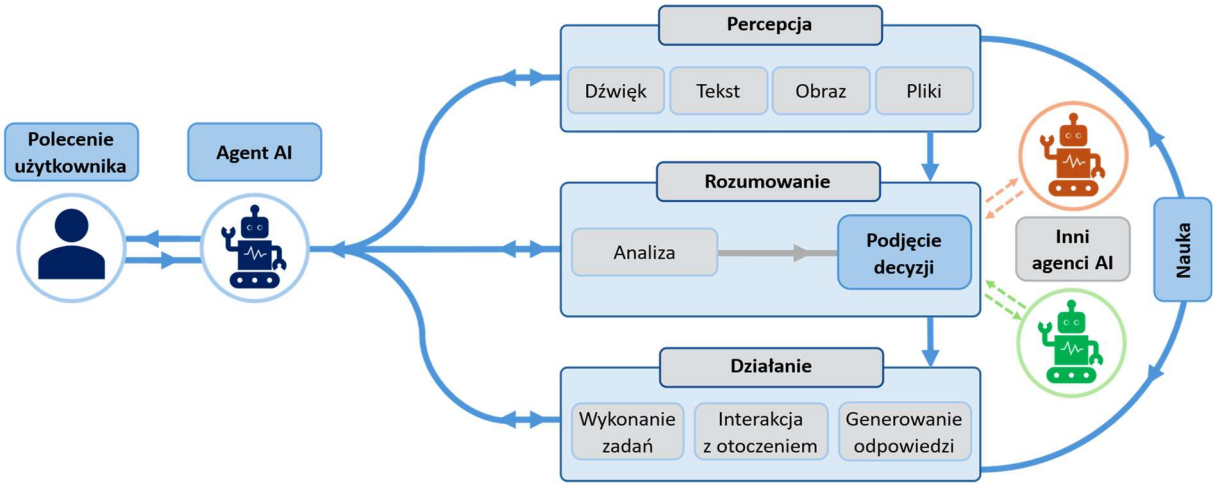
Rys. 3-15 Hierarchia rozwoju sztucznej inteligencji

W ramach AI mieści się szereg poddziedzin [14](Rys. 3-16), z których podstawową jest uczenie maszynowe (ang. Machine Learning, ML) [189], obejmujące techniki umożliwiające systemom uczenie się na podstawie danych. Szczególnym podzbiorem ML jest głębokie uczenie (ang. Deep Learning, DL) [153, 170], które wykorzystuje wielowarstwowe sieci neuronowe, m.in. konwolucyjne sieci neuronowe (ang. Convolutional Neural Network, CNN) [269], do uczenia się złożonych wzorców z ogromnych zbiorów danych. W kontekście diagnostyki mostów kluczową rolę odgrywa wizja komputerowa (ang. Computer Vision, CV) [229, 282], czyli dziedzina AI skoncentrowana na interpretacji obrazów. Wykorzystuje ona wyspecjalizowane architektury, takie jak YOLO (ang. You Only Look Once) [84, 107, 183], umożliwiające detekcję obiektów w czasie rzeczywistym. Coraz większe znaczenie ma również uczenie transferowe (ang. Transfer Learning, TL) [269, 282], polegające na adaptacji wstępnie wytrenowanego modelu do nowego zadania, co znacząco redukuje ilość wymaganych danych treningowych. Znaczący rozwój odnotowuje również przetwarzanie języka naturalnego (ang. Natural Language Processing, NLP), stanowiące podstawę dużych modeli językowych (ang. Large Language Models, LLM) [220]. Kolejny ważny trend to modele multimodalne, operujące natywnie na kilku typach danych (np. tekście i obrazach) [148].



Rys. 3-16 Hierarchia i wzajemne relacje w obrębie sztucznej inteligencji

Najnowszym kierunkiem rozwoju są tzw. agenci AI, czyli autonomiczne systemy zdolne do percepcji otoczenia, rozumowania, planowania i podejmowania działań w celu osiągnięcia złożonych celów bez stałego nadzoru człowieka [171]. Jak opisują [220], systemy te ewoluują od prostych, reaktywnych agentów do złożonych architektur kognitywnych, zdolnych do współpracy, korzystania z pamięci i samodzielnej optymalizacji swoich działań. Typowa architektura agenta AI obejmuje trzy podstawowe moduły (Rys. 3-17): percepcję (odbiór danych), rozumowanie (analiza i decyzja) oraz działanie (wykonywanie dodatkowych zadań za pomocą udostępnionych narzędzi rozszerzających zdolności natywnych modeli AI). W fazie planowania agent może również komunikować się i współpracować z innymi agentami, tworząc systemy wieloagentowe. Współczesne narzędzia konwersacyjne, takie jak GPT, Gemini, Perplexity czy Copilot, są prekursorami tej technologii, demonstrując zdolność do rozumienia kontekstu i wykonywania wieloetapowych zadań.



Rys. 3-17 Architektura działania agenta AI

W inżynierii mostowej sztuczna inteligencja może znaleźć zastosowanie na niemal każdym etapie cyfrowego procesu diagnostycznego, od planowania inspekcji, przez analizę danych, po wspomaganie decyzji. Od małych obiektów inżynierskich, jak przepusty [163], po wieloprzęsłowe konstrukcje mostowe [107]. Głównym i najszerzej badanym obszarem jest automatyczna detekcja uszkodzeń na

podstawie danych wizualnych, co jest tematem licznych prac przeglądowych [14, 229]. Detekcja może odbywać się zarówno na zdjęciach 2D [217], modelach 3D [198], jak i w czasie rzeczywistym w środowiskach XR [183]. Badania te w przeważającej mierze koncentrują się na wykrywaniu i segmentacji zarysowań, wykorzystując do tego sieci neuronowe [15, 42, 136, 230, 235, 268]. Jest to popularny kierunek badań nie tylko z uwagi na częste występowanie tego typu uszkodzeń, ale również dlatego, że problem detekcji zarysowań, które mają wyraźny, liniowy wzorzec jest dopasowany do możliwości algorytmów wizji komputerowej, co czyni go dobrym poligonem doświadczalnym.

Rozwijane są również algorytmy do identyfikacji innych typów uszkodzeń, takich jak korozja stali [47], defekty spoin [107] czy jednoczesnej detekcji wielu klas uszkodzeń [41, 159, 170]. AI znajduje zastosowanie również w poprawie jakości danych inspekcyjnych poprzez automatyczne czyszczenie i filtrację [276] oraz do optymalizacji procesu ich zbierania i wstępnego przetwarzania, np. przez ulepszanie widoczności obrazów przed analizą [105]. Algorytmy uczące się mogą tworzyć również adaptacyjne strategie inspekcyjne, skupiając wysiłek na obszarach o podwyższonym ryzyku [41] lub optymalizować trasy przelotu dronów, aby zmaksymalizować pokrycie przy minimalnym zużyciu energii [28, 182]. Dane te mogą następnie służyć do automatyzacji planowania napraw i prac utrzymaniowych [46]. Coraz częściej rozwiązania te integrowane są w ramach cyfrowych bliźniaków, które wykorzystują AI do dynamicznej symulacji i predykcji stanu obiektu [88, 268].

W ostatnich latach rośnie również znaczenie metod AI w analizie i klasyfikacji danych pochodzących z systemów SHM [59], gdzie algorytmy uczenia maszynowego umożliwiają automatyczne rozpoznawanie wzorców drgań, identyfikację anomalii w sygnałach sensorycznych oraz ocenę stanu elementów konstrukcyjnych w czasie rzeczywistym [39, 55]. Celem nadrzędnym jest tu przejście od detekcji do predykcji np. oceny trwałości zmęczeniowej [88]. Uczenie maszynowe jest również stosowane do przetwarzania danych z sensorów systemów SHM w celu ważenia pojazdów w ruchu [189] oraz do klasyfikacji uszkodzeń spowodowanych uderzeniem pojazdu w filary [255]. Co więcej, modele AI są w stanie prognozować rozwój procesów degradacji [33, 56] oraz oceniać trwałość konstrukcji nawet przy ograniczonym zestawie danych [43].

Zdaniem autora niniejszej rozprawy, obecna koncentracja badań na detekcji zarysowań, choć zrozumiała z uwagi na powszechność występowania tego zjawiska, jest pewnym uproszczeniem. Należy pamiętać, że rozwartość rysy na powierzchni betonu bardzo szybko maleje w głąb konstrukcji, a jej obserwowana szerokość jest często wynikiem wykruszeń na krawędziach lub złudzeniem wywołanym przez zanieczyszczenia. Zanim celem stanie się w pełni autonomiczna ocena zarysowań, należałoby w pierwszej kolejności rozwinąć metody niezawodnego rozpoznawania ogólnych uszkodzeń powierzchniowych (odspojeń, zacieków) i ich automatycznej kwantyfikacji (np. jako procent uszkodzonej powierzchni elementu). Co więcej, pierwszym krokiem wspomagającym inspektora powinna być odpowiednia segmentacja i segregacja zdjęć, automatyczny podział obrazu na logiczne elementy konstrukcyjne, a następnie grupowanie zdjęć tych samych elementów. Techniki, które mogą ułatwić takie działania, jak kody QR (ang. Quick Response), znaczniki NFC (ang. Near Field Communication) czy RFID (ang. Radio-frequency identification), zostaną przedstawione w kolejnych rozdziałach.

Perspektywy rozwoju AI w mostownictwie są jednak znacznie szersze. Obejmują one m.in. tworzenie inteligentnych systemów do szkolenia inspektorów, doradztwo w czasie rzeczywistym

podczas inspekcji w terenie [11, 113, 183], czy automatyczne przetwarzanie notatek głosowych i pisemnych na ustrukturyzowane raporty. Mimo ogromnego potencjału należy podkreślić, że korzystanie z AI bez krytycznej weryfikacji przez eksperta jest obecnie obarczone dużym ryzykiem, zwłaszcza w zastosowaniach technicznych. Modele językowe mają skłonność do generowania nieprawdziwych, choć wiarygodnie brzmiących informacji (tzw. halucynacji) i mogą być łatwo przekonane do błędnych założeń [171], co wymaga od inżyniera szczególnej ostrożności. Równolegle rozwijane są jednak koncepcje wyjaśnialnej sztucznej inteligencji (ang. Explainable AI, XAI), których celem jest zwiększenie przejrzystości i interpretowalności decyzji podejmowanych przez modele, co ma kluczowe znaczenie w kontekście bezpieczeństwa infrastruktury krytycznej [255].

3.3 Wyzwania technologiczne i organizacyjne

3.3.1 Wprowadzenie

Nowoczesne technologie i narzędzia przedstawione w pkt. 3.2 posiadają potencjał zrewolucjonizowania diagnostyki obiektów mostowych, jednak sama ich nowoczesność nie gwarantuje skuteczności. Celem niniejszego podrozdziału nie jest zatem promowanie bezrefleksyjnej pogoni za technologicznymi nowinkami, ale przedstawienie ram racjonalnego doboru narzędzi, które przynoszą realną i wymierną korzyść.

Wiele z tych rozwiązań, choć obiecujących, napotyka na fundamentalne bariery, nie tylko technologiczne, ale również organizacyjne i prawne. W praktyce inżynierskiej o stosowalności danej metody decyduje bowiem złożony bilans, uwzględniający nie tylko jej potencjał pomiarowy, lecz także koszt i czas wdrożenia, wymogi organizacyjne, bezpieczeństwo, interoperacyjność danych oraz dojrzałość procedur.

Systematyzacja tych czynników i ich obiektywna ocena wymagają przyjęcia spójnej metodyki. W tym celu, w dalszej części rozdziału zaproponowano ramy oceny oparte na koncepcji kluczowych wskaźników efektywności (ang. Key Performance Indicators, KPI) [79, 205]. Stanowią one narzędzie w zarządzaniu wydajnością, pozwalające definiować i mierzyć postępy w osiąganiu celów strategicznych. Podejście to pozwala na przełożenie ogólnych celów diagnostycznych na zbiór konkretnych, porównywalnych kryteriów, które zostaną szerzej omówione i zdefiniowane w kolejnym podrozdziale.

3.3.2 Bariery i czynniki decydujące o doborze techniki

W kontekście diagnostyki obiektów mostowych, koncepcja kluczowych wskaźników efektywności (KPI) przyjmuje wymiar techniczno-decyzyjny. Ich zadaniem nie jest tworzenie prostego rankingu „najlepszej" technologii, lecz zdefiniowanie wspólnej płaszczyzny porównawczej [17, 87]. Pozwala ona przede wszystkim zderzyć profil dowolnej techniki alternatywnej z metodą tradycyjną oraz ułatwia dobór optymalnego zestawu narzędzi do konkretnego zadania diagnostycznego.

Wskaźniki KPI służą tu do oceny, w jakim stopniu dana metoda spełnia oczekiwania i jakie oferuje korzyści względem tradycyjnych technik inspekcji. Pozwalają wykazać, że choć wdrożenie alternatywnej techniki może być droższe, to uzyskana w zamian wartość – np. w postaci obiektywnych danych, ich potencjału do ponownego wykorzystania i integracji z modelami cyfrowymi – wielokrotnie przewyższa ten koszt, uzasadniając jej zastosowanie. Właściwy dobór wskaźników pozwala zrównoważyć czynniki

takie jak jakość danych, koszt, czas czy gotowość technologii do wdrożenia [44, 205]. Badania potwierdzają, że w ocenie procesów inżynierskich najlepiej sprawdza się podejście wielowymiarowe, łączące kryteria techniczne, ekonomiczne i organizacyjne [160, 251].

Należy przy tym zaznaczyć, że przedstawiony model pięciu grup KPI stanowi elastyczne ramy analityczne, a nie sztywną listę kontrolną. Ze względu na specyfikę i różnorodność omawianych technologii, nie każda z nich będzie podlegała ocenie w każdej z podkategorii. Przykładowo, technologie służące głównie do przetwarzania lub wizualizacji danych nie będą oceniane pod kątem efektywności operacyjnej w terenie, gdyż nie jest to ich zadaniem. Celem jest wykorzystanie odpowiednich wskaźników do oceny tych aspektów, w których dana technologia faktycznie funkcjonuje, co pozwala na rzetelne porównanie ich potencjału w kontekście konkretnych zastosowań.

W celu ustrukturyzowanej i obiektywnej oceny, przyjęto tu model oparty na pięciu grupach kluczowych wskaźników efektywności (KPI) (Rys. 3-18), które zostały omówione szczegółowo poniżej.

Grupa 1: KPI efektywności operacyjnej i bezpieczeństwa. Ta grupa ocenia sprawność, elastyczność i bezpieczeństwo procesu zbierania danych bezpośrednio na obiekcie. Odpowiada na pytanie: Jak efektywnie i bezpiecznie można pozyskać dane z obiektu w warunkach terenowych?

- **Zasięg przestrzenny i dostępność**: Ocenia zdolność do inspekcji miejsc trudnodostępnych bez konieczności stosowania skomplikowanego sprzętu dostępowego.
- **Bezpieczeństwo inspektorów:** Mierzy stopień, w jakim technologia redukuje ryzyko związane z pracą w warunkach niebezpiecznych (np. na wysokości).
- **Czas inspekcji w terenie:** Określa czas potrzebny na zebranie danych, co bezpośrednio wpływa na koszty i ewentualne utrudnienia w ruchu.
- **Mobilność i elastyczność:** Definiuje, jak łatwo można przemieszczać i adaptować sprzęt do zmieniających się warunków na obiekcie.
- **Liczba personelu:** Wskazuje na minimalną liczbę osób potrzebnych do przeprowadzenia inspekcji, co rzutuje na logistykę, koszt oraz bezpieczeństwo operacji.

Grupa 2: KPI jakości i wierności danych. Ta grupa skupia się na merytorycznej wartości uzyskanych wyników. Odpowiada na pytanie: Jak dobre i dokładne są dane, które zebraliśmy?

- **Rozdzielczość i precyzja pomiaru:** Określa poziom szczegółowości danych oraz ich dokładność metryczną, kluczową dla inwentaryzacji uszkodzeń i geometrii.
- **Wierność odwzorowania:** Ocenia, na ile uzyskane dane (np. geometria, tekstura) wiernie reprezentują rzeczywisty stan materiału i obiektu.
- **Wiarygodność danych:** Wskazuje na stopień zaufania do uzyskanych wyników, ich kompletność, stabilność w różnych warunkach i przydatność do dalszych analiz inżynierskich.

Grupa 3: KPI niezawodności i powtarzalności. Ta grupa ocenia obiektywizm całej metodyki, od pomiaru po wynik końcowy. Odpowiada na pytanie: Na ile niezawodna i obiektywna jest cała metoda?

- **Powtarzalność i obiektywizm wyników:** Mierzy, czy wyniki są niezależne od operatora i warunków, co jest kluczowe dla monitorowania zmian w czasie.
- **Automatyzacja procesu:** Ocenia stopień zautomatyzowania procedury.

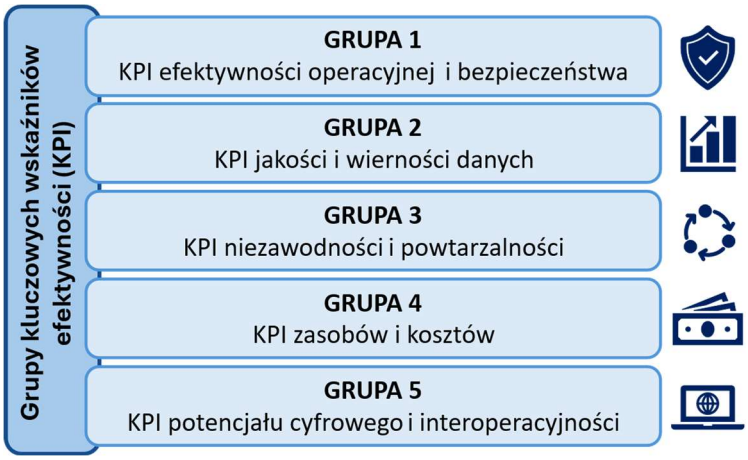
- **Odporność na błędy:** Wskazuje na wrażliwość technologii na zakłócenia środowiskowe (np. oświetlenie, drgania) lub błędy proceduralne.
- **Dojrzałość technologii:** Określa czy jest to rozwiązanie sprawdzone i powszechnie stosowane, czy też eksperymentalne i obarczone ryzykiem.

Grupa 4: KPI zasobów i kosztów. Ta grupa koncentruje się na całkowitych nakładach (finansowych i czasowych) niezbędnych do wdrożenia i stosowania technologii. Odpowiada na pytanie: Jakie są całkowite nakłady czasowe i finansowe związane z wdrożeniem i stosowaniem technologii?

- **Koszt wdrożenia:** Obejmuje cenę zakupu lub wynajmu sprzętu, oprogramowania oraz niezbędnych szkoleń.
- **Koszt operacyjny:** Definiuje koszt przeprowadzenia pojedynczej inspekcji, wliczając w to personel i logistykę.
- **Czasochłonność obróbki danych:** Mierzy czas potrzebny na przetworzenie surowych danych do postaci użytecznego raportu lub modelu, co często decyduje o praktycznej użyteczności danej metody.

Grupa 5: KPI potencjału cyfrowego i interoperacyjności. Ta grupa ocenia długoterminową wartość danych i ich zdolność do funkcjonowania w nowoczesnym ekosystemie cyfrowym. Odpowiada na pytanie: Jaką wartość cyfrową i analityczną będą miały dane w dłuższej perspektywie?

- **Format i interoperacyjność danych:** Ocenia, czy dane są zapisywane w otwartych, uniwersalnych formatach, umożliwiających ich użycie w różnym oprogramowaniu.
- **Potencjał integracji z systemami BIM/DT:** Mierzy łatwość, z jaką dane mogą zostać włączone do cyfrowego modelu obiektu (BIM) lub jego Cyfrowego Bliźniaka (DT).
- **Zdolność do archiwizacji i ponownej analizy:** Wskazuje, czy cyfrowy format danych pozwala na ich trwałe przechowywanie i ponowne wykorzystanie w przyszłych analizach porównawczych.



Rys. 3-18 Schemat pięciu grup kluczowych wskaźników efektywności (KPI) w diagnostyce mostów

Zastosowanie zdefiniowanych ram KPI do oceny poszczególnych technologii uwidacznia, że każda z nich, obok niezaprzeczalnych zalet, posiada również bariery i ograniczenia, które determinują zakres jej praktycznego wykorzystania. Zaawansowanie technologii nie zawsze idzie w parze z jej

efektywnością. Często prowadzi do przesunięcia problemu z fazy pozyskania danych na etap ich przetwarzania lub interpretacji.

Zastosowanie platform zrobotyzowanych, zwłaszcza dronów, zrewolucjonizowało efektywność operacyjną (Grupa 1), umożliwiając szybkie i bezpieczne pozyskiwanie danych z miejsc trudno dostępnych [134, 250]. Jednocześnie jednak, jak zauważają autorzy [8, 105], technologie te są podatne na ograniczenia środowiskowe, takie jak wiatr czy deszcz, które mogą zaburzać stabilność pomiaru, negatywnie wpływając na niezawodność i powtarzalność (Grupa 3). Wysoki koszt sprzętu, potrzeba certyfikowanego personelu oraz formalne ograniczenia prawne stanowią istotną barierę w Grupie 4 (zasoby i koszty), ograniczając pełne wykorzystanie potencjału automatyzacji.

Metody pozyskiwania danych przestrzennych, takie jak skanowanie laserowe i fotogrametria, należą do rozwiązań o najwyższych wskaźnikach w zakresie jakości i wierności danych (Grupa 2), pozwalając na tworzenie precyzyjnych modeli 3D o dużym potencjale integracji cyfrowej, co potwierdzają liczne badania [18, 130]. Fotogrametria jest metodą stosunkowo niedrogą w fazie pozyskania danych, w przeciwieństwie do skanowania laserowego, które wymaga drogiego, specjalistycznego sprzętu. Mimo tej różnicy na etapie wdrożenia, obie techniki łączy wspólna, kosztowna wada: generowanie gigantycznych zbiorów danych, których obróbka często jest czasochłonna. Jak wskazują [37, 117, 227], ta wysoka czasochłonność bezpośrednio obniża wskaźniki w Grupie 4 (Zasoby i koszty), czyniąc cały proces droższym i dłuższym niż mogłoby się wydawać na etapie prac terenowych. Dodatkowym ograniczeniem, wpływającym na niezawodność procesu (Grupa 3), pozostaje wrażliwość na warunki atmosferyczne i oświetleniowe, co jest szczególnie dotkliwe w przypadku mniej kosztownej fotogrametrii [204].

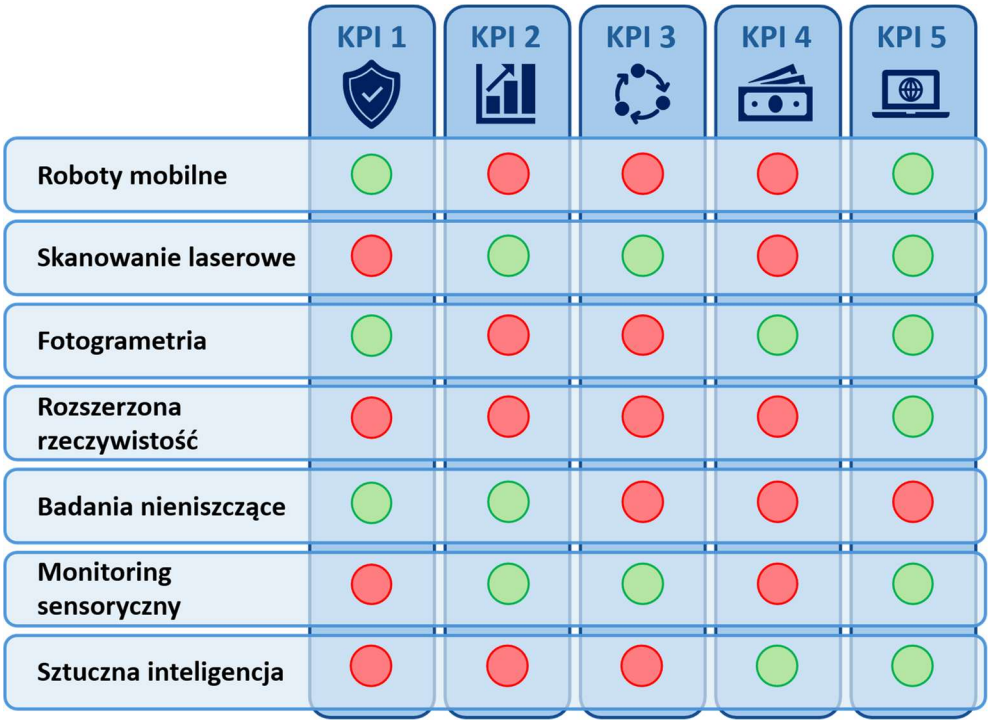
Systemy monitoringu konstrukcji (SHM) wyróżniają się najwyższymi wskaźnikami w zakresie niezawodności (Grupa 3) oraz potencjału cyfrowego (Grupa 5), oferując możliwość ciągłej obserwacji i automatycznego alarmowania [3, 275]. Ich główną wadą są jednak wysokie koszty instalacji i utrzymania, a także konieczność projektowania dedykowanej infrastruktury, co sprawia, że w praktyce ich stosowanie jest ograniczone do strategicznych obiektów. Warto przy tym zauważyć, że same czujniki nie są niezawodne, mogą ulec uszkodzeniu, utracić kalibrację lub generować dane obarczone błędem pomiarowym, co w konsekwencji może prowadzić do błędnych interpretacji stanu konstrukcji. Jak podkreślają [106], dodatkową barierę stanowi brak interoperacyjności między sensorami różnych producentów oraz złożoność interpretacji ogromnych zbiorów danych, co może przytłoczyć zarządców infrastruktury.

Nowoczesne badania nieniszczące (NDT), mimo że dostarczają szczegółowych informacji o stanie materiału, pozostają metodami punktowymi, co utrudnia ich skalowanie pozwalające uzyskać informacje o stanie całej konstrukcji. Zależność od bezpośredniego kontaktu z powierzchnią oraz kluczowa rola eksperta w interpretacji wyników negatywnie wpływają na powtarzalność i obiektywizm (Grupa 3) [26, 162]. Dane z NDT wykazują ograniczony potencjał cyfrowy [124] (Grupa 5) powoduje to, że są one często trudne do integracji z systemami BIM, pozostając izolowanymi informacjami, a nie częścią cyfrowego ekosystemu obiektu.

Technologie przetwarzania i wizualizacji, takie jak sztuczna inteligencja (AI) oraz rzeczywistość rozszerzona (XR), oferują ogromny potencjał w Grupie 5, lecz ich skuteczność jest nierozerwalnie związana z jakością danych wejściowych [14, 38, 269]. Modele AI, mimo rosnącej precyzji w detekcji

i klasyfikacji uszkodzeń, wciąż stanowią narzędzia wymagające weryfikacji przez eksperta, szczególnie w kontekście decyzji technicznych o krytycznym znaczeniu [255]. Z kolei technologie XR, jak wykazali [10, 224], napotykają istotne bariery sprzętowe i środowiskowe – wysoką cenę urządzeń, ograniczoną widoczność hologramów w świetle dziennym oraz niską dokładność pozycjonowania, co ogranicza ich praktyczne zastosowanie w warunkach terenowych (Grupa 1). W obecnej formie mają one charakter przede wszystkim komplementarny, pełnią funkcję uzupełniającą względem metod dostarczających danych o wysokiej jakości, takich jak skanowanie laserowe czy fotogrametria. Bez ich wsparcia pozostają narzędziami efektownymi wizualnie, lecz mało użytecznymi poznawczo.

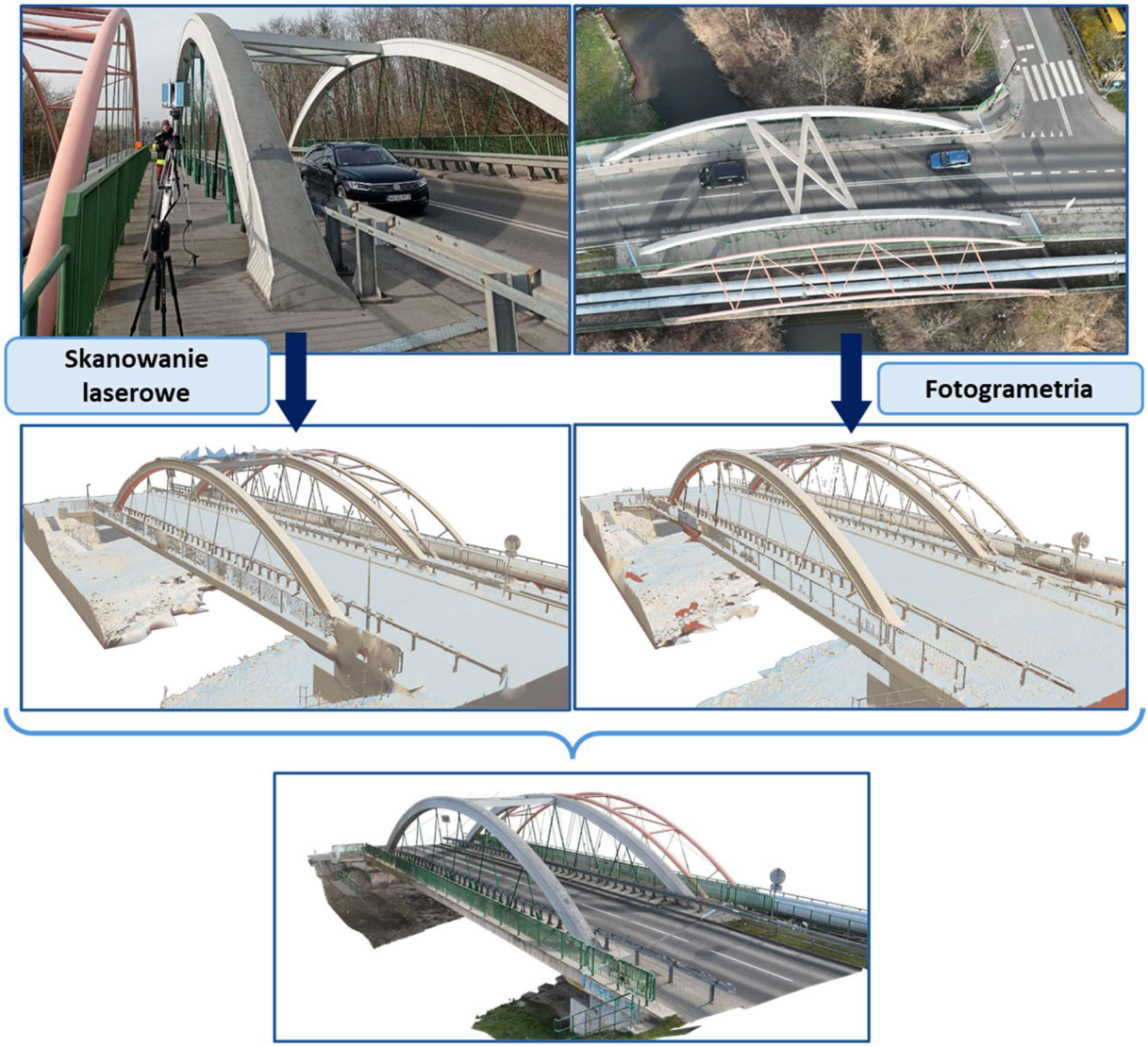
Podsumowując, żadna z nowoczesnych technologii nie stanowi rozwiązania uniwersalnego, zdolnego do samodzielnego spełnienia wszystkich wymagań procesu diagnostycznego. Analiza w ujęciu wskaźników KPI ujawnia liczne kompromisy pomiędzy precyzją i wiarygodnością danych, czasem oraz kosztem ich pozyskania, a także między poziomem automatyzacji a koniecznością zachowania nadzoru eksperta. Na Rys. 3-19 przedstawiono uproszczoną ocenę poszczególnych technik z podziałem na grupy KPI, opracowaną w oparciu o skalę binarną (ocena pozytywna lub negatywna). Należy jednak wyraźnie zaznaczyć potrzebę dalszego rozwoju tego podejścia. Przyjęta dwustopniowa klasyfikacja stanowi punkt wyjścia do dyskusji, lecz w przyszłości konieczne są badania pozwalające na wartościowanie technik w szerszej i bardziej szczegółowej skali. Pozwoliłoby to na precyzyjniejsze określenie stopnia przydatności danej metody. Mimo tych metodologicznych ograniczeń, ogólne wnioski z tej analizy wskazują jednoznacznie na potrzebę integracji komplementarnych metod, które w połączeniu tworzą spójne, wielopoziomowe systemy diagnostyczne zdolne do wspomagania kompleksowej i wiarygodnej oceny stanu obiektu.



Rys. 3-19 Ocena współczesnych technologii i narzędzi wspomagających inspekcję w odniesieniu do grup KPI

Jednym z najpopularniejszych przykładów integracji jest łączenie danych ze skanowania laserowego i fotogrametrii, często realizowanej z użyciem BSP. Choć obie techniki służą podobnemu

celowi (odwzorowaniu geometrii i wyglądu obiektu), to różnią się zakresem oraz dokładnością pozyskiwanych danych. Jak wynika z analizy KPI, doskonale się uzupełniają: skanowanie laserowe zapewnia wysoką precyzję geometryczną, natomiast fotogrametria, zwłaszcza z BSP, cechuje się dużą efektywnością operacyjną oraz umożliwia pozyskanie danych z trudno dostępnych miejsc, dostarczając jednocześnie fotorealistycznych tekstur [37, 40, 245]. Integracja obu metod pozwala uzyskać zarówno pomiarowo wiarygodne chmury punktów, jak i wizualnie realistyczne modele fotogrametryczne, co znajduje zastosowanie zarówno w modelowaniu 3D, jak i analizie uszkodzeń. Na Rys. 3-20 przedstawiono przykład takiego połączenia na przykładzie mostu łukowego, w którym dane z fotogrametrii i skanowania laserowego zostały zintegrowane w jeden spójny model przestrzenny.



Rys. 3-20 Integracja fotogrametrii i skanowania laserowego na przykładzie mostu łukowego

Drugim przykładem jest integracja robotów mobilnych z metodami badań nieniszczących (NDT). Wykorzystanie zrobotyzowanych platform umożliwia automatyzację procesu pomiarowego oraz znaczące ograniczenie ryzyka pracy w trudno dostępnych strefach konstrukcji, przy jednoczesnym zwiększeniu powtarzalności wyników. Coraz częściej stosowane są systemy termograficzne montowane na dronach [31, 174] oraz robotach kołowych [232], które umożliwiają szybkie skanowanie dużych powierzchni i identyfikację uszkodzeń bez konieczności bezpośredniego kontaktu z obiektem.

Równolegle rozwijane są rozwiązania umożliwiające kontaktowe pomiary przy użyciu dronów wyposażonych np. w głowice ultradźwiękowe [109, 218], a także roboty kroczące i wspinające się, przeznaczone do monitorowania korozji lub inspekcji stalowych elementów konstrukcyjnych [137, 142].

Wraz ze upowszechnianiem systemów monitoringu konstrukcji (SHM) pojawia się konieczność przetwarzania i interpretacji ogromnych ilości danych pomiarowych. W tym kontekście sztuczna inteligencja staje się nieodzownym elementem nowoczesnych systemów SHM, umożliwiając automatyczne wykrywanie anomalii i predykcję degradacji elementów konstrukcyjnych. Badania w tym obszarze koncentrują się na wykorzystaniu uczenia maszynowego do wykrywania anomalii w danych z czujników [16] oraz analizie danych o obciążeniu ruchem [189]. Rozwijane są również systemy łączące AI i SHM z wizualizacją danych w środowisku wirtualnym, co umożliwia interaktywną analizę wyników [70, 151]. Ponadto, roboty mobilne mogą wspierać systemy SHM, dostarczając okresowych danych wizualnych, które uzupełniają punktowe pomiary z czujników [231], tworząc zintegrowane systemy monitoringu łączące inspekcje wizualne i sensoryczne.

Najbardziej zaawansowanym kierunkiem rozwoju jest integracja wielu komplementarnych technologii w ramach jednego systemu diagnostycznego. Przykłady takich podejść, opisane w literaturze [204, 268], przedstawiają koncepcje kompleksowych procesów inspekcyjnych łączących dane geometryczne i wizualne (roboty mobilne, fotogrametria i skanowanie laserowe), dane sensoryczne z systemów SHM oraz ich analizę z wykorzystaniem algorytmów AI i wizualizację w środowiskach immersyjnych, takich jak VR. Takie podejście pozwala na wykorzystanie mocnych stron każdej z technologii wpływając pozytywnie na efektywny proces diagnostyczny, w którym centralną postacią nadal jest inspektor, a dane mogą być przetwarzane w spójnym środowisku cyfrowym. W dalszej części rozprawy autor koncentruje się właśnie na tym szerokim, wieloaspektowym podejściu.

3.3.3 Aspekty organizacyjne i prawne

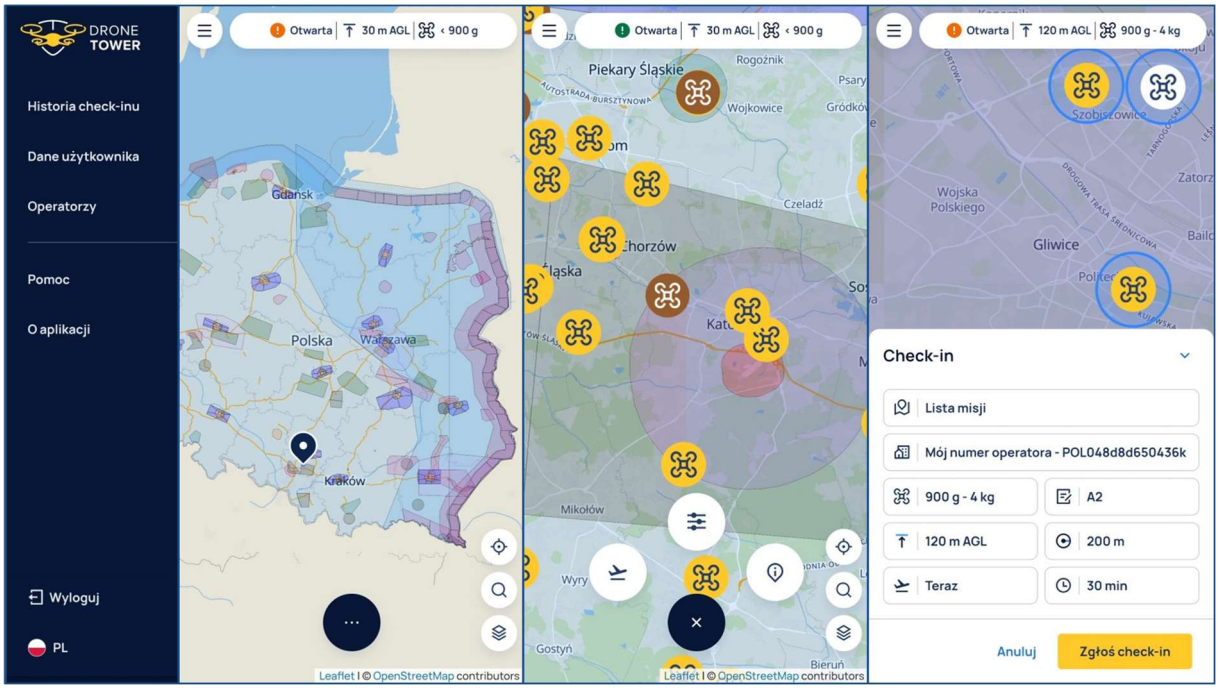
Postęp technologiczny w obszarze diagnostyki infrastruktury mostowej w Polsce znacząco wyprzedza dostosowanie krajowych ram prawnych i organizacyjnych. Choć nowoczesne narzędzia, takie jak skanowanie laserowe, fotogrametria, roboty mobilne, systemy SHM czy rozwiązania oparte na sztucznej inteligencji, są już technicznie dostępne, ich pełne wdrożenie w praktyce utrudniają przestarzałe przepisy oraz brak spójnej strategii instytucjonalnej. Nawet najbardziej zaawansowane rozwiązania pozostaną niewykorzystane, jeśli napotkają bariery systemowe, regulacyjne lub kompetencyjne. Skuteczne przeprowadzenie cyfrowej transformacji w diagnostyce mostowej wymaga zatem nie tylko inwestycji w sprzęt, ale przede wszystkim strategicznych zmian w przepisach i podejściu zarządców infrastruktury.

Główną barierą dla modernizacji polskiego systemu inspekcji jest jego przestarzała i niespójna podstawa prawna. Jak wskazano w rozdziale 2.3.2, modernizacja systemu powinna rozpocząć się od najwyższego szczebla – poprzez aktualizację Prawa budowlanego [243], które w obecnym kształcie nie obejmuje jednoznacznych zapisów dotyczących inspekcji obiektów mostowych. Bez nadrzędnych ram prawnych, które standaryzowałyby podstawowe definicje, klasyfikacje i obowiązki, wszelkie inicjatywy modernizacyjne będą miały charakter fragmentaryczny i nieefektywny. Dopiero na takim fundamencie możliwe będzie tworzenie nowoczesnych wytycznych branżowych oraz dostosowanie przepisów sektorowych, drogowych i kolejowych, do standardów europejskich. Kolejnym krokiem powinno być

stworzenie jednolitych zasad klasyfikacji i terminologii, tak aby wyeliminować obecny dualizm między infrastrukturą drogową i kolejową oraz ustandaryzować nazewnictwo komponentów mostów. Niezbędna jest również aktualizacja rozporządzenia dotyczącego ewidencji obiektów [209], tak by stało się ono podstawą dla repozytoriów cyfrowych i zintegrowanych baz danych, umożliwiających wykorzystanie technologii BIM i cyfrowych bliźniaków w utrzymaniu infrastruktury. Przykłady takich rozwiązań, jak norweski Brutus czy włoski system AINOP, pokazują, że centralizacja danych w połączeniu z cyfryzacją procesu inspekcyjnego może znacząco zwiększyć efektywność zarządzania mostami.

Odrębnej analizy wymagają ograniczenia dotyczące stosowania poszczególnych technologii. Najbardziej widoczne są one w przypadku najczęściej stosowanych bezzałogowych statków powietrznych (BSP), których potencjał pozostaje ograniczony przez restrykcyjne regulacje. W Polsce i większości krajów Unii Europejskiej autonomiczne loty dronów poza zasięgiem wzroku operatora, zwłaszcza w zautomatyzowanych misjach inspekcyjnych nad infrastrukturą krytyczną, są w praktyce możliwe jedynie po uzyskaniu indywidualnych, trudnodostępnych zezwoleń. Tymczasem w innych sektorach, takich jak logistyka (np. dostarczanie przesyłek [78], w tym medycznych [138]), rolnictwo precyzyjne [200] czy monitoring środowiskowy [114], operacje tego typu stają się coraz powszechniejsze, przy czym główne wyzwania dotyczą poruszania się w środowiskach zurbanizowanych [194, 262].

Ramy prawne dla operacji BSP są stosunkowo dobrze rozwinięte i w naszym rejonie określane są przez Agencję Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (ang. European Union Aviation Safety Agency, EASA). Piloci dronów muszą posiadać stosowne kwalifikacje (A1/A3, A2) zależnie od masy drona i profilu operacji. W Polsce przepisy te wdraża i nadzoruje Urząd Lotnictwa Cywilnego (ULC), a podstawowym aktem krajowym jest Prawo lotnicze [242]. Szczegółowe omówienie tych zasad oraz prawnych aspektów użytkowania BSP w świetle obowiązujących regulacji przedstawiono m.in. w monografii M. Zawadzaka [274]. Profesjonalne inspekcje infrastruktury zazwyczaj wymagają od pilotów zaawansowanych uprawnień w kategorii szczególnej (operacje w ramach scenariuszy NSTS, a docelowo STS) oraz koordynacji lotów w systemie Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej (PAŻP, ang. Polish Air Navigation Services Agency, PANSA) – PansaUTM. Proces ten realizowany jest za pośrednictwem dedykowanych narzędzi, takich jak aplikacja DroneTower (Rys. 3-21) czy serwis DroneMap, które umożliwiają rejestrację operacji, uzyskiwanie zezwoleń i monitorowanie stref geograficznych. Choć rozwiązania te znacząco usprawniły proces planowania i koordynacji lotów, nie wspierają jeszcze w pełni operacji autonomicznych ani złożonych misji inspekcyjnych.



Rys. 3-21 Interfejs aplikacji mobilnej DroneTower

Równie istotne są bariery organizacyjne i kompetencyjne. W polskim systemie utrzymania mostów wciąż dominuje ograniczona znajomość nowoczesnych technik, zarówno po stronie inżynierów, jak i zarządców. Większość zarządców nie posiada wystarczającej wiedzy o możliwościach, ale także o ograniczeniach nowych metod, co skutkuje zachowawczym podejściem i powielaniem procedur wynikających z obowiązujących przepisów. Sytuację pogarsza fakt, że wielu zarządców infrastruktury, zwłaszcza na niższych szczeblach, jest słabo wynagradzanych i ma ograniczone możliwości rozwoju zawodowego, co nie sprzyja podejmowaniu inicjatyw modernizacyjnych.

Z kolei dla firm inżynierskich i diagnostycznych pionierskie wdrażanie innowacji często okazuje się ekonomicznie nieopłacalne. Koszty zakupu specjalistycznego sprzętu i szkolenia personelu zwracają się powoli, zwłaszcza gdy zamawiający na końcu i tak wymaga jedynie dokumentacji zgodnej z przestarzałymi przepisami. W efekcie, postępowania przetargowe rozstrzygane są na korzyść wykonawców oferujących najniższą cenę poprzez minimalne spełnienie wymogów OPZ, co zniechęca do konkurowania jakością i innowacyjnością, która niesie za sobą dodatkowe koszty. W konsekwencji nowoczesne technologie rozwijane są głównie w wąskich, specjalistycznych zastosowaniach, gdzie ich przewaga jest bezdyskusyjna, zamiast być wdrażane w sposób systemowy.

Zmiany wymagają zatem działań systemowych. Niezbędne jest podnoszenie świadomości i kompetencji kadry technicznej poprzez cykle szkoleń oraz włączanie nowoczesnych metod diagnostyki do programów studiów. Kluczowe wydaje się jednak stworzenie mechanizmów promujących i nagradzających innowacyjność. Wzorem krajów takich jak Norwegia, należałoby powoływać państwowe zespoły eksperckie i finansowane ze środków publicznych, programy badawcze oraz projekty pilotażowe, które pełniłyby rolę łącznika między światem nauki a administracją publiczną. Takie inicjatywy, prowadzone pod patronatem administracji centralnej, pozwoliłyby na przetestowanie nowych rozwiązań w praktyce, opracowanie standardów i wytycznych, a w konsekwencji, na stopniowe i bezpieczne wdrożenie ich do powszechnej praktyki inżynierskiej.

4 Koncepcja wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych

4.1 Wprowadzenie

Analiza przeprowadzona w poprzednich rozdziałach wykazała, że tradycyjne podejście do diagnostyki mostów (pkt 3), a także brak spójnych standardów systemowych w Polsce (pkt 2) stanowią poważną barierę dla efektywnego zarządzania infrastrukturą. Odpowiedzią na te wyzwania jest szeroko rozumiana transformacja cyfrowa, obejmująca przekształcenie sposobu pozyskiwania, organizacji i wykorzystywania danych w procesie inspekcji. Jej podstawą jest stopniowe przejście od metod tradycyjnych do zintegrowanych, predykcyjnych systemów diagnostycznych wykorzystujących zaawansowane technologie pomiarowe, informatyczne i analityczne.

W tym kontekście kluczowe jest rozróżnienie trzech pojęć: digitalizacji, cyfryzacji i wirtualizacji, które choć są ze sobą powiązane, to jednak opisują różne etapy tej transformacji. Najwęższym procesem jest digitalizacja (ang. digitization), rozumiana jako samo przekształcanie treści analogowych w dane cyfrowe, umożliwiające ich archiwizację, udostępnianie i dalsze przetwarzanie. Na wyższym poziomie znajduje się cyfryzacja (ang. digitalization), będąca szerszym procesem wdrażania technologii i systemów IT w celu automatyzacji i ustrukturyzowania informacji. Jak widać, to rozróżnienie widoczne występuje nawet w literaturze angielskojęzycznej [30, 184]. Zwieńczeniem tej transformacji jest wirtualizacja (ang. virtualization), czyli zaawansowany proces polegający na tworzeniu cyfrowej, interaktywnej reprezentacji obiektu, która umożliwia jego dynamiczną analizę i symulację.

W odpowiedzi na zdiagnozowane wyzwania, niniejszy rozdział przedstawia autorską koncepcję wdrożenia wirtualizacji do procesu inspekcji mostów, opartą na dwóch wzajemnie uzupełniających się filarach. Pierwszym filarem jest autorski model piramidy wirtualizacji (pkt 4.2), czyli hierarchicznej struktury, która przedstawia rosnący poziom dojrzałości technologicznej procesu: od tradycyjnej inspekcji, przez cyfryzację i wirtualną analizę, aż po autonomiczną robotyzację i końcowy poziom zintegrowanych systemów predykcyjnych. Drugim, równie kluczowym filarem, jest standaryzacja identyfikacji elementów (pkt 4.3). Wprowadzenie spójnego systemu oznaczeń jest bowiem warunkiem koniecznym dla funkcjonowania złożonych systemów cyfrowych. Nawet najbardziej zaawansowane modele 3D czy algorytmy detekcji tracą swoją użyteczność, jeśli nie istnieje jednolita metoda identyfikacji elementów, do których te dane mają być przypisane. Integracja obu tych podejść tworzy spójny model rozwoju dojrzałego systemu diagnostycznego, który stanowi fundament dla rozwiązań i wdrożeń omówionych w kolejnych częściach pracy.

4.2 Piramida wirtualizacji procesu inspekcji

4.2.1 Założenia i struktura piramidy wirtualizacji

Wirtualizacja procesu inspekcji obiektów mostowych oznacza złożoną i wieloetapową transformację, obejmującą stopniowe przejście od tradycyjnych metod oceny technicznej do zintegrowanych, predykcyjnych systemów diagnostycznych. W celu przedstawienia logicznego modelu

rozwoju dojrzałości technologicznej procesu inspekcyjnego, od metod konwencjonalnych do pełnej integracji danych pomiarowych i decyzyjnych w środowisku cyfrowym, zaproponowano autorski, hierarchiczny model wdrożeniowy – piramidę wirtualizacji procesu inspekcji.

Model ten organizuje proces transformacji diagnostycznej w dziewięć, następujących po sobie poziomów (od 0 do 8), które reprezentują kolejne etapy dojrzałości technologicznej i procesowej. Koncepcja piramidy opiera się na czterech kluczowych założeniach:

- **Stopniowe wdrażanie:** piramida reprezentuje ewolucyjną ścieżkę wdrożenia, pozwalającą na sukcesywną adaptację coraz bardziej zaawansowanych metod i narzędzi.
- **Zależność hierarchiczna:** każdy wyższy poziom bazuje na fundamentach technologicznych, procesowych i danych zbudowanych na poziomach niższych.
- **Równoległość rozwoju:** rozwój badawczy poszczególnych poziomów może przebiegać równolegle i niezależnie, natomiast ich skuteczna implementacja systemowa wymaga osiągnięcia odpowiedniego poziomu cyfryzacji.
- **Nadzór ekspercki:** celem modelu nie jest eliminacja inspektora, lecz transformacja jego roli – z wykonawcy pełnego zakresu czynności inspekcyjnych w weryfikatora i nadzorcę (ang. human-in-the-loop, HITL) [4] coraz bardziej zautomatyzowanego procesu, dostarczającego obiektywnych i ustrukturyzowanych informacji.

Strukturę piramidy podzielono na cztery fazy transformacji, poprzedzone punktem wyjścia (Poziom 0). Poszczególne poziomy, stanowiące kolejne etapy dojrzałości technologicznej i procesowej, przedstawiono na Rys. 4-1 oraz zestawiono poniżej. Ich szczegółowy opis zostanie zaprezentowany w kolejnych podrozdziałach.

Punkt wyjścia

- **Poziom 0:** Tradycyjna inspekcja

Faza I. Cyfryzacja systemowa

Cel: Wprowadzenie narzędzi cyfrowych i ujednolicenie sposobu gromadzenia danych inspekcyjnych, prowadzące do uporządkowania, standaryzacji i integracji w spójnym systemie.

- **Poziom 1:** Inspekcja wspomagana cyfrowo
- **Poziom 2:** Zintegrowana inspekcja cyfrowa

Faza II. Wirtualizacja i wspomaganie analizy w biurze

Cel: Opracowanie cyfrowej reprezentacji obiektu oraz rozwój metod analizy i oceny stanu technicznego w środowisku wirtualnym, umożliwiających częściową automatyzację interpretacji danych i pracę zdalną.

- **Poziom 3:** Cyfrowe odwzorowanie obiektu
- **Poziom 4:** Wirtualna inspekcja obiektu
- **Poziom 5:** Automatyczna detekcja uszkodzeń

Faza III. Automatyzacja i wspomaganie pracy w terenie

Cel: Wdrożenie inteligentnego wspomagania i automatyzacji bezpośrednio w procesach terenowych w celu wsparcia lub częściowego zastąpienia inspektora podczas inspekcji.

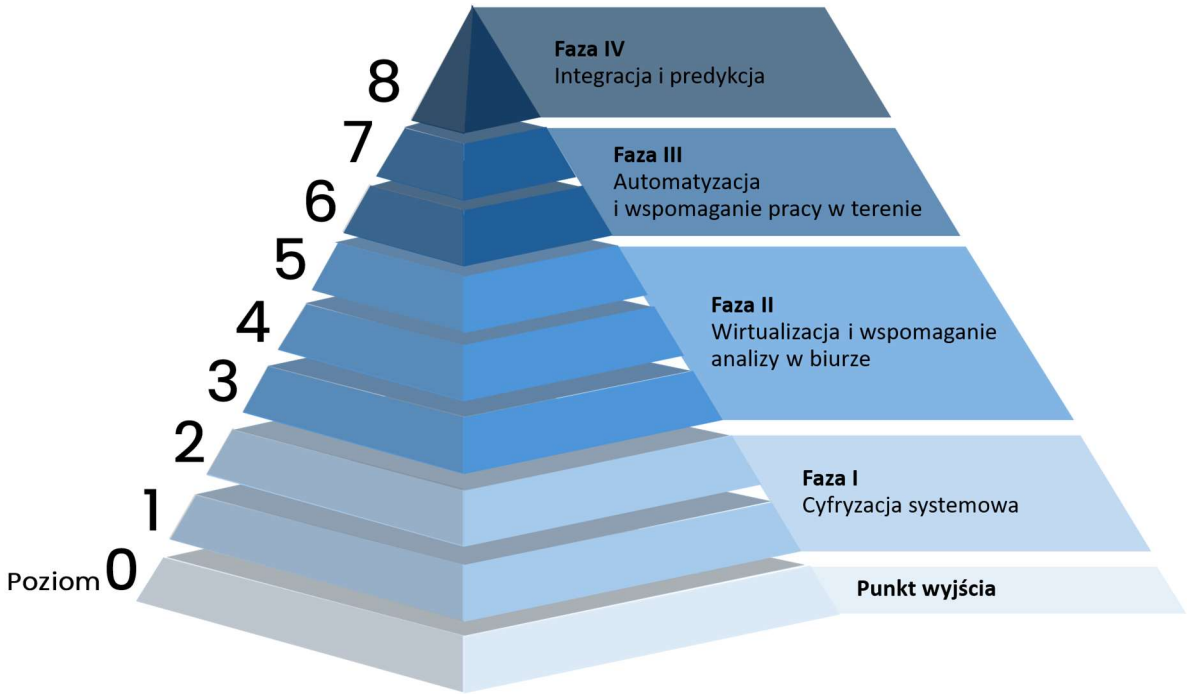
- **Poziom 6:** Wspomagana inspekcja terenowa

- **Poziom 7:** Autonomiczna inspekcja zrobotyzowana

Faza IV. Integracja i predykcja

Cel: Połączenie rozwiązań wypracowanych w fazach I–III w jeden zintegrowany system diagnostyczno-predykcyjny. Etap ten prowadzi do utworzenia środowiska umożliwiającego kompleksową analizę, prognozowanie zmian oraz wspomaganie decyzji utrzymaniowych.

- **Poziom 8:** Zintegrowany system diagnostyczno-predykcyjny



Rys. 4-1 Autorska koncepcja piramidy wirtualizacji procesu inspekcji mostu

W kolejnych podrozdziałach omówiono charakterystykę każdego z poziomów piramidy wirtualizacji. Poziom 0, stanowiący punkt wyjścia, opisano w sposób ogólny, jako odniesienie dla dalszych etapów transformacji. Każdy z kolejnych poziomów (1-8) został przeanalizowany według spójnego, pięciopunktowego schematu:

- **Definicja i cel:** ogólna charakterystyka danego poziomu, określająca jego istotę, zakres i główny cel w procesie wirtualizacji inspekcji.
- **Kluczowe technologie i metodyki:** podstawowe narzędzia i technologie wspomagające, które umożliwiają realizację założeń tego poziomu.
- **Wartość dodana:** porównanie z poziomem niższym ze wskazaniem kluczowych korzyści, zmian jakościowych i usprawnień procesu.
- **Rola inspektora:** opis transformacji sposobu udziału człowieka w procesie.
- **Ograniczenia i perspektywy:** wskazanie barier danego poziomu, motywujących do przejścia na poziom wyższy.

4.2.2 Poziom 0 – Tradycyjna inspekcja

Poziom 0 stanowi punkt wyjścia dla modelu piramidy. Obejmuje tradycyjny, analogowy proces diagnostyczny, który wciąż pozostaje powszechnie stosowany w praktyce inspekcyjnej. Opiera się on na bezpośrednich oględzinach wizualnych obiektu, podczas których ocena stanu technicznego jest

całkowicie zależna od doświadczenia, intuicji i wiedzy eksperckiej inspektora. Podstawowe czynności obejmują oględziny w terenie, wykonanie odręcznych szkiców i notatek, często z wykorzystaniem podstawowych narzędzi pomiarowych (Rys. 4-2).

Dokumentacja jest generowana w formie papierowej lub, w najlepszym wypadku, jako nieustrukturyzowane pliki tekstowe. Kluczowym ograniczeniem tego podejścia jest fakt, że dane w tej postaci są trudne do archiwizacji, nieporównywalne i nie nadają się do automatycznej analizy. W rezultacie, ich potencjał diagnostyczny jest tracony niemal natychmiast po zakończeniu inspekcji, uniemożliwiając efektywne monitorowanie obiektu w czasie.

Mimo tych ograniczeń poziom ten stanowi ważny punkt odniesienia dla całego procesu transformacji. To właśnie w ten sposób, przez dekady, inżynierowie budowali swoją wiedzę praktyczną, doświadczenie zawodowe i nieformalną bazę danych o zachowaniu się konstrukcji. Ten historyczny model, oparty na ludzkim doświadczeniu i tradycyjnych metodach, stanowi fundament, na którym rozwija się współczesna cyfryzacja i wirtualizacja procesu inspekcji obiektów mostowych.



Rys. 4-2 Schemat tradycyjnej inspekcji (Poziom 0)

4.2.3 Poziom 1 – Inspekcja wspomagana cyfrowo

Celem poziomu 1 jest wprowadzenie podstawowych narzędzi cyfrowych wspierających proces dokumentowania i archiwizowania wyników inspekcji, bez zasadniczej zmiany metodyki, która nadal opiera się na manualnych oględzinach. Stanowi to pierwszy krok odejścia od procesu analogowego (poziom 0) i początek Fazy I – Cyfryzacji systemowej. Na tym etapie tradycyjne metody obserwacji i oceny pozostają podstawą pracy inspektora, jednak proces rejestracji danych zostaje usprawniony dzięki wykorzystaniu technologii cyfrowych. Wprowadzenie elementarnej cyfryzacji umożliwia ograniczenie błędów, poprawę czytelności danych oraz łatwiejsze ich udostępnianie i archiwizację (Rys. 4-3).

Kluczowymi technologiami wspomagającymi są urządzenia mobilne, takie jak tablety i smartfony, umożliwiające rejestrację fotograficzną i opisową, a także elektroniczne formularze inspekcyjne, cyfrowe raporty i podstawowe narzędzia biurowe do przetwarzania danych. Dane są gromadzone i archiwizowane w postaci luźnych, niepowiązanych ze sobą plików cyfrowych (np. .docx, .pdf, .jpg). Stosowane są również proste repozytoria plików lub usługi chmurowe, które pozwalają na przechowywanie i wymianę dokumentacji między członkami zespołu inspekcyjnego.

Wartością dodaną w stosunku do poziomu 0 jest przejście od dokumentacji papierowej do cyfrowej, co zwiększa trwałość i dostępność danych oraz umożliwia łatwiejsze porównywanie wyników między kolejnymi inspekcjami. Cyfrowa rejestracja ogranicza ryzyko utraty informacji, poprawia przejrzystość raportów i ułatwia organizację materiałów archiwalnych oraz dzielenie się nimi drogą elektroniczną.

Rola inspektora pozostaje zasadniczo niezmieniona w stosunku do poziomu 0. Nadal jest on wykonawcą pełnego zakresu czynności, odpowiedzialnym za fizyczne oględziny, interpretację i przygotowanie raportu. Zmieniają się jedynie narzędzia, inspektor korzysta z rozwiązań poprawiających dokładność, porządek i kompletność danych, takich jak komputer, aparat cyfrowy czy proste bazy danych.

Głównym ograniczeniem tego poziomu jest brak ustrukturyzowania i standaryzacji danych. Nie istnieje centralna baza informacji, a dokumentacja pozostaje rozproszona i trudna do analizy porównawczej, co utrzymuje problem chaosu ewidencyjnego. Kierunek dalszego rozwoju prowadzi zatem ku wdrożeniu odpowiednich standardów oraz zintegrowanej platformy (poziom 2).



Rys. 4-3 Schemat inspekcji wspomaganej cyfrowo (Poziom 1)

4.2.4 Poziom 2 – Zintegrowana inspekcja cyfrowa

Celem poziomu 2 jest przede wszystkim fundamentalna zmiana w organizacji danych, polegająca na przejściu od luźnych plików cyfrowych (poziom 1) do ustrukturyzowanej, ustandaryzowanej i zintegrowanej bazy danych. Etap ten stanowi kluczową bazę dla całego procesu wirtualizacji oraz punkt, w którym proces inspekcji zostaje po raz pierwszy sformalizowany za pomocą dedykowanych platform cyfrowych, szczegółowych wytycznych i standardów postępowania. Ujednolicenie sposobu gromadzenia, klasyfikacji i interpretacji danych zapewnia spójność informacji oraz umożliwia ich dalsze wykorzystanie w zautomatyzowanych procesach analizy i oceny (Rys. 4-4).

Kluczowymi technologiami wspomagającymi są: centralna baza danych (na wzór systemów przedstawionych w pkt. 2.2, takich jak norweski Brutus czy włoski AINOP), cyfrowe repozytoria danych oraz oprogramowanie i aplikacje mobilne umożliwiające generowanie raportów z wykorzystaniem zdefiniowanych szablonów i standardów. Kluczowa staje się również standaryzacja identyfikacji elementów obiektów mostowych, której proponowany kształt przedstawiony zostanie w pkt. 4.3. W jej ramach każdy element otrzymuje unikalny alfanumeryczny kod, a wspomagająco stosowane są znaczniki fizyczne (np. kody QR, znaczniki NFC), pozwalające na jego szybkie rozpoznanie w terenie. Na tym etapie pojawia się już również pierwsze zastosowanie sztucznej inteligencji, która ma wspierać proces np. w mechanizmach automatycznej kontroli poprawności wpisów do bazy, automatycznym kategoryzowaniu zdjęć czy pomocy w wypełnianiu, generowaniu i analizie raportów.

Wartością dodaną jest fundamentalny skok jakościowy w organizacji i użyteczności danych. Różnica pomiędzy poziomem 1 a poziomem 2 jest jedną z najbardziej znaczących, a proces inspekcji wchodzi na zupełnie nowy poziom. Dane stają się ustrukturyzowane, maszynowo odczytywalne i porównywalne w czasie. Opracowane standardy i wytyczne inspekcyjne jednoznacznie definiują sposób prowadzenia oględzin, a ustandaryzowana ocena staje się wiarygodną podstawą do przeprowadzania analizy ryzyka. Zamiast izolowanych raportów PDF, system gromadzi konkretne oceny powiązane z unikalnymi identyfikatorami elementów. Całość rozwiązuje problem chaosu

ewidencyjnego i ogranicza subiektywność ocen, wymuszając stosowanie wspólnego standardu. Zintegrowany system umożliwia porównywanie obiektów między sobą, analizę trendów oraz szybkie wyszukiwanie informacji archiwalnych, a dane mogą być wielokrotnie wykorzystywane w kolejnych inspekcjach, analizach i raportach zbiorczych.

Rola inspektora na tym etapie ewoluuje. W dalszym ciągu przeprowadza on oględziny i gromadzi dane w terenie, lecz staje się również kluczowym użytkownikiem systemu zarządzania informacją. Jego praca koncentruje się na wprowadzaniu i weryfikacji danych w ujednoliconym środowisku, co zwiększa odpowiedzialność za jakość informacji, ale jednocześnie ułatwia organizację pracy. W nowych standardach kluczową rolę zaczyna odgrywać algorytm, który na podstawie jasno zdefiniowanych i ustandaryzowanych danych wejściowych wprowadzanych przez inspektora, wspomaga klasyfikację obiektu i wskazuje rekomendowane działania. Włączenie analizy ryzyka do systemu oceny pozwoliłoby również w przyszłości na uelastycznienie harmonogramu inspekcji. W praktyce oznaczałoby to, że częstotliwość kontroli mogłaby być powiązana z realnym poziomem ryzyka.

Głównym ograniczeniem tego poziomu jest fakt, że pomimo pełnej standaryzacji danych proces inspekcji pozostaje wciąż manualny. Najpełniejszą wiedzę o stanie technicznym nadal posiada inspektor obecny na obiekcie, a informacje nie mają jeszcze charakteru przestrzennego. W przypadku nieuzyskania niektórych danych w terenie, konieczny jest fizyczny powrót na obiekt. Ocena skomplikowanych zależności geometrycznych lub relacji między uszkodzeniami w różnych częściach obiektu nadal wymaga dużej wyobraźni i analizy wielu osobnych zdjęć. Motywuje to do wdrożenia metod cyfrowego odwzorowania obiektu (poziom 3).



Rys. 4-4 Schemat zintegrowanej inspekcji cyfrowej (Poziom 2)

4.2.5 Poziom 3 – Cyfrowe odwzorowanie obiektu

Celem poziomu 3 jest odwzorowanie rzeczywistej geometrii i tekstury obiektu w postaci cyfrowej, tworzącej przestrzenną reprezentację konstrukcji, co rozpoczyna Fazę II – Wirtualizację i wspomaganie analizy w biurze. Proces ten opiera się na technikach przechwytywania rzeczywistości (ang. Reality Capture, RC), które pozwalają na zbudowanie wirtualnego modelu obiektu, np. w formie chmury punktów lub modelu siatkowego. Cyfrowe odwzorowanie umożliwia po raz pierwszy analizę obiektu nie tylko w formie opisów i zdjęć, lecz także w formie jego geometrycznie wiernego modelu odtworzonego z rzeczywistych danych przestrzennych (Rys. 4-5).

Kluczowymi technologiami wspomagającymi są metody przechwytywania rzeczywistości: przede wszystkim fotogrametria niskopułapowa (często z wykorzystaniem BSP) oraz naziemne lub mobilne skanowanie laserowe (TLS/MLS). Na tym etapie dane są zazwyczaj pozyskiwane w sposób manualny lub półautomatyczny, np. poprzez zaplanowany nalot BSP. Wymagają one specjalistycznego

oprogramowania do przetwarzania danych, generowania chmur punktów i modeli siatkowych, które następnie mogą być wykorzystywane do wizualizacji oraz pomiaru uszkodzeń i deformacji.

Wartością dodaną tego etapu jest nadanie danym diagnostycznym wymiaru przestrzennego i stworzenie cyfrowego obrazu obiektu, który może być analizowany, mierzony i udostępniany bez konieczności ponownego dostępu do mostu. Cyfrowe odwzorowanie umożliwia bardziej precyzyjną interpretację lokalizacji i charakteru uszkodzeń na fotorealistycznej teksturze, a także porównywanie modeli w czasie. Utworzone modele 3D stanowią pierwszy element budowy cyfrowego bliźniaka i tworzą bazę dla wirtualnych analiz technicznych oraz inspekcji biurowych.

Rola inspektora ulega znacznemu poszerzeniu. Oprócz wykorzystania tradycyjnych kompetencji diagnostycznych, bierze on udział w planowaniu i nadzorze procesu pozyskiwania danych geometrycznych oraz weryfikuje ich jakość i kompletność. Może pełnić również funkcję operatora zaawansowanego sprzętu pomiarowego (np. certyfikowanego pilota BSP, operatora skanera) lub specjalisty przetwarzania danych, odpowiedzialnego za wygenerowanie poprawnego i dokładnego modelu 3D z zebranego materiału. Dopuszczalny jest elastyczny podział zadań pomiędzy głównego inspektora a operatora terenowego. Zadania związane z pozyskiwaniem danych mogą być realizowane przez mniej doświadczonego, rozwijającego się inspektora, który specjalizuje się w tego typu czynnościach i z czasem aspiruje do roli głównego inspektora. Niezależnie od przyjętego podziału ról, stworzenie cyfrowego modelu umożliwia "wirtualny powrót" na obiekt lub wręcz pierwszą wirtualną wizytę na nim głównego inspektora.

Głównym ograniczeniem tego poziomu jest fakt, że samo posiadanie modelu 3D nie jest równoznaczne z przeprowadzeniem inspekcji. Model na tym etapie jest jedynie odwzorowaniem geometrii i wyglądu obiektu mostowego. Brakuje jeszcze ustrukturyzowanej metodyki oraz dedykowanych narzędzi do prowadzenia w pełni cyfrowej inspekcji w środowisku 3D. Stanowi motywację do wdrożenia kolejnego poziomu, w którym przestrzenne odwzorowanie zostaje wzbogacone o warstwy danych opisowych i narzędzia analityczne umożliwiające rzeczywistą ocenę stanu technicznego w środowisku wirtualnym.



Rys. 4-5 Schemat cyfrowego odwzorowania obiektu (Poziom 3)

4.2.6 Poziom 4 – Wirtualna inspekcja obiektu

Celem poziomu 4 jest przeprowadzenie inspekcji w środowisku wirtualnym z wykorzystaniem cyfrowego modelu obiektu, który staje się podstawowym nośnikiem informacji diagnostycznych. Etap ten stanowi naturalne rozwinięcie cyfrowego odwzorowania (poziom 3) i polega na wykorzystaniu modelu 3D jako narzędzia do prowadzenia analizy, oceny i dokumentowania stanu technicznego.

Inspekcja odbywa się w sposób zdalny, w bezpiecznym środowisku komputerowym lub immersyjnym, co pozwala na szczegółową analizę danych bez konieczności fizycznej obecności na obiekcie (Rys. 4-6).

Kluczowymi technologiami wspomagającymi są platformy analityczne oraz przeglądarki modeli 3D (stacjonarne lub sieciowe), które umożliwiają interakcję z modelem. Na tym poziomie wykorzystywane są również technologie immersyjne, takie jak VR, pozwalające na uzyskanie wrażenia bliskiego rzeczywistej obecności na obiekcie. W ramach oprogramowania stosowane są narzędzia pomiarowe zintegrowane z modelami (np. pomiar długości, objętości, deformacji), systemy znaczników i adnotacji oraz bazy danych przypisane do elementów konstrukcyjnych. Możliwe jest również powiązanie przestrzennych obserwacji z danymi ewidencyjnymi z poziomu 2 w jednym interfejsie.

Wartością dodaną tego etapu jest wprowadzenie oprogramowania inspekcyjnego pozwalającego na przeprowadzanie pełnych analiz w środowisku wirtualnym, z wykorzystaniem modeli utworzonych na poziomie 3. Inspekcja staje się znacznie bezpieczniejsza, eliminując ryzyko związane z fizycznym dostępem do trudno dostępnych elementów. Inspektor może wirtualnie poruszać się po modelu, analizować uszkodzenia, przeglądać historię ocen oraz zestawiać wyniki z różnych okresów. Stworzenie cyfrowego środowiska diagnostycznego umożliwia wirtualny powrót na oceniany obiekt. Inżynier, który nie był fizycznie obecny podczas inspekcji lub czynności pomiarowych, będzie mógł uzyskać obszerny obraz stanu technicznego obiektu i współdecydować o jego ewaluacji. Wirtualna inspekcja umożliwia więc nie tylko dokładniejszą analizę, ale także efektywniejszą współpracę zespołową w środowisku biurowym lub zdalnym.

Rola inspektora na tym etapie polega na pracy w środowisku cyfrowym, w którym przeprowadza ocenę stanu technicznego obiektu, korzystając z narzędzi pomiarowych i analitycznych dostępnych w modelu 3D. Inspektor staje się wirtualnym diagnostą, analitykiem i interpretatorem danych, wykorzystującym model jako wirtualny odpowiednik obiektu rzeczywistego. Jego fizyczna obecność na obiekcie przestaje być konieczna, w sytuacji, gdy obowiązki pozyskiwania danych przejmuje wyspecjalizowany operator terenowy. Dzięki integracji z bazami danych i archiwami fotograficznymi może on nie tylko weryfikować aktualny stan elementów, ale też analizować zmiany w czasie i planować działania utrzymaniowe. Coraz większą rolę zaczyna odgrywać współpraca między ekspertami, którzy mogą jednocześnie analizować ten sam model w środowisku sieciowym.

Głównym ograniczeniem tego poziomu jest to, że mimo przeniesienia inspekcji do środowiska biurowego, proces interpretacji i identyfikacji uszkodzeń pozostaje w pełni manualny. Inspektor musi polegać na własnej percepcji i doświadczeniu, analizując często ogromne zbiory danych i tekstur w poszukiwaniu wad. Proces ten jest czasochłonny i podatny na błędy ludzkie, w tym na przeoczenia. Ta manualna bariera analityczna stanowi motywację do wdrożenia algorytmów sztucznej inteligencji automatyzujących detekcję uszkodzeń (poziom 5).



Rys. 4-6 Schemat wirtualnej inspekcji obiektu (Poziom 4)

4.2.7 Poziom 5 – Automatyczna detekcja uszkodzeń

Celem poziomu 5 jest wprowadzenie automatyzacji procesu identyfikacji i klasyfikacji uszkodzeń poprzez zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji. Pozwala to na przetwarzanie dużych zbiorów informacji pochodzących z poziomów wcześniejszych (modele 3D, zdjęcia, raporty inspekcyjne). Etap ten stanowi początek automatycznej analizy diagnostycznej, w której informacja nie tylko jest przetwarzana, lecz również interpretowana przez maszyny. Co kluczowe, celem tego poziomu jest nie tylko analiza danych w biurze, ale również wytrenowanie i walidacja modeli AI, które będą stanowić bazę dla bardziej zaawansowanych rozwiązań wspomagających inspekcje terenowe, na kolejnych poziomach, gdzie algorytmy będą analizować dane w czasie rzeczywistym i wspierać operatorów w zbieraniu informacji o obiekcie (Rys. 4-7).

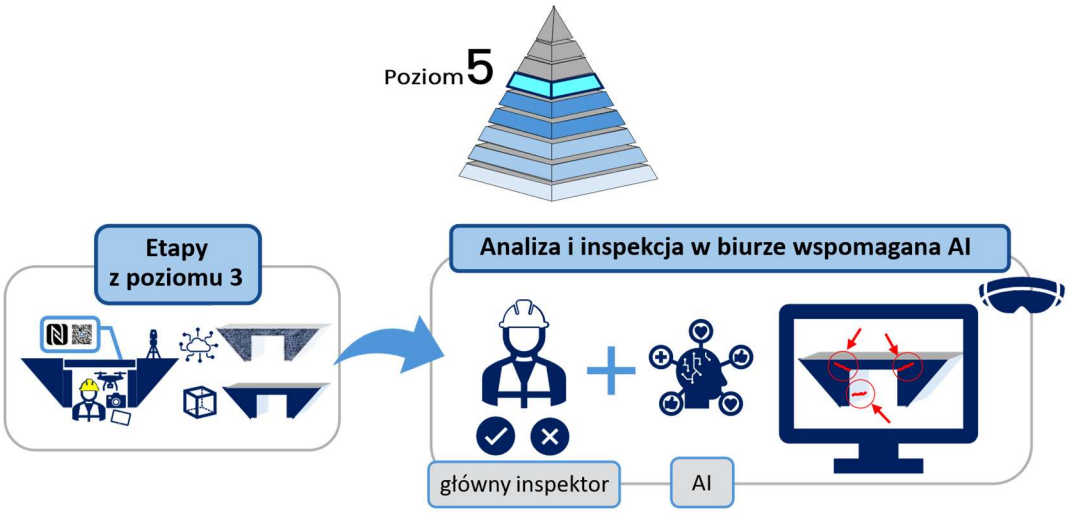
Kluczową technologią są elementy sztucznej inteligencji, a w szczególności algorytmy uczenia maszynowego (ML) i głębokiego (DL) oraz wizja komputerowa (CV). Wykorzystuje się tu zaawansowane architektury sieci neuronowych (np. CNN, YOLO) wytrenowane na dużych zbiorach danych do rozpoznawania specyficznych wzorców uszkodzeń – takich jak rysy, pęknięcia czy korozja – zarówno na płaskich zdjęciach, jak i w danych przestrzennych.

Wartością dodaną tego etapu jest znaczące zwiększenie efektywności, obiektywizmu i powtarzalności procesu oceny stanu technicznego. Automatyczna analiza pozwala znacząco skrócić czas przeglądu, umożliwia przetwarzanie dużych wolumenów danych oraz redukuje ryzyko błędów wynikających z czynnika ludzkiego. Systemy uczące się potrafią wskazywać obszary o wysokim prawdopodobieństwie wystąpienia uszkodzeń, kierując uwagę inspektora na kluczowe fragmenty konstrukcji. W efekcie inspekcja staje się bardziej skalowalna i niezależna od indywidualnych umiejętności obserwatora.

Rola inspektora na tym etapie polega na nadzorze i weryfikacji wyników wygenerowanych przez system. Inspektor nie musi już samodzielnie przeszukiwać całego modelu w poszukiwaniu wad, a pełni funkcję nadzorczą (zgodnie z koncepcją HITL). Ocenia on poprawność klasyfikacji, korygując błędne oznaczenia i dostarczając systemowi informacji zwrotnej niezbędnej do dalszego uczenia, co bezpośrednio przekłada się na stopniową poprawę skuteczności działania algorytmów przy kolejnych analizach. To on ostatecznie zatwierdza działanie algorytmu dopuszczając go do użytku w wyższych poziomach. Na tym etapie algorytmy mogą pełnić rolę wyspecjalizowanych osobistych asystentów AI, wspierających inspektora w analizie i stopniowo dostosowywanych do specyfiki ocenianych obiektów oraz jego sposobu pracy i potrzeb. Operator terenowy w dalszym ciągu odpowiada za pozyskiwanie materiału fotograficznego i pomiarowego niezbędnego do treningu i kalibracji modeli. Wykonuje także

dodatkowe obserwacje w miejscach wskazanych przez algorytm weryfikując poprawność klasyfikacji uszkodzeń.

Głównym ograniczeniem tego poziomu jest fakt, że skuteczność algorytmu AI jest wprost zależna od jakości i kompletności pozyskanych danych. Materiał źródłowy, zbierany przez operatora terenowego, może być obarczony błędami (np. pominięciem obszarów, niewłaściwym oświetleniem lub zakłóceniami geometrii). Aby zminimalizować to ryzyko, analiza biurowa na poziomie 5 wymuszałaby tworzenie kompletnego modelu 3D całego obiektu przy każdej inspekcji, co jest procesem niezwykle pracochłonnym, kosztownym, a często niemożliwym do wykonania. Alternatywą byłby powrót na obiekt głównego inspektora w celu weryfikacji najgroźniejszych uszkodzeń. Tworzy to barierę wdrożeniową i motywuje do rozwoju systemów, które przeniosą te algorytmy w teren, dając operatorowi wsparcie oraz informację zwrotną w czasie rzeczywistym.



Rys. 4-7 Schemat automatycznej detekcji uszkodzeń (Poziom 5)

4.2.8 Poziom 6 – Wspomagana inspekcja terenowa

Celem poziomu 6 jest przeniesienie wytrenowanych modeli sztucznej inteligencji z biura bezpośrednio w teren, aby wspierać operatora w czasie rzeczywistym. Jest to początek Fazy III – Automatyzacji i wspomagania pracy w terenie. Etap ten ma charakter przejściowy i stanowi kluczowe ogniwo pomiędzy wirtualną analizą a pełną automatyzacją procesu inspekcyjnego. System zaczyna działać bezpośrednio na obiekcie, analizując dane pozyskiwane w czasie rzeczywistym i generując wskazówki dla operatora terenowego. Algorytm wspomaga go w lokalizacji nowych oraz weryfikacji wcześniej wykrytych uszkodzeń, a także w ocenie, które elementy wymagają ponownego pomiaru lub rekonstrukcji. Na tym etapie możliwe staje się zastąpienie pełnej rekonstrukcji obiektu przy każdej inspekcji rekonstrukcją selektywną, obejmującą jedynie obszary, które uległy zmianom, zawierają nowe uszkodzenia lub należą do elementów o krytycznym znaczeniu konstrukcyjnym. Jest to również moment praktycznej walidacji i kalibracji modeli AI w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych (Rys. 4-8).

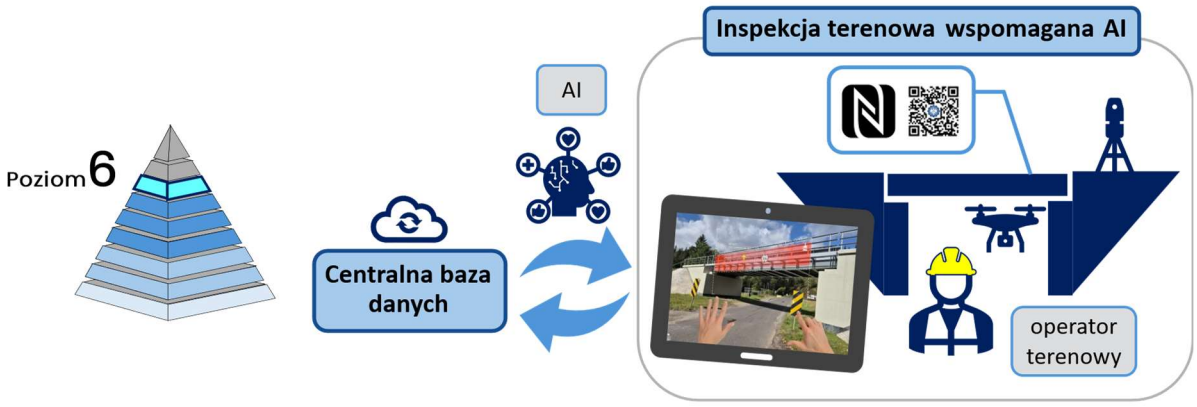
Kluczowymi technologiami są aplikacje mobilne (na tabletach lub smartfonach) wykorzystujące modele AI do rozpoznawania uszkodzeń w czasie rzeczywistym, a także systemy wspomagania wizualnego oparte na rozszerzonej rzeczywistości (AR), które mogą wskazywać operatorowi miejsca wymagające szczególnej uwagi. Dodatkowo, dzięki połączeniu z centralną bazą danych, możliwa jest

natychmiastowa weryfikacja wcześniejszych obserwacji oraz synchronizacja wyników inspekcji z danymi archiwalnymi. Operator, kierując kamerę urządzenia na element, otrzymuje natychmiastową informację zwrotną: system nakłada na obraz dane z bazy (np. po odczytaniu znacznika NFC lub kodu QR) oraz ramki identyfikujące uszkodzenia wykryte przez AI.

Wartością dodaną tego etapu jest istotne zwiększenie precyzji i bezpieczeństwa pracy w terenie przy jednoczesnym ograniczeniu liczby błędów ludzkich. System analizujący obraz w czasie rzeczywistym może ostrzegać operatora o potencjalnych nieprawidłowościach, sugerować ujęcia fotograficzne lub automatycznie oznaczać obszary wymagające szczegółowych pomiarów. W efekcie operator współpracuje z algorytmem, który pełni rolę inteligentnego asystenta terenowego. Wprowadzenie tego poziomu pozwala na wykonywanie wybiórczych rekonstrukcji lub pomiarów uzupełniających zamiast pełnej, czasochłonnej rekonstrukcji całego obiektu przy każdej inspekcji. Całość umożliwia bieżącą weryfikację i douczanie modelu AI bezpośrednio na obiekcie, co znacząco obniża koszty i czas inspekcji.

Rola inspektora na tym etapie polega na nadzorze i ocenie poprawności funkcjonowania systemu w środowisku rzeczywistym (HITL). Inspektor weryfikuje wyniki pracy operatora i systemu AI, zatwierdza wyniki detekcji oraz ocenia jakość zbieranych danych. Operator terenowy, wspomagany przez inteligentny system, odpowiada za pozyskiwanie danych w sposób ukierunkowany i kontrolowany przez algorytmy. System może w czasie rzeczywistym wskazywać mu lokalizacje do wykonania zdjęć, ostrzegać o brakach danych lub błędach w rejestracji. W ten sposób inspekcja terenowa staje się procesem interaktywnym, w którym człowiek i system uczą się od siebie nawzajem.

Głównym ograniczeniem tego poziomu jest wciąż wysoka zależność skuteczności inspekcji od operatora, który musi zachować czujność i odpowiedzialność za poprawność rejestracji, ponieważ w przypadku błędnych wskazań systemu konsekwencje mogą być trudne do zweryfikowania. Proces, mimo wsparcia technologicznego, nadal nie jest w pełni powtarzalny. Motywuje to do stopniowego ograniczania udziału człowieka w procesie pozyskiwania danych i zastępowania operatora zrobotyzowanymi systemami autonomicznymi. Poziom 6 pełni więc funkcję przejściową: etapu walidacji terenowej i uczenia systemów autonomicznych, prowadząc bezpośrednio do kolejnego poziomu, w którym proces pozyskiwania danych staje się całkowicie zautomatyzowany.



Rys. 4-8 Schemat wspomaganej inspekcji terenowej (Poziom 6)

4.2.9 Poziom 7 – Autonomiczna inspekcja zrobotyzowana

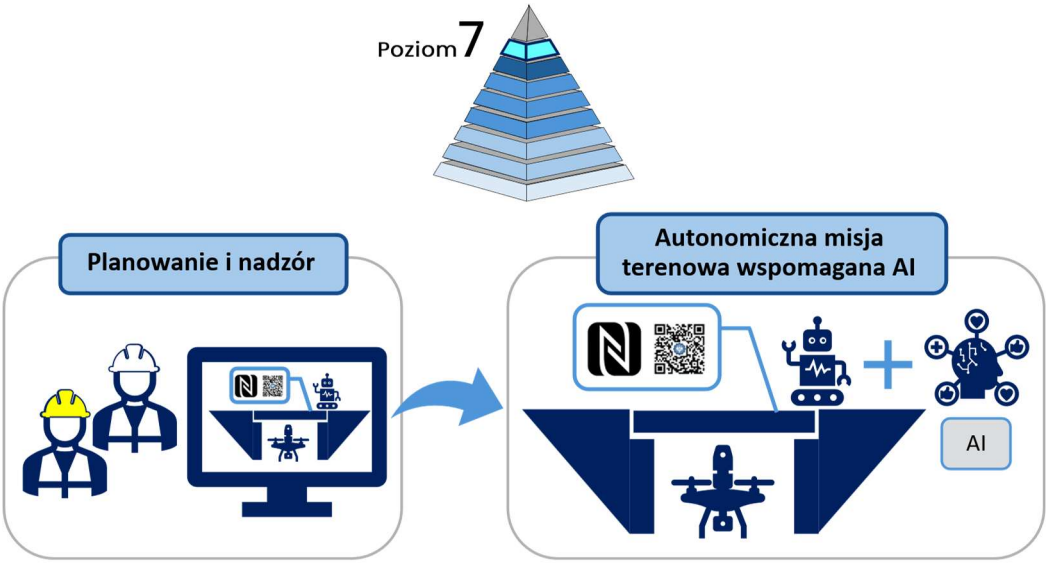
Celem poziomu 7 jest osiągnięcie pełnej automatyzacji procesu inspekcji, przede wszystkim w zakresie pozyskiwania danych, ale również ich przetwarzania, analizy i raportowania. Na tym etapie operator terenowy zostaje zastąpiony przez autonomiczne platformy robotyczne, które samodzielnie i powtarzalnie realizują zaplanowaną misję inspekcyjną. Zintegrowane moduły sztucznej inteligencji samodzielnie analizują i klasyfikują wyniki, dostarczając użytkownikowi gotowych wniosków diagnostycznych (Rys. 4-9).

Kluczowymi technologiami są autonomiczne roboty mobilne powietrzne, lądowe i pływające (UAV, UGV, USV), wyposażone w czujniki wizyjne, laserowe i termowizyjne. Platformy te korzystają z zaawansowanych systemów nawigacji, takich jak SLAM (ang. Simultaneous Localization and Mapping), GNSS czy RTK, oraz z wbudowanych, wytrenowanych modeli sztucznej inteligencji. Umożliwia to robotom nie tylko autonomiczne poruszanie się po precyzyjnie zdefiniowanych trasach, ale także inteligentną analizę obrazu i zbieranie danych w czasie rzeczywistym. Całość działa w trybie zdalnego nadzoru, z możliwością interwencji inspektora w przypadku nieprawidłowości lub sytuacji krytycznych.

Wartością dodaną tego etapu jest przede wszystkim niemal całkowite wyeliminowanie konieczności bezpośredniego udziału człowieka w procesie pozyskiwania danych, przez co znacznie zwiększa się bezpieczeństwo inspekcji. Czas trwania inspekcji ulega skróceniu, a jej wyniki cechują się wysoką powtarzalnością i obiektywizmem. Robot jest w stanie precyzyjnie powtórzyć misję (np. wrócić w te same punkty, zachować te same kąty kamery), a algorytmy sztucznej inteligencji dokonują obiektywnej oceny tych powtarzalnie zbieranych danych. System samodzielnie ocenia jakość danych, uzupełnia brakujące informacje i w razie potrzeby inicjuje ponowny pomiar.

Rola inspektora na tym etapie, podobnie jak na poziomie 6, polega na pełnieniu funkcji nadzorcy procesu (HITL). Konieczne jest wielokierunkowe wykształcenie inspektora, który definiuje parametry misji, określa priorytety diagnostyczne i analizuje raporty generowane przez system. Nie uczestniczy już bezpośrednio w inspekcji, lecz odpowiada za weryfikację poprawności działania algorytmów, interpretację wyników końcowych i podejmowanie kluczowych decyzji. Operator terenowy również może zdalnie nadzorować misję oraz brać udział w jej planowaniu.

Głównym ograniczeniem tego poziomu jest wysoka złożoność techniczna systemów autonomicznych oraz potrzeba zapewnienia ich niezawodności w zmiennych warunkach środowiskowych. Wymagają one stałej łączności, dużej mocy obliczeniowej i dokładnej kalibracji czujników. Wyzwanie stanowią również kwestie bezpieczeństwa, odpowiedzialności prawnej i certyfikacji operacji w przestrzeni publicznej, co sprawia, że poziom 7 jest najbardziej odległy do pełnego, powszechnego wdrożenia. Ponadto, z perspektywy diagnostycznej, poziom ten stanowi zwieńczenie automatyzacji reaktywnej. System jest zdolny do wykrywania i porównywania zmian geometrycznych, lecz brakuje mu bezpośredniej, zautomatyzowanej korelacji z danymi dynamicznymi (np. z systemów SHM), które umożliwiłyby wyjaśnienie przyczyn obserwowanych zmian. Otwiera to drogę do kolejnego etapu rozwoju.



Rys. 4-9 Schemat autonomicznej inspekcji zrobotyzowanej (Poziom 7)

4.2.10 Poziom 8 – Zintegrowany system diagnostyczno-predykcyjny

Celem poziomu 8 jest stworzenie w pełni zintegrowanego, samoaktualizującego się systemu diagnostyczno-predykcyjnego, który łączy wszystkie wcześniejsze poziomy piramidy w jeden spójny ekosystem zarządzania informacją o obiekcie mostowym osiągając najwyższy stopień dojrzałości diagnostycznej. Chociaż podstawowe algorytmy predykcyjne mogły być wdrażane na niższych poziomach, poziom 8 jest tu opisany jako ostateczne zwieńczenie systemu, ponieważ bazuje na powtarzalnych, ustandaryzowanych danych. System nie tylko gromadzi i analizuje dane, ale również uczy się na ich podstawie, rozpoznaje trendy i przewiduje przyszłe zachowania konstrukcji. To etap, w którym cyfrowa reprezentacja obiektu przestaje być wyłącznie odzwierciedleniem rzeczywistości, a staje się aktywnym, predykcyjnym narzędziem wspomagania decyzji (Rys. 4-10).

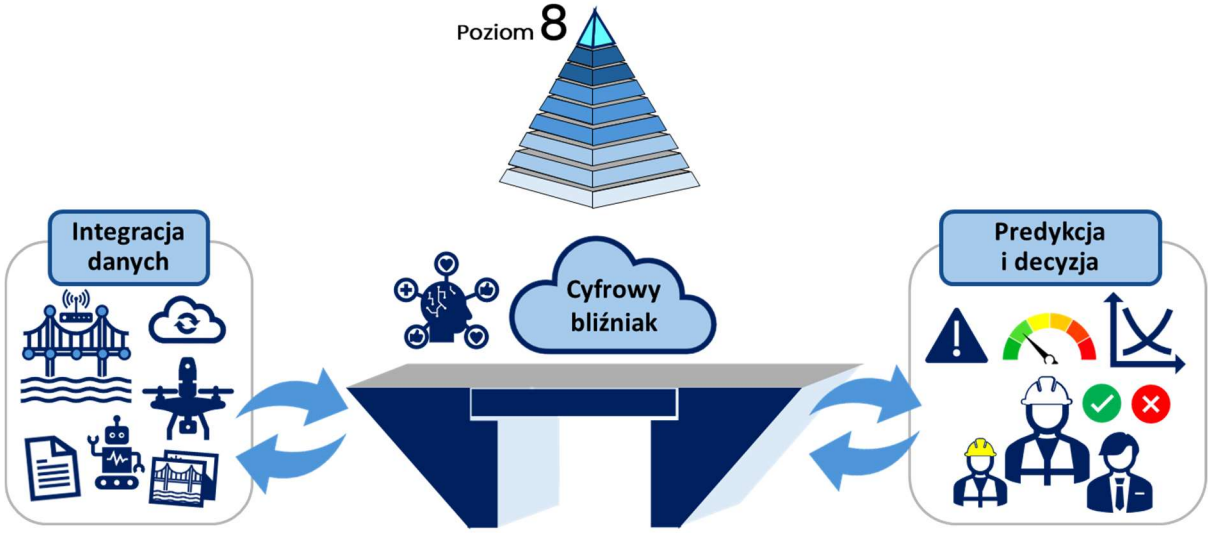
Kluczowymi technologiami są zintegrowane platformy danych oparte na architekturze cyfrowych bliźniaków, systemy zarządzania informacją o infrastrukturze (BIM), algorytmy sztucznej inteligencji do modelowania zjawisk degradacyjnych oraz metody predykcyjne oparte na analizie trendów i danych wielośródłowych. System integruje dane z autonomicznych inspekcji, systemów monitoringu (SHM) oraz z raportów eksperckich. Dzięki zastosowaniu metod uczenia maszynowego, możliwe staje się przewidywanie prawdopodobieństwa wystąpienia uszkodzeń oraz szacowanie tempa ich rozwoju.

Wartością dodaną tego etapu jest pełna integracja danych i przejście z diagnostyki reaktywnej do diagnostyki predykcyjnej. System nie tylko reaguje na zmiany, ale również identyfikuje ich przyczyny i przewiduje skutki. Umożliwia to wdrożenie zaawansowanych modeli zarządzania ryzykiem, automatyczne planowanie inspekcji oraz priorytetyzację działań utrzymaniowych. W efekcie obiekt mostowy staje się elementem inteligentnej infrastruktury, w której dane z różnych źródeł (inspekcje, monitoring, analizy) współdziałają w ramach jednego cyfrowego ekosystemu. Zintegrowany system diagnostyczno-predykcyjny może funkcjonować zarówno na poziomie pojedynczego mostu, jak i całej sieci infrastrukturalnej.

Rola inspektora na tym etapie polega na nadzorze strategicznym nad działaniem systemu oraz interpretacji wyników predykcyjnych w kontekście decyzji inżynierskich i zarządczych. Jego zadaniem,

poza weryfikacją opisaną na poziomie 7 staje się ocena wiarygodności prognoz i ich wpływu na planowanie utrzymania obiektu. Rola inspektora ewoluuje w kierunku analityka danych infrastrukturalnych, wykorzystującego dane z systemu do wspierania zarządcy w podejmowaniu racjonalnych, opartych na danych decyzji.

Głównym ograniczeniem tego poziomu jest złożoność integracji danych pochodzących z wielu źródeł i systemów o różnej strukturze, jakości i częstotliwości aktualizacji. Ujednolicenie standardów danych oraz zapewnienie interoperacyjności pomiędzy platformami stanowi poważne wyzwanie organizacyjne i technologiczne. Ponadto skuteczność predykcji zależy od długości i jakości cykli pomiarowych, co wymaga wieloletniego, systematycznego gromadzenia danych. Poziom ten stanowi osiągnięcie zwieńczenia modelu opartego na koncepcji nadzoru eksperckiego (HITL). System dostarcza kompletnych danych diagnostycznych i predykcyjnych, lecz ostateczna, strategiczna decyzja zarządcza wciąż pozostaje w rękach człowieka. Dalszy, hipotetyczny rozwój mógłby prowadzić w kierunku systemów w pełni autonomicznych (na poziomie superinteligencji, ASI), zdolnych do samodzielnego podejmowania decyzji zarządczych. Poziom 8 stanowi jednak docelową, realistyczną wizję wirtualizacji procesu diagnostycznego według niniejszej koncepcji.



Rys. 4-10 Schemat zintegrowanego systemu diagnostyczno-predykcyjnego (Poziom 8)

4.3 Standaryzacja identyfikacji elementów obiektów mostowych

4.3.1 System identyfikacji elementów

4.3.1.1 Wprowadzenie

Standaryzacja sposobu identyfikacji i klasyfikacji elementów obiektów mostowych stanowi kluczowy warunek umożliwiający ich pełną cyfrową reprezentację oraz wirtualizację procesu inspekcji. Bez opracowanej ontologii (pkt 2.3.3) w postaci spójnego systemu nazw, relacji i lokalizacji, nie jest możliwe skuteczne powiązanie danych geometrycznych, diagnostycznych i eksploatacyjnych w zintegrowanym środowisku cyfrowym.

Wspólny, jednoznaczny, zrozumiały maszynowo język identyfikacji elementów umożliwia porównywalność danych między obiektami, ujednolica sposób raportowania uszkodzeń i ocen stanu

technicznego, a także pozwala na automatyczne przetwarzanie informacji pochodzących z różnych źródeł od klasycznych inspekcji wizualnych po rozbudowane systemy monitoringu. Jednocześnie wszelkie procesy oparte na automatyzacji, wnioskowaniu maszynowym czy wykorzystaniu agentów AI oraz asystentów wirtualnych do analizy stanu technicznego obiektów wymagają istnienia jednoznacznego, logicznego systemu identyfikatorów elementów, stanowiącego uniwersalny język komunikacji.

Opracowany system porządkuje więc proces inspekcji i ewidencji, tworząc spójne ramy dla dokumentacji technicznej i tworzenia cyfrowej identyfikacji mostów. W tym kontekście stanowi on istotny krok w kierunku paszportyzacji infrastruktury, rozumianej jako proces systematycznego tworzenia i aktualizacji cyfrowych paszportów technicznych obiektów, integrujących dane o geometrii, wyposażeniu, stanie i historii utrzymania.

Inspiracją dla opracowania systemu była norweska instrukcja V440 [158, 246] (szerzej omówiona w pkt. 2.2.4), definiująca standard klasyfikacji elementów w procesach utrzymania obiektów mostowych. Na jej bazie opracowano jednak rozszerzoną i dostosowaną do polskich warunków koncepcję, obejmującą także system lokalizacji przestrzennej. Rozwiązanie to opisano szczegółowo w kolejnych podrozdziałach.

4.3.1.2 Założenia systemu identyfikacji

Prezentowany system ma na celu zapewnienie, że każdy element obiektu mostowego posiada jednoznaczny identyfikator. System został zaprojektowany w oparciu o następujące założenia:

- **Hierarchiczność:** struktura klasyfikacji jest wielopoziomowa, co pozwala na opis elementu z różnym stopniem szczegółowości, od ogólnej grupy do specyficznego komponentu.
- **Unikalność identyfikatora:** każdy fizyczny element obiektu otrzymuje unikalny identyfikator, składający się z kodu klasyfikacyjnego elementu oraz kodu jego lokalizacji przestrzennej.
- **Logika kodu klasyfikacyjnego**: kod alfanumeryczny elementu odzwierciedla jego pozycję w hierarchii. System bazuje na zasadzie, że każdy kolejny poziom jest definiowany przez dodanie dwucyfrowego numeru (od `01` do `99`). W ten sposób poziom w hierarchii jest odzwierciedlony w długości kodu, np. `C` → `C02` → `C0201` → `C020102`.
- **Lokalizacja przestrzenna**: identyfikator zawiera informację o położeniu elementu wzdłuż osi podłużnej obiektu (lokalizacja wzdłużna) oraz w jego przekroju poprzecznym (lokalizacja poprzeczna). Zasady lokalizacji są powiązane ze zdefiniowanym lokalnym układem współrzędnych.
- **Elastyczność i rozszerzalność**: hierarchiczna lista klasyfikacyjna nie jest systemem zamkniętym. Została zaprojektowana z myślą o możliwości przyszłego rozszerzania, zarówno poprzez dodawanie zupełnie nowych głównych grup elementów (np. `I`, `J`...), jak i poprzez wprowadzanie bardziej szczegółowych podziałów lub nowych typów w ramach już istniejących gałęzi. Umożliwia to adaptację systemu do zmieniających się technologii i potrzeb. Nowe gałęzie nie mogą natomiast zmieniać znaczenia istniejących kodów (dopuszczane jest dodawanie, a nie przesuwanie).

- **Neutralność językowa kodu:** alfanumeryczne kody są niezależne od języka. System przewiduje istnienie powiązanego słownika terminów (etykiet) w języku polskim i angielskim dla każdego kodu.

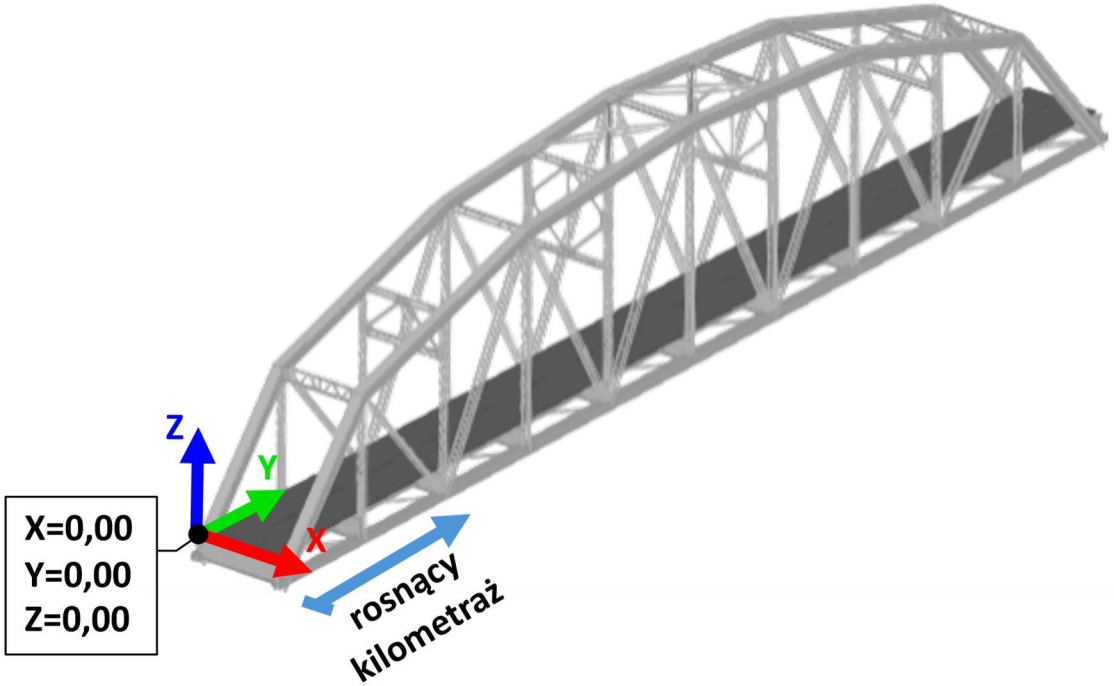
4.3.1.3 Przyjęty układ współrzędnych

Podstawą jednoznacznej identyfikacji przestrzennej elementów jest zdefiniowany lokalny, prawoskrętny układ współrzędnych kartezjańskich (X, Y, Z) oraz powiązany z nim system kodowania lokalizacji (Rys. 4-11).

Podstawą lokalizacji jest rosnący **kilometraż obiektu**. Dla ujednoznacznienia kierunku globalnego przyjęto, że kilometraż rośnie z północy na południe (N-S, układ pionowy na mapie) lub z zachodu na wschód (W-E, układ poziomy na mapie). Poniżej opisano kolejne trzy osie.

- **Oś X (poprzeczna)**: Biegnie w poprzek głównej osi obiektu, prostopadle do osi Y, ze zwrotem od lewej do prawej strony obiektu (patrząc w kierunku rosnącego kilometrażu).
- **Oś Y (podłużna)**: Biegnie wzdłuż głównej osi obiektu, ze zwrotem zgodnym z rosnącym kilometrażem.
- **Oś Z (pionowa)**: Jest prostopadła do płaszczyzny XY, ze zwrotem skierowanym pionowo w górę.

Początek układu współrzędnych przyjmuje się na lewej krawędzi konstrukcji (oś X = 0) w umownym początku obiektu (oś Y = 0). W zależności od typu konstrukcji punkt ten może odpowiadać np. końcowi skrzydła przyczółka, zakończeniu ścianki zaplecznej lub innemu charakterystycznemu punktowi początkowemu obiektu. Położenie początku układu powinno być określone w sposób umożliwiający objęcie całej konstrukcji dodatnimi wartościami współrzędnych.



Rys. 4-11 Przykładowy lokalny układ współrzędnych do kodyfikacji

4.3.1.4 Kody lokalizacji

Kod lokalizacji jest dodawany do kodu elementu, przy czym najpierw podaje się lokalizację wzdłużną (bardziej globalną), a następnie poprzeczną (bardziej lokalną).

- **Lokalizacja wzdłużna** `[LOKALIZACJA Y]`**:**
  - **Podpory (osie obiektu):** identyfikowane są prefiksem `P` i dwucyfrowym numerem (`P01`, `P02`, …) narastającym zgodnie z osią Y. W przypadku więcej niż jednej osi na tej samej podporze, stosowane są dodatkowe oznaczenia małą literą alfabetu (np. `P02a`, `P02b`, …). Prefiks `P` stosuje się dla elementów, których lokalizacja jest bezpośrednio związana z podporą (osią), np. łożysk, słupów filara, poprzecznic podporowych itp.
  - **Przęsła:** identyfikowane są prefiksem `S` i dwucyfrowym numerem (`S01`, `S02`, …) narastającym zgodnie ze zwrotem osi Y. Prefiks `S` stosuje się dla elementów, których lokalizacja jest związana z przęsłem, np. dźwigarów, płyt pomostu itp.
  - **Pozycje w obrębie przęsła**: Dla elementów powtarzalnych (np. poprzecznic pośrednich) używa się kodu przęsła i numeru porządkowego po kropce (`S03.1`, `S03.2`, ...), który rośnie zgodnie ze zwrotem osi Y.
- **Lokalizacja poprzeczna** `[LOKALIZACJA X]`**:** Przy większej liczbie elementów w przekroju poprzecznym (np. dźwigarów, łożysk) stosuje się kolejne litery alfabetu (`A`, `B`, `C`, ...), licząc od lewej strony (narastając zgodnie ze zwrotem osi X).

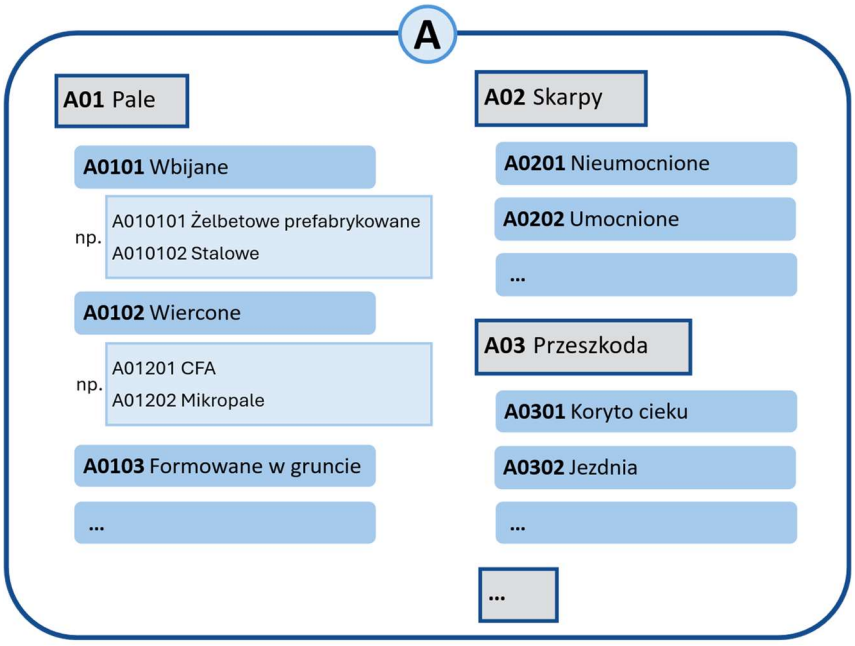
Przyjmuje się następujące zasady pomijania kodów lokalizacji:

- Elementy ciągłe poprzecznie (np. nawierzchnia) pomijają kod lokalizacji poprzecznej.
- Elementy ciągłe wzdłużnie (np. balustrada) mogą pomijać kod lokalizacji wzdłużnej przy ogólnej identyfikacji, ale wymagają go przy lokalizacji uszkodzeń.

4.3.1.5 Klasyfikacja i hierarchia elementów

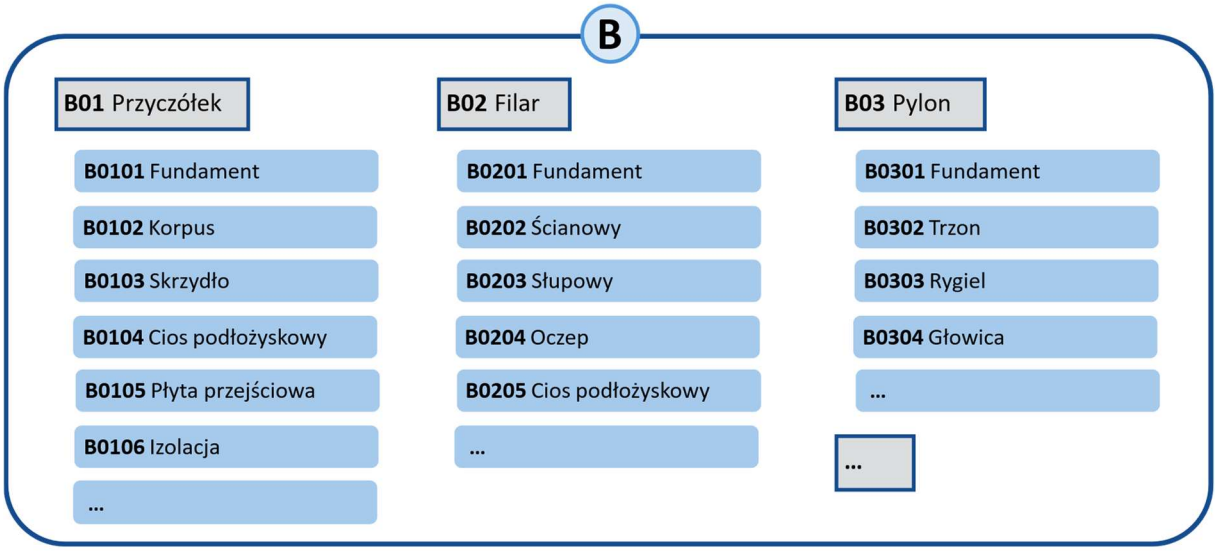
System dzieli elementy na główne grupy oznaczone literami od A do H, które następnie rozgałęziają się na bardziej szczegółowe podgrupy i typy elementów. Poniżej przedstawiono główne grupy elementów oraz przykładowe kody klasyfikacyjne `[KOD KLASYFIKACYJNY]` wg podziału hierarchicznego w poszczególnych grupach:

- **A Grunt i otoczenie:** Obejmuje elementy związane z podłożem gruntowym wchodzącym w interakcję z konstrukcją oraz bezpośrednim otoczeniem obiektu (Rys. 4-12).



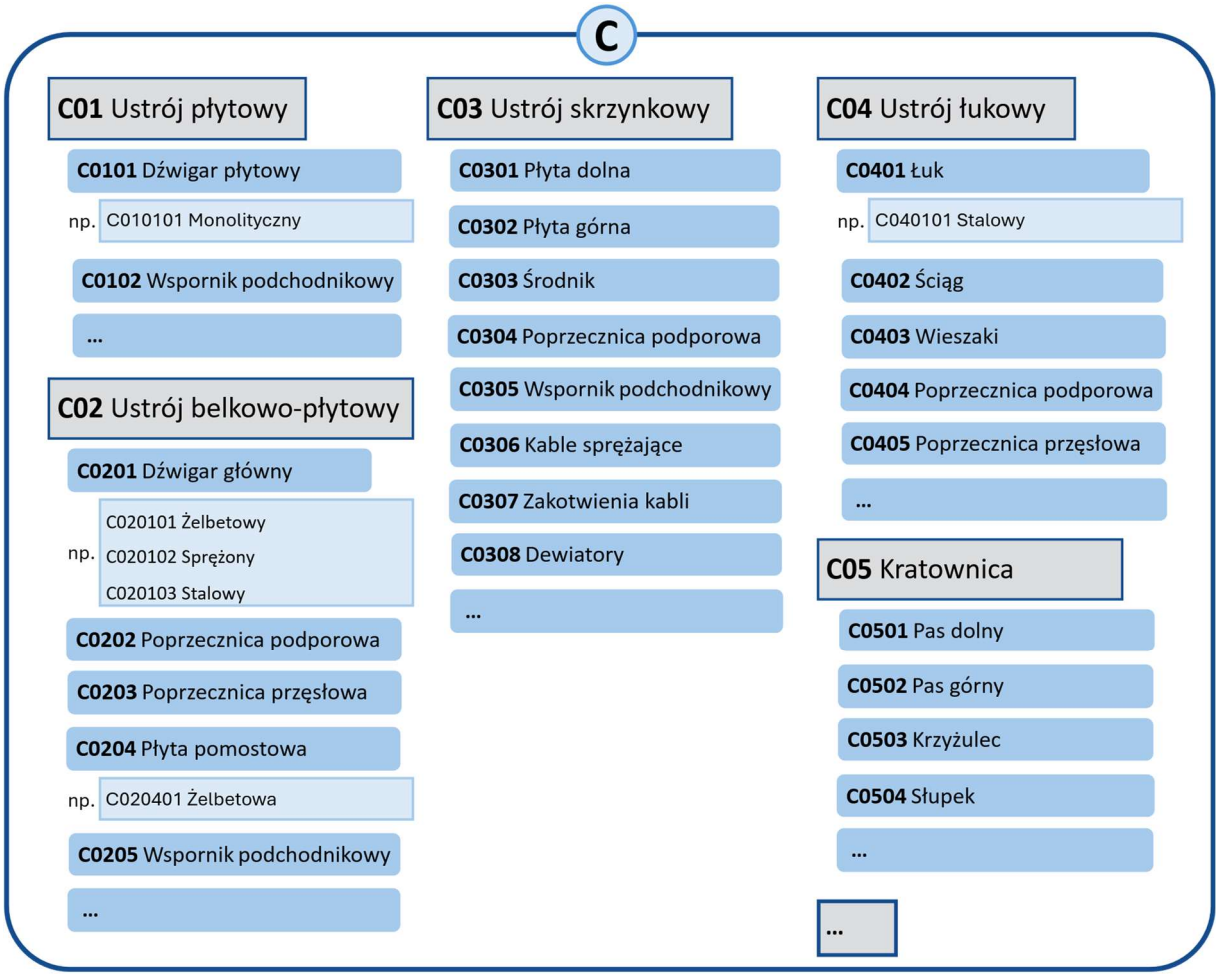
Rys. 4-12 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy A: Grunt i otoczenie

- **B Podpory:** Zawiera elementy konstrukcyjne przenoszące obciążenia z ustroju nośnego na podłoże (Rys. 4-13).



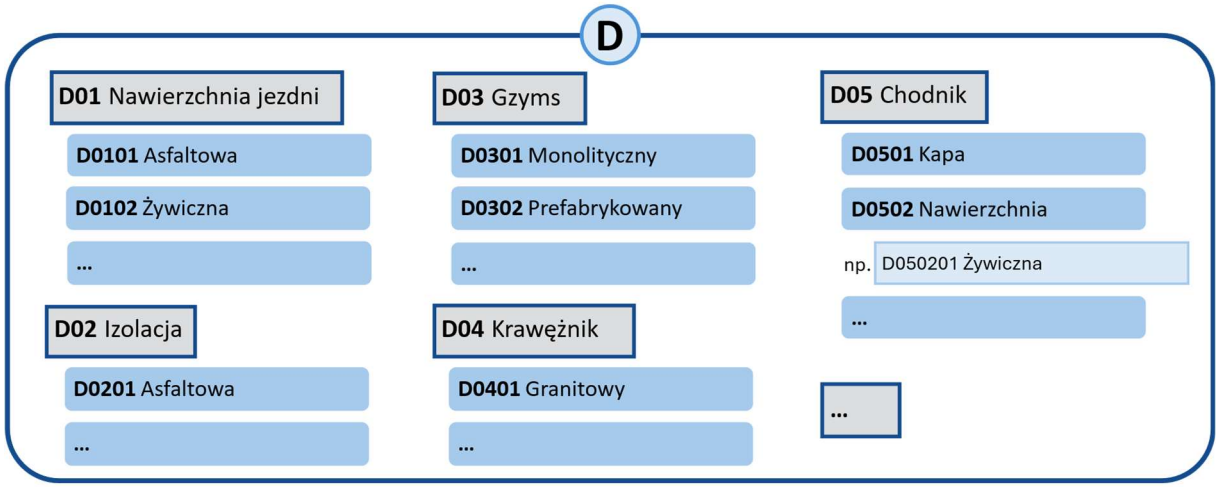
Rys. 4-13 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy B: Podpory

- **C Ustrój nośny:** Reprezentuje główną konstrukcję przenoszącą obciążenia, obejmując różne typy systemów konstrukcyjnych (Rys. 4-14).



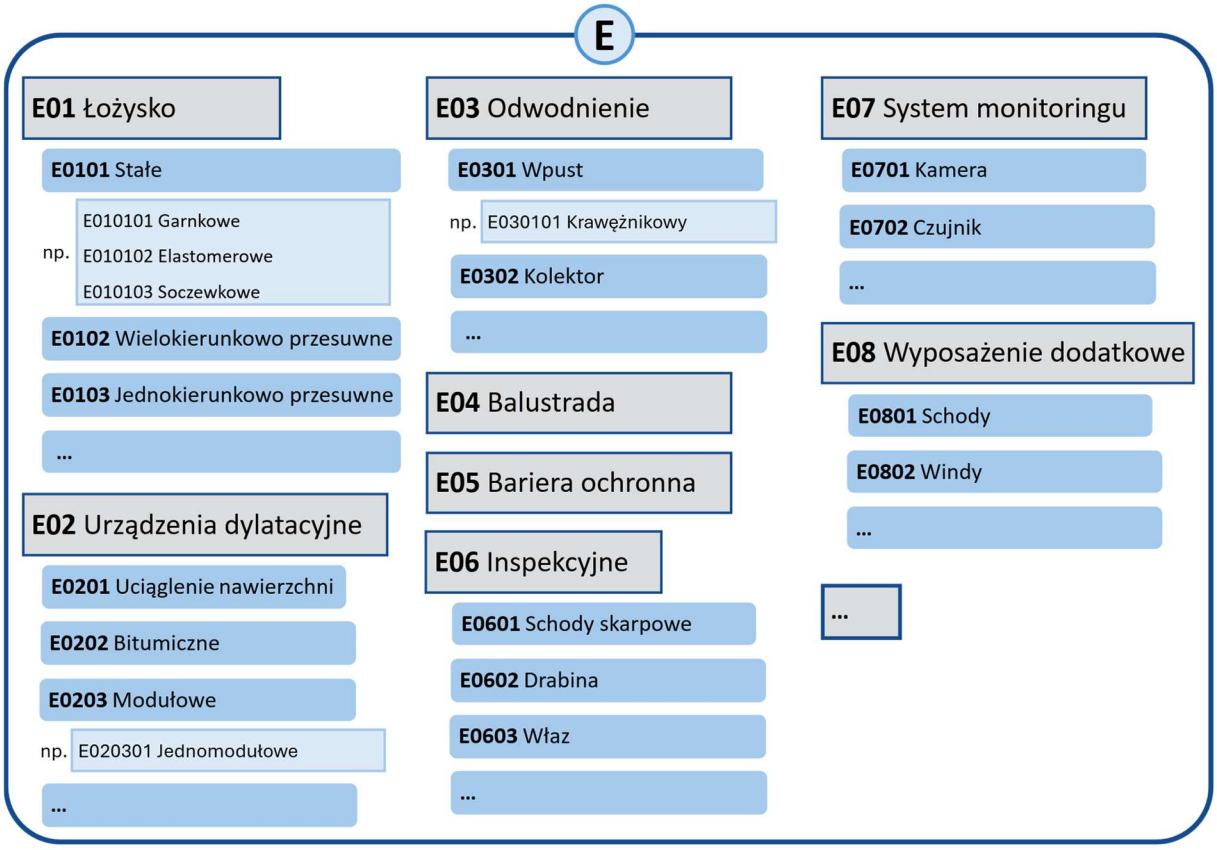
Rys. 4-14 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy C: Ustrój nośny

- **D Zabudowa pomostu:** Składa się z warstw i elementów ułożonych na płycie pomostu ustroju nośnego, tworzących powierzchnię użytkową oraz jej wykończenie krawędziowe (Rys. 4-15).



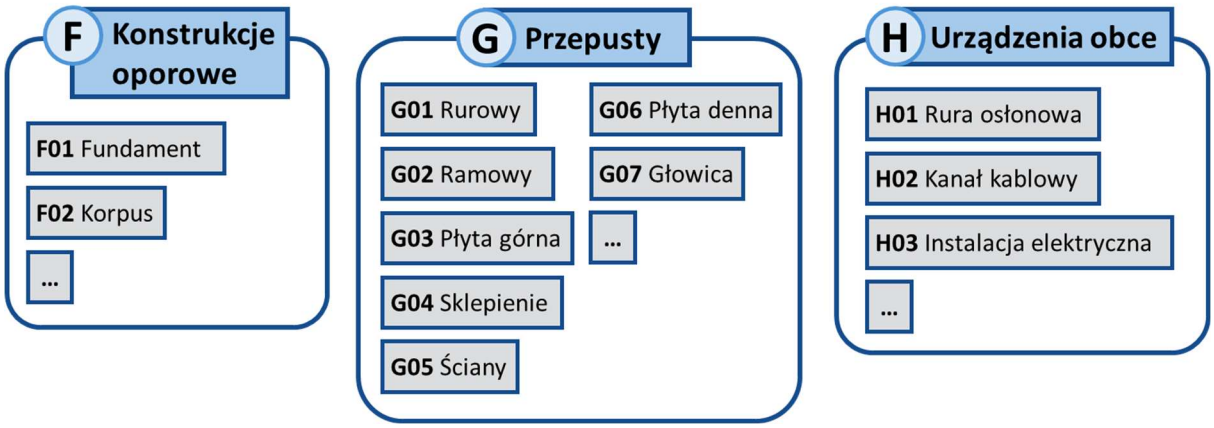
Rys. 4-15 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy D: Zabudowa pomostu

- **E Wyposażenie:** Obejmuje wszystkie dodatkowe komponenty zainstalowane na obiekcie, niezbędne do jego prawidłowego funkcjonowania (Rys. 4-16).



Rys. 4-16 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy E: Wyposażenie

- **F Konstrukcje oporowe:** Dotyczy samodzielnych konstrukcji, których główną funkcją jest podtrzymywanie gruntu lub innych materiałów (Rys. 4-17).
- **G Przepusty:** Klasyfikuje niewielkie konstrukcje przeprowadzające przeszkodę przez nasyp (Rys. 4-17).
- **H Urządzenia obce:** Zalicza się tu instalacje i urządzenia należące do podmiotów zewnętrznych, które są prowadzone przez obiekt lub są na nim zamocowane (Rys. 4-17).



Rys. 4-17 Przykładowe kody klasyfikacyjne dla grupy F: Konstrukcje oporowe, grupy G: Przepusty, grupy H: Urządzenia obce

4.3.1.6 Przykłady zastosowania kodu identyfikacyjnego elementu

Łącząc kod klasyfikacyjny z kodem lokalizacji, otrzymujemy jednoznaczny identyfikator elementu w obrębie obiektu, łącznikiem między kolejnymi segmentami kod jest znak podkreślenia „_" według schematu `[KOD KLASYFIKACYJNY]_[LOKALIZACJA Y]_[LOKALIZACJA X]`:

- `C020101_S02_C`: Dźwigar główny ustroju belkowo-płytowego (`C0201`) wykonany z żelbetu (`C020101`), znajdujący się w drugim przęśle (`_S02`), jako trzeci od lewej (`_C`).
- `E010102_P04_A`: Łożysko (`E01`) stałe (`E0101`) elastomerowe (`E010102`), znajdujące się na czwartej podporze (`_P04`), jako pierwsze od lewej (`_A`).
- `D0101_S03`: Nawierzchnia jezdni (`D01`) asfaltowa (`D0101`) w trzecim przęśle (`_S03`).
- `C040503_S01.6`: Poprzecznicę przęsłowa ustroju łukowego (`C0405`) wykonana ze stali (`C040503`), szóstą z kolei (`.6`) w pierwszym przęśle (`_S01`).

4.3.1.7 Możliwości rozwoju proponowanego standardu identyfikacji

Opracowany kod identyfikacyjny elementu stanowi pewną bazę. W docelowym systemie zarządzania infrastrukturą pełny identyfikator mógłby integrować również unikalne ID obiektu mostowego oraz kod uszkodzenia wraz z jego oceną (np. `[ID MOSTU]_[KOD ELEMENTU]_[KOD USZKODZENIA]`), co pozwoliłoby na jednoznaczne powiązanie obserwacji inspekcyjnej z konkretnym elementem na konkretnym obiekcie w skali całej sieci.

Rozwój systemu kodowania może obejmować kilka istotnych kierunków związanych z jego strukturą i funkcjonalnością. Pierwszym kierunkiem jest rozbudowa logiki i hierarchii kodów klasyfikacyjnych, umożliwiająca większą szczegółowość w opisie elementów. Przykładem może być wprowadzenie dodatkowych poziomów identyfikacji dla elementów złożonych, takich jak np. numeracja węzłów kratownic, punktów zakotwień itp.

Drugim kierunkiem jest definiowanie relacji semantycznych pomiędzy elementami. Proponowany system identyfikacji określa strukturę hierarchiczną, ale w przyszłości może zostać rozszerzony o opis relacji typu „element oparty na", „element połączony z" czy „element sąsiaduje z". Takie powiązania umożliwią tworzenie powiązanych baz wiedzy o strukturze obiektu oraz wspomogą procesy diagnostyczne i analityczne, np. automatyczne rozpoznawanie zależności między uszkodzeniami różnych elementów.

Trzecim obszarem rozwoju jest doprecyzowanie zasad aktualizacji identyfikatorów w przypadku zmian konstrukcyjnych, takich jak wymiana, przebudowa lub wzmocnienie elementu. System może zostać rozszerzony o reguły dotyczące zachowania lub nadawania nowych identyfikatorów w zależności od zakresu zmian, np. zachowania dotychczasowego ID przy wymianie w ramach tego samego miejsca konstrukcyjnego, lub nadania nowego przy zmianie funkcji elementu. Zasady te zapewniłyby spójność danych historycznych i ciągłość informacji diagnostycznych w czasie.

Czwartym kierunkiem jest utworzenie centralnego słownika kodów i definicji elementów, który stanowiłby oficjalny zasób referencyjny dla systemów utrzymaniowych czy modeli BIM. Każdy kod powinien być powiązany z zestawem metadanych, obejmującym nazwę, definicję, warianty materiałowe, powiązania hierarchiczne i wersję obowiązującą. Wersjonowanie słownika pozwoliłoby

utrzymać zgodność w czasie i umożliwić dalszy rozwój systemu bez utraty interpretowalności danych archiwalnych.

Ostatecznie, rozwój systemu identyfikacji otwiera drogę do jego szerszego wykorzystania w cyfrowych paszportach technicznych, modelach informacyjnych BIM, cyfrowych bliźniakach czy zautomatyzowanych procesach inspekcyjnych. Dzięki temu opracowany standard może stanowić spójną podstawę opisu danych o obiektach mostowych, zapewniając ich jednolitość i porównywalność zarówno w tradycyjnych procesach ewidencji i inspekcji, jak i w nowoczesnych systemach cyfrowych.

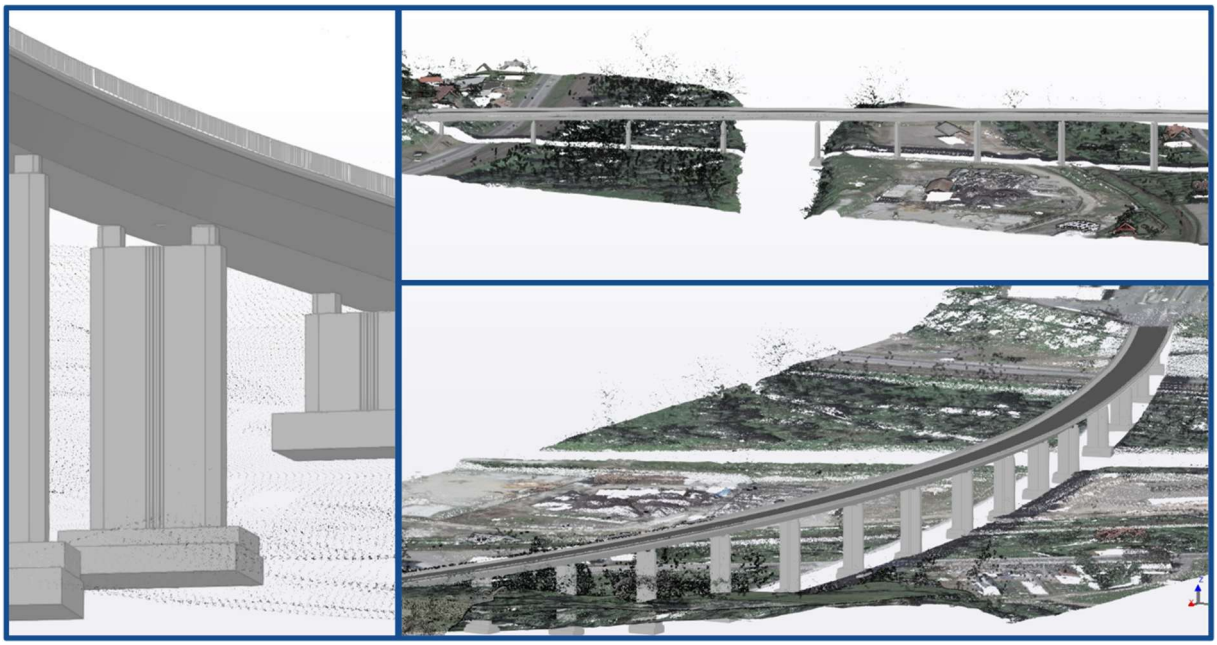
4.3.1.8 Przykład zastosowania systemu identyfikacji na moście w Cieszynie

W celu praktycznej demonstracji opracowanego systemu kodowania jako studium przypadku wybrano most nad rzeką Olzą w Cieszynie. Taki obiekt o złożonej geometrii i konstrukcji stanowi bardzo dobry przykład do wdrożenia ustandaryzowanego systemu identyfikacji elementów. Konstrukcja składa się z 17 przęseł, a jego całkowita długość wynosi 760 m. Ustrój nośną tworzy jednokomorowy, sprężony dźwigar skrzynkowy o zmiennej wysokości, oparty na 16 podporach pośrednich, dwa skrajne przęsła są wspornikowe. Całkowita szerokość pomostu wynosi 14,64 m. Most składa się z dwóch niezależnych ustrojów ciągłych (część wschodnia – 10-przęsłowa i część zachodnia – 5-przęsłowa), rozdzielonych dylatacją nad podporą nr 6.

Złożoność konstrukcji i powtarzalność elementów czynią go idealnym obiektem referencyjnym do pokazania skalowalności opracowanego systemu identyfikacji. Na Rys. 4-18 przedstawiono ogólny widok obiektu sfotografowany z drona a na Rys. 4-19 zaprezentowano stworzony model 3D mostu naniesiony na chmurę punktów wyeksportowaną z krajowego Geoportalu.



Rys. 4-18 Most w Cieszynie nad rzeką Olzą – ujęcia z drona



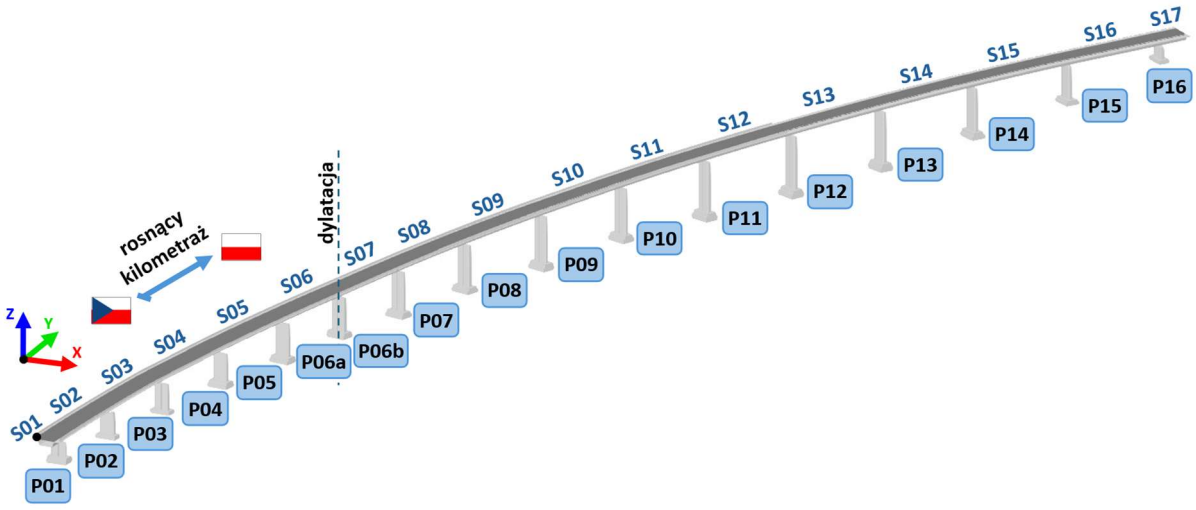
Rys. 4-19 Most w Cieszynie nad rzeką Olzą – model 3D naniesiony na chmurę punktów

Podstawą identyfikacji jest przyjęcie globalnego układu odniesienia (Rys. 4-20). Zgodnie z założeniami (pkt 4.3.1.3), oś Y (podłużna) biegnie zgodnie z rosnącym kilometrażem (w tym przypadku od strony zachodniej do wschodniej). Oś X (poprzeczna) skierowana jest od lewej do prawej (od strony północnej do południowej).

W pierwszym kroku obiekt dzielony jest na globalne strefy lokalizacji wzdłużnej (oś Y) zgodnie z pkt. 0, obiekt posiada:

- 16 podpór: oznaczonych od `P01` (skrajna podpora zachodnia) do `P16` (skrajna podpora wschodnia), z uwagi na występowanie dwóch osi podparcia na podporze nr 6, przyjęto numeracje `P06a` i `P06b`.
- 17 przęseł: oznaczonych od `S01` do `S17`.

Model 3D z przyjętą numeracją osi podpór i przęseł przedstawiono na Rys. 4-20.

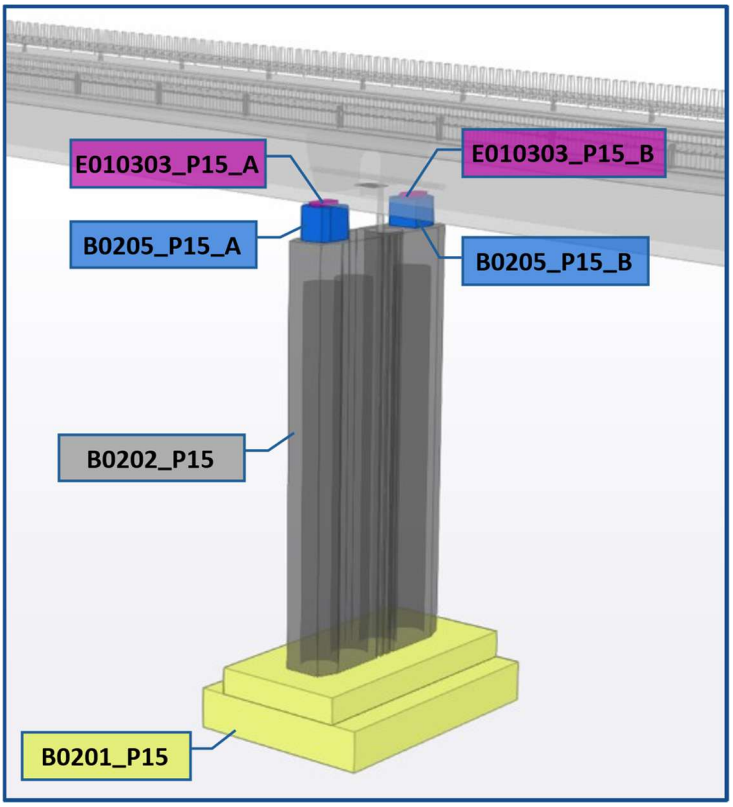


Rys. 4-20 Widok modelu 3D obiektu ze schematycznie naniesioną numeracją osi podpór i przęseł

Kolejne rysunki przedstawiają przykłady szczegółowej identyfikacji w obrębie podpory pośredniej P15 i przęsła S16, obrazujące sposób praktycznego zastosowania systemu na rzeczywistym obiekcie. Zaprezentowano kwalifikację wybranych elementów konstrukcyjnych o charakterze reprezentatywnym, bez szczegółowego odniesienia do wszystkich komponentów obiektu.

Analizując wybrany widok na podporą pośrednią P15 przedstawiony na Rys. 4-21, możemy zidentyfikować jej kluczowe komponenty:

- Fundament filara: B0201_P15
- Filar ścianowy: B0202_P15
- Ciosy podłożyskowe: B0205_P15_A i B0205_P15_B
- Łożyska jednokierunkowo przesuwne soczewkowe: E010303_P15_A i E010303_P15_B

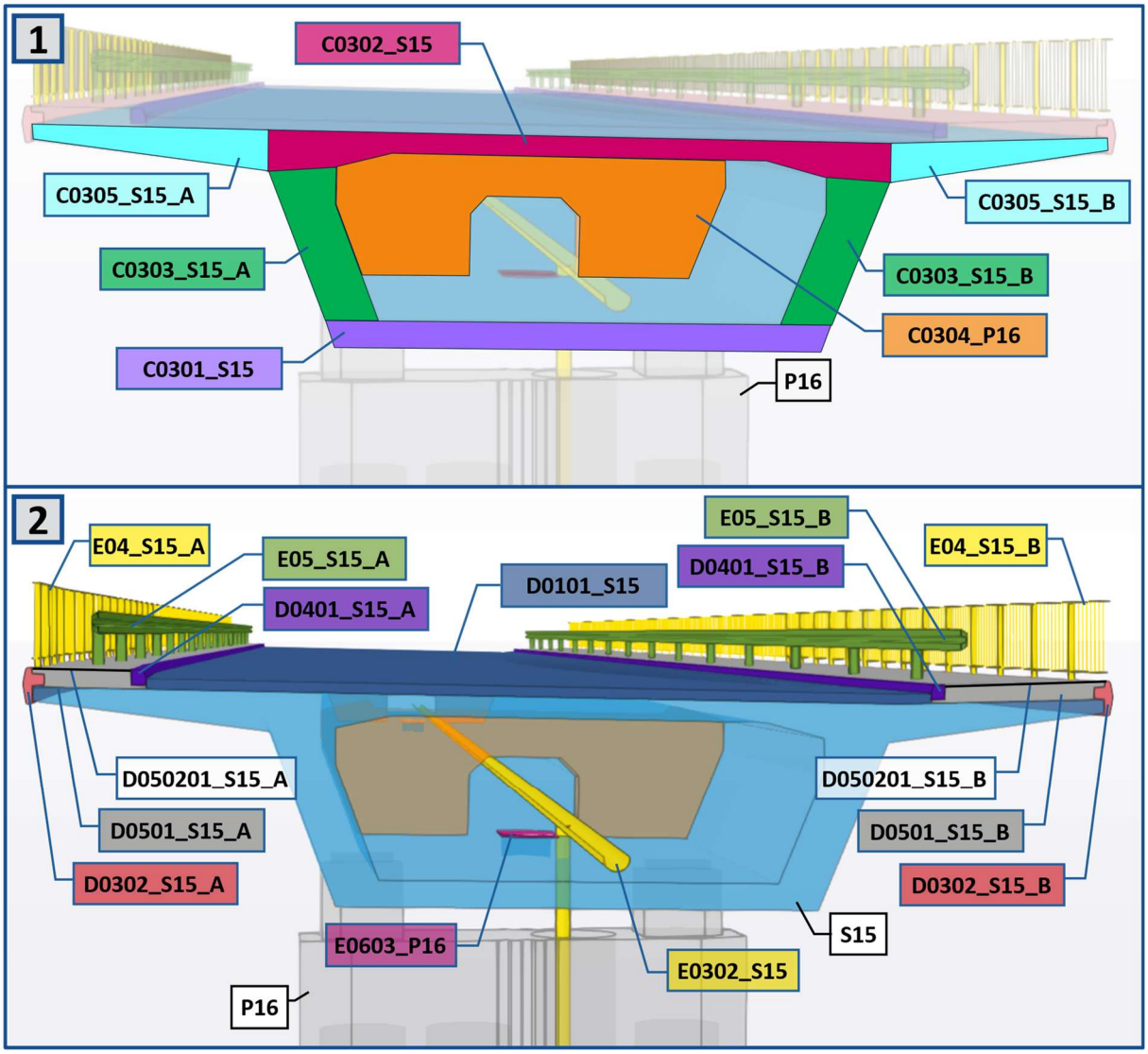


Rys. 4-21 Widok na podporę pośrednią w osi nr 15 wraz z identyfikacją elementów

Analizując przekrój poprzeczny przez przęsło S15 (patrząc w kierunku podpory pośredniej P16) przedstawiony na Rys. 4-22, identyfikujemy elementy ustroju nośnego C, zabudowy pomostu D i wyposażenia E.

- Ustrój nośny skrzynkowy C03:
  - Płyta dolna: C0301_S15
  - Płyta górna: C0302_S15
  - Środniki: C0303_S15_A i C0303_S15_B
  - Poprzecznica podporowa: C0304_P16
  - Wsporniki podchodnikowe: C0305_S15_A i C0305_S15_B

- Zabudowa pomostu D:
  - Nawierzchnia jezdni asfaltowa: D0101_S15
  - Gzymsy prefabrykowane: D0302_S15_A i D0302_S15_B
  - Krawężniki granitowe: D0401_S15_A i D0401_S15_B
  - Kapy chodnikowe: D0501_S15_A i D0501_S15_B
  - Nawierzchnia chodnika: D050201_S15_A i D050201_S15_B
- Wyposażenie E:
  - Kolektor odwodnienia: E0302_S15
  - Balustrady: E04_S15_A i E04_S15_B
  - Bariery ochronne: E05_S15_A i E05_S15_B
  - Właz inspekcyjny: E0603_P16



Rys. 4-22 Przekrój przez przęsło nr 15 w kierunku podpory nr 16 wraz z identyfikacją elementów ustroju nośnego (1) i wyposażenia (2)

Przedstawiony przykład potwierdza praktyczną możliwość zastosowania opracowanego systemu identyfikacji w odniesieniu do rzeczywistego obiektu mostowego. Zaproponowany sposób oznaczania

elementów pozwala na jednoznaczną identyfikację każdego elementu konstrukcji, zachowując logiczną hierarchię i spójność kodów, od poziomu całego obiektu, poprzez przęsła i podpory, aż do pojedynczych elementów. System ten może stanowić podstawę dla przyszłej integracji z cyfrowymi bazami danych i modelami 3D, wspierając proces ewidencji, inspekcji oraz paszportyzacji infrastruktury mostowej.

4.3.2 Sposoby oznaczania elementów w terenie

4.3.2.1 Wprowadzenie

Wdrożenie jednolitego systemu identyfikacji elementów obiektów mostowych wymaga nie tylko definicji kodów klasyfikacyjnych, ale również określenia sposobu ich fizycznego oznaczania w terenie, w sposób trwały, czytelny i zintegrowany z cyfrowym systemem zarządzania danymi. Odpowiednie oznakowanie elementów pozwala na bezpośrednie powiązanie obiektu fizycznego z jego cyfrowym odpowiednikiem, co znacząco ułatwia procesy inspekcji, inwentaryzacji, monitoringu i utrzymania. W dalszej części omówione zostaną konkretne technologie: QR, NFC i RFID przedstawione wstępnie w pkt. 3.2.8.

4.3.2.2 Kody QR

Jednym z najprostszych i najtańszych sposobów znakowania elementów są kody QR. Są one łatwe do generowania, istnieje wiele otwartych generatorów internetowych pozwalających na tworzenie ich bez specjalistycznego oprogramowania. Kody mogą być nanoszone na trwałe tabliczki lub etykiety, wykonane z aluminium, laminatu lub tworzywa odpornego na działanie czynników atmosferycznych i chemicznych.

Zaletami tej metody są niski koszt wdrożenia, prostota obsługi oraz powszechna kompatybilność, większość smartfonów i tabletów umożliwia natychmiastowy odczyt kodu za pomocą wbudowanych funkcji aparatu lub łatwo dostępnych aplikacji. Ograniczeniem jest konieczność bezpośredniego skierowania kamery w stronę kodu i uzyskania odpowiedniej jakości obrazu (ostrość, oświetlenie, czystość powierzchni). Kody są wrażliwe na zabrudzenia, korozję i zarysowania, dlatego zaleca się ich montaż w miejscach osłoniętych oraz stosowanie trwałych zabezpieczeń, takich jak grawerowanie laserowe lub powłoki ochronne.

Kod QR może zawierać tekstowy zestaw informacji o elemencie (np. jego identyfikator i podstawowe dane) lub odnośnik do bazy danych czy cyfrowego paszportu technicznego, w którym zapisane są szczegółowe informacje o danym elemencie. W Tab. 4-1 przedstawiono przykładowy zestaw danych widocznych po zeskanowaniu kodu QR.

Tab. 4-1 Przykładowy zestaw danych identyfikacyjnych skanowanego elementu

Pole	Przykład
ID elementu	E010102_P04_A
Nazwa elementu	Łożysko stałe elastomerowe
Lokalizacja	Podpora 4, pierwsze od lewej
Data budowy/montażu	2020-04
Data ostatniej naprawy bieżącej	2024-05
Data ostatniego remontu/przebudowy	-
Ocena z ostatniej inspekcji	4
Opis uszkodzeń (skrótowy)	Wybrzuszenie elastomeru
Zalecenia	Wymiana łożyska do końca 2027
Data ostatniej inspekcji	2025-08-01
Inspektor / jednostka	Mostoprojekt Katowice Sp. z o.o.

Tego typu struktura danych pozwala inspektorowi na szybkie uzyskanie podstawowych informacji o stanie elementu, bez konieczności logowania się do centralnej bazy danych. W przypadku połączenia z odpowiednią bazą danych kod może natomiast przekierowywać do szczegółowej karty elementu, zawierającej historię inspekcji, dokumentację fotograficzną oraz powiązania z modelem 3D obiektu.

Dla zwiększenia czytelności, poniżej kodu graficznego umieszcza się także czytelny zapis identyfikatora elementu, co pozwala na jego rozpoznanie również wizualnie, bez użycia urządzeń mobilnych. W ten sposób tabliczka pełni funkcję zarówno etykiety informacyjnej, jak i cyfrowego klucza dostępu do danych elementu. Na Rys. 4-23 przedstawiono dwie przykładowe tabliczki identyfikacyjne z kodami QR. Pierwsza przekierowuje do strony internetowej z danymi elementu, natomiast druga umożliwia wyświetlenie ich bezpośrednio w formie tekstowej na urządzeniu mobilnym. W drugim przypadku kod zawiera większą ilość zakodowanych informacji, przez co ma gęstszą strukturę (mniejszą siatkę modułów) i wymaga lepszych warunków oświetleniowych oraz wyższej rozdzielczości aparatu podczas odczytu. Takie kody, choć samowystarczalne (nie wymagają połączenia z siecią), są mniej czytelne z większej odległości i bardziej wrażliwe na zabrudzenia czy zarysowania powierzchni. Możliwe jest uzyskanie czytelnych kodów offline z mniejszą ilością informacji np. samym kodem identyfikacyjnym.



Rys. 4-23 Przykładowe tabliczki identyfikacyjne z kodami QR

Kody QR mogą być odczytywane przez dowolne urządzenie zawierające kamerę, w tym roboty mobilne. W zależności od oprogramowania, możliwy jest automatyczny odczyt informacji w terenie lub analiza wykonanych zdjęć w biurze, podczas której oprogramowanie rozpoznaje kod i odczytuje zawarte w nim dane.

4.3.2.3 Znaczniki NFC

Kolejnym sposobem znakowania elementów konstrukcyjnych są znaczniki NFC, umożliwiające bezdotykową identyfikację poprzez krótkofalową komunikację radiową. Są one szczególnym przypadkiem technologii RFID. W odróżnieniu od kodów QR, których odczyt wymaga kontaktu wzrokowego, znaczniki NFC pozwalają na przekazanie informacji poprzez zbliżenie urządzenia mobilnego do powierzchni elementu. Komunikacja odbywa się na częstotliwości 13,56 MHz i w centymetrowym zasięgu, w odróżnieniu od klasycznych systemów RFID, które mogą działać na większe odległości i wymagają dedykowanych czytników, technologia NFC została opracowana z myślą o bezpośredniej współpracy z urządzeniami mobilnymi.

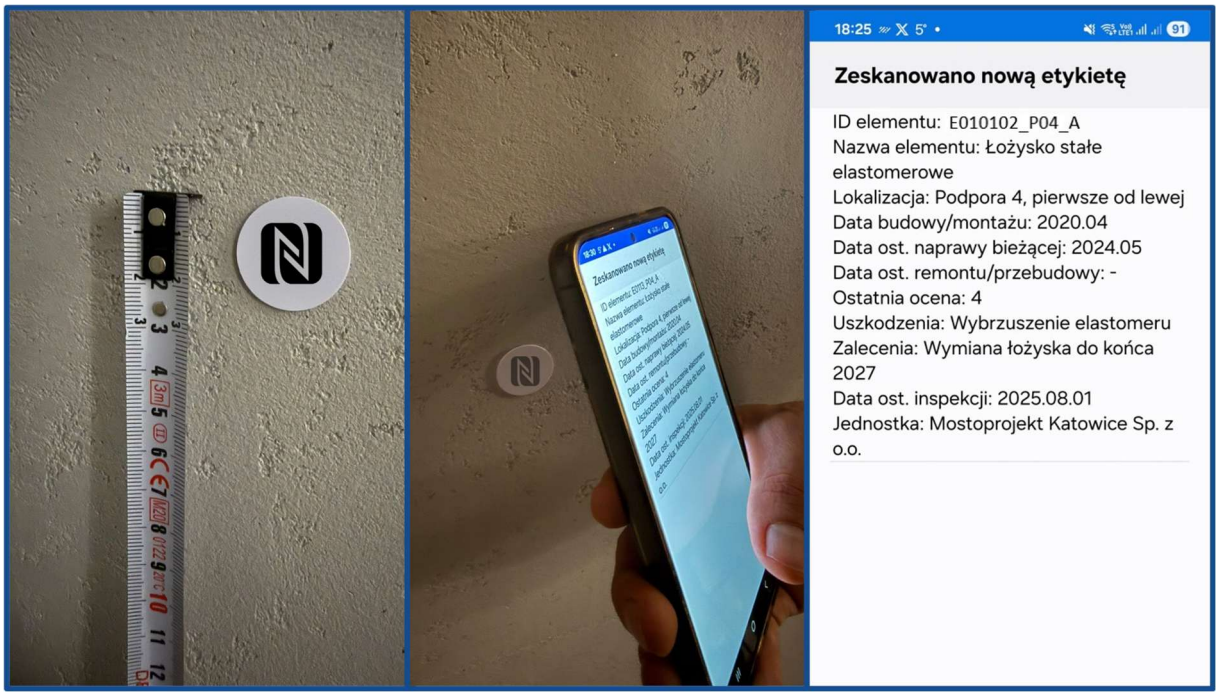
Znaczniki NFC to w większości pasywne chipy, zasilane energią z pola elektromagnetycznego wytwarzanego przez urządzenie odczytujące. Mogą mieć formę pastylek, naklejek lub kapsuł odpornych na działanie wody, promieniowania UV i temperatury. Montowane są na powierzchni elementu lub zatapiane pod warstwą ochronną, dzięki czemu mogą działać niezawodnie przez wiele lat. Ich istotną zaletą jest to, że większość smartfonów i tabletów wyposażona jest w moduł NFC, co umożliwia natychmiastowy odczyt danych bez użycia dodatkowego sprzętu, narzędzie do identyfikacji elementów jest więc zawsze pod ręką inspektora.

Znaczniki NFC można łatwo zaprogramować przy użyciu ogólnodostępnych aplikacji (np. NFC Tools), nadając im m.in. tekstowy zestaw danych lub odnośnik prowadzący do bazy danych. Cena pojedynczego znacznika NFC jest niewysoka i zwykle nie przekracza 1 zł, co czyni tę metodę bardzo ekonomiczną. Zakres informacji zapisanych w znaczniku może być taki sam jak w przypadku kodu QR, przedstawiony wcześniej w Tab. 4-1. W praktyce jednak różnica pomiędzy obiema metodami polega nie tyle na sposobie zapisu (tekst lub link), ile na czytelności i niezależności od ilości danych:

w przypadku kodów QR większa liczba informacji powoduje zagęszczenie struktury i obniża łatwość odczytu, natomiast w znacznikach NFC czytelność pozostaje niezmienna niezależnie od objętości danych, o ile mieści się ona w dopuszczalnej pojemności pamięci chipa (w testowanych egzemplarzach ok. 500 bajtów). Dzięki temu znaczniki NFC zachowują wysoką niezawodność odczytu nawet przy większym zakresie zapisanych danych.

Ze względów bezpieczeństwa konieczne jest wprowadzenie ograniczeń zapisu. Zmiany danych w znaczniku powinny być możliwe wyłącznie dla użytkownika autoryzowanego lub administratora systemu, natomiast wszyscy inni użytkownicy powinni mieć jedynie możliwość ich odczytu. Takie podejście zabezpiecza system przed nieuprawnioną edycją informacji lub nadpisaniem danych przez przypadkowe urządzenia.

Najistotniejszym ograniczeniem technologii NFC jest konieczność bardzo dużego zbliżenia urządzenia do znacznika (centymetrowy zasięg). Z jednej strony zwiększa to bezpieczeństwo (odporność na przypadkowe odczyty) i precyzję identyfikacji, z drugiej ogranicza możliwości zastosowania NFC w zautomatyzowanych systemach inspekcyjnych, zwłaszcza w przypadku robotów mobilnych czy dronów, które nie są w stanie utrzymać wymaganej odległości od powierzchni elementu. Na Rys. 4-24 przedstawiono przykładowy znacznik NFC oraz widok ekranu urządzenia mobilnego podczas skanowania znacznika.



Rys. 4-24 Skanowanie znacznika NFC

4.3.2.4 Znaczniki RFID

Technologia RFID stanowi ogólne rozwiązanie identyfikacji radiowej, w której wymiana informacji między znacznikiem a czytnikiem odbywa się przy użyciu fal radiowych. Jak wspomniano wcześniej, NFC jest szczególnym przypadkiem RFID działającym w paśmie wysokiej częstotliwości i na bardzo krótkim dystansie. Klasyczne systemy RFID wykorzystują również inne pasma częstotliwości: niskiej (ang. Low Frequency, LF; 25–134 kHz), wysokiej (ang. High Frequency, HF; 13,56 MHz) oraz bardzo wysokiej (ang. Ultra High Frequency, UHF; 860–960 MHz), co pozwala na odczyt danych z kilku,

a nawet kilkunastu metrów, w zależności od mocy czytnika i rodzaju znacznika. Zasięg odczytu nie zależy wyłącznie od częstotliwości, ale również od sposobu zasilania znacznika. Z uwagi na to, znaczniki dzieli się na trzy grupy:

- **Pasywne** nie posiadają własnego źródła zasilania i korzystają z energii pola elektromagnetycznego emitowanego przez czytnik; są najtańsze i najczęściej stosowane.
- **Półaktywne** mają baterię podtrzymującą pracę układu logicznego, co zwiększa ich zasięg i szybkość odpowiedzi.
- **Aktywne** są wyposażone we własne źródło zasilania i mogą być odczytywane nawet z odległości kilkudziesięciu metrów, jednak są droższe i mają ograniczoną żywotność baterii.

W zastosowaniach infrastrukturalnych największy potencjał mają systemy oparte na pasywnych znacznikach UHF, które mogą umożliwić zdalny odczyt danych z odległości od 2 do 10 m, w zależności od użytej anteny i środowiska pracy. Ich przewagą nad NFC jest możliwość identyfikacji elementu bez fizycznego kontaktu i bez konieczności kierowania kamery lub urządzenia na znacznik, co mogłoby otworzyć potencjał do zastosowania w zautomatyzowanych procesach inspekcyjnych np. przy użyciu robotów mobilnych.

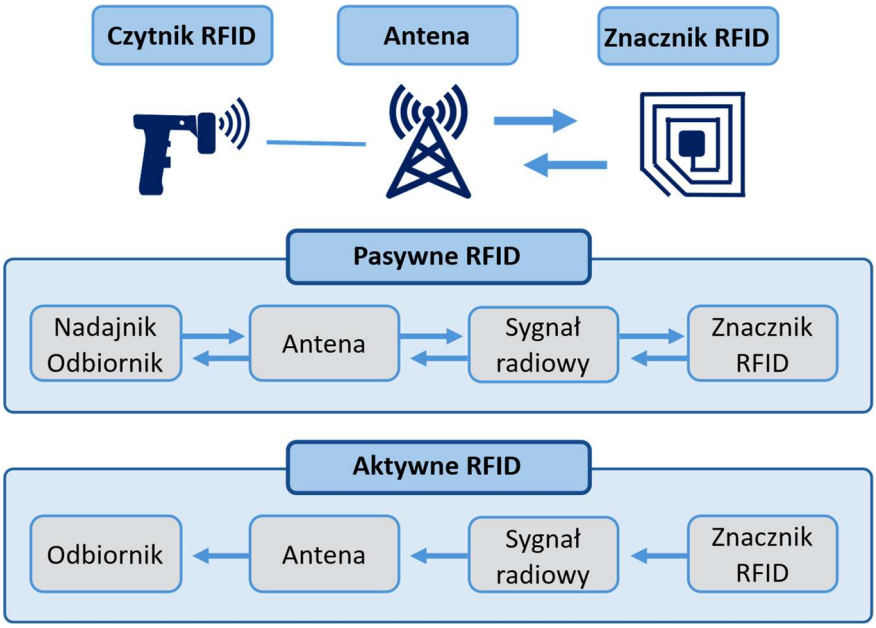
Znaczniki RFID mogą być wykonane w formie naklejek, etykiet, opasek kablowych lub obudów przemysłowych odpornych na wilgoć, promieniowanie UV i zmienne temperatury. Odczyt znaczników realizowany jest przez czytniki stacjonarne lub ręczne, przy czym te ostatnie często mają postać urządzeń zintegrowanych z przemysłowymi terminalami danych lub wzmocnionymi smartfonami. W systemach zautomatyzowanych odczyt odbywa się przez anteny, które w kontekście inspekcji mogłyby być montowane na robotach lub platformach pomiarowych. W pamięci znacznika RFID można zapisać unikalny identyfikator elementu, a w systemach bardziej zaawansowanych także podstawowe dane opisowe, podobnie jak w kodach QR czy NFC.

W przypadku oznaczania elementów mostowych przy pomocy znaczników RFID, na ograniczonej przestrzeni może znajdować się wiele takich identyfikatorów umieszczonych w niewielkiej odległości od siebie, co może powodować zjawisko nakładania się sygnałów podczas odczytu. Standardy komunikacyjne, przewidują mechanizmy antykolizyjne, umożliwiające sekwencyjny odczyt wielu znaczników, jednak w warunkach mostowych (przy obecności elementów metalowych i odbić fal) ich skuteczność może być ograniczona.

Największym atutem RFID jest zasięg działania i możliwość automatycznego odczytu wielu znaczników jednocześnie, bez konieczności ich lokalnego skanowania. Dzięki temu system RFID może być wykorzystany do szybkiej identyfikacji grup elementów, inspekcji zdalnych lub weryfikacji kompletności wyposażenia obiektu. W połączeniu z odpowiednim oprogramowaniem możliwe jest także śledzenie lokalizacji elementów tymczasowych (np. rusztowań, czujników, urządzeń pomiarowych) i automatyczne przypisywanie ich do odpowiednich obiektów w bazie danych.

Do głównych ograniczeń technologii RFID należy konieczność stosowania dedykowanych czytników (które są droższe od urządzeń mobilnych z NFC) oraz potencjalne zakłócenia od elementów metalowych i wilgoci, wpływające na zasięg i stabilność odczytu. Wymaga to doboru odpowiedniego typu znacznika oraz kalibracji anten w środowisku. Pomimo tych ograniczeń RFID ma największy potencjał rozwoju w kontekście automatyzacji procesów inspekcyjnych i integracji z robotami

mobilnymi, umożliwiając zdalny odczyt identyfikatorów bez kontaktu wzrokowego z elementem. Na Rys. 4-25 przedstawiono schemat działania systemu RFID.



Rys. 4-25 Schemat działania systemu RFID

4.3.2.5 Integracja i zastosowanie w procesie inspekcji

Przedstawione technologie (kody QR, NFC, RFID) nie wykluczają się wzajemnie. Największy potencjał leży w ich integracji i podejściu hybrydowym, w którym każda z metod pełni odmienną, uzupełniającą funkcję. Od prostych identyfikatorów wizualnych po bezdotykowe znaczniki umożliwiające automatyczny odczyt.

Zastosowanie znaczników w procesie inspekcji ma charakter dwukierunkowy (Rys. 4-26). Z jednej strony inspektor, skanując kod, pobiera informacje o elemencie (jego historię, parametry, poprzednie uszkodzenia). Z drugiej strony, sam akt skanowania może wysyłać informację zwrotną do systemu zarządcy, potwierdzając, że inspektor fizycznie znajdował się na obiekcie lub przy konkretnym elemencie. Zeskanowanie znaczników NFC lub RFID, które wymagają niewielkiej odległości odczytu, może stanowić cyfrowy dowód fizycznej obecności i weryfikację wykonania inspekcji.



Rys. 4-26 Dwukierunkowe działanie znaczników identyfikacyjnych

W początkowej fazie lub dla obiektów o prostej konstrukcji wystarczające może być zastosowanie pojedynczego znacznika przypisanego do całego obiektu mostowego, zawierającego podstawowe

informacje i umożliwiającego potwierdzenie wykonania przeglądu. Docelowo, dla obiektów skomplikowanych, system powinien opierać się na sieci punktów kontrolnych rozmieszczonych na kluczowych elementach konstrukcji. Taka sieć, poprzez wymuszenie odczytu znaczników w określonej kolejności, może służyć zdefiniowaniu powtarzalnej trasy inspekcyjnej, co bezpośrednio zwiększa powtarzalność, spójność i porównywalność danych zbieranych w czasie.

Ostatecznie system ten może stanowić fundament dla automatyzacji procesów inspekcyjnych. W podstawowym zakresie umożliwia automatyczną organizację dokumentacji fotograficznej, powiązanie zdjęć z odczytanymi znacznikami pozwalałoby na ich segregację według elementów i lokalizacji. Rozwiązanie to eliminuje błędy, skraca czas opracowania raportu i wspiera jego częściową automatyzację. W bardziej zaawansowanym scenariuszu system mógłby być zintegrowany z cyfrowym modelem 3D obiektu, umożliwiając przypisywanie zdjęć, ocen i uwag bezpośrednio do wirtualnych elementów konstrukcji. Znaczniki mogłyby wówczas pełnić dodatkowo funkcję punktów nawigacyjnych dla robotów inspekcyjnych, ułatwiających lokalizację elementów w przestrzeni.

W kontekście bezpieczeństwa zastosowanie technologii o ograniczonym zasięgu działania, takich jak NFC w miejscach publicznie dostępnych jest względnie bezpieczne. Odczyt wymaga celowego przyłożenia urządzenia do znacznika, dzięki czemu przypadkowy kontakt lub nieuprawniony odczyt przez osobę postronną, nieświadomą istnienia znacznika są mało prawdopodobne. Docelowo znaczniki mogą być dodatkowo chronione hasłem lub szyfrowaniem danych, ograniczającym dostęp do informacji tylko dla autoryzowanych użytkowników.

4.4 Podsumowanie

W niniejszym rozdziale przedstawiono autorską, dwufilarową koncepcję systemowego wdrożenia wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych. Jest ona odpowiedzią na ograniczenia i braki zidentyfikowane w pkt. 2 i 3, a jednocześnie stanowi propozycję spójnej architektury transformacji diagnostycznej, obejmującej zarówno rozwój technologii, jak i porządkowanie struktur informacyjnych. Podstawę tej architektury tworzą dwa elementy: piramida wirtualizacji oraz system standaryzacji identyfikacji elementów konstrukcyjnych.

Pierwszy element, piramida wirtualizacji (pkt 4.2), pokazał, że cyfrowa transformacja procesu diagnostycznego nie jest jednorazowym wdrożeniem, lecz ewolucyjnym procesem. Rozwój ten musi następować etapami, ponieważ każdy bardziej zaawansowany poziom korzysta z fundamentów danych, procesów i technologii wypracowanych poziom niżej. Taka hierarchiczna struktura wynika z samej natury procesu diagnostycznego, który przechodzi od bazowych metod cyfrowego wspomagania, przez cyfrowe odwzorowanie i zdalną analizę, aż po automatyzację terenową i ostatecznie systemy predykcyjne. Jednocześnie rozdział pokazał, że choć poszczególne poziomy mogą być przedmiotem badań rozwijanych równolegle, ich realna implementacja systemowa wymaga osiągnięcia odpowiedniej dojrzałości cyfrowej – zwłaszcza w zakresie jakości danych i ich strukturyzacji. Piramida podkreśla również, że transformacja nie zmierza do eliminacji roli inspektora, lecz do jej redefinicji. Człowiek staje się w coraz większym stopniu weryfikatorem i nadzorcą procesu (HITL), a nie wykonawcą pełnego zakresu czynności inspekcyjnych. Zmiana ta jest nie tylko konsekwencją wzrostu autonomii technologii, ale także niezbędnym warunkiem utrzymania odpowiedzialności i bezpieczeństwa procesu diagnostycznego.

Druga część rozdziału obejmuje standaryzację identyfikacji elementów obiektów mostowych (pkt 4.3). Stanowi ona podstawowy warunek skutecznego wdrożenia piramidy, ponieważ bez jednoznacznej i spójnej identyfikacji elementów konstrukcyjnych niemożliwe byłoby zarówno prowadzenie ustrukturyzowanej inspekcji cyfrowej, jak i późniejsza automatyczna analiza danych, rekonstrukcja selektywna czy działanie systemów robotycznych. Standaryzacja tworzy fundament informacyjny, który umożliwia interoperacyjność danych i pozwala wszystkim poziomom piramidy funkcjonować w ramach wspólnego, jednolitego ekosystemu.

Najważniejszym wnioskiem płynącym z rozdziału jest to, że oba filary pozostają w ścisłej współzależności. Piramida opisuje logikę i kierunek rozwoju technologicznego, ale jej wdrożenie jest możliwe tylko wtedy, gdy dane są uporządkowane, jednoznacznie zidentyfikowane i dostępne w ustrukturyzowanej formie. Z kolei standaryzacja danych dopiero w połączeniu z ewolucyjnym modelem wdrożeniowym piramidy pozwala wykorzystać pełen potencjał nowoczesnych metod, takich jak automatyczna detekcja uszkodzeń, wirtualna analiza, autonomiczne misje inspekcyjne czy systemy predykcyjne. Dopiero integracja obu podejść prowadzi do powstania spójnego środowiska diagnostycznego, zdolnego do wiarygodnego monitorowania stanu technicznego obiektów, uczenia się na podstawie danych i wspierania zarządzania ryzykiem infrastrukturalnym.

Po przedstawieniu ram teoretycznych i koncepcyjnych, kolejne rozdziały rozprawy (pkt 5 i 6) skupiają się już na praktycznej demonstracji i wdrożeniu kluczowych elementów zaproponowanego modelu. W szczególności omówione zostaną kluczowe etapy Fazy II piramidy: poziomu 3, czyli cyfrowego odwzorowania obiektu oraz poziomu 4, czyli jego wirtualnej inspekcji.

5 Cyfrowe odwzorowanie obiektów mostowych

5.1 Założenia i struktura procesu

5.1.1 Usytuowanie procesu w piramidzie wirtualizacji

Cyfrowe odwzorowanie obiektów mostowych stanowi jeden z kluczowych etapów autorskiego modelu piramidy wirtualizacji procesu inspekcji, przedstawionego w pkt. 4.2. Odpowiada on Poziomowi 3, określanemu jako Cyfrowe odwzorowanie obiektu. Etap ten wyznacza przejście od zintegrowanej inspekcji cyfrowej (Poziom 2), do środowiska umożliwiającego przestrzenną, zintegrowaną analizę geometrii oraz cech wizualnych analizowanego obiektu.

W strukturze piramidy proces ten pełni rolę fundamentu dla dalszych, bardziej zaawansowanych form wirtualizacji, w szczególności wirtualnej inspekcji obiektu (Poziom 4) oraz automatycznej analizy i detekcji uszkodzeń (Poziom 5). Jakość, kompletność i spójność danych uzyskanych na tym etapie determinują bowiem zarówno zakres możliwych analiz, jak i wiarygodność późniejszych wniosków diagnostycznych. Należy zaznaczyć, że cyfrowe odwzorowanie nie jest tożsame z samą czynnością inspekcyjną, lecz stanowi jej niezbędne przygotowanie. Na tym poziomie nie dochodzi jeszcze do interpretacji stanu technicznego elementów ani ich oceny, lecz do stworzenia cyfrowego odpowiednika rzeczywistej konstrukcji, który umożliwia przeniesienie dalszych czynności inspekcyjnych do środowiska wirtualnego.

Skupienie badań w niniejszej rozprawie na tym poziomie wynika zarówno z dużej różnorodności dostępnych technik oraz narzędzi pomiarowych, jak i z ich wysokiej dojrzałości technologicznej. Stwarza to możliwość wieloaspektowego zbadania zagadnienia w ramach jednego poziomu piramidy wirtualizacji. Istotnym argumentem był również wdrożeniowy charakter rozprawy. Proces cyfrowego odwzorowania obiektu stanowi etap, który może być relatywnie łatwo zaimplementowany w działalności przedsiębiorstwa zajmującego się diagnostyką obiektów mostowych, bez konieczności głębokiej reorganizacji całego systemu inspekcyjnego. W ramach prowadzonych badań możliwe było nie tylko przetestowanie różnych technologii przechwytywania rzeczywistości i rekonstrukcji 3D, lecz także ich rzeczywiste wdrożenie i weryfikacja w bieżącej pracy inżynierskiej, co pozwoliło na ocenę ich przydatności oraz ograniczeń.

5.1.2 Przechwytywanie rzeczywistości a rekonstrukcja 3D

Proces cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych obejmuje dwa ściśle powiązane, lecz w ocenie autora, pojęciowo odrębne zagadnienia: przechwytywanie rzeczywistości oraz rekonstrukcję 3D. W opracowaniach naukowych oraz praktyce inżynierskiej pojęcia te są często stosowane zamiennie, co prowadzi do nieścisłości interpretacyjnych. Ich jednoznaczne rozróżnienie ma zatem kluczowe znaczenie zarówno z punktu widzenia metodyki badań, jak i spójności terminologicznej całej rozprawy.

Przechwytywanie rzeczywistości (ang. reality capture) definiuje się jako proces pozyskiwania danych z rzeczywistego świata w celu stworzenia jego cyfrowej reprezentacji. Obejmuje on rejestrację

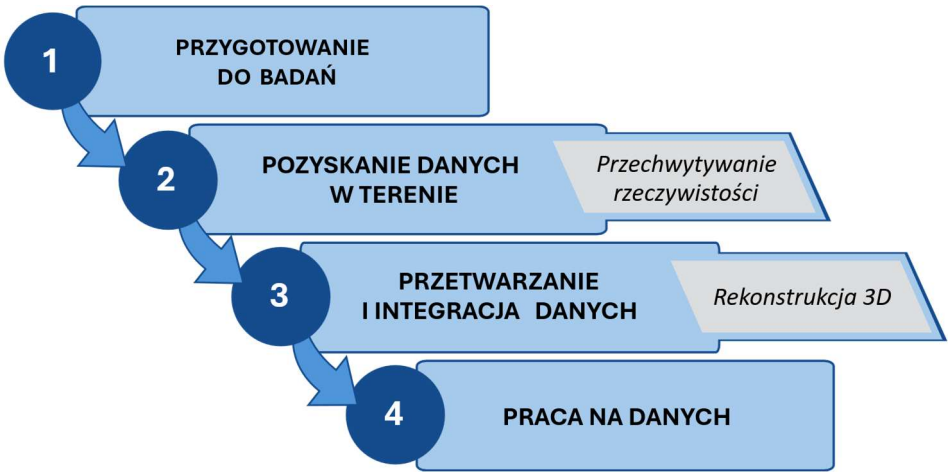
geometrii oraz informacji wizualnych (tekstur) z wykorzystaniem technologii pomiarowych, takich jak skanowanie laserowe czy fotogrametria. Przechwytywanie rzeczywistości stanowi pierwszy, terenowy etap cyfryzacji obiektu. Na tym etapie powstają surowe dane pomiarowe, w szczególności zbiory zdjęć oraz chmury punktów lub ich fragmenty, które same w sobie nie tworzą jeszcze spójnego modelu, lecz stanowią jego fundament informacyjny.

Rekonstrukcja 3D jest natomiast procesem przetwarzania danych pozyskanych w wyniku przechwytywania rzeczywistości w celu utworzenia uporządkowanej, cyfrowej reprezentacji obiektu. Obejmuje ona m.in. łączenie danych, przetwarzanie chmur punktów, tworzenie modeli siatkowych, ich teksturowanie, a w końcowym etapie również budowę modeli bryłowych. Etap ten realizowany jest w ramach prac kameralnych, w środowisku obliczeniowym i prowadzi do powstania modelu, który może być dalej wykorzystywany jako nośnik informacji diagnostycznej oraz podstawa analiz prowadzonych w środowisku wirtualnym.

Wprowadzone rozróżnienie podkreśla dwa zasadnicze etapy procesu cyfrowego odwzorowania, w którym operacje terenowe i kameralne muszą być ze sobą ściśle zsynchronizowane. Relacja ta ma charakter sekwencyjny: jakość i kompletność danych pozyskanych podczas przechwytywania rzeczywistości wyznaczają górną granicę dokładności oraz wierności odwzorowania końcowego modelu uzyskanego w procesie rekonstrukcji 3D. Takie ujęcie umożliwia precyzyjne przypisanie konkretnych technologii pomiarowych oraz algorytmów obliczeniowych do właściwych faz realizacji zadania, porządkując proces cyfrowego odwzorowania obiektu w ujęciu etapowym.

5.1.3 Etapy procesu cyfrowego odwzorowania obiektu

Proces cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych ma charakter sekwencyjny i obejmuje zestaw wzajemnie powiązanych, następujących po sobie etapów. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych, wypracowano czterostopniowy model, który porządkuje poszczególne działania inżynierskie w logiczny ciąg zdarzeń. Schemat procesu, przedstawiony na Rys. 5-1 obejmuje: przygotowanie do badań, pozyskiwanie danych w terenie, ich przetwarzanie i integrację oraz pracę na danych. Każdy z wymienionych etapów wymaga zastosowania odrębnego warsztatu narzędziowego oraz specyficznych kompetencji, co uzasadnia ich jednoznaczne rozdzielenie w strukturze procesu.



Rys. 5-1 Schemat procesu cyfrowego odwzorowania obiektu mostowego

Etap 1: Przygotowanie do badań

Pierwszym etapem procesu jest przygotowanie do badań, obejmujące planowanie prac terenowych, analizę geometrii i dostępności obiektu, analizę dokumentacji archiwalnej, a także dobór technik pomiarowych i narzędzi adekwatnych do celu inspekcji. Na tym etapie określany jest zakres pozyskiwanych danych, sposób ich rejestracji oraz potencjalne ograniczenia wynikające z lokalnych warunków terenowych oraz ograniczeń formalnych. Decyzje podejmowane na etapie przygotowania mają bezpośredni wpływ na jakość danych wejściowych oraz efektywność kolejnych etapów procesu.

Etap 2: Pozyskiwanie danych

Drugim etapem jest pozyskiwanie danych w terenie, stanowiące właściwy proces przechwytywania rzeczywistości opisany w pkt. 0. Obejmuje ono realizację nalotów fotogrametrycznych, skanowań laserowych, wykonywanie zdjęć oraz pomiary z wykorzystaniem tradycyjnych narzędzi. Efektem tego etapu są surowe dane pomiarowe, takie jak notatki, zbiory zdjęć czy chmury punktów, których kompletność i jakość determinują możliwości dalszego przetwarzania oraz rekonstrukcji obiektu w środowisku cyfrowym.

Etap 3: Przetwarzanie danych

Kolejnym etapem jest przetwarzanie danych realizowane w warunkach biurowych, odpowiadające procesowi rekonstrukcji 3D opisanej w pkt. 0. Obejmuje ono integrację danych pozyskanych w terenie w środowisku cyfrowym poprzez przetwarzanie serii zdjęć, łączenie chmur punktów, tworzenie modeli siatkowych oraz ich teksturowanie oraz tworzenie modeli bryłowych. Celem tego etapu jest uzyskanie spójnej, uporządkowanej cyfrowej reprezentacji obiektu, stanowiącej podstawę dalszych analiz i działań inspekcyjnych.

Etap 4: Praca na danych

Ostatnim etapem procesu jest praca na danych, rozumiana jako wykorzystanie powstałego modelu 3D jako nośnika informacji diagnostycznej. Na tym etapie model przestaje pełnić wyłącznie funkcję rekonstrukcji geometrycznej, a staje się środowiskiem umożliwiającym analizę, interpretację oraz dokumentowanie stanu technicznego obiektu. Etap ten stanowi bezpośrednie przejście do zagadnień związanych z wirtualną inspekcją oraz dalszą wirtualizacją procesu diagnostycznego i zostanie szerzej omówiony w rozdziale 6.

Przyjęty podział procesu cyfrowego odwzorowania obiektu porządkuje kolejne działania i stanowi ramy odniesienia dla dalszych rozważań przedstawionych w niniejszym rozdziale. Pierwsze trzy etapy procesu, wraz z zastosowanym sprzętem pomiarowym, oprogramowaniem oraz obiektami mostowymi pełniącymi rolę poligonu doświadczalnego, zostały szczegółowo omówione w kolejnych podrozdziałach rozdziału 5, natomiast etap czwarty przedstawiony został w rozdziale 6.

5.2 Narzędzia i środowisko badań

5.2.1 Sprzęt pomiarowy i rejestrujący

Skuteczność procesu przechwytywania rzeczywistości w diagnostyce mostowej jest bezpośrednio uzależniona od parametrów technicznych oraz funkcjonalnych zastosowanej aparatury pomiarowej. W ramach prowadzonych badań doświadczalnych wykorzystano zróżnicowany zestaw

urządzeń umożliwiających wieloskalowe pozyskiwanie danych, obejmujące zarówno rejestrację ogólnej geometrii obiektu, jak i wysokorozdzielczą dokumentację detali konstrukcyjnych istotnych z punktu widzenia inspekcji. W niniejszej pracy pojęcie sprzętu pomiarowego i rejestrującego odnosi się do wszelkich urządzeń wykorzystywanych do pozyskiwania danych przestrzennych i obrazowych niezbędnych do procesu cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych, niezależnie od stopnia ich zaawansowania technologicznego. Obejmuje ono zarówno specjalistyczne systemy pomiarowe, jak i urządzenia powszechnie dostępne, stosowane jako narzędzia uzupełniające w procesie inspekcji.

Do pozyskiwania danych wizualnych i geometrycznych z powietrza wykorzystano flotę BSP o zróżnicowanej charakterystyce technicznej i operacyjnej. Kluczową rolę odegrał model **DJI Mavic 3 Enterprise** (masa bazowa: ok. 915 g), który dzięki mechanicznej migawce i modułowi RTK zapewnił wysoką precyzję pozycjonowania i jakość zdjęć. Dodatkowe oświetlenie GL10 umożliwiło dokumentację miejsc o ograniczonym dostępie światła naturalnego, co było kluczowe przy precyzyjnej inspekcji elementów takich jak łożyska. Do zadań specjalistycznych wykorzystano platformę **DJI Matrice 210 RTK** (masa bazowa: 4,69 kg), pozwalającą na montaż zarówno kamery inspekcyjnej o dużym przybliżeniu optycznym (Zenmuse Z30), jak i kamery termowizyjnej (Zenmuse XT2). Uzupełnieniem zestawu był najnowszy ultralekki dron **DJI Mini 5 Pro** (masa < 250 g), wykorzystywany w lokalizacjach objętych ograniczeniami dotyczącymi operacji BSP lub w przypadkach niewymagających wysokiej dokładności georeferencji fotografii. Na Rys. 5-2 przedstawione zostały poszczególne drony wykorzystane w badaniach.



Rys. 5-2 Używane drony: (1) DJI Mini 5 Pro, (2) DJI Matrice 210 RTK, (3) DJI Mavic 3 Enterprise z modułem RTK (a) i oświetleniem (b)

Do precyzyjnej rejestracji geometrii obiektów mostowych wykorzystywano naziemne skanowanie laserowe (TLS), umożliwiające pozyskanie wysokorozdzielczych chmur punktów stanowiących podstawę analizy geometrycznej oraz integracji z danymi fotogrametrycznymi. Podstawowym urządzeniem stosowanym w ramach prowadzonych badań był skaner **Leica BLK360**. Jego kompaktowe wymiary oraz intuicyjna obsługa umożliwiały sprawne prowadzenie pomiarów w zróżnicowanych warunkach terenowych, przy jednoczesnej łatwej implementacji urządzenia w bieżącą praktykę inżynierską firmy. Uzyskiwane chmury punktów charakteryzowały się wystarczającą

dokładnością i gęstością do celów rekonstrukcji 3D oraz dalszej analizy w środowisku cyfrowym, pełniąc istotną rolę w procesie cyfrowego odwzorowania obiektu.

W analizach wykorzystywano również uzupełniająco chmury punktów pochodzące z innych wysokowydajnych skanerów stacjonarnych: **Trimble X9** oraz **Z+F IMAGER 5010X**. Urządzenia te charakteryzują się znacznym zasięgiem oraz wysoką dokładnością pomiaru, co pozwoliło na rzetelne odwzorowanie geometrii ustrojów nośnych o dużych rozpiętościach oraz precyzyjne wyznaczenie rzędnych kluczowych punktów konstrukcyjnych. Integracja danych pochodzących z tak zróżnicowanych jednostek skanujących pozwoliła na weryfikację wpływu gęstości i dokładności chmury punktów na końcową jakość rekonstrukcji 3D obiektu mostowego. Na Rys. 5-3 przedstawiono wybrane modele skanerów wykorzystane w badaniach, a w Tab. 5-1 zestawiono porównanie ich podstawowych parametrów technicznych.

Tab. 5-1 Podstawowe parametry techniczne wykorzystanych skanerów laserowych

Parametr techniczny	Leica BLK360	Trimble X9	Z+F IMAGER 5010X
Zasięg pomiarowy [m]	do 60	do 150	do 187,3
Szybkość skanowania [pkt/s]	do 360 000	do 1 000 000	do 1 016 000
Dokładność na 10 m [mm]	± 4,0	± 2,3	± 1,6
Masa z baterią [kg]	ok. 1,0	ok. 6,0	ok. 11,0



Rys. 5-3 Używane skanery laserowe od lewej: Leica BLK360, Trimble X9, Z+F IMAGER 5010X

W procesie szybkiego pozyskiwania danych dotyczących fragmentów obiektów oraz ich detali konstrukcyjnych, w tym uszkodzeń, wykorzystywano urządzenia mobilne wyposażone w sensory LiDAR, takie jak iPhone 16 Pro oraz iPad Pro 11” (drugiej generacji). Urządzenia te, we współpracy z aplikacjami mobilnymi, służyły do testowania technologii natychmiastowej rekonstrukcji 3D. Ponadto urządzenia te, a także smartfony z serii Samsung Galaxy (S24+, S20+), wykorzystywano do wykonywania dokumentacji fotograficznej oraz obsługi innych urządzeń pomiarowych, takich jak BSP czy skanery laserowe.

W wybranych przypadkach proces cyfrowego odwzorowania rozszerzano o dane pochodzące z badań nieniszczących betonu (NDT). W tym celu wykorzystywano specjalistyczną aparaturę m.in. georadary (GSSI Flex NX, IDS C-thrue), urządzenia do badań ultradźwiękowych (Proceq Pundit 200) oraz

systemy lokalizacji zbrojenia (Hilti PS300) i oceny stanu korozji (iCAMM). Dane te pełniły funkcję uzupełniającą i nie stanowiły bezpośredniego elementu rekonstrukcji geometrycznej, lecz pozwalały na rozszerzenie zakresu informacji przypisywanych do modelu 3D.

W celu zapewnienia odniesienia przestrzennego danych oraz kontroli geometrii tworzonych modeli wykorzystywano instrumenty geodezyjne, w tym tachimetry (Leica TS10, Geomax Zoom90) oraz odbiorniki GNSS (Nivel System Point 3 i Geomax Zenith 40). Urządzenia te stosowano w wybranych przypadkach do stabilizacji osnów pomiarowych oraz weryfikacji dokładności przestrzennej modeli. Uzupełniająco w trakcie badań wykorzystywano klasyczne narzędzia pomiarowe i inspekcyjne, takie jak miary taśmowe, dalmierze laserowe (np. Leica Disto D810), mierniki rys, szczelinomierze, suwmiarki oraz lupy, stosowane do lokalnych domiarów, pomiarów kontrolnych oraz weryfikacji obserwacji terenowych.

Zapewnienie ciągłości prac pomiarowych w warunkach terenowych, często w lokalizacjach pozbawionych dostępu do sieci elektroenergetycznej, wymagało zastosowania niezależnych i wydajnych źródeł zasilania. Do podtrzymania gotowości operacyjnej floty BSP, skanerów laserowych oraz urządzeń mobilnych wykorzystano dwa typy mobilnych źródeł energii o zróżnicowanej charakterystyce i przeznaczeniu.

Pierwszym z nich był przenośny magazyn energii (ang. powerbank) o pojemności 20 000 mAh, charakteryzujący się wysoką mocą wyjściową wynoszącą 100 W. Dzięki obsłudze standardów szybkiego ładowania w portach USB, urządzenie to służyło do podtrzymywania pracy kontrolerów lotu BSP, smartfonów oraz tabletów.

Drugim elementem była przenośna stacja zasilania o pojemności wynoszącej 680 Wh (odpowiadającej ok. 184000 mAh), pełniąca funkcję centralnego węzła energetycznego w miejscu prowadzenia badań. Urządzenie to zostało wyposażone w szeroki wachlarz złączy, w tym standardowe gniazda prądu (AC 230 V), wyjście prądu stałego (DC 12 V) oraz porty USB. Dzięki dużej pojemności i obecności gniazd sieciowych, stacja umożliwiała wielokrotne ładowanie akumulatorów BSP i skanerów laserowych oraz zapewniała zasilanie jednostek obliczeniowych w trakcie długotrwałych prac terenowych.

Dobór poszczególnych urządzeń każdorazowo uzależniony był od specyfiki badanego obiektu, celu pozyskiwania danych oraz uwarunkowań terenowych i formalnych. W procesie planowania uwzględniano czynniki takie jak skomplikowanie geometrii konstrukcji, dostępność jej newralgicznych elementów, obecność przeszkód terenowych oraz restrykcje w zakresie wykonywania nalotów bezzałogowych. Istotnym czynnikiem kształtującym ostateczną konfigurację sprzętu badawczego były również założenia opisane w podrozdziale 1.3, wynikające bezpośrednio z formuły doktoratu wdrożeniowego. Ograniczona dostępność niektórych kosztownych technologii pomiarowych, niebędących w posiadaniu jednostki naukowej ani przedsiębiorstwa partnerskiego, wymusiła oparcie badań na aparaturze dostępnej operacyjnie, co jednocześnie pozwoliło na ocenę jej rzeczywistej przydatności w warunkach praktyki inżynierskiej.

5.2.2 Oprogramowanie i środowisko informatyczne

Proces cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych, obejmujący zarówno przechwytywanie rzeczywistości, jak i rekonstrukcję 3D, wymagał zastosowania zaawansowanego środowiska

informatycznego, zdolnego do przetwarzania masowych ilości danych pochodzących głównie ze skanowania laserowego oraz fotogrametrii. Wykorzystane oprogramowanie można podzielić na cztery główne grupy funkcjonalne: aplikacje operacyjne, systemy przetwarzania chmur punktów, oprogramowanie fotogrametryczne oraz narzędzia modelowania BIM/CAD.

Do bezpośredniej obsługi urządzeń pomiarowych wykorzystano dedykowane aplikacje mobilne. Sterowanie flotą BSP oraz planowanie misji zautomatyzowanych realizowano przy użyciu oprogramowania DJI Pilot 2 (dla DJI Mavic) oraz DJI Fly (dla DJI Mini). Obsługę skanera Leica BLK 360 w terenie, w tym wstępną rejestrację i kontrolę jakości skanów, zapewniło oprogramowanie Cyclone FIELD 360. W procesie szybkiego pozyskiwania danych polegającym natychmiastowej rekonstrukcji 3D fragmentów obiektów mostowych z wykorzystaniem sensora LiDAR w urządzeniach mobilnych marki Apple, wykorzystano aplikację Polycam.

Istotnym etapem prac było łączenie danych z wielu stanowisk skanowania oraz ich oczyszczanie. Głównym narzędziem w tym procesie był program Cyclone REGISTER 360, który pozwolił na precyzyjną rejestrację chmur, ich filtrację z szumów oraz optymalizację pod kątem dalszego modelowania. Uzupełniająco wykorzystano Autodesk ReCap Pro, w celu wykonywania pomiarów kontrolnych na chmurach oraz przygotowania podkładów dla oprogramowania klasy BIM/CAD.

Podstawowym narzędziem wykorzystywanym do przetwarzania nieuporządkowanych zdjęć było oprogramowanie fotogrametryczne RealityCapture (wersje od 1.3 do 1.5). Poza generowaniem fotorealistycznych modeli teksturowanych oraz precyzyjnym dopasowaniem zdjęć, pozwalało ono na integracje danych fotogrametrycznych z chmurami punktów pozyskanymi w wyniku skanowania laserowego. Choć w procesie badawczym testowo wykorzystano również oprogramowanie Agisoft Metashape Professional, to RealityCapture stanowiło kluczowe narzędzie stosowane w badaniach.

Ponadto, przeprowadzono próby z wykorzystaniem narzędzi otwartych (ang. open source) takich jak CloudCompare oraz MeshLab. Ze względu na ograniczoną ergonomię pracy oraz niższą efektywność w kontekście dużych zbiorów danych, oprogramowanie to nie zostało włączone do podstawowego środowiska badawczego.

Tworzenie modeli bryłowych obiektów oraz opracowanie dokumentacji inwentaryzacyjnej na bazie chmur punktów i modeli siatkowych realizowano w środowiskach CAD i BIM. Wykorzystano w tym celu oprogramowanie Autodesk Revit oraz Tekla Structures do tworzenia parametrycznych modeli bryłowych konstrukcji.

Przetwarzanie, integracja oraz renderowanie zgromadzonych danych realizowano na czterech jednostkach obliczeniowych o zróżnicowanej architekturze i wydajności: dwóch stacjonarnych stacjach roboczych, laptopie oraz urządzeniu hybrydowym Microsoft Surface Pro 9. Ten ostatni był elementem uniwersalnego zestawu do wsparcia inspekcji w terenie i wizualizacji modelu 3D mostu i pełnił funkcję zarówno tabletu terenowego, jak i komputera przenośnego. W Tab. 5-2 zestawiono ich podstawowe parametry techniczne wraz z rolą w procesie przetwarzania danych. Wybór tak skonfigurowanego środowiska sprzętowego wynikał bezpośrednio z wysokich wymagań obliczeniowych algorytmów fotogrametrycznych oraz konieczności operowania na dużych wolumenach chmur punktów.

Tab. 5-2 Charakterystyka jednostek obliczeniowych wykorzystanych w procesie przetwarzania danych

Parametr	Stacjonarna stacja robocza 1	Stacjonarna stacja robocza 2	Laptop	MS Surface Pro 9
Procesor	Intel Core i9-12900K 16 rdzeni (8P + 8E) 3,20 – 5,20 GHz	Intel Core i9-14900K 24 rdzenie (8P + 16E) 3,20 – 6,00 GHz	Intel Core i7-12650H 10 rdzeni (6P + 4E) 2,30 – 4,70 GHz	Intel Core i7-1265U 10 rdzeni (2P + 8E) 1,80 – 4,80 GHz
Pamięć RAM	64 GB	64 GB	16 GB	16 GB
Karta graficzna (VRAM)	NVIDIA GeForce RTX 2060 (6 GB)	NVIDIA GeForce RTX 4060 Ti (16 GB)	NVIDIA GeForce RTX 3060 Laptop (6 GB)	Intel Iris Xe (pamięć współdzielona)
Dysk twardy	1 TB SSD	1 TB SSD	1 TB SSD	512 GB SSD
System operacyjny	Windows 11 Pro	Windows 11 Pro	Windows 11 Home	Windows 11 Pro
Rola w procesie	Wstępne przetwarzanie i rejestracja chmur punktów	Główne renderowanie i integracja danych	Renderowanie, łączenie danych, optymalizacja modeli	Kontrola jakości danych w terenie oraz bieżąca obsługa pomiarów

Najbardziej obciążające etapy przetwarzania, takie jak generowanie gęstych chmur punktów, tworzenie modeli siatkowych oraz ich teksturowanie danymi o wysokiej rozdzielczości, realizowano na stacjonarnych stacjach roboczych wyposażonych w procesory o dużej liczbie rdzeni oraz wydajne układy graficzne. Jednostki mobilne wykorzystywano przede wszystkim do wstępnego przetwarzania danych, integracji zbiorów z różnych źródeł oraz kontroli jakości wyników, zarówno w warunkach biurowych, jak i bezpośrednio w terenie. Ze względu na duże wolumeny danych przestrzennych wykorzystywano również szybkie zewnętrzne nośniki danych typu SSD o pojemności 2 TB oraz 4 TB, umożliwiające sprawną archiwizację i transfer danych pomiędzy stanowiskami roboczymi.

Zastosowane środowisko informatyczne umożliwiło realizację pełnego procesu cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych, od etapu pozyskiwania danych po ich wieloetapowe przetwarzanie. Integracja specjalistycznego oprogramowania inżynierskiego oraz zaawansowanych narzędzi fotogrametrycznych, wykraczających poza standardowy katalog instrumentów diagnostycznych, w połączeniu z wysoką mocą obliczeniową wykorzystanych jednostek roboczych, pozwoliła na sprawną transformację surowych danych przestrzennych w metryczne modele informacji o obiekcie. Przyjęte rozwiązania stanowiły optymalny kompromis pomiędzy wydajnością obliczeniową, ergonomią pracy oraz realiami wdrożeniowymi.

5.3 Obiekty badawcze

5.3.1 Zakres i uzasadnienie wyboru obiektów

Badania związane z cyfrowym odwzorowaniem obiektów mostowych prowadzono na szerokim zbiorze konstrukcji, obejmującym zarówno obiekty drogowe, jak i kolejowe, o zróżnicowanej formie konstrukcyjnej, skali oraz stopniu skomplikowania geometrii. Dobór obiektów mostowych do badań doświadczalnych wynikał bezpośrednio z rzeczywistej praktyki inżynierskiej oraz prac diagnostycznych realizowanych w ramach działalności zawodowej i badawczej autora.

W ramach prowadzonych prac wyróżniono obiekty pełniące rolę kluczowych poligonów badawczych, na których realizowano pełne lub niemal pełne sekwencje procesu cyfrowego odwzorowania. Równolegle analizowano obiekty o charakterze uzupełniającym, wykorzystywane do testowania wybranych etapów procesu, konkretnych technologii lub narzędzi.

Zgromadzony materiał badawczy obejmuje zarówno kompletne modele obiektów, jak i rekonstrukcje fragmentaryczne, koncentrujące się na wybranych elementach konstrukcyjnych (np. filarach, ustrojach nośnych, konstrukcjach oporowych). Takie podejście umożliwiło ocenę przydatności poszczególnych technik cyfrowego odwzorowania nie tylko w skali całego obiektu, lecz także w odniesieniu do lokalnych problemów diagnostycznych, takich jak analiza deformacji czy inwentaryzacja konkretnych uszkodzeń.

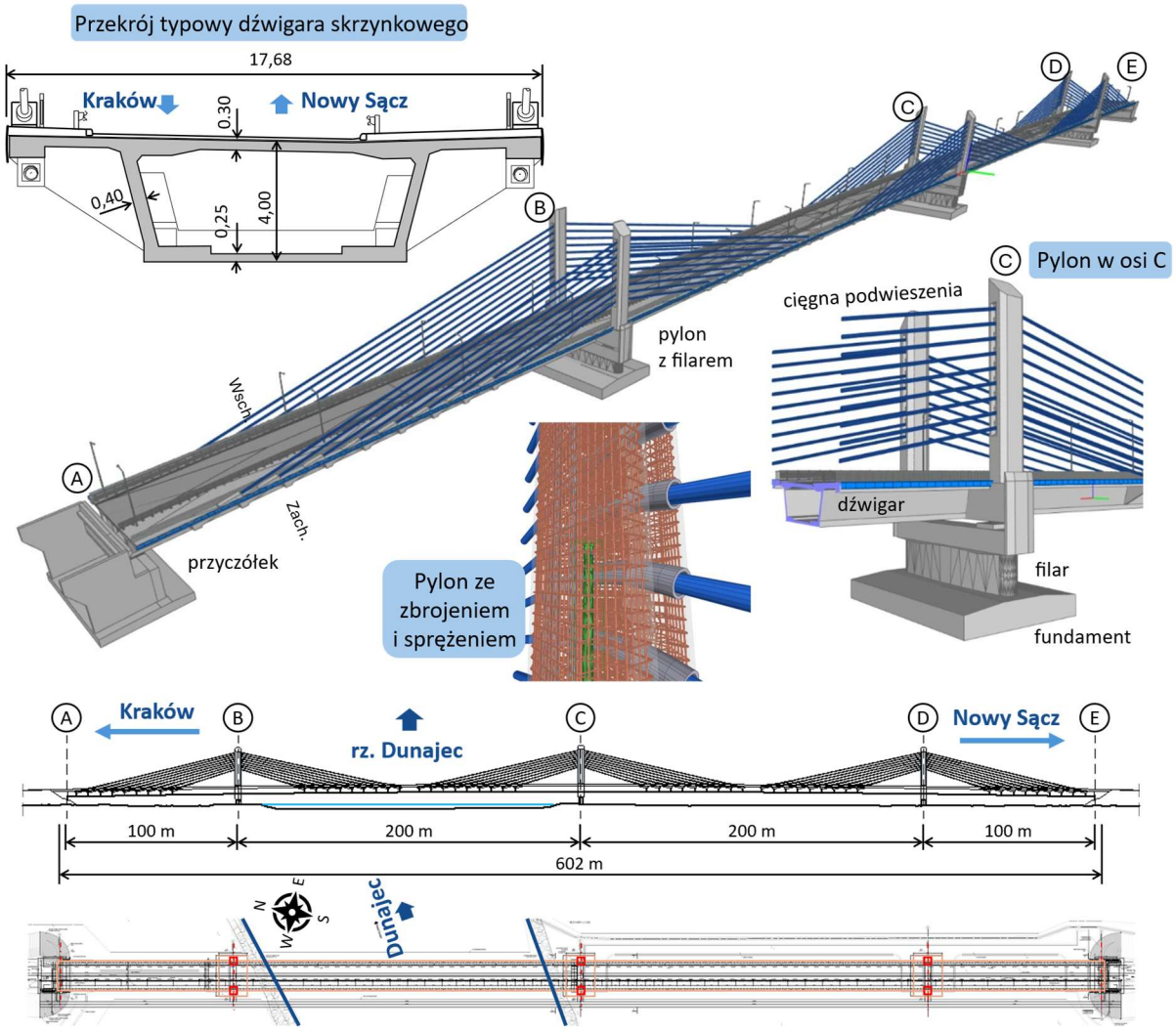
5.3.2 Obiekty drogowe

W grupie obiektów drogowych badania koncentrowały się na weryfikacji uniwersalności opracowanej metodyki w zróżnicowanych skalach, od pojedynczych elementów konstrukcyjnych po wieloprzęsłowe obiekty mostowe o złożonej charakterystyce geometrycznej. Istotnym aspektem prowadzonych prac była ocena przydatności poszczególnych technik cyfrowego odwzorowania w rzeczywistej praktyce inżynierskiej oraz ich korelacja z klasycznymi metodami diagnostycznymi.

Głównym poligonem badawczym był most w Kurowie nad rzeką Dunajec, zlokalizowany w pobliżu Nowego Sącza, o długości całkowitej około 600 m (Rys. 5-4). Jest to obiekt typu extradosed, składający się z czterech przęseł o rozpiętościach 100 i 200 m (Rys. 5-5). Jego ustrój nośny tworzy kablobetonowa skrzynka z obustronnymi wspornikami, w których zakotwiono cięgna podwieszenia, natomiast pylony zamocowane są bezpośrednio w dźwigarze i oparte na łożyskach filarów. Zakres przeprowadzonych tam badań był najbardziej kompleksowy i obejmował pełną sekwencję przechwytywania rzeczywistości, rekonstrukcję 3D oraz wirtualną inspekcję, koncentrując się szczególnie na obszarach pylonów. Całość wzbogacono o wyniki badań nieniszczących (NDT) betonu.

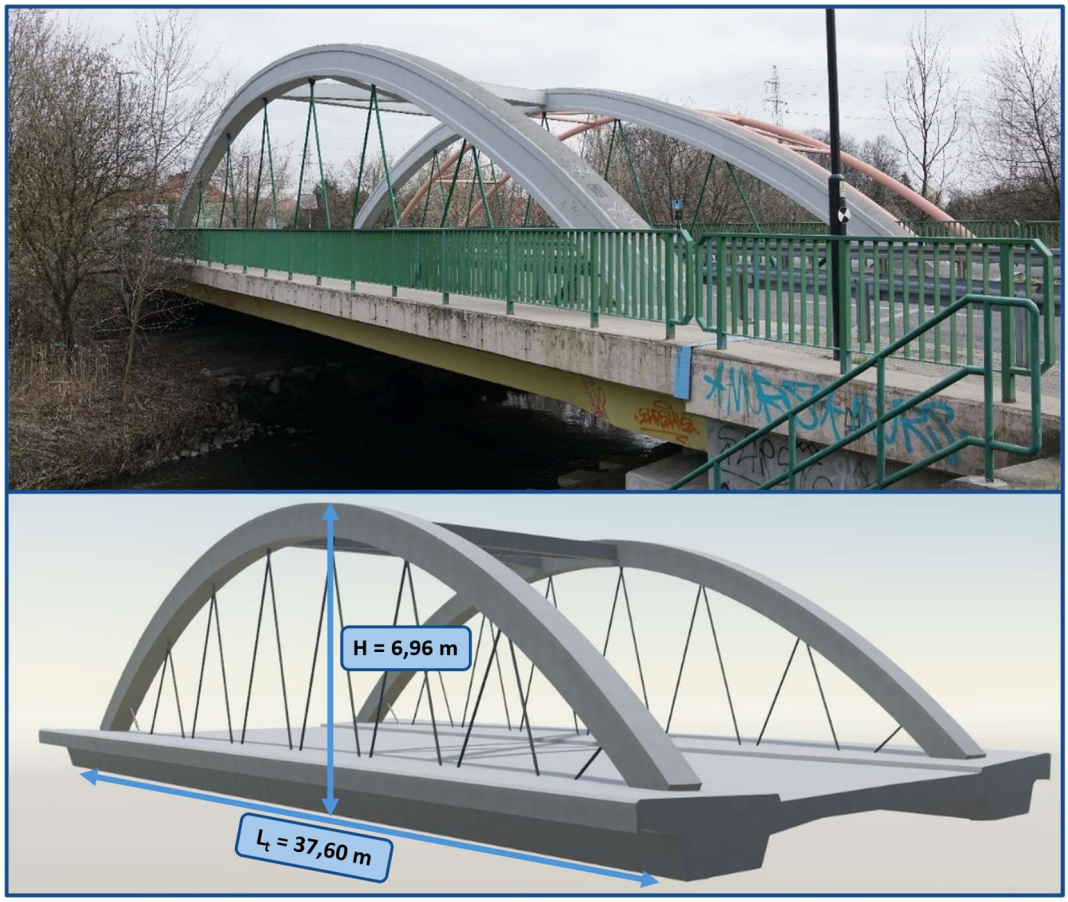


Rys. 5-4 Most w Kurowie – główny poligon badawczy (zdjęcia ogólne)



Rys. 5-5 Most w Kurowie – główny poligon badawczy (dane techniczne i model bryłowy)

Drugim istotnym poligonem badawczym był most w ciągu ul. Panewnickiej w Gliwicach (Rys. 5-6). Ustrój nośny obiektu stanowią dwa dźwigary sprężone wzmocnione łukiem żelbetowym z wieszakami typu V o rozpiętości teoretycznej 37,6 m. Ze względu na lokalizację w bezpośrednim sąsiedztwie kampusu Politechniki Śląskiej, obiekt ten pełnił rolę poligonu inicjalnego. Prowadzone na nim prace umożliwiły wypracowanie pierwszych schematów cyfrowego odwzorowania oraz wstępny dobór narzędzi pomiarowych, stanowiąc punkt odniesienia dla dalszych, bardziej złożonych misji pomiarowych.



Rys. 5-6 Most w ciągu ul. Panewnickiej w Gliwicach – inicjalny poligon badawczy

Pozostałe obiekty drogowe służyły analizom ukierunkowanym na wybrane zagadnienia cząstkowe, gdzie zakres cyfrowego odwzorowania był każdorazowo dostosowany do konkretnego celu diagnostycznego. Na granicy Chorzowa i Świętochłowic poddano badaniom dziesięciometrowy filar wiaduktu, co pozwoliło na analizę komplementarności danych pochodzących ze skanowania laserowego i fotogrametrii. Z kolei prace na wieloprzęsłowym moście nad Dunajem w Bratysławie koncentrowały się na problematyce odwzorowania geometrii nad szerokimi przeszkodami wodnymi. W tym przypadku, ze względu na brak możliwości rozstawienia stanowisk skanera pod obiektem, testowano innowacyjne podejście polegające na pozyskiwaniu danych fotogrametrycznych przy użyciu pływającej platformy pomiarowej.

W ramach współpracy z przemysłem, wynikającej z charakteru pracy zawodowej, prowadzono również badania na obiektach o specyficznych wymaganiach i problemach, gdzie techniki przechwytywania rzeczywistości znalazły swoje zastosowania. Przykładem jest czteroprzęsłowy wiadukt M16 nad autostradą A4 w Mysłowicach o długości całkowitej ok. 55 m, gdzie do analizy

rozmieszczenia prefabrykowanych belek użyto chmury punktów. Głównym wyzwaniem w tym przypadku był intensywny, nieprzerwany ruch samochodowy pod obiektem. Podobny charakter miały prace w ciągu drogi krajowej DK1 w Tychach, na czteroprzęsłowym wiadukcie o długości całkowitej ok. 65 m, gdzie precyzyjna chmura punktów była niezbędna do przygotowania dokładnego projektu remontu obejmującego zmianę geometrii węzłów podporowych.

Badaniom poddano również pojedyncze elementy konstrukcyjne. Część obiektów wykorzystywano do testów natychmiastowej rekonstrukcji 3D z użyciem aplikacji mobilnych podczas licznych inwentaryzacji obiektów na terenie całej Polski. Most graniczny w Cieszynie, wspomniany w pkt. 4.3, posłużył dodatkowo do implementacji autorskiego systemu numeracji i identyfikacji elementów konstrukcyjnych. Zbiorcze zestawienie wybranych pozostałych poligonów badawczych zaprezentowano na Rys. 5-7.



Rys. 5-7 Pozostałe wybrane drogowe poligony badawcze (1) Bratysława (2) Chorzów, (3) Mysłowice, (4) Tychy

5.3.3 Obiekty kolejowe

Badania obiektów kolejowych, mające charakter testów wdrożeniowych, stanowiły istotny komponent prac badawczych, co wynikało bezpośrednio z opracowań eksperckich realizowanych w ramach działalności zawodowej autora. Specyfika infrastruktury kolejowej, odmienna od drogowej, wynika m.in. z obecności nawierzchni torowej, której układ geometryczny (szyny, podkłady, podsypka) jest trudniejszy do odwzorowania, a także z bardziej restrykcyjnych uwarunkowań formalnych i organizacyjnych związanych z prowadzeniem prac pomiarowych. Czynniki te miały istotny wpływ na

dobór technik przechwytywania rzeczywistości używanych do licznych opracowań inwentaryzacyjnych, wykonywanych głównie na potrzeby przeglądów specjalnych.

Jednym z głównych poligonów badawczych były dwa sąsiadujące ze sobą wiadukty kolejowe zlokalizowane przy ul. Mostowej w Kędzierzynie-Koźlu, oddalone od siebie o około 30 m. Były to dwa jednoprzęsłowe obiekty żelbetowe: jeden o konstrukcji płytowej, drugi o sklepionej. Na obu obiektach zrealizowano pełną sekwencję pozyskiwania danych z wykorzystaniem naziemnego skanowania laserowego oraz fotogrametrii, a następnie opracowano wspólny model fotogrametryczny obejmujący obie konstrukcje jednocześnie. Prace te stanowiły próbę przetworzenia relatywnie dużego obszaru infrastruktury kolejowej w ramach jednego spójnego modelu cyfrowego.

Wyzwaniem było również skanowanie laserowe dużego mostu kratowego w Zatorze, obejmującego trzy przęsła o rozpiętościach teoretycznych około 65 i 73 m. Obiekt przeprowadza dwa tory kolejowe, co łącznie daje sześć niezależnych kratownic. Celem prac była inwentaryzacja konstrukcji oraz opracowanie jej modelu bryłowego na potrzeby ekspertyzy technicznej i późniejszego projektu remontu. Złożoność geometrii, występowanie przecinających się smukłych stalowych profili i gęstych połączeń nitowanych pozwoliły na ocenę przydatności skanowania w procesie rekonstruowania obiektów o wysokim stopniu komplikacji geometrycznej.

Natomiast w Jarocinie wykonano chmurę punktów wiaduktu kolejowego w celu oceny geometrii konstrukcji stalowej uszkodzonej w wyniku uderzenia przez pojazd o zbyt dużej wysokości. Analizy obejmowały zarówno ocenę globalnej geometrii obiektu (przemieszczenia w planie), jak i identyfikację lokalnych deformacji uderzonego dźwigara. Uzyskane dane stanowiły podstawę do opracowania ekspertyzy technicznej oraz późniejszych prac projektowych związanych z remontem obiektu.

Badania obejmowały również wybrane elementy konstrukcyjne o charakterze lokalnym. Przykładem był wieloprzęsłowy most kratowy nad Wisłą w Krakowie, gdzie wykonano rekonstrukcję natychmiastową geometrii ciosów przyczółków w celu opracowania dokumentacji remontowej. Wysoka dokładność odwzorowania była w tym przypadku kluczowa, ponieważ projektowane elementy stalowe miały stanowić okucie istniejących ciosów. Innym przykładem był wiadukt kolejowy w rejonie Łodzi, dla którego wykonano model fotogrametryczny skrzydła obiektu na podstawie zdjęć wykonanych smartfonem. Kalibracja modelu oparta została na pomiarach ręcznych, co pozwoliło na określenie geometrii przemieszczeń skrzydła wraz z ich wizualnym powiązaniem z teksturą powierzchni. Badania te miały na celu ocenę przydatności powszechnie dostępnych urządzeń mobilnych w szybkim dokumentowaniu fragmentów konstrukcji.

Dopełnieniem badań były liczne inwentaryzacje łącznie kilkudziesięciu obiektów kolejowych na terenie Zakładów Linii Kolejowych w Warszawie, Tarnowskich Górach i Rzeszowie, realizowane w ramach przeglądów specjalnych. Wypracowano tam autorską procedurę pomiarową, która polegała na tym, że spód oraz boki obiektów przechwytywano w postaci chmury punktów przy użyciu skanowania laserowego, natomiast górę (poziom torowiska) mierzono jedynie w wybranych punktach przy użyciu tachimetru, odnosząc pomiary do geometrii uzyskanej ze skanowania laserowego. Wykorzystanie powtarzalności geometrii szyn pozwoliło na ich poprawną rekonstrukcję bez konieczności czasochłonnej zmiany stanowisk pomiarowych z dołu na górę obiektu, co znacząco skróciło proces inwentaryzacyjny przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej wartości informacyjnej uzyskanych danych. Wybrane obiekty kolejowe wykorzystane w badaniach przedstawiono na Rys. 5-8.



Rys. 5-8 Wybrane kolejowe poligony badawcze: (1) Zator, (2) Kędzierzyn-Koźle, (3) Jarocin

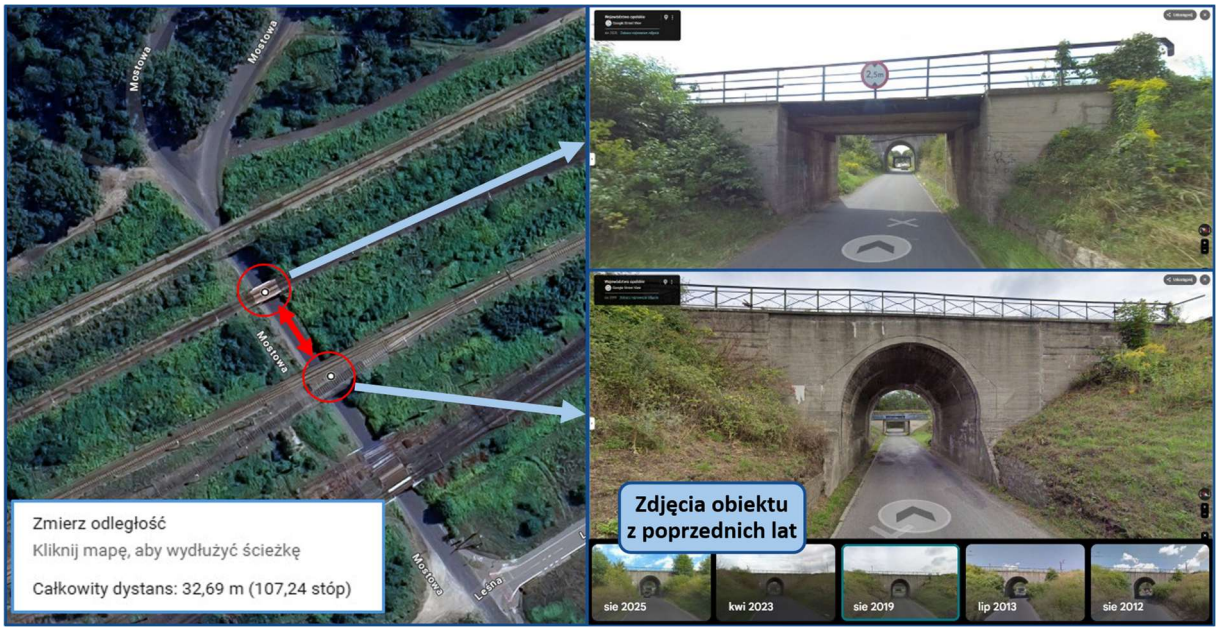
5.4 Przygotowanie do badań terenowych

5.4.1 Analiza obiektu i uwarunkowań inspekcji

Proces przygotowawczy do badań terenowych rozpoczyna się od wielokryterialnej analizy obiektu, której celem jest ustalenie strategii pomiarowej oraz minimalizacja ryzyka wystąpienia błędów na etapie pozyskiwania danych. Skuteczność cyfrowego odwzorowania w stopniu krytycznym zależy od zrozumienia geometrii, skali oraz uwarunkowań funkcjonowania obiektu jeszcze przed przystąpieniem do prac pomiarowych.

W pierwszej kolejności analizowana jest dokumentacja archiwalna, o ile jest ona dostępna. Pozwala to na wstępne rozpoznanie układu konstrukcyjnego obiektu, identyfikację jego kluczowych elementów oraz wskazanie obszarów, które z punktu widzenia diagnostycznego mogą stanowić potencjalne problemy. Istotnym elementem analizy jest ocena skali obiektu, w tym jego rozpiętości, wysokości, liczby przęseł oraz stopnia skomplikowania formy konstrukcyjnej. Parametry te wpływają bezpośrednio na zakres planowanych prac terenowych, czas ich realizacji oraz potencjalną objętość danych przeznaczonych do dalszego przetwarzania.

W wielu przypadkach dokumentacja archiwalna okazuje się niekompletna, nieaktualna lub rozbieżna ze stanem rzeczywistym. W takiej sytuacji, w celu właściwego zaplanowania pomiarów, podejmowana jest decyzja o przeprowadzeniu wizji lokalnej. W zależności od skali i charakteru obiektu przyjmuje ona formę fizyczną lub wirtualną. Wizja lokalna realizowana jest fizycznie w terenie głównie w przypadku dużych, nietypowych lub szczególnie skomplikowanych konstrukcji. W pozostałych przypadkach wystarczające okazuje się wykorzystanie ogólnodostępnych źródeł informacji, takich jak archiwalne materiały fotograficzne, nowoczesne systemy mapowe (np. Google Street View) czy ortofotomapy satelitarne, co pozwala na przeprowadzenie efektywnej wirtualnej wizji lokalnej. Przykład takiego podejścia, zastosowanego na wiaduktach kolejowych nad ul. Mostową w Kędzierzynie-Koźlu, przedstawiono na Rys. 5-9.



Rys. 5-9 Wirtualna wizja lokalna na wiaduktach kolejowych [77]

Na etapie przygotowania do badań identyfikowane są również ograniczenia zewnętrzne, które wpływają na możliwość i sposób realizacji prac terenowych. Ograniczenia te można podzielić na trzy główne grupy: terenowe, eksploatacyjne oraz formalno-prawne. Zostały one omówione z podaniem w nawiasach przykładów mostów, w których wystąpiły.

- **Ograniczenia terenowe** wynikają z fizycznych cech obiektu oraz jego bezpośredniego otoczenia i mogą być w dużej mierze identyfikowane na etapie analizy dokumentacji, fizycznej lub wirtualnej wizji lokalnej. Obejmują one w szczególności:
  - **Dostępność elementów konstrukcyjnych**: Możliwość dotarcia do spodu obiektu (kluczowa przy przeszkodach wodnych, jak w Bratysławie) czy wysokich pylonów (Kurów).
  - **Przeszkody terenowe i infrastrukturalne:** Gęsta roślinność (Kędzierzyn-Koźle), linie energetyczne i teletechniczne (Zator) czy rozległe przeszkody (Bratysława, Kurów, Zator).
  - **Warunki oświetleniowe i atmosferyczne:** Zacienienie pod obiektem mające wpływ na jakość tekstur fotogrametrycznych (Gliwice) oraz wilgotność, a także temperatura powietrza i powierzchni konstrukcji (Kurów).
  - **Topografia i stabilność terenu:** Brak możliwości stabilnego rozstawienia skanera na stromych skarpach (Kędzierzyn-Koźle) lub konieczność stosowania specjalistycznych statywów.
  - **Zasięg sygnału GNSS:** Ograniczenie dokładności pozycjonowania pod płytą pomostu w dźwigarach skrzynkowych (Bratysława), przy niekorzystnych wskaźnikach aktywności geomagnetycznej (KP Indeks) lub w głębokich wykopach, co wymusza stosowanie dodatkowej osnowy tachimetrycznej przy próbach kalibracji i orientacji danych.
- **Ograniczenia eksploatacyjne** wynikają z bieżącego użytkowania obiektu oraz jego otoczenia i mogą wpływać na czas, sposób oraz zakres prowadzenia prac terenowych. Do najistotniejszych należą:

- **Intensywność ruchu:** Wysokie natężenie ruchu na i pod obiektem (np. wiadukt M16 nad A4 w Mysłowicach), generujące szumy w chmurze punktów i wymagające filtracji obiektów ruchomych.
- **Uwarunkowania organizacyjne:** Ograniczenia wynikające z rozkładu jazdy pociągów (ważne przy inwentaryzacjach dla PKP), presja terminowa spowodowana awarią (Jarocin), konieczność koordynacji z innymi wykonawcami lub działaniami eksploatacyjnymi (Kurów, Mysłowice).
- **Drgania konstrukcji:** Wpływ przejeżdżających składów kolejowych lub ciężkich pojazdów na precyzję pomiaru skanerów laserowych i stabilność ich kompensatorów (Zator).
- **Zanieczyszczenie środowiska:** Obecność pyłów, pary wodnej lub spalin, które mogą rozpraszać wiązkę lasera.

- **Ograniczenia formalno-prawne** wynikają z obowiązujących przepisów, procedur administracyjnych oraz wymogów bezpieczeństwa i mogą bezpośrednio determinować możliwość legalnego prowadzenia prac pomiarowych. Obejmują one w szczególności:
  - **Zarządzanie przestrzenią powietrzną:** Konieczność zgłoszenia lotów w systemie PansaUTM oraz analiza stref (zgodnie z pkt 3.3.3), szczególnie w obszarach zurbanizowanych (np. Kraków, Katowice).
  - **Zezwolenia zarządców:** Wymóg uzyskania zgód na wejście w pas drogowy (np. Mysłowice) lub na teren kolejowy (obiekty PKP), co często wiąże się z koniecznością wprowadzania tymczasowej organizacji ruchu lub asysty pracowników torowych.
  - **Wymogi BHP**: Specyficzne środki ochrony indywidualnej wymagane przy pracach na wysokościach lub w czynnym pasie drogowym lub na terenie kolejowym.

Kompleksowa analiza obiektu i uwarunkowań inspekcji umożliwia świadome zaplanowanie dalszych etapów procesu cyfrowego odwzorowania, ograniczenie ryzyka błędnych decyzji technologicznych oraz uniknięcie stosowania zaawansowanych technik pomiarowych w sytuacjach, w których nie wnoszą one realnej wartości diagnostycznej.

5.4.2 Dobór technik przechwytywania rzeczywistości

Dobór technik przechwytywania rzeczywistości stanowi kluczowy etap przygotowania do badań terenowych i jest bezpośrednią konsekwencją analizy obiektu oraz uwarunkowań inspekcji przedstawionych w pkt. 5.4.1. Na tym etapie podejmowane są decyzje dotyczące wyboru metod pozyskiwania danych, które powinny zapewnić osiągnięcie założonych celów diagnostycznych przy jednoczesnym uwzględnieniu ograniczeń terenowych, eksploatacyjnych i formalno-prawnych.

W procesie cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych wykorzystywane są różnorodne techniki przechwytywania rzeczywistości, w tym: fotogrametria, naziemne skanowanie laserowe czy rekonstrukcja natychmiastowa z użyciem urządzeń mobilnych, uzupełniane pomiarami tradycyjnymi. Każda z tych technik charakteryzuje się odmiennym zakresem zastosowań, dokładnością oraz stopniem złożoności przetwarzania danych, co uniemożliwia ich uniwersalne stosowanie w każdej sytuacji.

Podstawowym kryterium doboru technik przechwytywania rzeczywistości jest cel inspekcji oraz oczekiwany poziom dokładności danych. W przypadkach, w których kluczowe znaczenie ma precyzyjne odwzorowanie geometrii konstrukcji lub analiza deformacji, preferowane są techniki umożliwiające

uzyskanie chmur punktów o wysokiej dokładności. W innych sytuacjach, takich jak dokumentowanie stanu powierzchni, identyfikacja uszkodzeń czy przestrzenna lokalizacja fotografii obiektu, wystarczające mogą być techniki o mniejszym stopniu złożoności, zapewniające szybsze pozyskanie danych przy niższym nakładzie pracy.

Istotnym elementem procesu decyzyjnego jest ocena kompromisów technologicznych, które wynikają z relacji pomiędzy dokładnością, czasem realizacji, objętością danych oraz kosztami ich dalszego przetwarzania. W praktyce oznacza to, że zastosowanie najbardziej zaawansowanych technik nie zawsze jest rozwiązaniem optymalnym. Dla niewielkich obiektów lub pojedynczych elementów konstrukcyjnych pełna rekonstrukcja fotogrametryczna lub szczegółowe skanowanie laserowe mogą generować nieproporcjonalnie duży nakład pracy obliczeniowej w stosunku do uzyskanego efektu. W takich przypadkach prostsze metody, takie jak rekonstrukcja natychmiastowa czy selektywne skanowanie wybranych fragmentów, pozwalają osiągnąć jakość danych w pełni wystarczającą do celów diagnostycznych.

Dobór technik jest również silnie uzależniony od możliwości integracji danych pochodzących z różnych źródeł. W wielu przypadkach najbardziej efektywne okazuje się łączenie technik, na przykład wykorzystanie naziemnego skanowania laserowego do uzyskania wiarygodnej geometrii obiektu oraz fotogrametrii do wzbogacenia jej o informacje wizualne. Zależność pomiędzy charakterystyką obiektu, występującymi ograniczeniami a doborem technik przechwytywania rzeczywistości zestawiono w Tab. 5-3.

Tab. 5-3 Zestawienie technik przechwytywania rzeczywistości zastosowanych na wybranych obiektach

Obiekt	Zastosowane techniki	Zakres odwzorowania	Kluczowe ograniczenia	Uzasadnienie doboru
Most w Kurowie	TLS, fotogrametria, NDT	pylony i wybrane elementy ustroju	duża wysokość, ograniczony dostęp, warunki oświetleniowe	konieczność wysokiej dokładności geometrii oraz integracji danych wizualnych i diagnostycznych
Most w Gliwicach	TLS, fotogrametria rekonstrukcja natychmiastowa	cały obiekt	dostępność, brak istotnych ograniczeń formalnych	poligon inicjalny do testów i kalibracji procesu
Most w Bratysławie	Fotogrametria, TLS	wybrane przęsła	skala obiektu, przeszkoda wodna, zagraniczne obostrzenia, ograniczony sygnał GNSS	przetestowanie wybranych technik na obiekcie o dużej skali
Most w Zatorze	TLS	cały obiekt	skomplikowana geometria, profile stalowe, ruch kolejowy, przeszkoda wodna	konieczność inwentaryzacji obiektu kratowego o znacznych rozmiarach i analiza jego geometrii
Wiadukty w Kędzierzynie-Koźlu	TLS, fotogrametria	dwa obiekty jednocześnie	roślinność, skarpy, infrastruktura kolejowa	test przetwarzania dużego obszaru w jednym modelu
Wiadukt nad A4 w Mysłowicach	TLS	cały obiekt	intensywny ruch pod obiektem	minimalizacja czasu pomiaru i bezpieczne pozyskanie danych
Wiadukt w Jarocinie	TLS	cały obiekt, koncentracja na lokalnej deformacji dźwigara	presja czasowa, prace awaryjne, ruch pod obiektem	precyzyjna ocena geometrii na potrzeby ekspertyzy
Most w Krakowie	rekonstrukcja natychmiastowa	ciosy przyczółków	ograniczony dostęp, wymagana lokalna precyzja	testowanie prostych technik do stosunkowo precyzyjnego zadania

Obecnie proces doboru technik jest silnie determinowany przez ograniczenia sprzętowe i programowe, takie jak ogromna objętość generowanych danych oraz czasochłonność ich renderowania na jednostkach obliczeniowych. Należy jednak zakładać, że w przyszłości, wraz z rozwojem algorytmów sztucznej inteligencji i wzrostem mocy obliczeniowej, bariery te będą ulegać zatarciu. Na obecnym etapie kluczowym zadaniem inżyniera pozostaje jednak selekcja narzędzi tak, aby uniknąć nadmiaru danych, który nie przekłada się na lepszą jakość oceny stanu technicznego obiektu. Techniki przechwytywania rzeczywistości nie powinny być wykorzystywane dla samego użycia zaawansowanych narzędzi, lecz wyłącznie wówczas, gdy wnoszą one realną wartość diagnostyczną lub organizacyjną do procesu inspekcji.

5.4.3 Planowanie pozyskiwania danych i organizacja prac terenowych

5.4.3.1 Strategia pomiarowa i logistyka operacyjna

Strategia pomiarowa oraz sposób organizacji prac terenowych nie były stałe przez cały okres prowadzenia badań, lecz podlegały systematycznej ewolucji. Początkowe etapy prac, realizowane m.in. na poligonie inicjalnym w Gliwicach, służyły empirycznej weryfikacji możliwości sprzętowych oraz testowaniu różnych wariantów gęstości zapisu danych. Celem tych działań było zapewnienie wystarczającej jakości i kompletności danych przy jednoczesnym ograniczeniu liczby wizyt w terenie oraz całkowitego czasu trwania pomiarów.

W toku prowadzonych badań ustalono, że dla uzyskania wysokiej jakości modeli na bazie fotogrametrii, niezbędne jest zachowanie pokrycia zdjęć na poziomie od 60% do 80%. Wartości te zostały dobrane na podstawie analizy błędów rekonstrukcji występujących przy mniejszym pokryciu, szczególnie w strefach o dużej zmienności oświetlenia i powtarzalności wizualnej powierzchni. Z biegiem czasu wdrażano automatyczne scenariusze nalotów BSP, umożliwiające realizację tych założeń w sposób powtarzalny i kontrolowany, co zostało szerzej opisane w pkt. 5.4.3.2.

W przypadku naziemnego skanowania laserowego standardowy stopień wzajemnego pokrycia sąsiednich chmur punktów utrzymywano zazwyczaj w granicach 30–40%. W miejscach uznanych za newralgiczne, takich jak przejścia po skarpach spod obiektu na poziom jezdni, obszary o bardzo powtarzalnej geometrii czy strefy o ograniczonej widoczności, świadomie zagęszczano stanowisko pomiarowe, zwiększając wzajemne pokrycie do około 60–70%. Takie podejście pozwalało na skuteczne łączenie danych w biurze i minimalizowało ryzyko konieczności powrotu na obiekt w celu uzupełnienia luk pomiarowych.

Istotnym elementem organizacji prac był odpowiedni podział zadań wewnątrz zespołu, co bezpośrednio przekładało się na tempo realizacji misji oraz bezpieczeństwo, skracając czas ekspozycji zespołu na zagrożenia występujące w czynnym pasie drogowym lub kolejowym. Choć doświadczony inspektor jest w stanie równolegle nadzorować kilka obszarów działań (np. naloty BSP i skanowanie laserowe), w praktyce dążono do możliwie jednoznacznego rozdzielenia ról, obejmujących obsługę BSP, realizację pomiarów TLS, dokumentację fotograficzną oraz bieżącą kontrolę jakości danych. Przy realizacjach o większej skali, takich jak badania mostu w Kurowie, taki podział okazywał się niezbędny dla zachowania płynności prac.

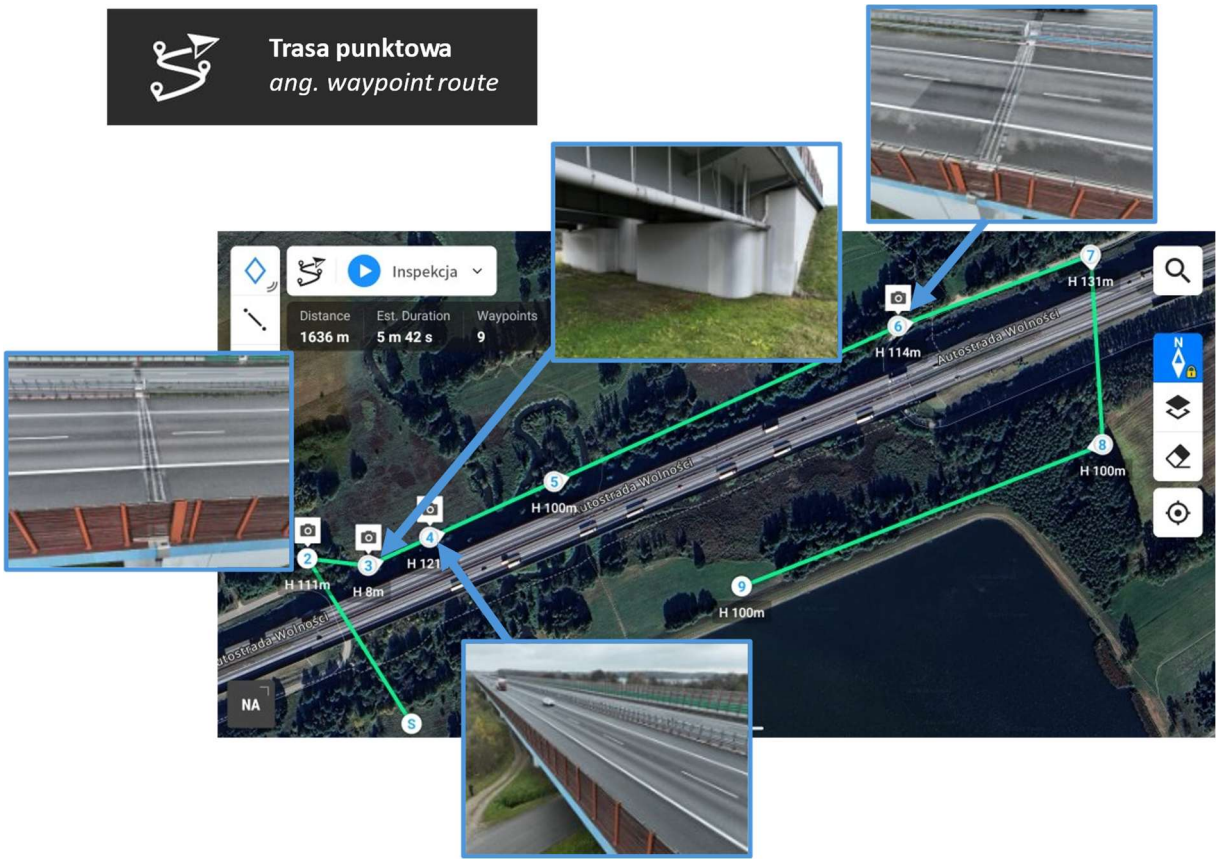
Ciągłość pracy w terenie zapewniano poprzez odpowiednie zaplecze logistyczne w zakresie zasilania oraz przechowywania danych. Wykorzystanie przenośnych źródeł zasilania umożliwiało nieprzerwaną pracę BSP, skanerów laserowych oraz urządzeń mobilnych w lokalizacjach pozbawionych dostępu do sieci elektroenergetycznej przez cały dzień roboczy. W przypadku misji wielodniowych, realizowanych na rozległych obiektach, kluczowe znaczenie miało wykorzystanie szybkich zewnętrznych nośników danych SSD. Takie rozwiązanie umożliwiło bezpieczne archiwizowanie dużych wolumenów surowych danych bezpośrednio w terenie, zapewniając płynność procesu inwentaryzacyjnego bez obaw o limity pamięci urządzeń rejestrujących oraz umożliwiając sprawne rozpoczęcie etapu biurowego bez ryzyka utraty cennych informacji pomiarowych.

5.4.3.2 Scenariusze automatyzacji nalotów BSP

Automatyzacja nalotów bezzałogowych statków powietrznych stanowi istotny element strategii pomiarowej w procesie przechwytywania rzeczywistości, szczególnie w przypadku obiektów o dużej skali, powtarzalnej geometrii lub ograniczonym dostępie terenowym. Zastosowanie zautomatyzowanych misji pozwala na zwiększenie powtarzalności pozyskiwanych danych, ograniczenie wpływu czynnika ludzkiego na geometrię nalotu, poprawę bezpieczeństwa oraz przyspieszenie prac terenowych. Stanowi to również jeden z pierwszych kroków w stronę pełnej autonomiczności procesu inspekcji (poziom 7 piramidy opisany w pkt 4.2.9).

W ramach prowadzonych badań wykorzystywano scenariusze automatycznych misji lotniczych dostępne w środowisku DJI Pilot 2, realizowane z użyciem platformy DJI Mavic 3 Enterprise, dostosowując je do charakterystyki obiektu oraz celu inspekcji. Trasy były programowane bezpośrednio na kontrolerze lub importowane w formatach KMZ/KML (przygotowywanych m.in. w środowisku Google Earth). W procesie badawczym wykorzystano trzy główne scenariusze:

- **Trasa punktowa** (ang. waypoint route) – pozwala na precyzyjne zaplanowanie ścieżki drona poprzez definiowanie punktów w przestrzeni 3D oraz przypisanych do nich punktów zainteresowania (ang. point of interest, POI). Każdy punkt trasy może mieć zdefiniowane parametry, takie jak orientacja kamery, wykonanie zdjęcia, nagranie wideo czy zmiana ogniskowej. W badaniach trasy te wykorzystywano przede wszystkim do realizacji powtarzalnych scenariuszy inspekcyjnych. Pozwalało to na wykonywanie ujęć z identycznych pozycji przestrzennych w różnych odstępach czasu, co umożliwiło analizę zmian stanu technicznego, np. postępu degradacji nawierzchni jezdni czy urządzeń dylatacyjnych. Stosowanie tego trybu było szczególnie zasadne w strefach o relatywnie stabilnych warunkach odbioru sygnału GNSS, gdzie automatyzacja gwarantowała najwyższą precyzję nalotu. Rys. 5-10 pokazano przykładową misję w tym trybie.



Rys. 5-10 Przykładowa inspekcja przy użyciu trybu punktowego (ang. waypoint route) na wiadukcie autostradowym

- **Trasa obszarowa** (ang. area route) – służy do automatycznego zbierania danych fotogrametrycznych nad wyznaczonym obszarem. Tryb ten automatycznie generuje siatkę przelotów, zapewniając zadane parametry pokrycia podłużnego i poprzecznego oraz kąta nachylenia kamery. Trasy obszarowe wykorzystywano głównie do szybkiego pozyskiwania danych z górnych partii obiektów oraz ich bezpośredniego otoczenia. Pozwalało to na sprawne zebranie dużej ilości danych w krótkim czasie, co było szczególnie przydatne w przypadku rozległych obiektów mostowych. Możliwość rejestracji zdjęć pod różnymi kątami sprzyjała późniejszej integracji danych fotogrametrycznych. Na Rys. 5-11 pokazano przykładową misję w tym trybie.



Rys. 5-11 Przykładowa inspekcja przy użyciu trybu obszarowego (ang. area route) na moście w Gliwicach

- **Trasa pochyła** (ang. slope route) – tryb wymagający precyzyjnego pozycjonowania RTK, służący do zbierania danych dla powierzchni nachylonych lub pionowych, takich jak fasady czy wysokie podpory. Trasa tworzona jest bezpośrednio w terenie, często z wykorzystaniem wizualizacji w rzeczywistości rozszerzonej (AR). Tryb ten umożliwia prowadzenie lotu równolegle do analizowanej powierzchni przy zachowaniu zadanych parametrów pokrycia i orientacji kamery. Pozwala to na uzyskanie jednorodnych danych fotogrametrycznych rozległych, płaskich elementów, gdzie manualne sterowanie BSP byłoby utrudnione ze względu na skalę obiektu oraz konieczność zachowania stałej odległości od fotografowanej powierzchni. Na Rys. 5-12 pokazano przykładową misję w tym trybie.



Rys. 5-12 Przykładowa inspekcja przy użyciu trybu pochyłego (ang. slope route) pylonu mostu w Kurowie

Poza wymienionymi trybami, system oferuje również trasę liniową (ang. linear route), dedykowaną dla długich odcinków infrastruktury drogowej i kolejowej, oraz trasę geometryczną (ang. geometric route), wymagającą również modułu RTK, optymalną do automatycznego okrążania obiektów wolnostojących (np. wież czy obiektów kubaturowych). Choć tryby te nie znalazły bezpośredniego zastosowania w niniejszych badaniach, wykazują one potencjał zastosowania w przyszłych scenariuszach inspekcyjnych.

Warto również odnotować pojawiające się kierunki rozwoju automatyzacji nalotów, takie jak funkcja inteligentnego przechwytywania 3D (ang. Smart Capture 3D) dostępna w nowszych BSP (np. DJI Matrice 4E, 4D i 400). Rozwiązania tego typu, bazujące na tworzeniu wstępnej chmury punktów obiektu przy użyciu czujników LiDAR i adaptacyjnym planowaniu trajektorii lotu, mogą w przyszłości znacząco uprościć proces przechwytywania rzeczywistości i jeszcze bardziej ograniczyć rolę manualnego planowania misji na rzecz procesów w pełni autonomicznych.

Należy jednak podkreślić, że automatyzacja nalotów nie stanowi rozwiązania uniwersalnego. W przypadku obiektów o bardzo nieregularnej geometrii, w warunkach gęstej roślinności lub w strefach o wysokim ryzyku utraty sygnału pozycjonowania (np. pod szerokimi ustrojami nośnymi), loty manualne lub półautomatyczne pozostają najskuteczniejszą metodą pozyskiwania danych. W niniejszej pracy loty sterowane bezpośrednio przez operatora były traktowane jako niezbędne uzupełnienie misji automatycznych, pozwalające na reagowanie na nieprzewidziane przeszkody

terenowe oraz wykonanie szczegółowej dokumentacji w miejscach o krytycznym znaczeniu diagnostycznym.

5.5 Pozyskiwanie danych w terenie

5.5.1 Fotogrametria

Fotogrametria stanowiła jeden z podstawowych sposobów pozyskiwania danych wizualnych i geometrycznych w procesie cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych. W przeważającej liczbie przypadków dane pozyskiwano z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych, co umożliwiało szybkie i bezkontaktowe rejestrowanie trudno dostępnych fragmentów konstrukcji. W sytuacjach wymagających uzupełnienia modelu o detale niewidoczne z pułapu niskiego lub przy ograniczeniach wynikających z przeszkód terenowych i eksploatacyjnych (zgodnie z pkt. 5.4.1), dane wzbogacano o zdjęcia wykonane cyfrowymi aparatami fotograficznymi oraz smartfonami. Te ostatnie wykorzystywano również w celach eksperymentalnych, m.in. przy inwentaryzacji skrzydła obiektu w okolicach Łodzi, badając przydatność urządzeń konsumenckich w diagnostyce.

Poza pojedynczymi przypadkami wykorzystania fotogrametrii jako jedynego źródła danych geometrycznych, zasadniczą cechą przyjętej metodyki było traktowanie jej jako techniki komplementarnej względem naziemnego skanowania laserowego. Integracja tych dwóch źródeł pozwoliła na uzyskanie modeli o wysokiej dokładności geometrycznej przy jednoczesnym zachowaniu fotorealistycznej tekstury i pełnego pokrycia obszarów niewidocznych dla skanera. Na Rys. 5-13 przedstawiono przykładowe stanowisko robocze podczas badań mostu w Kurowie, obejmujące jednostkę BSP wraz z kontrolerem i stacją ładującą, a także proces przygotowania do lotu przy moście w Gliwicach.

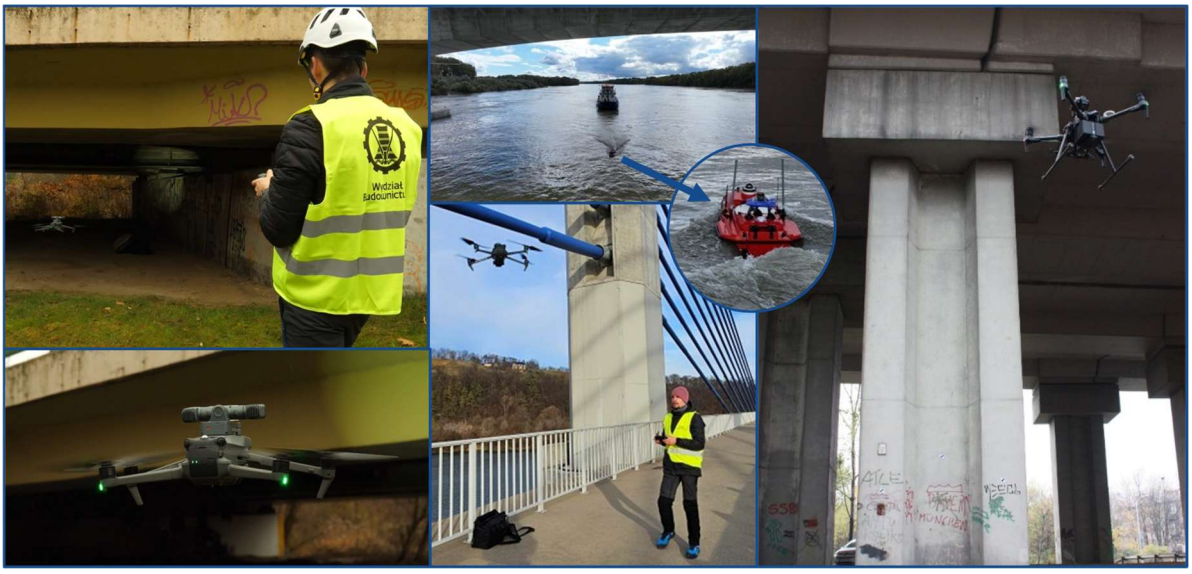


Rys. 5-13 Stanowisko robocze BSP na moście w Kurowie oraz przygotowania do lotu na moście w Gliwicach

Dane fotogrametryczne pozyskiwano zarówno w trybie nalotów automatycznych, jak i lotów manualnych, zależnie od geometrii obiektu oraz występujących ograniczeń opisanych w pkt. 5.4.1. Naloty automatyczne realizowano głównie w trybie obszarowym oraz pochyłym, zgodnie z charakterystyką przedstawioną w pkt. 5.4.3.2. Tryb pochyły stosowano m.in. do dokumentowania

pylonów mostu w Kurowie, natomiast tryb obszarowy wykorzystywano do pozyskiwania danych z górnych partii obiektów oraz ich otoczenia w Kędzierzynie-Koźlu, Kurowie i Gliwicach. Loty manualne stosowano w sytuacjach wymagających precyzyjnego kadrowania detali lub w strefach o ograniczonej stabilności sygnału GNSS, gdzie automatyzacja mogła prowadzić do błędów trajektorii. Dotyczyło to w szczególności filara wiaduktu na granicy Chorzowa i Świętochłowic oraz dolnej części wiaduktów kolejowych w Kędzierzynie-Koźlu. W takich przypadkach operator świadomie rejestrował materiał wizualny z myślą o dalszym przetwarzaniu fotogrametrycznym, dbając o zachowanie wymaganych założeń dotyczących pokrycia zdjęć.

Zakres fotogrametrii obejmował zarówno kompletne obiekty, jak i wybrane fragmenty konstrukcji. Przykłady pozyskiwania danych na wybranych obiektach przedstawiono na Rys. 5-14. W przypadku mostu w Kurowie dokumentację skoncentrowano na sześciu pylonach, dla których wykonano od 900 do 1100 zdjęć na pojedynczy element przy użyciu drona DJI Mavic 3 Enterprise z modułem RTK. Na obiekcie w Gliwicach pozyskano około 400 zdjęć z BSP oraz około 250 zdjęć wykonanych aparatem cyfrowym z poziomu terenu, uzupełniając dokumentację o fotografie z wykorzystaniem oświetlenia dodatkowego. Dla filara wiaduktu na granicy Chorzowa i Świętochłowic wykonano około 250 zdjęć przy użyciu platform DJI Matrice 210 RTK oraz DJI Mini 5 Pro. W Kędzierzynie-Koźlu celowo zoptymalizowano liczbę ujęć wyłącznie do zestawu niezbędnego dla fotogrametrii, aby wymusić i przetestować proces inspekcji wizualnej prowadzonej bezpośrednio na modelu cyfrowym w biurze. Łącznie wykonano tam około 1500 zdjęć (Mavic 3E RTK). Na obiekcie w Bratysławie, poza fotografiami i filmami z drona, jako mobilną platformę dla aparatu wykorzystano również robota wodnego.



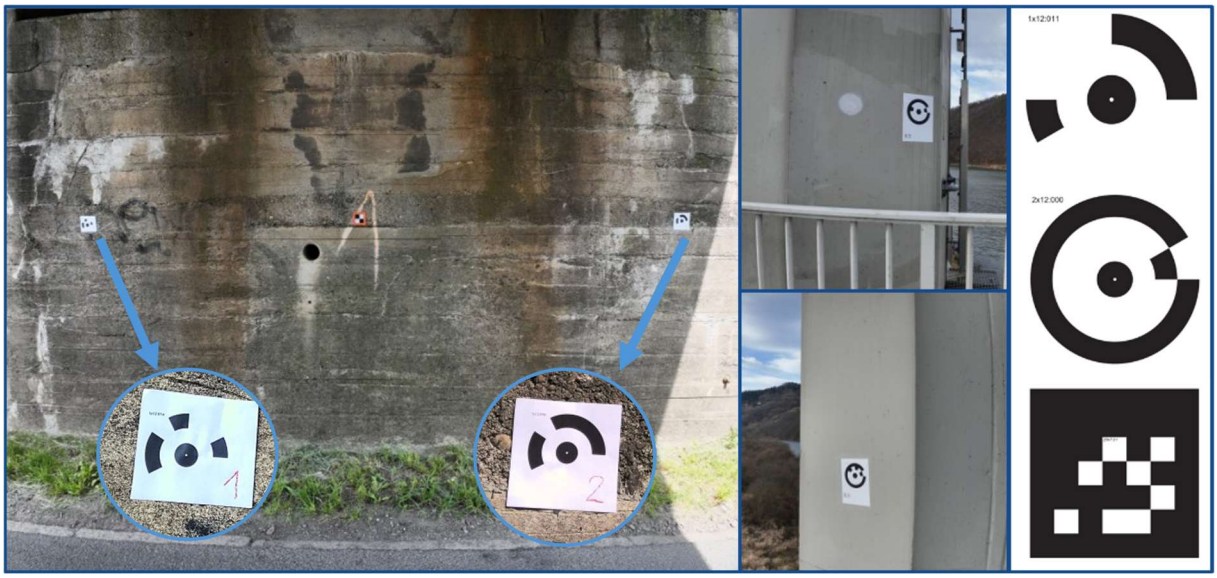
Rys. 5-14 Pozyskiwanie danych fotogrametrycznych na wybranych obiektach mostowych

W celu poprawy dokładności rejestracji oraz integracji danych fotogrametrycznych zastosowano dedykowane markery kodowane, generowane i automatycznie rozpoznawane w środowisku RealityCapture. Wykorzystywano przede wszystkim trzy typy markerów:

- Circular, single ring - prosty marker kołowy z pierścieniem danych; dzięki białemu punktowi centralnemu zwiększa precyzję wskazań.

- Circular, dual ring - wariant z dodatkowym pierścieniem orientacyjnym, ułatwiający rozpoznanie markerów przy zdjęciach wykonywanych pod dużym kątem.
- Square, April Tag - marker kwadratowy przypominający kod QR, charakteryzuje się wysoką skutecznością detekcji w trudnych warunkach oświetleniowych oraz przy zdjęciach z dużej odległości, natomiast nie posiada łatwego do identyfikacji punktu centralnego.

Markery te były automatycznie rozpoznawane przez oprogramowanie fotogrametryczne i służyły nie tylko do orientacji zdjęć, ale w wersji kołowej były również namierzane tachimetrem w celu kalibracji i weryfikacji geometrycznej modeli. Na Rys. 5-15 przedstawiono typy markerów oraz ich praktyczne zastosowanie na obiektach w Kurowie i Kędzierzynie-Koźlu.



Rys. 5-15 Typy markerów fotogrametrycznych (po prawej) oraz ich zastosowanie w terenie

W Tab. 5-4 przedstawiono szczegółowe zestawienie zakresu i skali pozyskiwania danych fotogrametrycznych dla poszczególnych obiektów mostowych.

Tab. 5-4 Zestawienie zakresu i skali pozyskiwania danych fotogrametrycznych na wybranych obiektach mostowych

Obiekt	Zakres fotogrametrii	Urządzenie	Liczba wykonanych zdjęć
Most w Kurowie	wybrane elementy (6 pylonów)	DJI Mavic 3 Enterprise (RTK)	ok. 900–1100 / pylon
Most w Gliwicach	cały obiekt	DJI Mavic 3 Enterprise (RTK) + aparat cyfrowy	ok. 400 (BSP) + ok. 250 (aparat)
Wiadukt w Chorzowie	pojedynczy filar	DJI Matrice 210 RTK i DJI Mini 5 Pro	ok. 250
Wiadukty w Kędzierzynie-Koźlu,	dwa obiekty jednocześnie	DJI Mavic 3 Enterprise (RTK)	ok. 1500
Most w Bratysławie	wybrane przęsła	DJI Mavic 3 Enterprise (RTK) i robot wodny	nd.

5.5.2 Naziemne skanowanie laserowe

Naziemne skanowanie laserowe stanowiło podstawową technikę pozyskiwania precyzyjnych danych geometrycznych w procesie cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych. Na etapie prac terenowych kluczowe znaczenie miało odpowiednie zaplanowanie rozmieszczenia stanowisk skanera oraz założonego stopnia wzajemnego pokrycia chmur punktów, umożliwiającego ich skuteczną rejestrację i dalsze przetwarzanie w środowisku biurowym. Planowanie skanowania laserowego każdorazowo odnosiło się do ograniczeń opisanych w pkt. 5.4.1, a także do celu pozyskiwania danych, od pełnej rekonstrukcji obiektu, przez analizę deformacji, po lokalną kalibrację danych fotogrametrycznych. Ważnym elementem planowania była decyzja dotycząca rejestracji kolorystyki RGB. Choć barwa ułatwia późniejszą interpretację w biurze i identyfikację materiałów, jej rejestracja znacząco wydłuża czas poboru danych na pojedynczym stanowisku. W przypadkach, w których priorytetem była szybkość pomiaru lub geometria obiektu była jednoznaczna, skanowanie realizowano w skali szarości, co pozwoliło na sprawne przeprowadzenie prac przy zachowaniu pełnej precyzji geometrycznej. Na Rys. 5-16 przedstawiono przykłady pracy skanerów laserowych w trakcie pozyskiwania danych na wybranych obiektach badawczych.



Rys. 5-16 Pozyskiwanie danych z naziemnego skanowania laserowego na wybranych obiektach

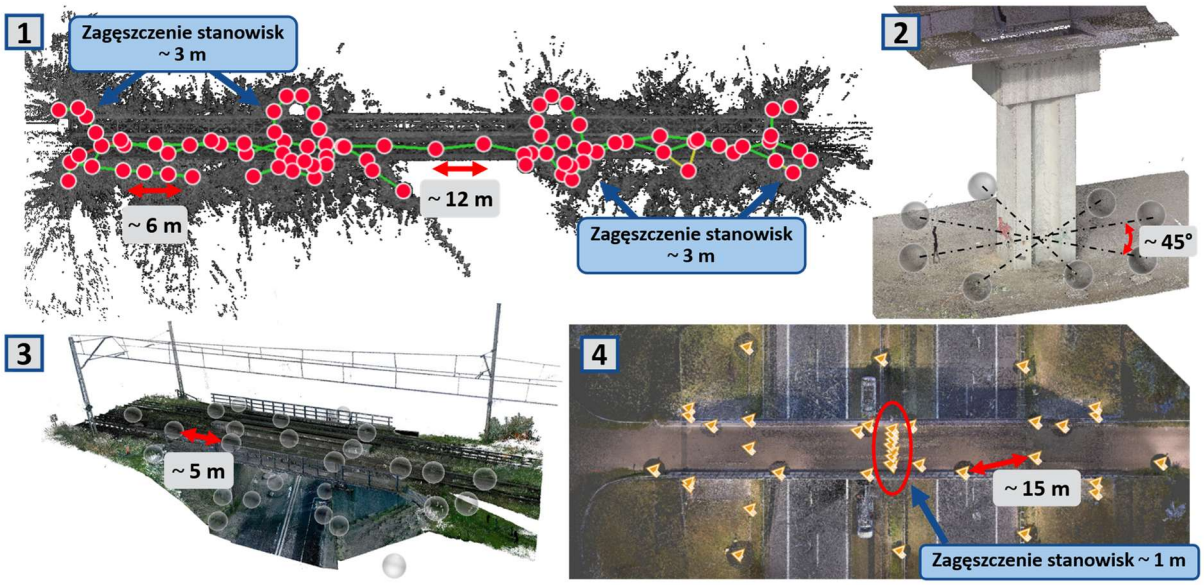
W badaniach nie stosowano jednolitego schematu rozmieszczania stanowisk, lecz podejście adaptacyjne dostosowane do geometrii i dostępności poszczególnych obiektów. Przy inwentaryzacji pojedynczego filara w Chorzowie priorytetem było uzyskanie pełnego obwodu konstrukcji, dlatego skaner Leica BLK360 ustawiano przy każdym narożniku oraz wzdłuż ścian filara (łącznie 8 stanowisk), przedkładając ciągłość wizualną nad sztywny rozstaw (nr 2 na Rys. 5-17). Na moście w Kurowie

skanowanie laserowe pełniło funkcję pomocniczą i służyło wyłącznie do kalibracji oraz weryfikacji danych fotogrametrycznych. Z tego względu planowane wzajemne pokrycie chmur punktów utrzymywano na poziomie około 50%, co uznano za wystarczające dla celów orientacji, wykorzystując łącznie 30 wybranych lokalizacji skanera Trimble X9. W Kędzierzynie-Koźlu stanowiska skanera Leica BLK360 rozmieszczano wzdłuż wiaduktów kolejowych w odstępach około 6 m, jednak na skarpach, ze względu na bujnie rosnącą roślinność ograniczającą zasięg lasera, konieczne było zagęszczenie stanowisk do około 2 m. Dało to łącznie 40 ustawień dla obu konstrukcji. Na moście przy ul. Panewnickiej w Gliwicach wykorzystano 24 stanowiska skanera Z+F IMAGER 5010X w średnim rozstawie ok. 6,5 m, przy czym odległości między stanowiskami wahały się od 2 m do 11 m.

Na obiektach o dużej intensywności ruchu planowanie stanowisk determinowały ograniczenia eksploatacyjne i zasięgowe urządzeń. W Mysłowicach (wiadukt M16) rozstaw skanera wynosił średnio 15 m, przy czym zastosowanie urządzenia Trimble X9 pozwoliło na zachowanie zadowalającej gęstości danych przy znacznie większych odległościach niż w przypadku skanera BLK360, co wynika z parametrów technicznych przedstawionych w Tab. 5-1. Dodatkowe zagęszczenie do około 1 m zastosowano jedynie na oczepie filara oraz przy przyczółkach, w celu dokładnego odwzorowania gęsto rozstawionych belek, co dało łącznie 38 stanowisk (nr 4 na Rys. 5-17). W Tychach, ze względu na ciągły ruch pojazdów przesłaniający wiązkę, średni rozstaw skanera Leica BLK360 utrzymywano na poziomie 6 m (łącznie 37 stanowisk), co zapewniało odpowiednie pokrycie danych. Podobną strategię przyjęto w Jarocinie, gdzie stanowiska rozstawiano średnio co 5 m (łącznie 31), skupiając się na precyzyjnym odwzorowaniu uszkodzonego przęsła stalowego (nr 3 na Rys. 5-17).

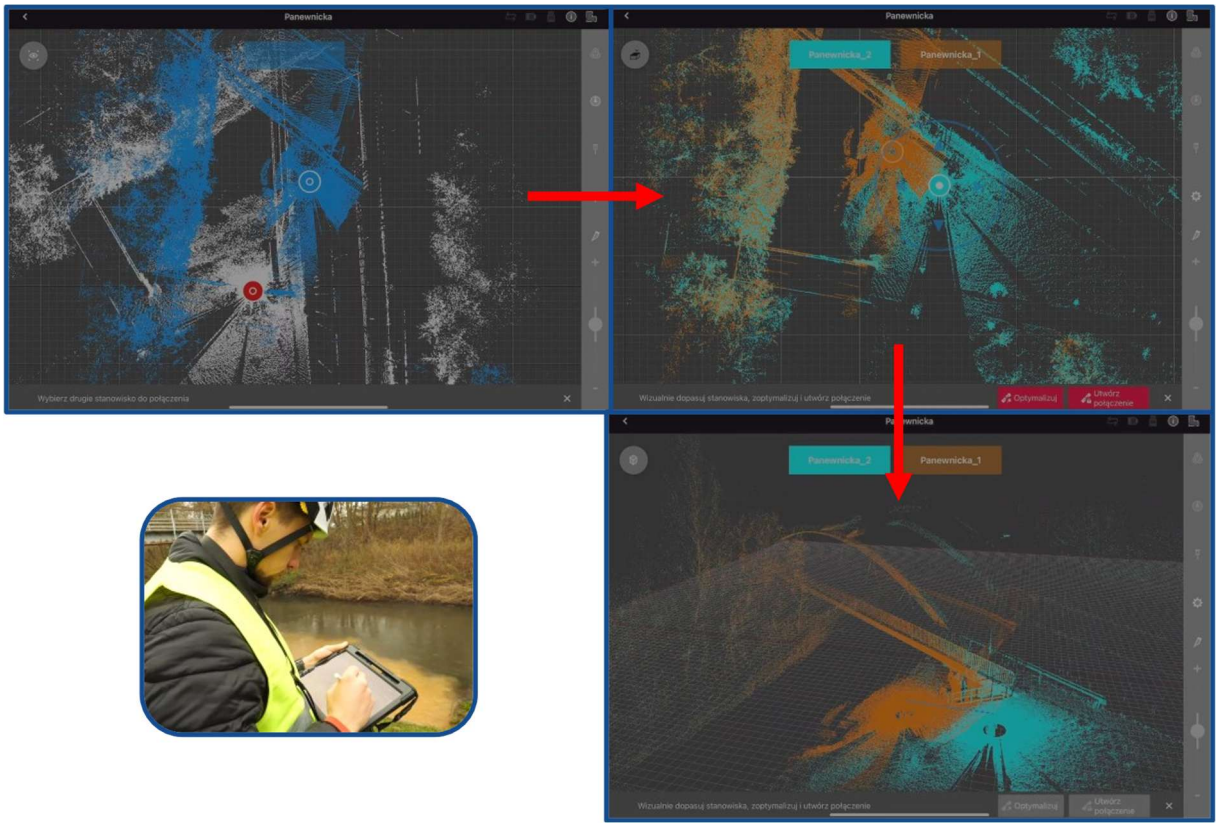
Szczególnie złożoną strategię przyjęto dla skomplikowanego mostu kratowego w Zatorze. Na poziomie toru, mimo mylącej dla skanera powtarzalności elementów, rozstaw co 12 m okazał się wystarczający dla poprawnej rejestracji. Jednak pod obiektem, ze względu na konieczność zapewnienia skuteczności łączenia metodą „chmura do chmury" w gęstej strukturze kratownicy, rozstaw musiał zostać zmniejszony do 6 m, gdyż przy większych dystansach automatyczne dopasowanie chmur w terenie bywało nieskuteczne. W strefach przejść oraz w miejscach o skomplikowanych detalach stanowiska zagęszczano nawet do 3 m, co sumarycznie przełożyło się na 84 stanowiska skanera BLK360 (nr 1 na Rys. 5-17).

Na obiekcie w Bratysławie użyto zarówno skanera Z+F, jak i Trimble do skanowania fragmentu tego rozległego obiektu. Testowo wykonano odpowiednio 21 i 19 stanowisk na wybranych przęsłach. Ponadto przy użyciu mobilnego robota wodnego wykonano chmury punktów dna Dunaju na szerokości mostu (Rys. 5-14). Na ich podstawie stworzono mapy batymetryczne dna. Przykłady rozmieszczenia stanowisk dla wybranych obiektów przedstawiono na Rys. 5-17.



Rys. 5-17 Rozmieszczenie stanowisk skanera laserowego w: (1) Zatorze, (2) Chorzowie, (3) Jarocinie i (4) Mysłowicach

Ważnym elementem prac terenowych w trakcie używania skanera Leica BLK360 było wykorzystanie oprogramowania Cyclone Field 360 na urządzeniach mobilnych. Aplikacja ta pozwalała na wstępne łączenie chmur punktów bezpośrednio w terenie, wizualizując sąsiednie skany w różnych kolorach (pomarańczowym i błękitnym), co umożliwiało operatorowi ręczną korektę ich usytuowania i natychmiastową weryfikację kompletności danych. Takie podejście znacząco ułatwiało dalszą obróbkę danych w środowisku biurowym. Przykład wstępnej rejestracji chmur w terenie pokazano na Rys. 5-18.



Rys. 5-18 Proces łączenia chmur punktów z poszczególnych stanowisk w terenie

Oprócz dopasowania geometrycznego, na wybranych obiektach stosowano punkty referencyjne w postaci szachownic. Rozmieszczenie tych markerów bezpośrednio na elementach mostu oraz ich namierzenie tachimetrem pozwoliło na późniejszą ręczną kalibrację, udoskonalenie połączeń między stanowiskami i weryfikację poprawności składania chmur, szczególnie w miejscach o powtarzalnej charakterystyce wizualnej. Przykłady zastosowania punktów referencyjnych w terenie przedstawiono na Rys. 5-19 .



Rys. 5-19 Zastosowanie punktów referencyjnych dla skanowania laserowego w terenie

Zakres i organizację pomiarów naziemnym skanowaniem laserowym na wybranych obiektach mostowych zestawiono w Tab. 5-5.

Tab. 5-5 Zestawienie zakresu i organizacji pomiarów naziemnym skanowaniem laserowym na wybranych obiektach

Obiekt	Skaner laserowy	Liczba stanowisk	Planowany rozstaw stanowisk	RGB	Uwagi
Wiadukt w Chorzowie	Leica BLK360	8	obejście filara dookoła (każda ściana i narożnik)	Tak	rozstaw drugorzędny; kluczowe pełne zamknięcie geometrii
Most w Kurowie	Trimble X9	30	dostosowany do kalibracji fotogrametrii; planowane pokrycie ok. 50%	Nie	TLS użyty wyłącznie do kalibracji i kontroli geometrii modeli fotogrametrycznych
Most w Gliwicach	Z+F IMAGER 5010X	24	średnio 6,5 m (od 2 do 11 m)	Nie	kolorystka chmury na bazie fotogrametrii
Wiadukty w Kędzierzynie-Koźlu	Leica BLK360	40	co ok. 6 m; zagęszczenie na skarpach do ok. 2 m	Tak	utrudnienia terenowe (roślinność, skarpy) wymusiły lokalne zagęszczenia
Wiadukt w Jarocinie	Leica BLK360	31	co ok. 5 m	Nie	brak RGB w celu skrócenia czasu pomiarów, analiza geometrii przęsła
Wiadukt nad A4 w Mysłowicach	Trimble X9	38	co ok. 15 m; zagęszczenie do ok. 1 m przy podporach	Tak	ograniczenia wynikające z czynnego ruchu autostradowego
Most w Zatorze	Leica BLK360	84	tory: ok. 12 m; spód: ok. 6 m; zagęszczenie: ok. 3 m	Nie	rozstaw stanowisk uzależniony od skomplikowanej geometrii
Wiadukt w Tychach	Leica BLK360	37	co ok. 6 m	Tak	aktywny ruch na i pod obiektem
Most w Bratysławie	Z+F IMAGER 5010X + Trimble X9	21 + 19	dostosowany do kalibracji fotogrametrii	Nie	TLS uzupełniony o dane batymetryczne dna Dunaju

5.5.3 Rekonstrukcja natychmiastowa

Rekonstrukcja natychmiastowa stanowi uproszczoną, mobilną i hybrydową formę przechwytywania rzeczywistości i rekonstrukcji 3D. Jej cechą wyróżniającą jest możliwość generowania trójwymiarowej reprezentacji obiektu bezpośrednio w trakcie lub tuż po zakończeniu rejestracji danych, bez konieczności przeprowadzania czasochłonnego przetwarzania biurowego. W przeciwieństwie do klasycznej fotogrametrii czy naziemnego skanowania laserowego, technika ta nie wymaga planowania stanowisk pomiarowych ani integracji wielu źródeł danych. Technologia umożliwia bieżący podgląd powstającego modelu bezpośrednio na ekranie urządzenia, a uzyskany rezultat dostępny jest niemal natychmiast po zakończeniu pomiaru.

Podstawowym narzędziem wykorzystywanym do rekonstrukcji natychmiastowej w badaniach była aplikacja Polycam.

Oprogramowanie to umożliwia tworzenie modeli 3D zarówno na podstawie fotogrametrii bazującej na sekwencjach wideo i pojedynczych zdjęciach, jak i poprzez bezpośrednie skanowanie przestrzenne z użyciem sensora LiDAR. Do kluczowych funkcji aplikacji należą:

- **Wizualizacja postępu**: Śledzenie procesu rekonstrukcji w czasie rzeczywistym pozwala operatorowi na bieżąco oceniać stopień pokrycia skanowanej powierzchni oraz identyfikować obszary wymagające uzupełnienia danych. Zapewnia to natychmiastową informację zwrotną dotyczącą kompletności modelu, co znacząco ogranicza ryzyko powstania luk pomiarowych.
- **Narzędzia inżynierskie**: Możliwość wykonywania pomiarów liniowych, powierzchniowych i objętościowych, a także kalibracji i skalowania modelu w oparciu o znane wymiary referencyjne.
- **Funkcje kubaturowe**: Możliwość generowania planów rzutów poziomych oraz uproszczonych brył pomieszczeń, co znajduje zastosowanie głównie w budownictwie kubaturowym.
- **Interoperacyjność**: Szeroki wachlarz formatów eksportu, w tym modele siatkowe (OBJ, FBX, STL) oraz chmury punktów (LAS, XYZ, PLY), co pozwala na bezpośredni import danych do środowisk CAD i BIM.

Pełne zastosowanie inżynierskie aplikacji możliwe było dzięki wykorzystaniu trybu opartego na czujnikach LiDAR, który umożliwia automatyczną kalibrację metryczną tworzonych modeli. Wykorzystano w tym celu urządzenia mobilne marki Apple (wymienione w pkt. 5.2.1.) zintegrowane z aktywnymi sensorami głębi.

Choć na rynku dostępne są aplikacje na system Android, opierają się one głównie na fotogrametrii obrazowej, co bez wsparcia aktywnego sensora głębi skutkuje mniejszą dokładnością metryczną, czyniąc uzyskane modele materiałem poglądowym, a nie inżynierskim.

Na Rys. 5-20 przedstawiono przykład rekonstrukcji fragmentu przyczółka mostu w Gliwicach, obejmujący czynności pomiarowe w terenie, widok interfejsu aplikacji Polycam oraz gotowe modele siatkowe (surowy i z nałożoną teksturą).



Rys. 5-20 Rekonstrukcja natychmiastowa fragmentu przyczółka przy użyciu Polycam

Rekonstrukcja natychmiastowa była wykorzystywana w szerokim zakresie zadań badawczo-wdrożeniowych obejmujących przechwytywanie elementów takich jak:

- **detale konstrukcyjne** (łożyska, urządzenia dylatacyjne, lokalne uszkodzenia),
- **fragmenty większych obiektów** (filar, przyczółek, fragment dźwigara, spód przęsła),
- **całe obiekty o niewielkich gabarytach** (małe mosty czy przepusty),

Wybrane efekty tych prac przedstawiono na Rys. 5-21.



Rys. 5-21 Wybrane efekty rekonstrukcji natychmiastowej przy użyciu Polycam

Szczególnie istotnym przykładem zastosowania tej techniki była inwentaryzacja kilkunastu ciosów podłożyskowych na wieloprzęsłowym moście w Krakowie. Modele wykonane przy użyciu

aplikacji Polycam posłużyły jako podkład projektowy do opracowania dokumentacji remontowej, obejmującej wzmocnienie ciosów za pomocą blach stalowych o złożonej geometrii dopasowanej do ich rzeczywistego kształtu. Pozwoliło to na uniknięcie czasochłonnego rozstawiania skanera laserowego w trudnodostępnych strefach podparcia konstrukcji przy jednoczesnym zachowaniu wystarczającej dla tego zadania precyzji. Na Rys. 5-22 przedstawiono zestawienie efektu rekonstrukcji przed remontem oraz stan ciosów po wykonaniu prac naprawczych.



Rys. 5-22 Rekonstrukcja natychmiastowa ciosów podłożyskowych na moście w Krakowie oraz ich stan po remoncie

Podstawowym atutem rekonstrukcji natychmiastowej jest stosunkowo krótki czas pozyskiwania danych oraz powszechna dostępność sprzętu w postaci smartfonu czy tabletu, który znajduje się zazwyczaj w bezpośrednim zasięgu inspektora. Choć uzyskane modele nie osiągają dokładności charakterystycznej dla systemów TLS czy zaawansowanej fotogrametrii, ich jakość okazała się w pełni wystarczająca w wielu scenariuszach diagnostycznych, szczególnie na etapie wstępnej inwentaryzacji lub dokumentowania lokalnych wad konstrukcyjnych. Intuicyjna obsługa i szybkość pracy oraz czytelność uzyskiwanych modeli sprawiły, że technologia ta została na stałe wdrożona w praktyce przedsiębiorstwa jako jedno z narzędzi pomiarowych. Istotnym aspektem był również wymiar organizacyjny i szkoleniowy. Użycie rekonstrukcji natychmiastowej umożliwiło stopniowe oswajanie pracowników z pracą na danych trójwymiarowych, chmurach punktów oraz modelach przestrzennych.

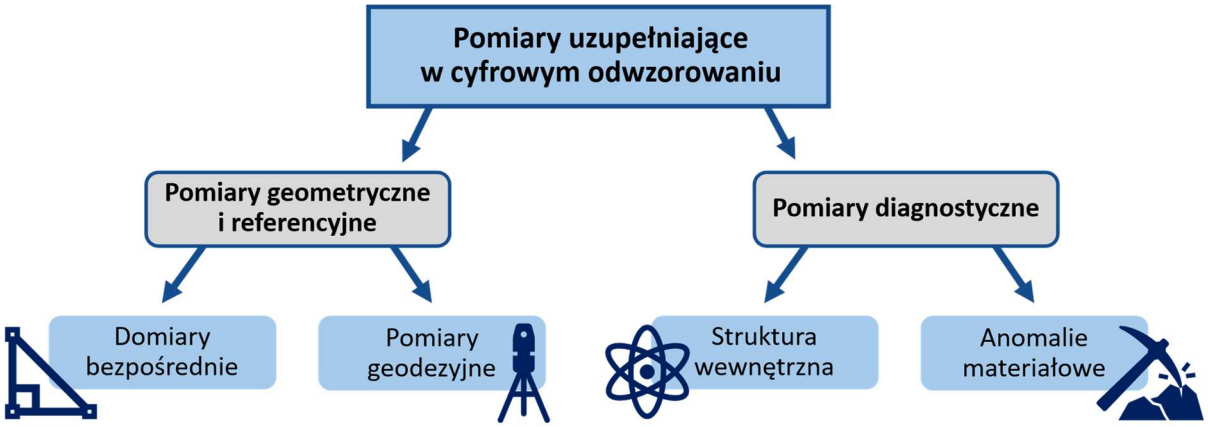
Mimo licznych zalet, technologia ta posiada istotne ograniczenia, które należy uwzględnić przy planowaniu prac:

- **Zasięg i precyzja**: Zasięg sensora LiDAR w urządzeniach mobilnych jest ograniczony do kilku metrów, co jest wartością znacznie niższą od skanerów stacjonarnych. Ponadto, wiązka lasera może nie penetrować wąskich kilkucentymetrowych szczelin.
- **Warunki oświetleniowe**: Silne, bezpośrednie nasłonecznienie może powodować zakłócenia sensora i prześwietlenie tekstur, natomiast bardzo słabo oświetlone przestrzenie utrudniają poprawne odwzorowanie warstwy wizualnej.
- **Skalowalność**: Podczas skanowania dużych obiektów występuje zjawisko narastania błędu pozycji, co wymusza skanowanie fragmentaryczne. Łączenie takich fragmentów w biurze jest procesem uciążliwym i podatnym na błędy składania.

Z tych względów rekonstrukcja natychmiastowa nie stanowi bezpośredniej alternatywy dla klasycznych metod przechwytywania rzeczywistości. Pełni ona rolę narzędzia komplementarnego, którego zastosowanie powinno być świadomie ograniczone do sytuacji, w których szybkość i mobilność mają priorytet nad najwyższą dokładnością geometryczną.

5.5.4 Pomiary uzupełniające i dane wspierające

Pomiary uzupełniające cyfrowe odwzorowanie obiektów mostowych stanowią niezbędny element weryfikacji geometrycznej oraz rozszerzenia zakresu informacyjnego modelu o parametry fizyczne materiału i strukturę wewnętrzną konstrukcji. Ich zastosowanie wynikało z faktu, że nawet zaawansowane techniki przechwytywania rzeczywistości, takie jak fotogrametria czy naziemne skanowanie laserowe, nie są w stanie w pełni zastąpić bezpośrednich pomiarów terenowych ani dostarczyć informacji o niewidocznych cechach konstrukcji. Zgodnie z opracowaną klasyfikacją (Rys. 5-23), działania te podzielono na dwie główne grupy: pomiary geometryczno-referencyjne oraz pomiary diagnostyczne. Ich integracja pozwala na przekształcenie surowej geometrii 3D w zaawansowany model inżynierski o wysokim stopniu wiarygodności.



Rys. 5-23 Klasyfikacja pomiarów uzupełniających proces cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych

Pierwszą grupę stanowią pomiary geometryczne i referencyjne, których celem jest kalibracja, weryfikacja metryczna modeli oraz dokumentacja wybranych detali konstrukcyjnych. W ramach tej grupy wyróżniono domiary bezpośrednie oraz pomiary geodezyjne.

Domiary bezpośrednie realizowano przy użyciu klasycznych miarek, dalmierzy laserowych oraz precyzyjnych suwmiarek i szczelinomierzy. Służą one do bezpośredniej weryfikacji wymiarów charakterystycznych w celu późniejszej kalibracji modeli 3D oraz dokumentowania miejsc trudnodostępnych lub wymagających wysokiej precyzji pomiarowej. Przykłady obejmowały pomiar szerokości rozwarcia rys na powierzchniach betonowych (na praktycznie każdym badanym obiekcie), weryfikację grubości profili stalowych (np. most w Zatorze, wiadukt w Jarocinie), precyzyjne określenie przemieszczeń i obrotów łożysk względem osi podpór (np. mosty w Kurowie i w Cieszynie) oraz domiary elementów osłoniętych, zacienionych lub trudno dostępnych dla BSP i TLS.

Pomiary geodezyjne realizowano z wykorzystaniem tachimetrów oraz odbiorników GNSS. Umożliwiały one namierzenie punktów referencyjnych w postaci kodowanych markerów fotogrametrycznych oraz szachownic TLS, opisanych w pkt. 5.5.1 i 5.5.2. Działania te pozwalały na spójne połączenie danych z różnych technik przechwytywania rzeczywistości oraz, w wybranych

przypadkach, na odniesienie osnowy pomiarowej do państwowego układu współrzędnych i wysokościowego, co ma istotne znaczenie w analizach zmian geometrii obiektu w czasie. Przykłady realizacji tych pomiarów przedstawiono na Rys. 5-24.



Rys. 5-24 Pomiary geometryczne i referencyjne na wybranych obiektach badawczych: (1) domiary bezpośrednie, (2) pomiar stacją GNSS, (3) pomiar tachimetrem, (4) domiary precyzyjne

Drugą grupę stanowią pomiary diagnostyczne, ukierunkowane na identyfikację cech niewidocznych wizualnie dla inspektora. Obejmowały one zarówno analizę struktury wewnętrznej elementów konstrukcyjnych, jak i wykrywanie anomalii materiałowych. Informacje te umożliwiają interpretację stanu technicznego obiektu wykraczającą poza ocenę wizualną powierzchni, rozszerzając model geometryczny o warstwę diagnostyki nieniszczącej (NDT). Proces cyfrowego odwzorowania został rozszerzony o te dane w ramach badań na wybranych pylonach mostu w Kurowie.

W ramach badań na moście w Kurowie zastosowano diagnostykę struktury wewnętrznej przy użyciu georadarów (GSSI Flex NX, IDS C-thrue) oraz urządzenia do badań ultradźwiękowych (Proceq Pundit 200). Pozwoliło to na inwentaryzację zbrojenia, lokalizację kabli sprężających oraz identyfikację pustek i przewarstwień w betonie. Drugim obszarem były badania anomalii materiałowych, obejmujące ocenę stanu zagrożenia korozyjnego metodą iCAMM oraz analizę anomalii termicznych powierzchni z wykorzystaniem platformy DJI Matrice 210 RTK wyposażonej w kamerę termowizyjną Zenmuse XT2. Na Rys. 5-25 przedstawiono przykłady realizacji pomiarów diagnostycznych na moście w Kurowie.

Dane diagnostyczne pełniły funkcję wspierającą i nie stanowiły bezpośredniego elementu rekonstrukcji geometrycznej 3D. Tworzyły natomiast dodatkową warstwę informacyjną przypisaną do konkretnych fragmentów modelu. W celu zapewnienia precyzyjnej korelacji wyników badań NDT z modelem cyfrowym, na powierzchniach pylonów nanoszono fizyczną siatkę punktów referencyjnych (Rys. 5-25). Pozwoliło to na rzutowanie wyników badań wewnętrznych na zewnętrzną geometrię modelu 3D, tworząc rozbudowaną bazę wiedzy o stanie technicznym elementu.



Rys. 5-25 Uzupełniające pomiary diagnostyczne NDT na moście w Kurowie

Realizacja przedstawionych pomiarów uzupełniających zamyka etap gromadzenia danych terenowych i stanowi końcowy element przyjętej strategii pomiarowej. Połączenie precyzyjnej osnowy geodezyjnej, domiarów bezpośrednich oraz diagnostyki nieniszczącej pozwoliło na zwiększenie wiarygodności modeli cyfrowych, ograniczenie ryzyka błędnej interpretacji danych oraz rozszerzenie zakresu analizy poza informacje dostępne wizualnie. Tak przygotowany, wielowarstwowy pakiet danych surowych stanowi kompletny wsad do procesów biurowych, umożliwiając przejście do etapu integracji i przetwarzania danych, opisanych w kolejnym rozdziale.

5.6 Przetwarzanie i integracja danych

5.6.1 Wstępna obróbka i organizacja materiałów

5.6.1.1 Organizacja danych wejściowych

Proces przetwarzania danych w biurze rozpoczyna się od systematyzacji obszernych wolumenów danych surowych pozyskanych podczas pracy w terenie oraz ich jakościowej selekcji. Ze względu na interdyscyplinarny charakter badań, łączący dane z naziemnego skanowania laserowego, fotogrametrii oraz pomiarów uzupełniających, kluczowe było wdrożenie jednolitej i czytelnej struktury zarządzania informacją. Prawidłowa organizacja danych wejściowych jest warunkiem koniecznym dla zapewnienia płynności procesów rejestracji i integracji danych. Typowy układ struktury katalogów, wypracowany na potrzeby badawcze, obejmuje następujące główne pozycje:

- **00_Materiały_wejściowe**: Zawiera dokumentację archiwalną obiektu, uzgodnienia techniczne oraz wszelkie materiały niezbędne do rozpoczęcia prac modelowych.

- **01_Dane_surowe** (ang. raw data): Nieobrobione dane z terenu w formatach natywnych, z podziałem na foldery dedykowane: fotogrametrii, skanowaniu laserowemu, badaniom NDT, pomiarom geodezyjnym oraz danym dodatkowym (szkice terenowe, fotografie inspekcyjne).
- **02_Wstępna_obróbka** (ang. preprocessing): Dane po wstępnej selekcji i przygotowaniu, obejmujące m.in. wyselekcjonowane zdjęcia, pliki po zmianie nazewnictwa, wstępnie zarejestrowane i oczyszczone chmury punktów oraz wyselekcjonowane wyniki badań NDT.
- **03_Integracja**: Projekty integrujące dane z wielu źródeł, np. pliki robocze oprogramowania RealityCapture, w których następuje łączenie danych TLS i fotogrametrii.
- **04_Eksport**: Ostatecznie opracowane wyniki końcowe w postaci chmur punktów, modeli siatkowych, ortofotomap, modeli bryłowych oraz dokumentacji rysunkowej 2D.

Tak przygotowane środowisko danych pozwala na zachowanie spójności topologicznej podczas rekonstrukcji 3D, ograniczenie ryzyka błędów wynikających z nadpisywania plików oraz skuteczną archiwizację danych projektowych. Przejrzysta struktura jest kluczowa z uwagi na fakt, że proces cyfrowego odwzorowania często ma charakter iteracyjny. Wymaga to cofania się do wcześniejszych etapów przetwarzania, co bez rygorystycznej organizacji folderów prowadziłoby do chaosu informacyjnego.

5.6.1.2 Selekcja i przygotowanie materiału fotograficznego

Selekcja i wstępne przygotowanie materiału fotograficznego mają na celu wyeliminowanie ujęć, które mogłyby wprowadzić zamieszanie do procesu rekonstrukcji lub spowodować błędy w orientacji zdjęć. Celem tego etapu jest świadome ograniczenie zbioru wejściowego do materiału spełniającego podstawowe kryteria jakościowe i geometryczne, co w efekcie pozwala na oszczędność mocy obliczeniowej stacji roboczej i ograniczenie czasu pracy.

Podczas przeglądu materiału surowego, eliminacji podlegają przede wszystkim ujęcia niespełniające standardów jakościowych fotogrametrii. Do głównych przyczyn odrzucenia zdjęć należą:

- **Błędy ostrości i poruszenia:** Zdjęcia niewyraźne, wynikające z drgań BSP, nagłych zmian kierunku lotu lub niewystarczająco krótkiego czasu ekspozycji (nr 1 na Rys. 5-26).
- **Nieprawidłowa ekspozycja:** Zdjęcia prześwietlone (np. fragmenty betonu w bezpośrednim nasłonecznieniu) oraz niedoświetlone (ciemne strefy pod obiektem) (nr 3 i 5 na Rys. 5-26).
- **Niepożądane obiekty w kadrze:** Ujęcia z istotnymi przesłonięciami pola widzenia, takimi jak elementy konstrukcyjne BSP, ptaki, pojazdy lub osoby znajdujące się w bezpośrednim kadrze (nr 4 na Rys. 5-26).
- **Skrajne kąty przechwytywania:** Zdjęcia wykonane pod skrajnymi kątami, które nie wnosiły informacji geometrycznej użytecznej do rekonstrukcji (nr 2 na Rys. 5-26).
- **Szum cyfrowy:** Ujęcia wykonane przy zbyt wysokiej czułości ISO, gdzie ziarnistość obrazu maskuje rzeczywiste szczegóły powierzchni (nr 6 na Rys. 5-26).
- **Duplikaty:** Eliminacja zdjęć niemal identycznych, wykonanych w tym samym miejscu przy braku ruchu kamery.



Rys. 5-26 Przykłady odrzuconych zdjęć niespełniających podstawowych wymagań fotogrametrii

W dalszym etapie materiał fotograficzny podlegał segregacji, dostosowanej do struktury obiektu oraz celu przetwarzania. Zdjęcia dzielono najczęściej według:

- elementów konstrukcyjnych (np. pylony, filary, przyczółki, ustrój nośny),
- źródła pozyskania danych (BSP, aparat cyfrowy, smartfon),
- techniki pozyskania (naloty obszarowe, pochyłe, loty manualne),
- obszarów funkcjonalnych obiektu (góra obiektu, spód, boki).

Ostatnim korkiem przygotowania było sprawdzenie metadanych. W przypadku zdjęć z drona Mavic 3 Enterprise, kluczowe było upewnienie się, że każde zdjęcie posiada zapisane współrzędne RTK. Zapewnia to wyskalowanie i poprawną orientację modelu w przestrzeni geograficznej już na początkowym etapie dopasowania zdjęć.

5.6.1.3 Oczyszczanie i rejestracja chmur punktów

Proces rejestracji chmur punktów stanowi kluczowy etap przetwarzania danych pozyskanych metodą naziemnego skanowania laserowego i polega na sprowadzeniu skanów z lokalnych układów współrzędnych do wspólnego układu globalnego. Prace te realizowano w oprogramowaniu dedykowanym dla poszczególnych systemów skanujących, przede wszystkim w Leica Cyclone Register 360 oraz dedykowanych rozwiązaniach dla skanerów Trimble i Z+F. Końcowe przygotowanie i porządkowanie chmur punktów przeprowadzano w środowisku Autodesk ReCap. W procesie biurowym wykorzystano dwa uzupełniające się podejścia do rejestracji danych:

- **Rejestracja typu „chmura do chmury”** (ang. cloud-to-cloud), oparta na algorytmach dopasowujących wzajemne położenie skanów poprzez wyszukiwanie wspólnych płaszczyzn i krawędzi w obszarach ich wzajemnego pokrycia. Metoda ta była wykorzystywana przede wszystkim do wstępnego składania danych już na etapie prac terenowych, m.in. z wykorzystaniem aplikacji Cyclone Field 360, co umożliwiało bieżącą kontrolę kompletności pomiaru.

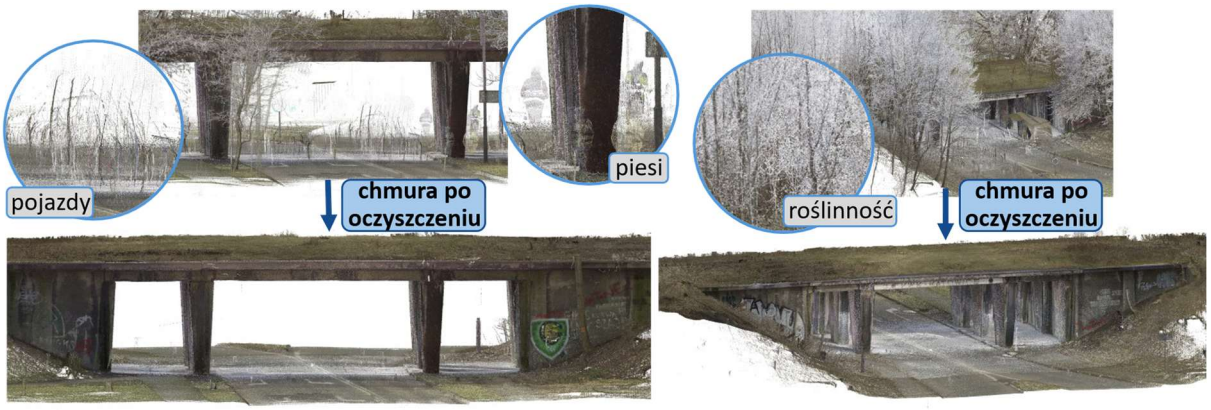
- **Rejestracja oparta na punktach referencyjnych** (ang. target-based), realizowana w celu ujednolicenia bloku skanów i wyeliminowania narastania błędów. Proces biurowy posiłkował się wskazanymi punktami referencyjnymi w postaci szachownic lub innych charakterystycznych elementów chmury. Pozwoliło to na ostateczną kalibrację chmury względem punktów charakterystycznych i osnowy geodezyjnej.

W praktyce stosowano podejście hybrydowe, w którym wstępne dopasowanie realizowane metodą cloud-to-cloud było następnie weryfikowane i korygowane w oparciu o wskazane punkty referencyjne.

Po zakończeniu rejestracji przeprowadzano proces oczyszczania chmur punktów, realizowany zarówno w oprogramowaniu natywnym producentów skanerów, jak i w programie Autodesk ReCap. Proces ten obejmował przede wszystkim:

- **Usuwanie artefaktów ruchomych:** Eliminację punktów pochodzących od przejeżdżających pojazdów, pieszych oraz innych ruchomych obiektów.
- **Filtrację roślinności i otoczenia:** Usuwanie drzew, krzewów i traw przesłaniających elementy konstrukcyjne, szczególnie w strefach podpór i skarp.
- **Zawężanie obszaru zainteresowania:** Ograniczenie chmury punktów do bryły samego obiektu mostowego i jego bezpośredniego otoczenia, w celu redukcji rozmiaru plików.
- **Redukcję szumów:** Usuwanie punktów o niskiej jakości, wynikających m.in. z wielokrotnych odbić wiązki laserowej (np. od tafli wody).

Na Rys. 5-27 przedstawiono przykład chmury punktów przed i po procesie oczyszczania.

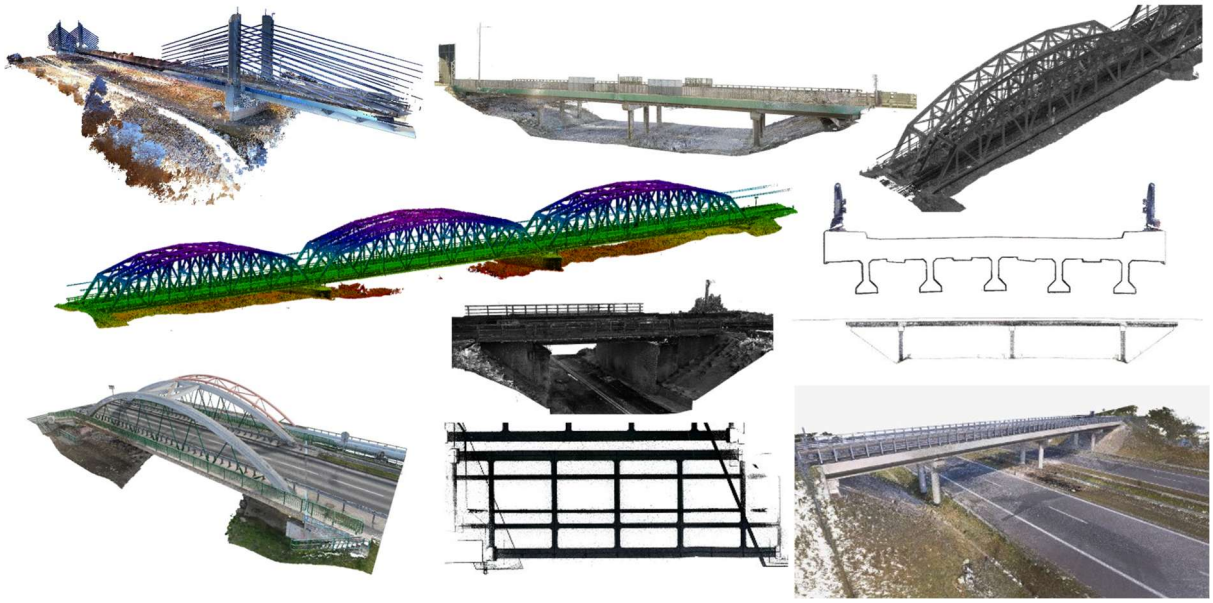


Rys. 5-27 Przykład chmury punktów wiaduktu w Katowicach przed i po procesie czyszczenia

Dokładność uzyskanych chmur dla wybranych poligonów badawczych na podstawie prac terenowych, których specyfikę określono w Tab. 5-5, zestawiono w Tab. 5-6. Jakość uzyskanych chmur punktów oceniano na podstawie średniego błędu łączenia oraz stopnia wzajemnego pokrycia skanów. Analizując wyniki, widoczne są zauważalnie wyższe błędy przy rejestrowaniu skanów utworzonych przy użyciu skanera Leica BLK360 (w zakresie 6–10 mm) w porównaniu do urządzeń Trimble czy Z+F. Pomimo tych różnic, jakość zebranego materiału została uznana za wystarczającą i w pełni gotową do dalszego wykorzystania diagnostycznego. Na Rys. 5-28 przedstawiono wybrane chmury punktów po procesie pełnej rejestracji i czyszczenia, stanowiące gotowy materiał do bezpośredniej analizy inżynierskiej lub do kolejnego etapu, polegającego na ich integracji z danymi fotogrametrycznymi.

Tab. 5-6 Zestawienie parametrów końcowych zarejestrowanych chmur punktów

Obiekt	Skaner laserowy	Liczba stanowisk	Średnie pokrycie	Średni błąd łączenia
Most w Kurowie	Trimble X9	30	55%	1,8 mm
Most w Gliwicach	Z+F IMAGER 5010X	24	nd.	0,8 mm
Most w Zatorze	Leica BLK360	84	39%	7,0 mm
Wiadukt w Chorzowie	Leica BLK360	8	62%	6,0 mm
Wiadukt nad A4 w Mysłowicach	Trimble X9	38	58%	1,3 mm
Wiadukt w Jarocinie	Leica BLK360	31	50%	10,0 mm
Wiadukt w Tychach	Leica BLK360	37	57%	7,0 mm



Rys. 5-28 Wybrane chmury punktów po procesie rejestracji i oczyszczania

5.6.1.4 Zakres i warianty przetwarzania danych 3D

Zakończenie etapu wstępnej obróbki i rejestracji danych nie zawsze oznaczało konieczność przejścia do pełnej integracji skanowania laserowego i fotogrametrii, ani do generowania kolejnych złożonych modeli 3D. Decyzja o zakresie dalszego przetwarzania wynikała zarówno z aktualnych ograniczeń sprzętowych, jak i z praktyki inżynierskiej, w której nakład pracy musi być adekwatny do postawionego celu. Świadome różnicowanie tego zakresu umożliwiło elastyczne dostosowanie ścieżki cyfrowego odwzorowania do rzeczywistych potrzeb inspekcyjnych, ograniczając nadmiarowość danych i unikając mechanicznego stosowania pełnej sekwencji przetwarzania tam, gdzie nie było to uzasadnione merytorycznie.

Należy przy tym zaznaczyć, iż dążenie do generowania pełnych modeli siatkowych z wysokorozdzielczą teksturą, odpowiadających trzeciemu poziomowi opisanej wcześniej piramidy (pkt 4.2.5), stanowi kierunek rozwojowy, który wraz z postępem technologicznym i automatyzacją

procesów stanie się prawdopodobnie standardem w diagnostyce wielu obiektów. W ramach prowadzonych badań wybór konkretnego wariantu lub stopnia szczegółowości modelu był jednak ściśle skorelowany z charakterem planowanych analiz.

Pierwszy z analizowanych wariantów koncentrował się przede wszystkim na weryfikacji parametrów geometrycznych obiektu. W wielu przypadkach poprawnie zarejestrowana i oczyszczona chmura punktów stanowiła wystarczający produkt końcowy, który opcjonalnie wzbogacano o uproszczone bryły 3D tworzone na jej podstawie. Takie podejście stosowano w zadaniach obejmujących sprawdzanie wymiarów charakterystycznych, ocenę przemieszczeń elementów konstrukcyjnych oraz przygotowanie podkładów pod rysunki inwentaryzacyjne. W tych scenariuszach dalsze zagęszczanie danych lub budowa modeli siatkowych nie wnosiły istotnej wartości diagnostycznej, a jedynie niepotrzebnie zwiększała objętość zbiorów danych oraz czasochłonność procesów biurowych.

Drugi wariant przetwarzania dedykowany był analizom wizualnym. W sytuacjach wymagających oceny stanu powierzchni, identyfikacji rys, inwentaryzacji ubytków materiałowych czy analizy innych uszkodzeń powierzchniowych, decydowano się na dalszą integrację danych. Chmury punktów były w tym procesie integrowane z danymi fotogrametrycznymi, co pozwalało na uzyskanie modeli siatkowych uzupełnionych o wysokiej rozdzielczości tekstury. Pozwalało to na połączenie wysokiej dokładności geometrycznej skanowania laserowego z bogatą informacją wizualną, niedostępną w surowej chmurze punktów. Szczegółowy opis procesu integracji tych danych przedstawiono w kolejnym podrozdziale.

Oprócz dwóch głównych ścieżek, w procesie badawczym występowały również warianty pośrednie i uproszczone. Obejmowały one zarówno tworzenie lokalnych modeli fragmentów obiektów (często na bazie rekonstrukcji natychmiastowej), jak i generowanie uproszczonych modeli geometrycznych służących wyłącznie jako przestrzenny nośnik rozbudowanych zbiorów zdjęć inspekcyjnych. Pozwalało to na sprawne zarządzanie bazą danych wizualnych, dając możliwość szybkiego odnalezienia i wyświetlenia źródłowego zdjęcia konkretnego detalu poprzez interakcję z uproszczoną bryłą obiektu w przestrzeni 3D.

5.6.2 Proces generowania modeli 3D – integracja skanowania i fotogrametrii

5.6.2.1 Wprowadzenie

Proces generowania zaawansowanych reprezentacji 3D oparto głównie na wieloźródłowej integracji danych pochodzących z naziemnego skanowania laserowego oraz fotogrametrii. Zgodnie z założeniami przedstawionymi w pkt. 3.3.2, integracja ta służy przede wszystkim wykorzystaniu komplementarnych zalet obu technik.

Naziemne skanowanie laserowe zapewnia wysoką precyzję geometryczną, co ma kluczowe znaczenie w analizach inżynierskich, takich jak ocena przemieszczeń czy weryfikacja geometrii konstrukcji. Fotogrametria natomiast charakteryzuje się dużą efektywnością operacyjną, elastycznością pozyskiwania danych oraz możliwością generowania tekstur wysokiej jakości, istotnych z punktu widzenia diagnostyki wizualnej.

Drugim, równie istotnym powodem integracji danych jest możliwość uzupełnienia braków informacyjnych występujących przy stosowaniu pojedynczej techniki. Dane z nalotów BSP pozwalają na zarejestrowanie fragmentów konstrukcji pozostających w tzw. cieniu pomiarowym skanerów naziemnych. Dotyczyło to przede wszystkim elementów wysokich lub niedostępnych z poziomu terenu, takich jak głowice pylonów mostu w Kurowie czy górne powierzchnie łuków mostu w Gliwicach (Rys. 3-20).

Proces budowy zintegrowanych modeli 3D realizowano głównie w środowisku oprogramowania RealityCapture. Kolejne kroki przetwarzania, opisane w niniejszym rozdziale, odzwierciedlają technologiczną ścieżkę tworzenia modeli, od orientacji danych surowych, przez generowanie i optymalizację modeli siatkowych, aż po opracowanie końcowych modeli bryłowych. Poniższy opis bazuje na parametrach uzyskanych dla wybranego pylonu w Kurowie, stanowiącego najbardziej reprezentatywny przykład złożonej integracji danych. W treści uwzględniono również odniesienia do pozostałych wybranych obiektów badawczych opisywanych w rozdziale 5.

5.6.2.2 Import i orientacja danych

Pierwszym etapem procesu jest integracja wieloźródłowych danych wejściowych. Do projektu importowano dane fotogrametryczne w postaci wyselekcjonowanych zdjęć z nalotów BSP oraz chmury punktów z pojedynczych, niescalonych stanowisk skanera laserowego (eksportowanych głównie w formacie .e57).

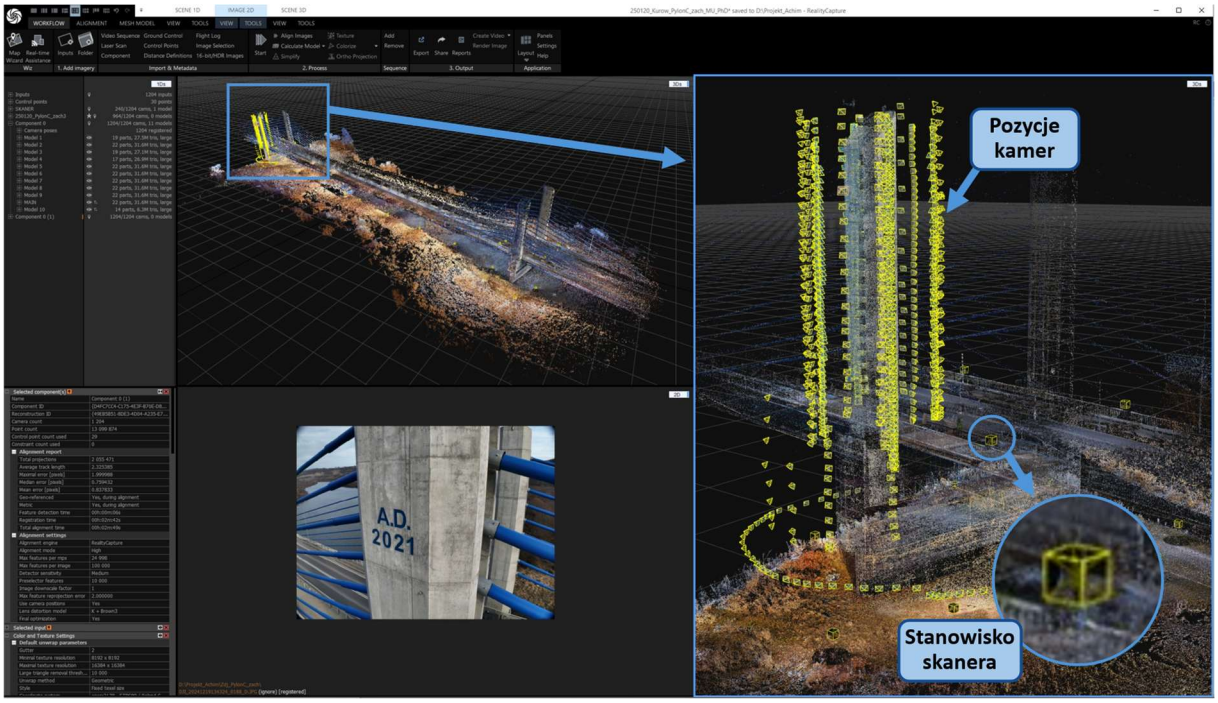
Z technicznego punktu widzenia kluczowe było importowanie pojedynczych stanowisk skanera, a nie jednej, uprzednio scalonej chmury punktów. Każde stanowisko skanera traktowane jest przez oprogramowanie jako zestaw sześciu wzajemnie zorientowanych projekcji sferycznych (ułożonych w formie sześcianu), odpowiadających pozycjom wirtualnych kamer. Dla modelowanego pylonu mostu w Kurowie zestaw danych obejmował 1204 jednostki, z czego 964 stanowiły zdjęcia z drona, a 240 to ujęcia pochodzące z 30 stanowisk skanera (6 rzutów na stanowisko).

Następnym krokiem był proces orientacji (ang. alignment), obejmujący dopasowanie zdjęć i stanowisk skanera. Wynikiem tego etapu jest szkielet geometryczny modelu w postaci rzadkiej chmury punktów (ang. sparse point cloud). Na Rys. 5-29 przedstawiono interfejs programu z widoczną wstępną geometrią pylonu oraz orientacją kamer i stanowisk skanera.

Dla tworzonych modeli uzyskano następujące wartości błędów reprojekcji, determinujące jakość dopasowania danych:

- maksymalny błąd reprojekcji: 2,0 pikseli (px) – przyjęty jako wartość graniczna,
- mediana błędu reprojekcji: 0,30–0,50 px (dla analizowanego pylonu 0,47 px),
- średni błąd reprojekcji: 0,40–0,60 px (dla analizowanego pylonu 0,58 px).

Uzyskany średni błąd reprojekcji na poziomie poniżej 0,60 px potwierdza wysoką spójność wewnętrzną modelu. Przy uwzględnieniu średniej wielkości teksela w przedziale 1–2 mm, przekłada się to na dokładność geometryczną rzędu 1–1,5 mm. Taka charakterystyka dopasowania gwarantuje, że rzutowane punkty 3D pokrywają się z obrazami źródłowymi z minimalnym odchyleniem, co zapewnia wiarygodne odwzorowanie krawędzi elementów oraz kluczowych detali konstrukcyjnych obiektu.



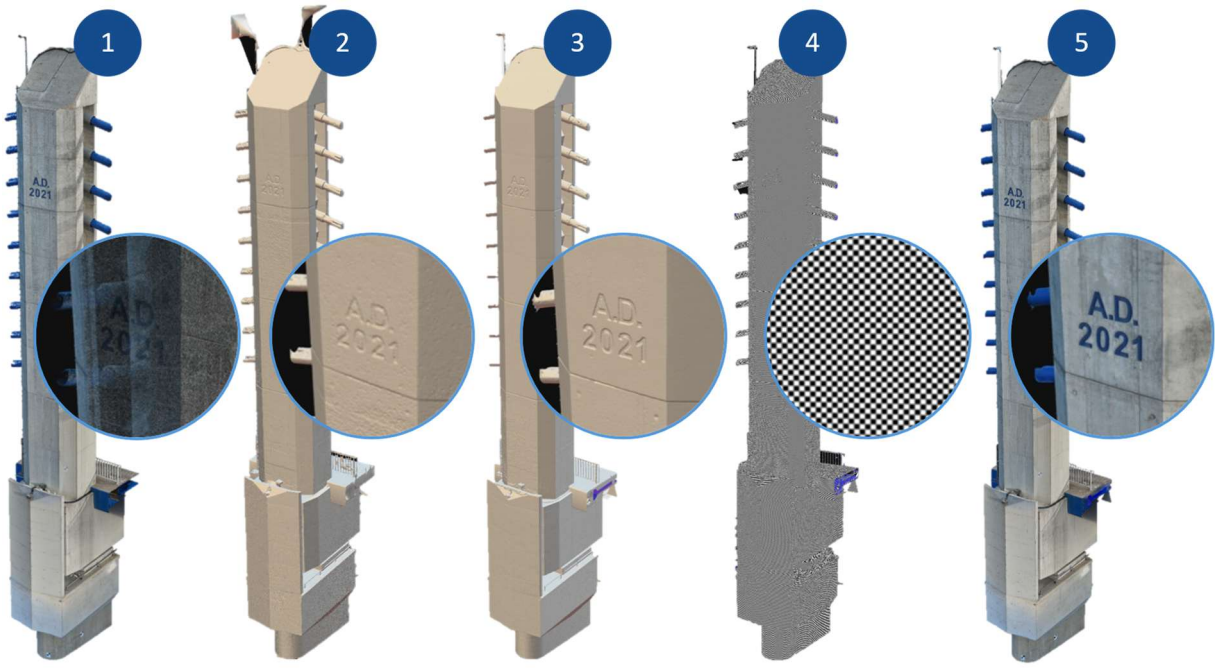
Rys. 5-29 Interfejs programu RealityCapture po procesie orientacji danych

Czas dopasowania danych wynosił zazwyczaj od kilku do kilkunastu minut, w zależności od liczby zdjęć i parametrów obliczeniowych. Dla analizowanego pylonu mostu w Kurowie proces orientacji trwał ok. 4,5 min. Dla porównania, orientacja danych dla wiaduktów w Kędzierzynie-Koźlu (przy użyciu ok. 1200 zdjęć i 40 stanowisk skanera), mimo znacznie większego obszaru opracowania, zajęła ok. 3,5 minuty na stacji roboczej nr 2 oraz 8,5 minuty na laptopie (charakterystykę jednostek obliczeniowych zestawiono w Tab. 5.2). Świadczy to o odpowiedniej jakości danych wejściowych oraz wpływie wydajności jednostki obliczeniowej na czas przetwarzania

5.6.2.3 Budowa modeli siatkowych i fotogrametrycznych

Po poprawnej orientacji danych i uzyskaniu odpowiedniej precyzji dopasowania, przystąpiono do generowania powierzchni modelu. Proces ten realizowano w zdefiniowanym regionie rekonstrukcji (ang. reconstruction region), co pozwoliło na odcięcie zbędnych elementów otoczenia zarejestrowanych przez BSP i TLS. Proces budowy modelu siatkowego z gęstej chmury punktów (krok 1 na Rys. 5-30) podzielono na dwa etapy. W pierwszej kolejności generowano model o średnim poziomie szczegółowości (ang. normal detail), który służył weryfikacji kompletności i spójności geometrii (krok 2 na Rys. 5-30). Po potwierdzeniu poprawności danych przystępowano do rekonstrukcji docelowej (ang. high detail), obejmującej budowę gęstej, docelowej siatki trójkątów (krok 3 na Rys. 5-30).

Dla jednego pylonu w Kurowie wynikowy model siatkowy zawierał ok. 31,6 mln trójkątów i ok. 15,8 mln wierzchołków. Tak utworzona geometria stanowiła podstawę do dalszego etapu, którym było nadanie modelowi warstwy wizualnej. W tym celu wykonywano operację rozwinięcia siatki, czyli mapowania UV (ang. unwrap), polegającą na wygenerowaniu dwuwymiarowych współrzędnych tekstury dla powierzchni trójwymiarowej. Efekt wizualizowany jest na modelu za pomocą gęstej, czarno-białej szachownicy (krok 4 na Rys. 5-30). Następnie przeprowadzano proces teksturowania (ang. texturing), polegający na naniesieniu wysokorozdzielczych obrazów źródłowych na przygotowaną siatkę trójkątów (krok 5 na Rys. 5-30).

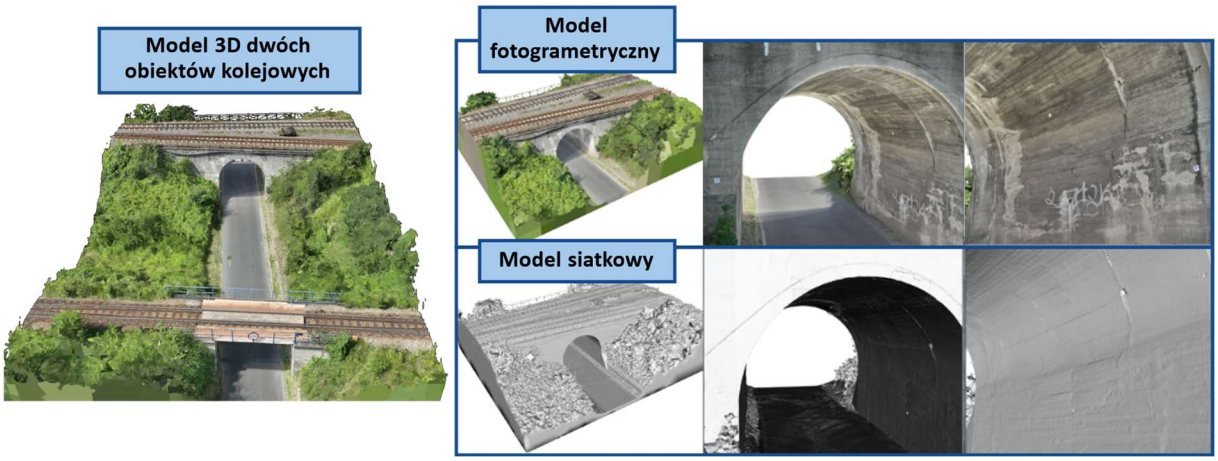


Rys. 5-30 Proces obejmujący tworzenie modelu siatkowego i fotogrametrycznego

Parametry rozwinięcia siatki i generowania tekstur dobrano w sposób zapewniający możliwie najwyższą jakość wizualną modelu, niezbędną do precyzyjnej identyfikacji uszkodzeń powierzchniowych. Zastosowanie stylu rozwinięcia „Maximal texture count" skutkowało wygenerowaniem pięciu map tekstur o rozdzielczości 16384 × 16384 pikseli każda. Efektywne wykorzystanie powierzchni map UV (ang. texture utilization) na poziomie 72% świadczy o racjonalnym zagospodarowaniu przestrzeni tekstury przy zachowaniu wysokiej szczegółowości obrazu. W analizowanym przypadku wielkość teksela (ang. texel size) wyniosła około 0,00085 jednostki modelu na piksel, co w układzie metrycznym odpowiada rozdzielczości poniżej 1 mm na piksel. W praktyce umożliwia to identyfikację nawet drobnych uszkodzeń. Uzyskany parametr jakości tekstury (ang. texture quality) na poziomie 100% wskazuje, że na etapie generowania map nie stosowano dodatkowej redukcji rozdzielczości, co było świadomą decyzją wynikającą z diagnostycznego przeznaczenia modelu.

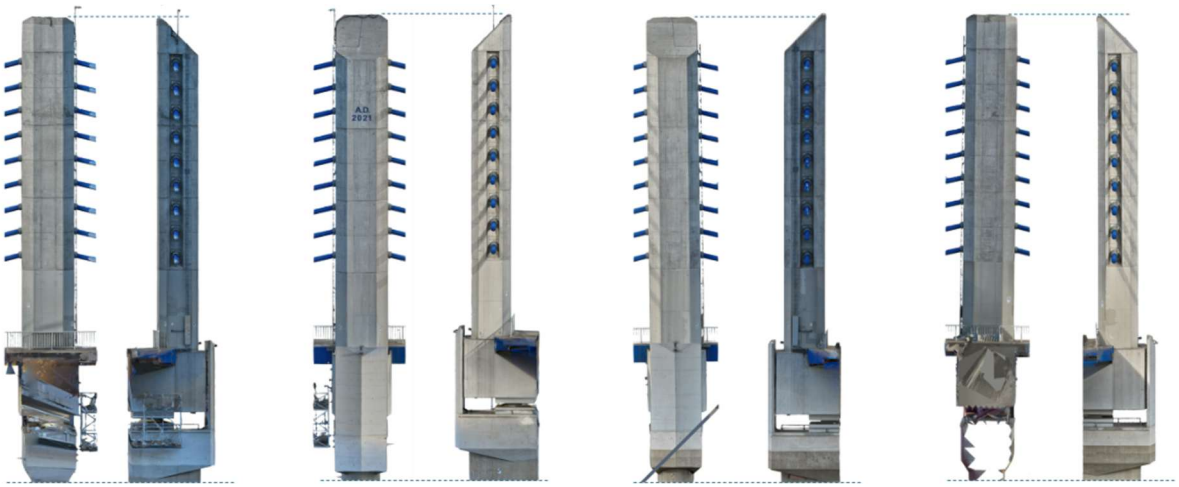
Całkowity czas przetwarzania jednego pylonu, obejmujący obliczenie map głębi, generowanie siatki, operację mapowania UV oraz teksturowanie, wyniósł ok. 2,5 godziny. Najbardziej czasochłonnym etapem było obliczanie map głębi (ang. depth-map computation), trwające ok. 2 godzin. Etap ten stanowi kluczowy element rekonstrukcji geometrycznej w fotogrametrii i polega na analizie relacji pomiędzy pikselami na zdjęciach a ich położeniem w przestrzeni z wykorzystaniem algorytmów MVS (pkt 3.2.4). Oznacza to, że zasadnicze obciążenie obliczeniowe procesu integracji danych związane jest z rekonstrukcją geometrii, a nie z samym nakładaniem tekstury.

Podobne parametry czasowe i jakościowe jak dla pylonu w Kurowie osiągnięto dla modelu dwóch wiaduktów w Kędzierzynie-Koźlu. Choć rekonstruowany obszar był większy, dużą jego część zajmowała roślinność, której przetwarzanie zostało uproszczone, a faktyczna powierzchnia samych wiaduktów była zbliżona do powierzchni pylonu. Efekty tej rekonstrukcji w postaci modelu siatkowego i fotogrametrycznego wiaduktów pokazano na Rys. 5-31.



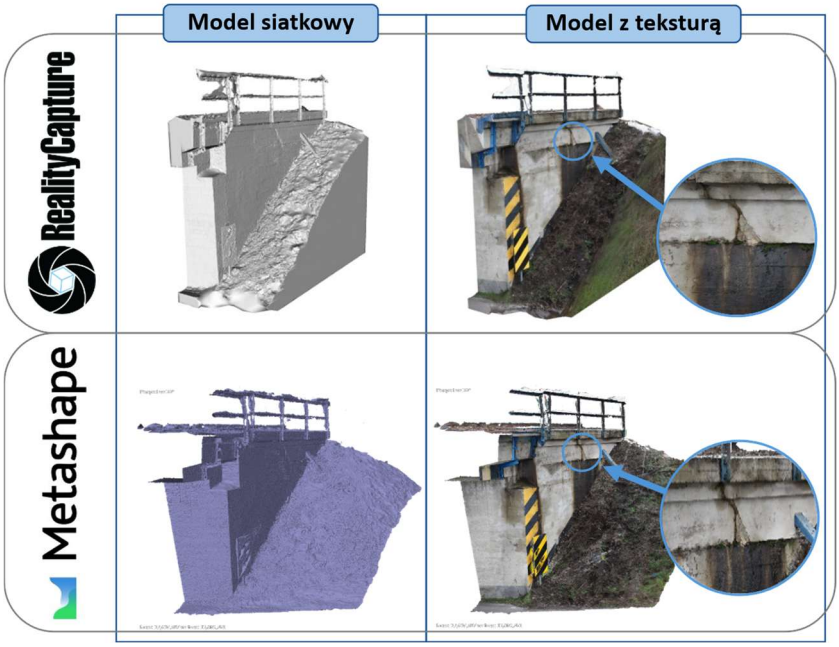
Rys. 5-31 Model siatkowy i fotogrametryczny wiaduktów kolejowych w Kędzierzynie-Koźlu

Ostatnim etapem przygotowania modelu do inspekcji wirtualnej było jego uproszczenie (ang. simplify), inaczej zwane retopologią (ang. retopology). Operacja ta polegała na redukcji liczby trójkątów, szczególnie na dużych, płaskich powierzchniach, przy jednoczesnym zachowaniu pierwotnej rozdzielczości tekstury. Modele pylonów wymagających szczególnej uwagi uproszczono do poziomu 6 mln trójkątów (ponad 5-krotna redukcja), natomiast dla pozostałych elementów wystarczający okazał się poziom 3 mln trójkątów (ponad 10-krotna redukcja). Pozwoliło to na późniejszą płynną nawigację w środowisku 3D przy zachowaniu pełnej wartości diagnostycznej modelu. Wybrane rzuty wynikowych modeli fotogrametrycznych pylonów mostu w Kurowie po procesie upraszczania pokazano na Rys. 5-32.



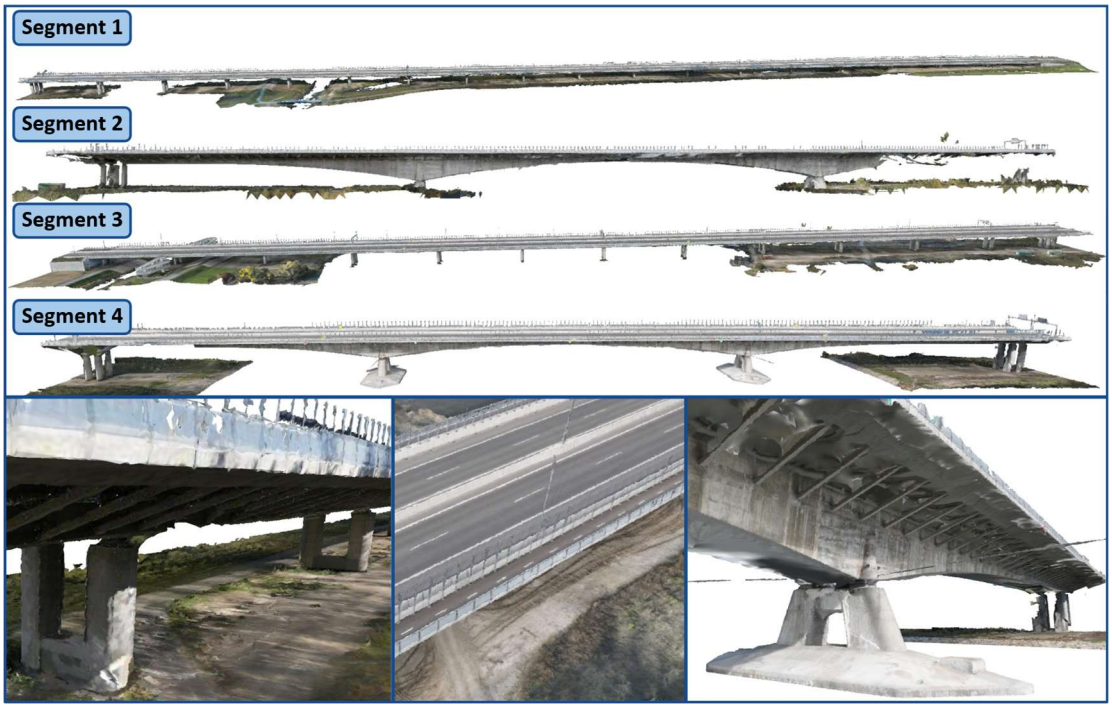
Rys. 5-32 Wybrane widoki modeli fotogrametrycznych mostu w Kurowie po procesie upraszczania

Poza pełną integracją danych ze skanowania laserowego i fotogrametrii niskiego pułapu wykonywano również modele eksperymentalne oparte wyłącznie na zdjęciach ze smartfona. Modele te tworzono w programach Agisoft Metashape oraz RealityCapture, a ich kalibracja geometryczna opierała się na pomiarach ręcznych. Przykładem jest model skrzydła wiaduktu w rejonie Łodzi, który pozwolił na określenie geometrii przemieszczeń oraz ich powiązanie z teksturą powierzchni (Rys. 5-33). Przypadek ten potwierdził możliwość wykorzystania uproszczonej ścieżki przetwarzania w zadaniach o ograniczonym zakresie geometrycznym.



Rys. 5-33 Model fotogrametryczny skrzydła wiaduktu koło Łodzi

Nie wszystkie misje pomiarowe zakończyły się jednak sukcesem. W przypadku wieloprzęsłowego mostu nad Dunajem w Bratysławie, pomimo zastosowania fotogrametrii lokalnie wspieranej skanowaniem laserowym, uzyskane dane okazały się niewystarczające do stworzenia modelu o charakterze diagnostycznym. Ze względu na rozległość obiektu oraz ograniczenia czasowe w pozyskiwaniu danych model stanowił jedynie materiał poglądowy (Rys. 5-34), a jego rozdzielczość okazała się niewystarczająca do celów inżynierskich. Na tej podstawie można wnioskować, że proces cyfrowego odwzorowania tak rozległych obiektów mostowych wymaga starannego przygotowania, odpowiedniego pokrycia danych oraz adekwatnych zasobów sprzętowych i zespołowych zarówno na etapie terenowym, jak i biurowym.

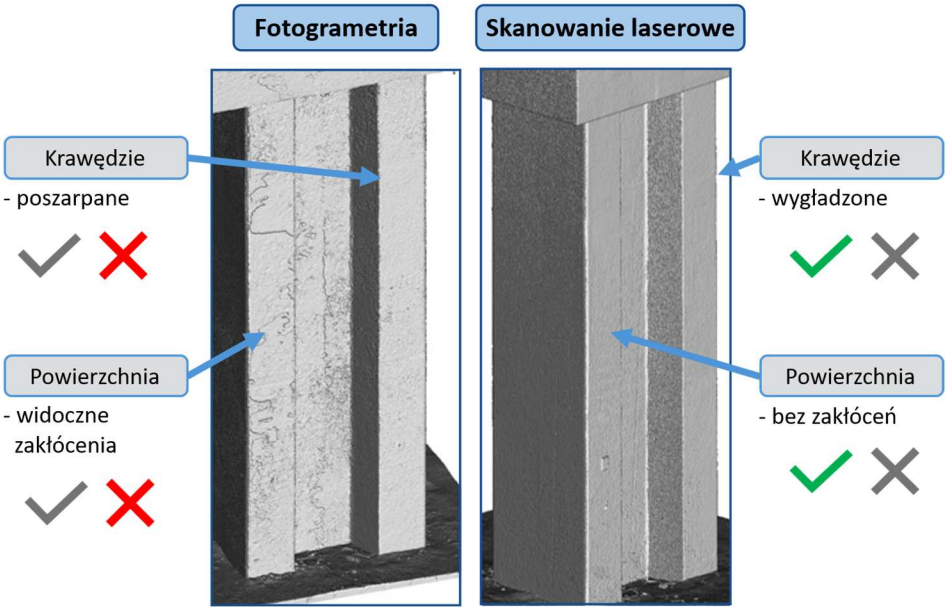


Rys. 5-34 Modele fotogrametryczne mostu nad Dunajem w Bratysławie

5.6.2.4 Analiza komplementarności źródeł danych

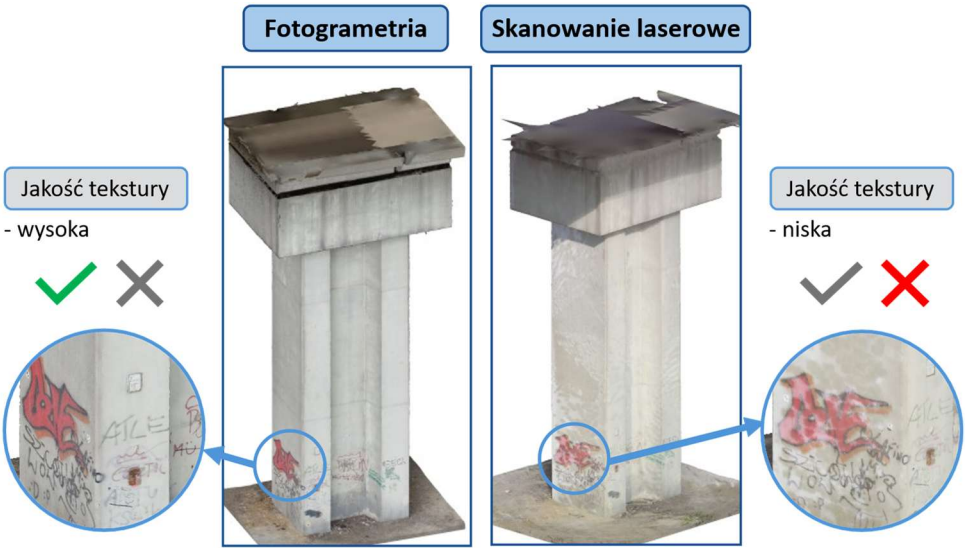
Po wygenerowaniu modeli siatkowych i fotogrametrycznych przeprowadzono analizę porównawczą jakości reprezentacji uzyskanych trzema wariantami przetwarzania danych: na podstawie wyłącznie skanowania laserowego, wyłącznie fotogrametrii oraz integracji obu technik. Do oceny stopnia komplementarności tych metod wykorzystano przykład filara wiaduktu w Chorzowie. Modele analizowano pod kątem dwóch kluczowych aspektów: precyzji geometrycznej oraz wierności tekstury.

W kontekście jakości geometrycznej analizowano dokładność odwzorowania kształtu i wymiarów bryły oraz obecność lokalnych niedoskonałości powierzchniowych. Modele uzyskane na bazie skanowania laserowego charakteryzują się wysoką precyzją. Powierzchnia jest gładka, a krawędzie wyraźne i ostre, co niemal idealnie oddaje rzeczywistą geometrię obiektu. Z kolei modele fotogrametryczne, mimo zachowania poprawności globalnej, wykazują liczne niedoskonałości lokalne. Powierzchnia bywa niejednorodna, a krawędzie elementów są mniej wyraźne i nienaturalnie zaokrąglone (Rys. 5-35).



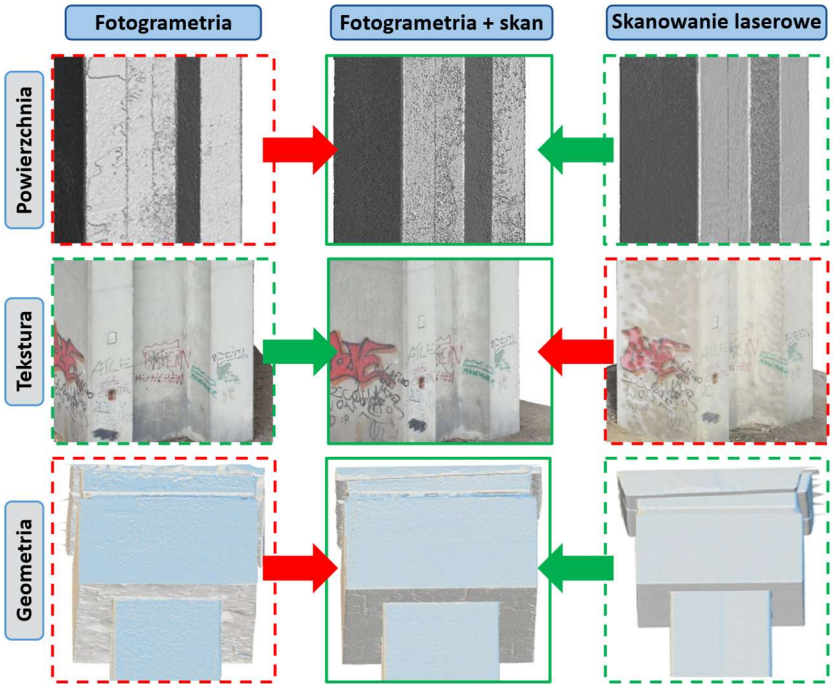
Rys. 5-35 Porównanie jakości geometrycznej modeli pozyskanych różnymi technikami

W przypadku oceny jakości wizualnej wyniki są odwrotne. Modele uzyskane na bazie fotogrametrii cechują się znacznie wyższą jakością odwzorowywanych tekstur, które uzyskiwane są z fotografii wykonanych w wysokiej rozdzielczości. Wszystkie detale powierzchni, takie jak graffiti, spękania czy zabrudzenia, są dobrze odwzorowane i wyraźne. W przypadku skanowania laserowego, informacje o kolorze uzyskiwane są z fotografii sferycznych wykonywanych w trakcie pomiaru. Wystarcza to do zarejestrowania podstawowej kolorystyki mierzonych punktów, lecz jest niewystarczające do celów szczegółowej diagnostyki wizualnej (Rys. 5-36).



Rys. 5-36 Porównanie jakości teksturalnej modeli pozyskanych różnymi technikami

Dopiero pełna integracja danych pozwoliła na uzyskanie kompletnej i wiarygodnej reprezentacji cyfrowej (Rys. 5-37). Model hybrydowy wykorzystuje chmurę punktów ze skanowania laserowego jako stabilny wzorzec geometryczny, eliminując szum i błędy krawędziowe, oraz wysokorozdzielcze zdjęcia BSP jako warstwę wizualną. Uzyskany w ten sposób wynik stanowi optymalny materiał do dalszej diagnostyki, łącząc milimetrową precyzję z wysoką czytelnością wizualną detali.



Rys. 5-37 Cechy modeli na uzyskanych na bazie fotogrametrii i skanowania laserowego

Należy jednak podkreślić, że przedstawione wnioski odnoszą się do konkretnego przypadku badawczego. W praktyce fotogrametria niskiego pułapu często stanowi nie tylko uzupełnienie tekstury, lecz również jedyne źródło danych geometrycznych dla fragmentów konstrukcji pozostających poza zasięgiem skanera naziemnego. Dotyczy to m.in. górnych powierzchni łuków mostu w Gliwicach (Rys. 3-20) czy trudno dostępnych partii wysokich elementów konstrukcyjnych. W takich sytuacjach rola

fotogrametrii wykracza poza warstwę wizualną i staje się kluczowa również z punktu widzenia kompletności geometrii modelu.

5.6.2.5 Weryfikacja dokładności i kompletności modeli

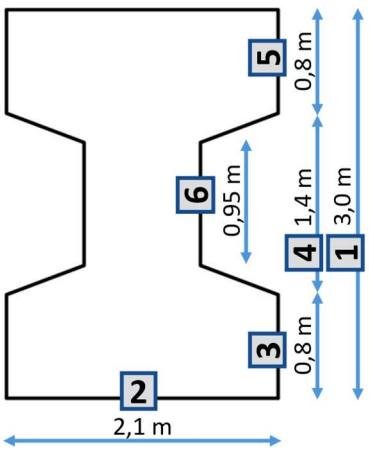
W celu oceny wiarygodności geometrycznej opracowanych modeli 3D przeprowadzono pomiary kontrolne wybranych wymiarów konstrukcyjnych bezpośrednio w terenie, a następnie porównano je z wartościami uzyskanymi z modeli cyfrowych.

Pomiary referencyjne realizowano przy użyciu tachimetru oraz klasycznych przyrządów pomiarowych (zgodnie z metodologią opisaną w pkt. 5.5.4), dobierając narzędzia do charakteru weryfikowanego elementu. Weryfikacja obejmowała zarówno pomiary globalnej geometrii poprzez porównanie współrzędnych punktów kontrolnych pomierzonych tachimetrycznie z ich odpowiednikami w modelu oraz poprzez bezpośrednie pomiary geometryczne elementów (wymiary przekrojów, wysokości, szerokości), jak i pomiary lokalnych uszkodzeń (ubytki, rozwarcia rys, przemieszczenia elementów). Weryfikacja obejmowała dwa poziomy kontroli:

- ocenę globalnej geometrii poprzez porównanie współrzędnych punktów kontrolnych pomierzonych tachimetrycznie z ich odpowiednikami w modelu 3D,
- analizę wymiarów charakterystycznych (wysokości, szerokości, przekrojów), a także pomiary lokalnych uszkodzeń, takich jak ubytki, rozwarcia rys czy przemieszczenia elementów.

Należy podkreślić, że celem weryfikacji nie było wykazanie laboratoryjnej precyzji modeli, lecz potwierdzenie ich przydatności w realnych zastosowaniach inżynierskich. Weryfikację przeprowadzono dla wszystkich opracowanych obiektów, jednak w pracy przedstawiono jedynie wybrane przykłady ilustrujące przyjętą metodykę.

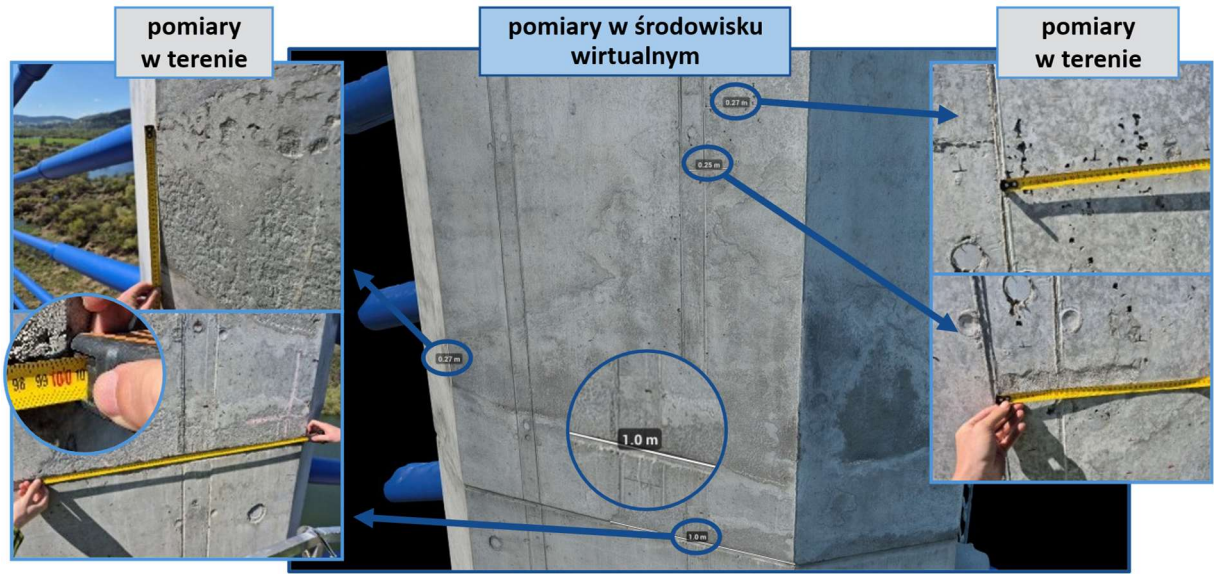
Na przykładzie filara w Chorzowie przeanalizowano rozbieżności wymiarowe dla różnych wariantów przetwarzania danych (fotogrametria, skanowanie laserowe, model zintegrowany). Wykonano serię pomiarów przekroju poprzecznego oraz pomiary punktów kontrolnych tachimetrem (Rys. 5-38). Uzyskane różnice pomiędzy pomiarami w terenie a wartościami odczytanymi z modeli mieściły się zazwyczaj w przedziale 1–2 cm, przy średnim błędzie względnym rzędu ok. 0,5%. Wartości te mieszczą się w granicach niepewności pomiarowej tachimetru oraz dopuszczalnych niedokładności wykonawczych samych elementów betonowych.



	Pomiar kontrolny	Fotogrametria	Skanowanie laserowe	Fotogrametria + skanowanie
L.p.	[m]			
1	3,000	2,988	3,001	2,984
2	2,100	2,100	2,089	2,091
3	0,800	0,792	0,793	0,786
4	1,400	1,385	1,402	1,390
5	0,800	0,785	0,792	0,791
6	0,950	0,964	0,954	0,951

Rys. 5-38 Pomierzona bezpośrednio w terenie geometria filara (po lewej) oraz zestawienie pomiarów geometrii na modelach uzyskanych z poszczególnych technik (po prawej)

Analogiczną weryfikację przeprowadzono dla wybranych uszkodzeń powierzchniowych pylonu mostu w Kurowie. Pomiary jednego z pylonów wykonane tradycyjnie z podnośnika koszowego porównano z pomiarami w środowisku wirtualnym (Rys. 5-39). Uzyskana zgodność mieściła się w granicach dokładności do ok. 1 cm, co w przypadku analizy geometrycznych parametrów uszkodzeń elementów betonowych uznano za wartość w pełni akceptowalną diagnostycznie.



Rys. 5-39 Walidacja modelu fotogrametrycznego wybranego pylonu w Kurowie

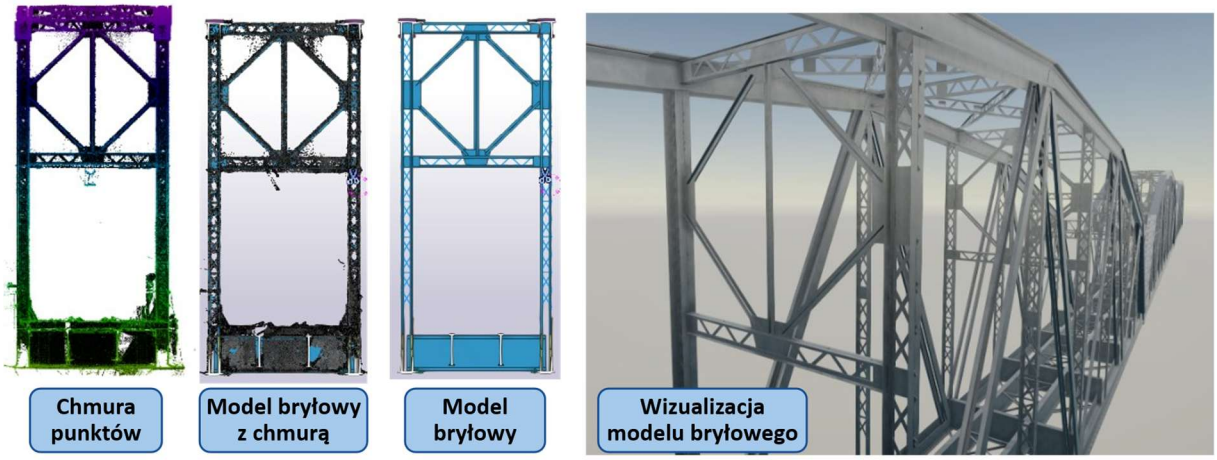
Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że opracowane modele 3D spełniają wymagania dokładnościowe dla zastosowania w diagnostyce i inwentaryzacji obiektów mostowych.

5.6.2.6 Tworzenie modeli bryłowych

Ostatnim etapem przetwarzania danych w ramach cyfrowego odwzorowania było tworzenie lub aktualizacja modeli bryłowych na podstawie zarejestrowanych chmur punktów oraz modeli siatkowych. W przypadku tych drugich, proces ten wymagał wygenerowania z nich danych punktowych (chmur), które mogły być importowane do oprogramowania umożliwiającego modelowanie parametryczne. Modele siatkowe, mimo swojej wysokiej szczegółowości wizualnej, nie posiadają odpowiedniej struktury wewnętrznej wymaganej w środowiskach BIM i CAD, co uniemożliwia bezpośrednie przeprowadzenie analiz inżynierskich. Współczesne środowiska projektowe (np. Autodesk Revit, Tekla Structures) oferują znacznie szerszy wachlarz narzędzi do pracy na chmurach punktów niż na gęstych siatkach trójkątów. Istotnym aspektem modelowania bryłowego jest fakt, że tworzone elementy posiadają zdefiniowane parametry, m. in. materiał, typ elementu czy przynależność do określonej kategorii konstrukcyjnej. Oznacza to, że model bryłowy staje się nośnikiem nie tylko geometrii, lecz również informacji semantycznej i materiałowej, co umożliwia jego wykorzystanie jako modelu informacyjnego (BIM). Tak opracowane modele mogą być eksportowane i współdzielone w otwartym formacie IFC, którego celem jest zapewnienie interoperacyjności i pełnienie roli uniwersalnego nośnika informacji pomiędzy różnymi środowiskami projektowymi i systemami zarządzania infrastrukturą. W ramach prac badawczych stosowano dwie zasadnicze ścieżki: tworzenie nowych modeli od podstaw oraz aktualizację i kalibrację modeli już istniejących.

Proces tworzenia modeli polegał na manualnym wpasowywaniu konkretnych brył parametrycznych w chmurę punktów lub rysowaniu elementów na podstawie poszczególnych jej przekrojów. Choć na rynku dostępne są narzędzia do automatycznego rozpoznawania kształtów i płaszczyzn (np. Leica 3DR czy EdgeWise), znajdują się one w stosunkowo wczesnej fazie rozwoju i ich dostępność jest ograniczona. W ramach niniejszych prac nie weryfikowano ich skuteczności, jednak analiza dostępnej literatury wskazuje, że obecne algorytmy automatyzacji nie odpowiadają w pełni specyfice i złożoności obiektów mostowych. Dostępne funkcje wykorzystywanych środowisk Revit czy AutoCAD również nie były skuteczne dla badanych mostów.

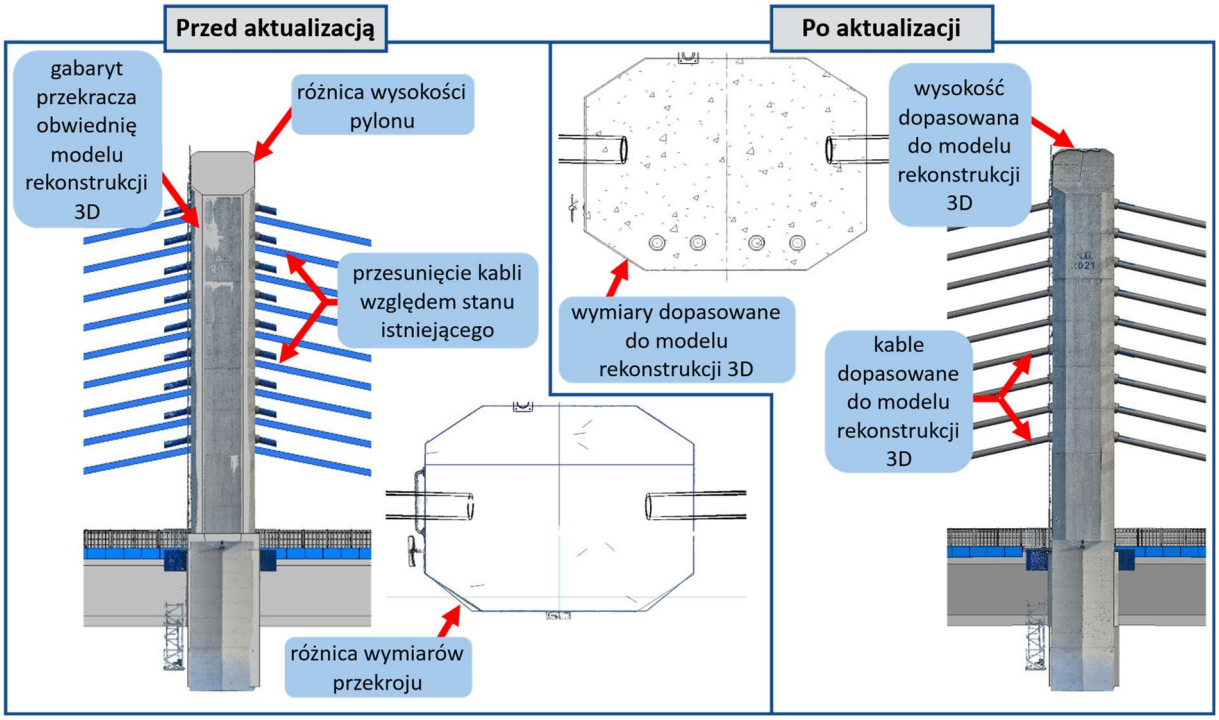
Przykładem tworzenia takiego modelu od podstaw była rekonstrukcja 3D mostu kratowego w Zatorze. Na podstawie gęstej chmury punktów odwzorowano w programie Tekla Structures pełną geometrię elementów kratownicy, w tym prętów, węzłów i stężeń, tworząc model bryłowy przeznaczony do dalszych analiz eksperckich i projektowych. Istotną obserwacją było to, iż ze względu na wymaganą milimetrową dokładność przy określaniu grubości profili stalowych, konieczna była kalibracja danych z chmury punktów przy pomocy bezpośrednich pomiarów terenowych. Na Rys. 5-40 przedstawiono model bryłowy mostu w Zatorze wraz z przykładowym przekrojem poprzecznym pokazującym relację między modelem a chmurą punktów.



Rys. 5-40 Tworzenie modelu bryłowego mostu kratowego w Zatorze

W przypadku posiadania pierwotnych modeli BIM możliwe było wykonanie ich weryfikacji względem stanu faktycznego oraz kalibracji na podstawie utworzonych chmur punktów. Proces ten przeprowadzono m.in. w programie Revit dla mostu w Kurowie, gdzie dostępny model poddano rygorystycznej kontroli.

Analiza porównawcza wykazała szereg rozbieżności, obejmujących różnice w wymiarach przekrojów poprzecznych, błędy w rzędnych wysokościowych oraz nieprawidłowe usytuowanie kabli przechodzących przez konstrukcję pylonu. Proces aktualizacji modelu, przedstawiający stan przed dopasowaniem oraz model skorygowany na podstawie chmury punktów, pokazano na Rys. 5-41.



Rys. 5-41 Proces aktualizacji modelu BIM mostu w Kurowie

Przedstawione działania stanowią bezpośredni krok w kierunku wdrożenia metodyki Scan-to-BIM w diagnostyce i zarządzaniu obiektami mostowymi. Należy jednak podkreślić, że obecny etap rozwoju technologii charakteryzuje się bardzo wysoką pracochłonnością na etapie modelowania. Mimo zaawansowania algorytmów rejestracji danych, etap semantycznej interpretacji chmury punktów i przekształcania jej w „inteligentne" obiekty parametryczne wciąż opiera się w dużej mierze na manualnej pracy inżyniera. Dlatego tak istotny dla branży jest dalszy rozwój narzędzi do automatycznego przetwarzania danych 3D. Pełna automatyzacja tworzenia modeli bryłowych pozwoliłaby znacząco ograniczyć czasochłonność prac biurowych, która obecnie stanowi jedno z ograniczeń w szerszym wdrażaniu modeli BIM dla istniejącej infrastruktury.

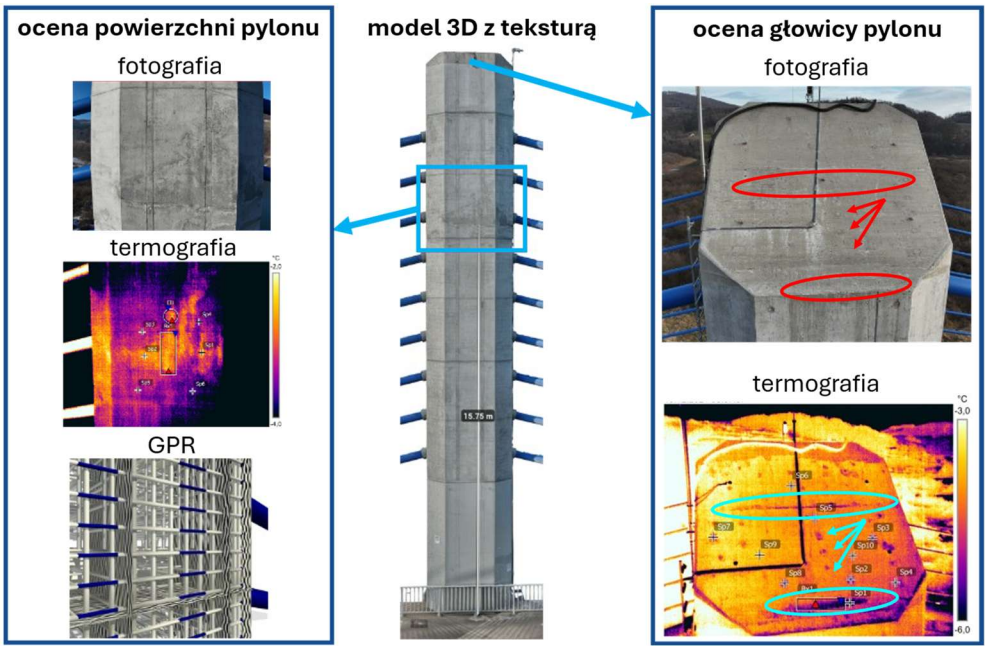
5.6.3 Rodzaje i charakterystyka opracowanych modeli 3D

W wyniku przeprowadzonych procesów przetwarzania i integracji danych opracowano kilka typów cyfrowych reprezentacji 3D, różniących się poziomem szczegółowości, strukturą danych, dokładnością geometryczną oraz przeznaczeniem diagnostycznym. Poszczególne modele nie stanowią rozwiązań konkurencyjnych, lecz uzupełniające się warianty reprezentacji tej samej konstrukcji, dostosowane do różnych etapów analizy i potrzeb inżynierskich:

- **Chmura punktów** – podstawowa reprezentacja przestrzenna obiektu, zawierająca zbiór punktów 3D o określonych współrzędnych. Stanowi bezpośredni wynik skanowania laserowego lub fotogrametrii i jest najbliższa surowym danym pomiarowym. Brak ciągłej powierzchni utrudnia interpretację wizualną, dlatego model ten wykorzystywany jest przede wszystkim w analizach geometrycznych i kalibracyjnych.
- **Model siatkowy** – ciągła powierzchnia zbudowana z siatki trójkątów. W porównaniu z chmurą punktów jest bardziej intuicyjny w odbiorze i umożliwia czytelne przedstawienie

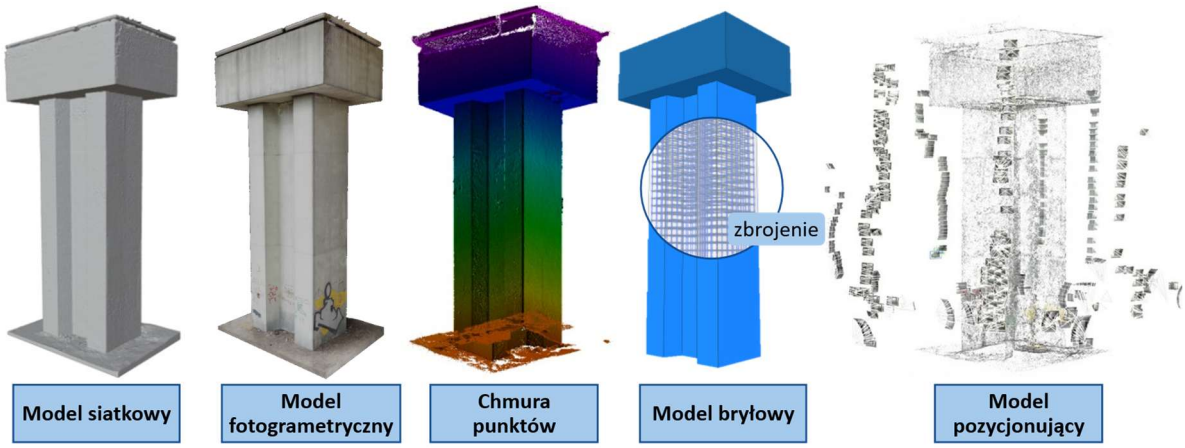
formy bryły. Jego generowanie jest jednak procesem czasochłonnym, a bez nałożonej tekstury nie dostarcza pełnej informacji o stanie powierzchni.

- **Model fotogrametryczny** (model siatkowy z teksturą) – najbardziej zaawansowana wizualnie forma modelu. Powstaje poprzez nałożenie wysokorozdzielczych zdjęć na geometrię modelu siatkowego. Stanowi kluczowe narzędzie w analizie uszkodzeń powierzchniowych, łącząc wysoką precyzję geometryczną z czytelną informacją wizualną. Ograniczeniem jest wysoka pracochłonność przetwarzania oraz utrudnione dzielenie się wynikami.
- **Model bryłowy** – uproszczona, parametryczna reprezentacja obiektu. Oprócz odwzorowania geometrii zewnętrznej może zostać wzbogacony o dane niejawne, takie jak informacje o zbrojeniu, wynikach badań diagnostycznych czy parametrach materiałowych. Stanowi podstawę budowy wielowarstwowego modelu informacyjnego BIM. Głównym ograniczeniem jest konieczność stosowania uproszczeń geometrycznych oraz wysoka pracochłonność modelowania manualnego wynikająca z braku skutecznych narzędzi automatycznego przetwarzania.
- **Model pozycjonujący** (indeksujący) – uproszczona bryła o niskiej rozdzielczości, służąca jako przestrzenny nośnik dla tysięcy zdjęć inspekcyjnych. Umożliwia szybkie odnalezienie źródłowych zdjęć poprzez interakcję z modelem 3D. Nie jest przeznaczony do analiz geometrycznych, lecz do organizacji i zarządzania informacją.
- **Modele hybrydowe** – zestawienia wielowarstwowe, łączące np. surową chmurę punktów lub teksturę fotogrametryczną z modelem bryłowym. Pozwalają one na jednoczesną pracę na danych o różnym stopniu szczegółowości, zależnie od aktualnych potrzeb eksperckich. Szczególnym przypadkiem takiego modelu jest integracja wyników badań NDT betonu z modelem bryłowym lub fotogrametrycznym (Rys. 5-42). Tworząc kolejne warstwy diagnostyczne modelu.



Rys. 5-42 Integracja danych z badań NDT betonu

W Tab. 5-7 przedstawiono syntetyczne porównanie poszczególnych modeli pod kątem: poziomu dokładności, zalet, ograniczeń oraz zastosowania diagnostycznego. Na Rys. 5-43 przedstawiono wizualne zestawienie wymienionych typów modeli na przykładzie filara wiaduktu w Chorzowie.



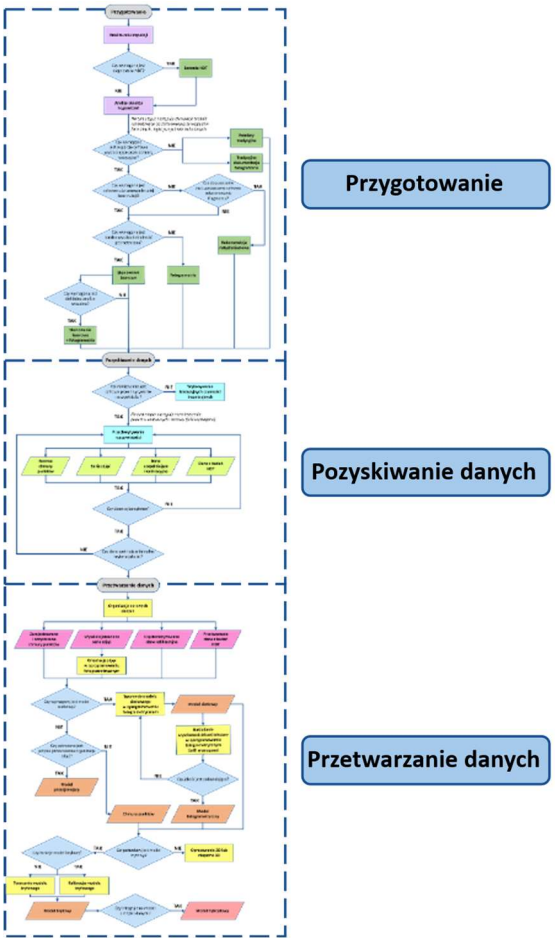
Rys. 5-43 Uzyskane typy modeli 3D

Tab. 5-7 Charakterystyka opracowanych modeli 3D w procesie cyfrowego odwzorowania

Typ modelu	Dokładność	Zalety	Ograniczenia	Zastosowanie diagnostyczne
Chmura punktów	Bardzo wysoka geometrycznie	Wysoka wiarygodność i precyzja geometryczna	Trudna interpretacja wizualna	Analizy geometryczne, pomiary przemieszczeń, kalibracja modeli
Model siatkowy	Wysoka geometrycznie	Intuicyjna wizualizacja formy	Brak informacji wizualnej i duża pracochłonność	Analiza kształtu i geometrycznych wad powierzchniowych
Model fotogrametryczny	Wysoka geometrycznie i bardzo wysoka wizualnie	Fotorealizm i czytelność detali	Duża pracochłonność i utrudniona kooperacyjność	Szczegółowa inspekcja wizualna i geometryczna
Model bryłowy	Średnia	Struktura parametryczna, integracja z BIM	Uproszczenia i manualne tworzenie	Scan-to-BIM, analizy projektowe
Model pozycjonujący	Niska	Szybka nawigacja po bazie zdjęć	Brak precyzji geometrycznej	Organizacja inspekcji wizualnej
Model hybrydowy	Zróżnicowana	Efekt synergii różnych danych	Złożoność struktury modelu	Kompleksowa ocena stanu obiektu

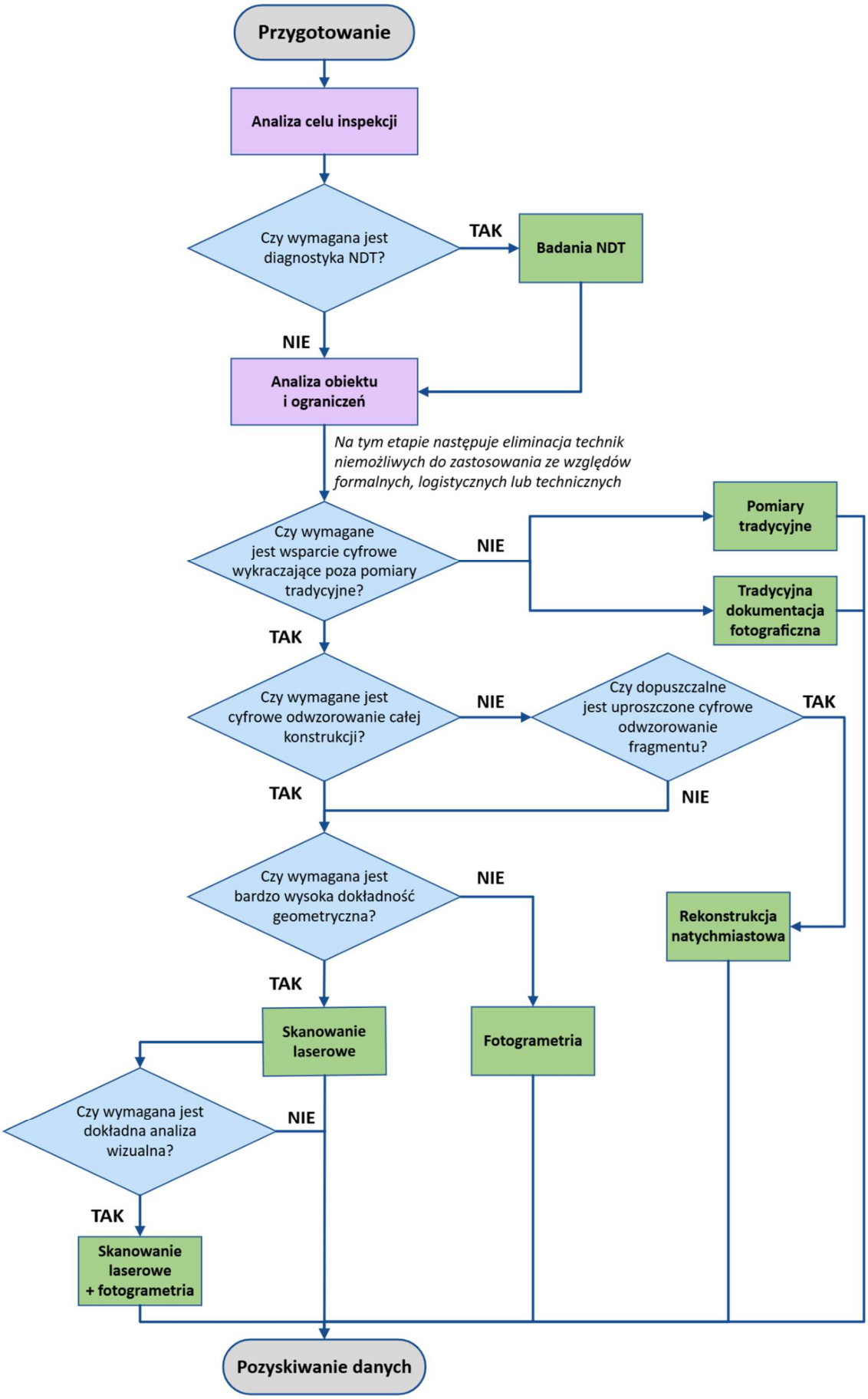
5.7 Scenariusze pracy inspektora na etapie cyfrowego odwzorowania

Podsumowaniem rozdziału dotyczącego procesu cyfrowego odwzorowania obiektów mostowych jest rozbudowany schemat blokowy, stanowiący syntezę doświadczeń zebranych podczas prac badawczych. Pełni on rolę praktycznego przewodnika dla inspektora w formie logicznego ciągu decyzji, od etapu przygotowania, poprzez pozyskiwanie danych, aż do przetwarzania i uzyskania określonej postaci modelu 3D. Jest to uporządkowany algorytmem postępowania, odzwierciedlający rzeczywiste scenariusze pracy w warunkach terenowych i biurowych. Całościowy widok schematu blokowego z wyszczególnionymi trzema głównymi fazami przedstawiono na Rys. 5-44.



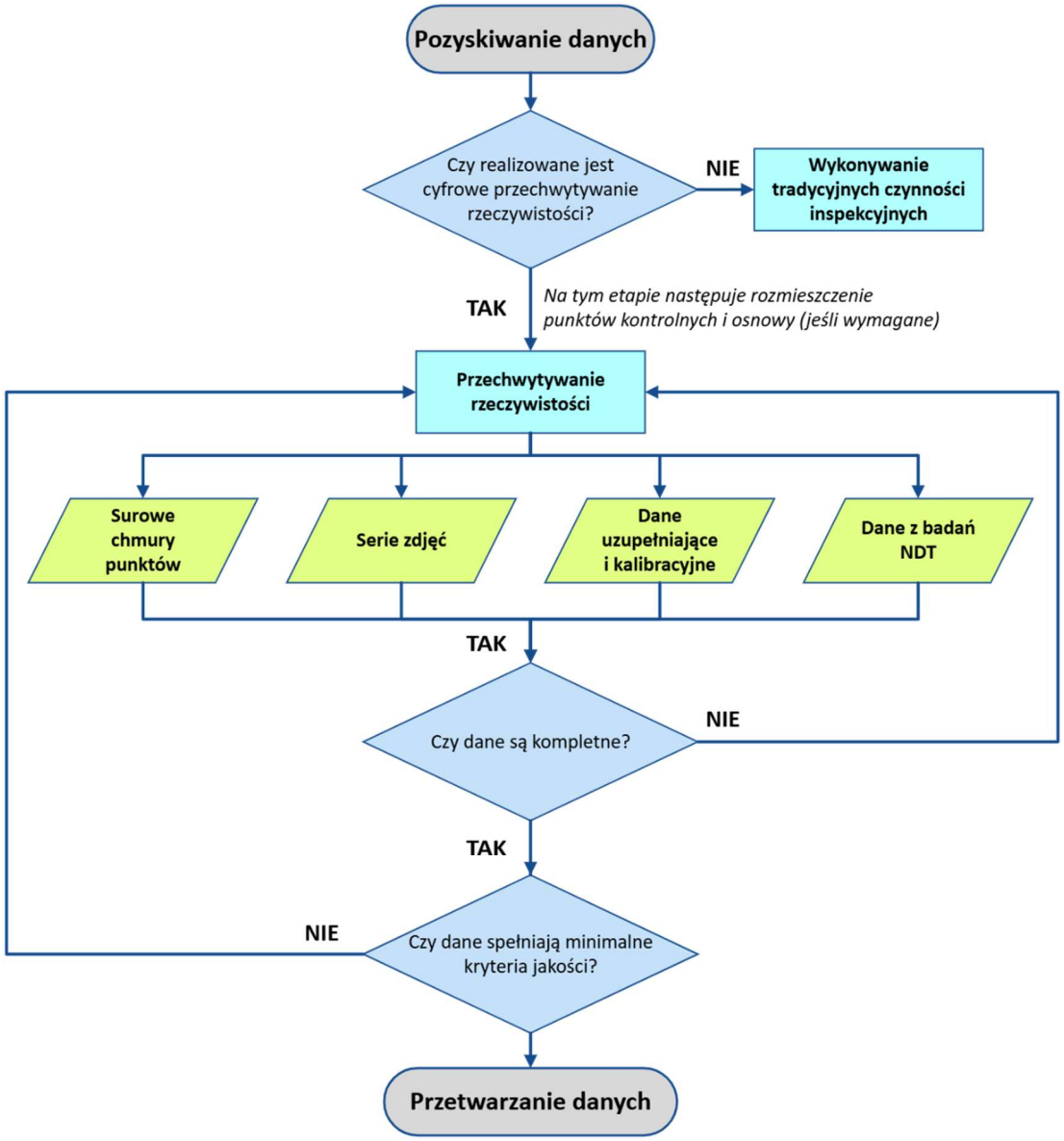
Rys. 5-44 Schemat blokowy obejmujący scenariusze pracy inspektora na etapie cyfrowego odwzorowania. Widok ogólny obejmujący przygotowanie (1), pozyskiwanie (2) i przetwarzanie (3).

Pierwsza z faz dotyczy przygotowania do prac terenowych opisanych w pkt. 5.4 i kończy się doborem konkretnych technik użytych w zadaniu. W schemacie założono, że cyfrowe przechwytywanie rzeczywistości nie jest rozwiązaniem obligatoryjnym, lecz jedną z możliwych ścieżek działania. Proces zawsze rozpoczyna się od analizy celu inspekcji oraz ograniczeń obiektu, co prowadzi do wstępnej kwalifikacji technik i ewentualnej eliminacji tych, których zastosowanie jest nieuzasadnione formalnie, logistycznie lub technicznie. Dopiero w przypadku stwierdzenia potrzeby wsparcia cyfrowego uruchamiana jest ścieżka obejmująca skanowanie laserowe, fotogrametrię, ich integrację bądź rekonstrukcję uproszczoną. W schemacie zachowano również miejsce dla pomiarów tradycyjnych, dokumentacji fotograficznej oraz badań NDT. Szczegółowy schemat tej fazy przedstawiono na Rys. 5-45.



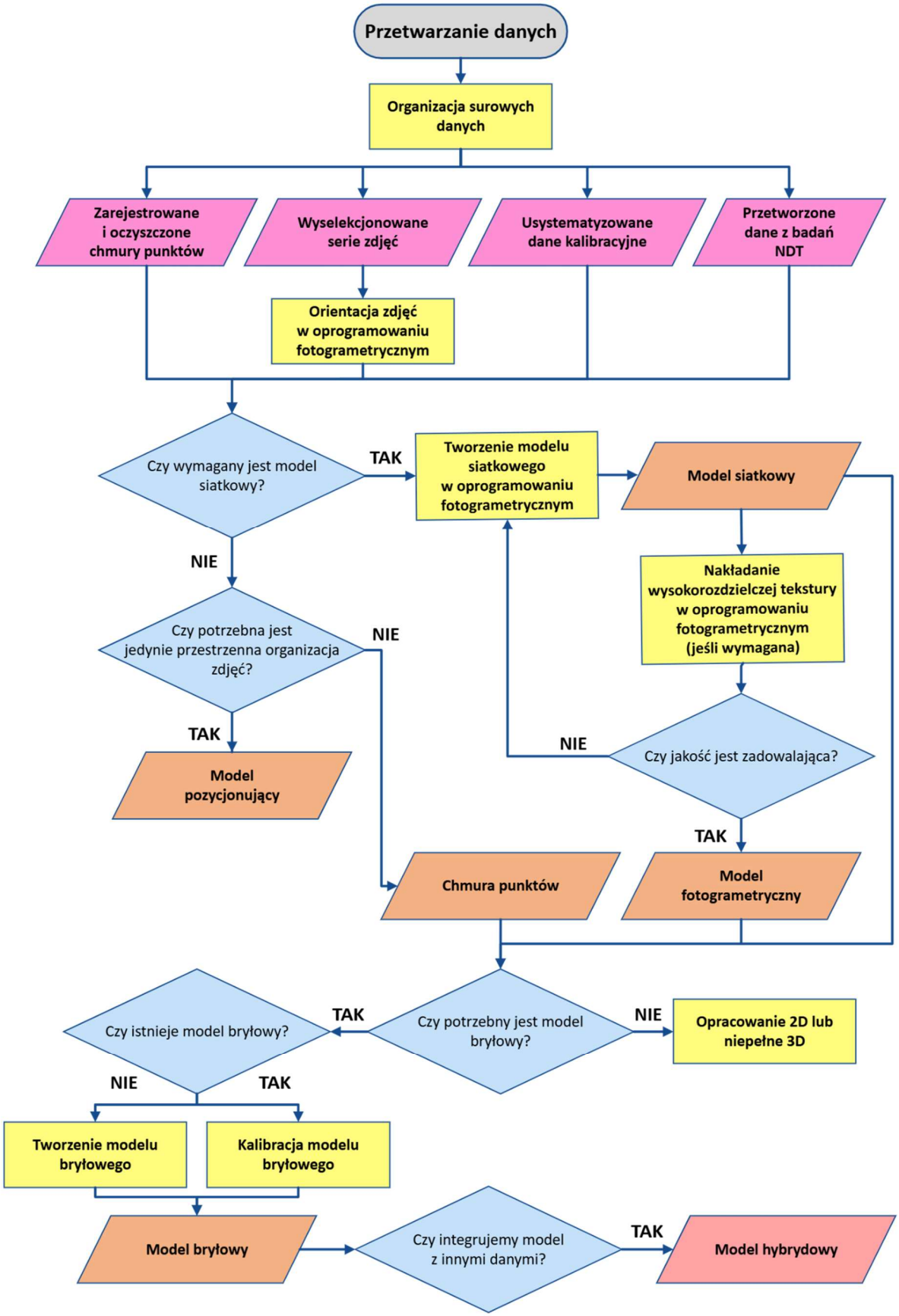
Rys. 5-45 Schemat blokowy dotyczący przygotowania badań przez inspektora w ramach cyfrowego odwzorowywania

Druga faza dotyczy pozyskiwania danych w terenie opisanych w pkt. 0. Istotnym elementem algorytmu jest wyraźne podkreślenie iteracyjnego charakteru przetwarzania danych. Weryfikacja kompletności i jakości danych stanowi warunek przejścia do dalszych etapów modelowania, co akcentuje zależność końcowej jakości modelu od poprawności procesu pomiarowego. Schemat nie rozbudowuje szczegółowych operacji technologicznych, lecz wskazuje kluczowe punkty decyzyjne determinujące wybór dalszej ścieżki postępowania. Szczegółowy schemat tej fazy przedstawiono na Rys. 5-46.



Rys. 5-46 Schemat blokowy dotyczący pozyskiwania danych przez inspektora w ramach cyfrowego odwzorowywania

Końcowa część algorytmu dotyczy przetwarzania danych w warunkach biurowych opisanych w pkt. 5.6. Podobnie jak etap pozyskiwania, również przetwarzanie ma charakter iteracyjny, a dążenie do poprawy jakości modelu może skutkować koniecznością uzupełnienia danych pomiarowych w terenie. Schemat obrazuje, że w wyniku przetwarzania mogą powstać różne reprezentacje cyfrowe (pkt 5.6.3), od chmury punktów i modelu pozycjonującego, przez model siatkowy i fotogrametryczny, aż po model bryłowy i modele hybrydowe. Szczegółowy schemat tej fazy przedstawiono na Rys. 5-47.



Rys. 5-47 Schemat blokowy dotyczący przetwarzania danych przez inspektora w ramach cyfrowego odwzorowywania

Rozdział 5 potwierdza, że cyfrowe odwzorowanie obiektów mostowych nie jest pojedynczą czynnością techniczną, lecz uporządkowanym procesem obejmującym przygotowanie, pozyskiwanie, przetwarzanie oraz wykorzystanie danych (pkt 5.1.3). Zachowanie tej sekwencji ma kluczowe znaczenie dla końcowej jakości modeli. Zaniedbania, szczególnie na etapie przygotowania i planowania misji pomiarowej, mogą prowadzić do powstania modeli o ograniczonej przydatności diagnostycznej, co ilustruje przykład obiektu w Bratysławie.

Na etapie przygotowania i pozyskiwania danych kluczowe jest, aby dobór techniki przechwytywania rzeczywistości wynikał bezpośrednio z celu inspekcji, a nie z dostępności technologii. Oczekiwany rezultat, czy będzie to analiza geometryczna, wizualna, dokumentacyjna czy opracowanie modelu BIM, determinuje wybór metody i zakres prac. Technologia stanowi narzędzie wspierające proces diagnostyczny, a nie jego nadrzędny cel. Równie istotne jest uwzględnienie ograniczeń obiektu, warunków terenowych i organizacyjnych oraz dostępnych zasobów.

Przeprowadzone analizy wskazują również, że nie każda inspekcja wymaga pełnego, wysokorozdzielczego modelu fotogrametrycznego. W obecnym zaawansowaniu technologicznym, przy uwzględnieniu czasu przetwarzania, pracochłonności oraz objętości danych, w wielu przypadkach wystarczająca okazuje się chmura punktów, model pozycjonujący lub uproszczona rekonstrukcja, a niekiedy nawet pomiary tradycyjne uzupełnione dokumentacją fotograficzną. Pełne modele siatkowe i teksturowane powinny być tworzone wówczas, gdy uzasadniają to konkretne potrzeby diagnostyczne. Takie podejście pozwala racjonalnie gospodarować czasem i zasobami obliczeniowymi. Jednocześnie należy podkreślić, że dążenie do generowania kompletnych modeli o wysokiej rozdzielczości, odpowiadających piramidzie wirtualizacji, stanowi kierunek rozwojowy. Wraz z postępem technologii, automatyzacją przetwarzania oraz zwiększeniem mocy obliczeniowej można oczekiwać, że w przyszłości tworzenie rozbudowanych modeli fotogrametrycznych stanie się dla wielu obiektów standardem, a obecne ograniczenia organizacyjne i czasowe będą miały mniejsze znaczenie.

Wyniki badań jednoznacznie potwierdzają komplementarność skanowania laserowego i fotogrametrii. Skanowanie laserowe zapewnia wysoką precyzję geometryczną oraz stabilne odwzorowanie krawędzi i płaszczyzn, natomiast fotogrametria dostarcza wysokiej jakości tekstur i informacji wizualnej niezbędnej do identyfikacji uszkodzeń powierzchniowych. Integracja obu metod prowadzi do uzyskania najbardziej kompletnych modeli diagnostycznych, łączących dokładność geometryczną z czytelnością detali. Przeprowadzone weryfikacje wykazały, że dokładność odpowiednio przygotowanych modeli jest wystarczająca do prowadzenia inspekcji w środowisku wirtualnym.

Bardzo pracochłonnym etapem pozostaje budowa modeli bryłowych w ramach podejścia Scan-to-BIM. Przekształcenie chmury punktów w semantyczny, parametryczny model wymaga nadal znacznego nakładu pracy inżynierskiej. Rozwój narzędzi automatycznej ekstrakcji cech i rozpoznawania elementów konstrukcyjnych stanowi warunek konieczny dla szerszego wdrażania modeli informacyjnych istniejących obiektów mostowych.

Istotnym wnioskiem jest także to, że modele 3D nie powinny być traktowane wyłącznie jako efektowna wizualizacja. Ich zasadniczą funkcją jest pełnienie roli nośnika informacji diagnostycznej. Integracja geometrii, tekstury oraz danych z badań nieniszczących przekształca model w platformę analityczną wspierającą proces podejmowania decyzji w zakresie utrzymania i zarządzania obiektami mostowymi.

Cyfrowe odwzorowanie należy postrzegać jako elastyczny scenariusz działania. Największą wartością nie jest sama technologia, lecz umiejętne zarządzanie procesem i wybór odpowiedniego scenariusza adekwatnego do rzeczywistych potrzeb diagnostycznych. Poprawnie wykonane cyfrowe odwzorowanie, zweryfikowane pod kątem geometrycznym i wizualnym, stanowi fundament do wdrożenia Poziomu 4 piramidy wirtualizacji, czyli Wirtualnej inspekcji obiektu, co zostanie omówione w Rozdziale 6.

6 Inspekcja w środowisku wirtualnym

6.1 Proces inspekcji w środowisku wirtualnym

6.1.1 Usytuowanie procesu w piramidzie wirtualizacji

Inspekcja obiektów mostowych w środowisku wirtualnym odpowiada Poziomowi 4 autorskiego modelu piramidy wirtualizacji, przedstawionego w pkt. 4.2. Etap ten wyznacza przejście od cyfrowego odwzorowania obiektu (Poziom 3 opisany w rozdziale 5) do środowiska umożliwiającego realizację zasadniczych czynności inspekcyjnych w bezpiecznych warunkach biurowych, z wykorzystaniem narzędzi analitycznych i dokumentacyjnych dostępnych w środowisku wirtualnym. W odróżnieniu od działań na Poziomie 5 (automatyczna detekcja uszkodzeń), interpretacja danych i identyfikacja uszkodzeń pozostają manualne i zależne od doświadczenia inspektora, a narzędzia cyfrowe pełnią rolę wspomagającą.

Poziom ten stanowi zatem przejście od gromadzenia danych do ich inżynierskiej konsumpcji. Wirtualna inspekcja nie jest już tylko wizualizacją geometrii, lecz usystematyzowanym procesem, mającym na celu identyfikację uszkodzeń, ocenę stanu technicznego oraz przeprowadzenie wirtualnych pomiarów bez konieczności fizycznej obecności inspektora na obiekcie mostowym. Przeniesienie tych działań do środowiska cyfrowego ogranicza zależność od warunków terenowych i dostępności obiektu, a jednocześnie tworzy spójny pomost do wdrażania rozwiązań z wyższych poziomów piramidy, w tym metod automatyzujących analizę oraz elementów inteligentnego zarządzania infrastrukturą i predykcji.

6.1.2 Dobór środowisk inspekcyjnych

Celem inspekcji w środowisku wirtualnym jest przeniesienie możliwie dużej części czynności analitycznych i dokumentacyjnych do bezpiecznego, kontrolowanego środowiska biurowego. Z tego względu w badaniach skupiono się na dwóch głównych środowiskach inspekcyjnych:

- **Standardowe środowisko komputerowe** (stacje robocze). Prace wykonywane są przy użyciu urządzeń peryferyjnych w postaci klasycznych monitorów ekranowych bądź dotykowych, myszy, manipulatorów oraz klawiatur. Decyzja o uwzględnieniu tego środowiska wynika z możliwości sprawnego przetwarzania i przeglądu zróżnicowanych danych przestrzennych (chmur punktów oraz różnych typów modeli) przy użyciu zaawansowanego oprogramowania inżynierskiego lub platform internetowych. Ponadto, standardowe interfejsy gwarantują możliwości prowadzenia precyzyjnych analiz geometrycznych oraz są powszechnie stosowane w praktyce inspekcyjnej
- **Środowisko immersyjne** (wirtualna rzeczywistość – VR). Wykorzystanie tego środowiska pozwala inspektorowi na pełną immersję, zapewniając naturalne poczucie skali obiektu oraz percepcję głębi. Poruszanie się w wirtualnej przestrzeni umożliwia zaawansowaną wizualizację modelu i tworzy wrażenie bliskie rzeczywistej obecności na obiekcie. Praca w takim środowisku ułatwia orientację przestrzenną, a nawigacja jest bardziej intuicyjna.

Użytkownik może korzystać z naturalnych ruchów, gestów lub komend głosowych, aby przenieść się w wybrane miejsce na modelu.

W ramach badań celowo odrzucono technologie rozszerzonej i mieszanej rzeczywistości (AR i MR). Znajdują się one na wyższym poziomie piramidy wirtualizacji (Poziom 6), co na obecnym etapie, bez uprzedniego zbudowania odpowiedniej bazy technologicznej, stanowiłoby nieuzasadniony metodologiczny przeskok. Ponadto, założeniem badań, zgodnym z Poziomem 4 piramidy, było przeniesienie prac analitycznych do biura, a istota wymienionych technik polega na nakładaniu warstwy cyfrowej na obraz rzeczywistego świata, co wymaga fizycznej obecności inspektora na obiekcie.

Dodatkowo obecne generacje urządzeń AR/MR posiadają istotne ograniczenia sprzętowe, które dyskwalifikują je jako główne narzędzie analityczne do pracy na obiektach mostowych w terenie. Należą do nich przede wszystkim:

- jakość wizualizacji danych cyfrowych silnie uzależniona od warunków zewnętrznych (utrudniona widoczność w skrajnych warunkach oświetleniowych czy niekorzystnych warunkach atmosferycznych);
- problemy z systemami śledzenia przestrzeni w otwartym terenie, spotęgowane zmiennym oświetleniem słonecznym i odblaskami;
- stosunkowo wąskie pole widzenia, które utrudnia globalną ocenę rozległych konstrukcji, zwłaszcza z pewnej odległości.

Wobec powyższych argumentów uznano, że połączenie stacji roboczych ze środowiskiem immersyjnym stanowi obecnie najbardziej odpowiednie i wydajne środowisko do realizacji procedur wirtualnej inspekcji, stanowiąc naturalny kolejny krok w piramidzie wirtualizacji. Nie wyklucza to jednak możliwości wykorzystania przyszłych, już usprawnionych generacji urządzeń AR/MR.0327

6.1.3 Schemat realizacji procesu

Proces inspekcji w środowisku wirtualnym ustrukturyzowano w postaci ciągu logicznych kroków, które odzwierciedlają typowy tok postępowania inspektora w procedurach przeglądowych. Przy czym szczegółowy przebieg procedury każdorazowo zależy od typu obsługiwanych danych oraz skali i specyfiki ocenianego obiektu. Zaproponowany schemat podzielono na pięć etapów, co zilustrowano na Rys. 6-1:

- **Etap 1: Wybór środowiska inspekcyjnego.** Proces rozpoczyna się od wyboru docelowego środowiska pracy (stacji roboczej z platformą internetową lub oprogramowaniem inżynierskim albo środowiska immersyjnego VR). Wybór ten podyktowany jest specyfiką analizowanego obiektu oraz głównym celem przeprowadzanej inspekcji.
- **Etap 2: Dobór i łączenie danych inspekcyjnych**. Do wybranego środowiska wczytywane są dane pozyskane na etapie tworzenia cyfrowego odwzorowania obiektu. Mogą to być m.in. fotogrametryczne modele siatkowe o wysokiej rozdzielczości, zorientowane przestrzennie zdjęcia, fotografie 360°, chmury punktów lub modele bryłowe. Dane te mogą być analizowane oddzielnie lub, jeśli środowisko na to pozwala, równolegle, z wykorzystaniem warstw, filtrów i przezroczystości. Kluczowym aspektem tego etapu jest potwierdzenie

poprawności skali i układu odniesienia oraz ewentualna optymalizacja pod kątem płynności wyświetlania, szczególnie w przypadku VR.

- **Etap 3: Globalna ocena wizualna.** Po pomyślnym załadowaniu danych inspektor przystępuje do ogólnego przeglądu konstrukcji, często w formie wirtualnego spaceru. Celem tego etapu jest zapoznanie się z geometrią obiektu i jego wirtualnym otoczeniem oraz identyfikacja ewentualnych globalnych anomalii. Na podstawie tej oceny typuje się konkretne fragmenty konstrukcji, które będą wymagały bardziej szczegółowej analizy. Na tym etapie mogą być również wstępnie zidentyfikowane miejsca o niedostatecznym pokryciu danymi, co stanowi sygnał do ich ewentualnego uzupełnienia.
- **Etap 4: Szczegółowa inspekcja i pomiary.** W tym etapie inspektor dokonuje wirtualnego zbliżenia do newralgicznych elementów ocenianego obiektu, wytypowanych na podstawie danych wejściowych i oceny globalnej. Wykorzystując dedykowane narzędzia, przeprowadza szczegółową identyfikację uszkodzeń, a w przypadku integracji różnych typów modeli odnosi je do pozostałych warstw informacyjnych. W tym miejscu wykonywane są także pomiary geometryczne, w tym analizy zaawansowane (np. ocena odkształceń lub przemieszczeń elementów konstrukcyjnych), realizowane najczęściej w specjalistycznym oprogramowaniu na stacjach roboczych, z wykorzystaniem precyzyjnych chmur punktów.
- **Etap 5: Dokumentowanie i raportowanie.** Ostatnim krokiem jest ewidencja wykrytych uszkodzeń. Zamiast tradycyjnych notatek inspektor może nanosić przestrzenne znaczniki bezpośrednio na model 3D i przypisywać im metadane w postaci opisów (np. rodzaj i charakterystyka obserwacji, wymiary, ocena), a także materiał ilustracyjny (np. zrzuty ekranu). Zgromadzone w ten sposób informacje mogą być eksportowane z zachowaniem ich lokalizacji przestrzennej, co może stanowić materiał wsadowy do modeli informacyjnych lub systemów gospodarowania obiektami mostowymi.



Rys. 6-1 Schemat realizacji inspekcji w środowisku wirtualnym

Przedstawiony schemat należy traktować jako proces elastyczny i iteracyjny. Jeżeli na etapie wirtualnej inspekcji ujawnią się braki w danych (np. martwe pola, niewystarczająca czytelność fragmentów struktury, błędy skalowania), konieczny może być powrót do etapu tworzenia cyfrowego odwzorowania w celu aktualizacji lub uzupełnienia modelu. Ponadto należy mieć na uwadze, że

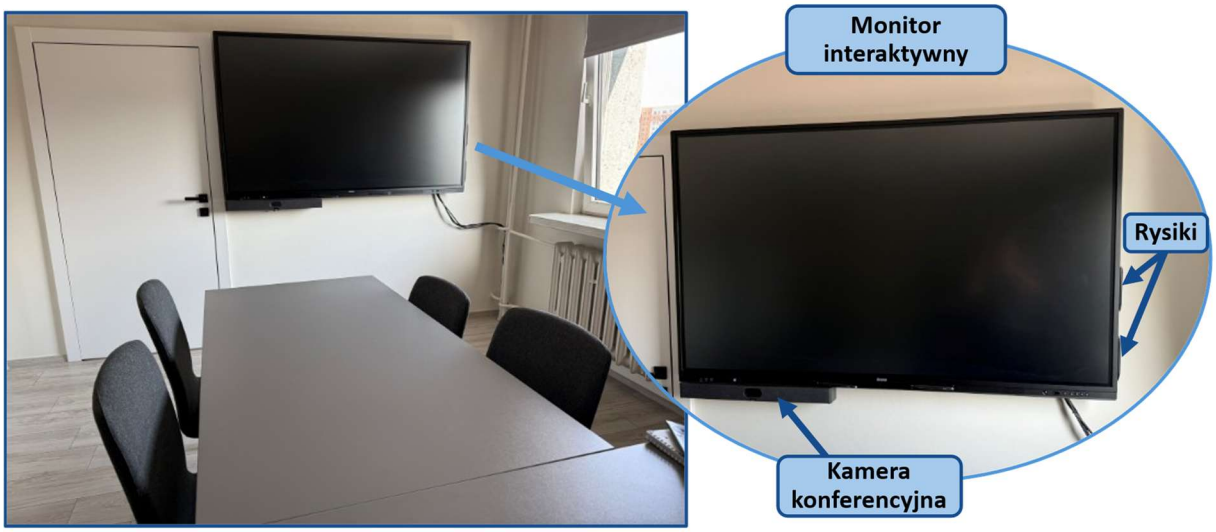
wdrażanie koncepcji wirtualnej inspekcji nie zawsze musi od razu obejmować wszystkie etapy w pełnym zakresie. W praktyce może stanowić uzupełnienie procesu inspekcyjnego realizowanego innymi metodami, zwłaszcza na początkowych etapach adaptacji piramidy wirtualizacji. Dotyczy to m.in. analiz lokalnych wykonywanych na podstawie fragmentarycznych modeli lub chmur punktów, gdzie zakres czynności oraz sposób dokumentowania wyników powinny zostać dostosowane do celu opracowania i dostępnych danych.

6.2 Narzędzia i środowisko badań

6.2.1 Sprzęt

Główny ciężar obliczeniowy związany z obrazowaniem i wizualizacją (z ang. renderowaniem) oraz analizą dużych zbiorów danych przestrzennych spoczywał na wydajnych stacjach roboczych. Dotyczyło to zarówno procesów inspekcyjnych prowadzonych w standardowym środowisku komputerowym, jak i w środowisku immersyjnym. Szczegółową specyfikację jednostek obliczeniowych wykorzystywanych w badaniach przedstawiono w pkt. 5.2.2 (Tab. 5-2). Praca na stanowiskach stacjonarnych odbywała się z użyciem standardowych urządzeń peryferyjnych: monitorów wysokiej rozdzielczości, klawiatur, myszy oraz manipulatorów 3D, ułatwiających precyzyjną nawigację w przestrzeni trójwymiarowej.

Dodatkowo, na potrzeby zespołowej wirtualnej inspekcji w warunkach biurowych, środowisko sprzętowe rozszerzono o 75-calowy monitor interaktywny wyposażony w kamerę konferencyjną, wspomagający pracę grupową (Rys. 6-2). Ekran ten, dysponujący matrycą dotykową obsługiwaną za pomocą dedykowanych rysików, połączono z główną stacją roboczą. Zastosowanie takiego zestawu znacząco ułatwiło wspólną analizę uszkodzeń na modelach 3D oraz prezentację wyników zespołowi projektowemu, zarówno w trybie stacjonarnym, jak i zdalnym.



Rys. 6-2 Środowisko pracy do zespołowej inspekcji wirtualnej

Do analiz w środowisku immersyjnym wykorzystano gogle rzeczywistości wirtualnej firmy Meta, połączone przewodowo (USB-C) ze stacją roboczą za pomocą aplikacji Meta Horizon Link. W początkowej fazie badań stosowano model Meta Quest 2, który następnie zastąpiono nowszą generacją Meta Quest 3. Nowy model odznaczał się znacznie wyższą rozdzielczością, gęstością pikseli

oraz mocą obliczeniową. Zastosowanie soczewek typu Pancake znacząco zredukowało zniekształcenia na brzegach pola widzenia, co w połączeniu z płynną regulacją rozstawu źrenic (ang. Interpupillary Distance, IPD) wyraźnie poprawiło ergonomię pracy w środowisku wirtualnym. Dodatkowo w modelu Quest 3 znacząco poprawiły się funkcje rzeczywistości mieszanej (MR). Ziarnisty, monochromatyczny podgląd rzeczywistego otoczenia z modelu Quest 2 zastąpiono w pełni kolorowym obrazem wysokiej rozdzielczości z aktywnym mapowaniem głębi. Rozwiązanie to pozwala inspektorowi na swobodny i bezpieczny wgląd w fizyczne środowisko biurowe (np. w celu sporządzenia odręcznej notatki czy obsługi klawiatury komputera) bez konieczności zdejmowania urządzenia z głowy. Rozwinięto także funkcje sterowania dłońmi bez kontrolerów dzięki bardziej zaawansowanemu śledzeniu rąk i rozpoznawaniu gestów. Zestawienie kluczowych parametrów obu urządzeń przedstawiono w Tab. 6-1.

Tab. 6-1 Zestawienie kluczowych parametrów technicznych gogli Meta Quest 2 i Meta Quest 3

Parametr	Meta Quest 2	Meta Quest 3
Rok premiery	2020	2023
Procesor	Snapdragon XR2 Gen 1	Snapdragon XR2 Gen 2
Pamięć RAM	6 GB	8 GB
Rozdzielczość	1832 × 1920 px / oko	1832 × 1920 px / oko
Zagęszczenie pikseli	20 PPD (pikseli na stopień)	25 PPD (pikseli na stopień)
Typ soczewek	Soczewki Fresnela	Soczewki typu Pancake
Pole widzenia	ok. 97° H / 93° V	ok. 110° H / 96° V
Regulacja IPD	3-stopniowa (58, 63, 68 mm)	Płynna (53–75 mm)
Podgląd otoczenia	Monochromatyczny (niska jakość)	Kolorowy (wysoka rozdzielczość)
Śledzenie dłoni	Oparte na kamerach IR	Wspierane czujnikiem głębi
Masa urządzenia	ok. 503 g	ok. 515 g

Z uwagi na specyfikę pracy, obejmującą sesje trwające (z przerwami) od kilkudziesięciu minut do kilku godzin podczas tworzenia oprogramowania i sesje inspekcyjne, standardowy zestaw Meta Quest 3 rozbudowano o dedykowane akcesoria. Celem było poprawienie ergonomii i wydłużenie czasu pracy urządzenia. Zastosowano regulowany uchwyt na głowę zintegrowany z dodatkowym akumulatorem oraz wysokoprzepustowe kable umożliwiające przewodowe przesyłanie obrazu z modeli renderowanych na stacji roboczej oraz stałe zasilanie gogli. Graficzne porównanie gogli Meta Quest 2 i 3 wraz z wykorzystanymi akcesoriami przedstawiono na Rys. 6-3.



Rys. 6-3 Gogle VR Meta Quest 2 i 3 wraz z akcesoriami

6.2.2 Oprogramowanie

Na potrzeby inspekcji w środowisku wirtualnym wykorzystano zróżnicowane oprogramowanie, które można podzielić na trzy główne kategorie: komercyjne platformy internetowe umożliwiające import i współdzielenie danych w celu oceny wizualnej, narzędzia deweloperskie do tworzenia autorskiego środowiska VR oraz oprogramowanie inżynierskie do precyzyjnych analiz geometrii.

Platformy internetowe wytypowano jako najbardziej przystępne inżyniersko środowiska do realizacji wirtualnych inspekcji, w szczególności ze względu na możliwość współdzielenia danych za pośrednictwem rozwiązań chmurowych oraz ograniczenie konieczności stosowania wyspecjalizowanego oprogramowania instalowanego lokalnie przez użytkowników. Ułatwia to komunikację pomiędzy uczestnikami procesu (w tym z zarządcami infrastruktury), a także umożliwia zdalny dostęp do modeli bez rozbudowanych wymagań sprzętowych.

Ogólna zasada działania wiodących platform jest zbliżona: umożliwiają one płynne wyświetlanie obszernych modeli fotogrametrycznych lub chmur punktów bezpośrednio w oknie przeglądarki internetowej, często integrując model 3D z przeglądarką zorientowanych przestrzennie zdjęć wysokiej rozdzielczości. Oprogramowanie to pozwala również na nanoszenie adnotacji i znaczników uszkodzeń bezpośrednio na geometrię obiektu. Przeglądarki tego typu stanowią obecnie najszybciej rozwijający się segment narzędzi do wirtualnej inspekcji. Spośród dostępnych na rynku rozwiązań, w ramach prac badawczych, dzięki licencjom testowym użyczonym przez producentów, przeanalizowano trzy wybrane platformy:

- gNext – amerykańska platforma analityczna dedykowana infrastrukturze, kładąca duży nacisk na integrację danych z bezzałogowych statków powietrznych (UAV). Narzędzie oferuje funkcje pomiarowe i automatyczne generowanie raportów oraz eksport danych do popularnych formatów (np. LAS, OBJ). W testach na dostępnych modelach wykazywało nieco niższą płynność działania niż pozostałe rozwiązania oraz mniej intuicyjną obsługę zdjęć zorientowanych w przestrzeni.
- Twinspect – platforma stworzona przez niemiecką firmę Twinsity, stanowiąca zaawansowane oprogramowanie do obsługi fotogrametrycznych modeli konstrukcji. Jej wyróżnikiem jest rozwijany moduł wsparcia analizy oparty na metodach sztucznej inteligencji, umożliwiający automatyczną detekcję niektórych typów uszkodzeń (np. rys, ubytków), Jednocześnie,

podobnie jak w przypadku gNext, w testach zauważalne były ograniczenia wydajnościowe w zakresie renderowania i płynności interakcji przy bardziej złożonych scenach. Rozbudowany interfejs i funkcjonalność wiążą się również z wyższymi kosztami licencyjnymi.

- Nira.app – elastyczna platforma do przeglądania i kolaboracji nad dużymi zbiorami danych 3D. Oprogramowanie to wyróżnia się autorskim silnikiem renderującym, który pozwala na natychmiastowe (bezstratne) ładowanie oraz niezwykle płynną nawigację po obszernych chmurach punktów i modelach siatkowych składających się z setek milionów trójkątów oraz tysięcy zdjęć.

Ostatecznie, po przeprowadzeniu testów porównawczych, do pełnego zakresu badań i analiz wybrano platformę Nira. Decyzję tę podyktowały bezkonkurencyjna płynność obsługi (kluczowa przy złożonych modelach obiektów mostowych), korzystna oferta cenowa oraz pełna, natywna integracja z oprogramowaniem RealityCapture, wykorzystywanym na etapie cyfrowego odwzorowania obiektu, które posiada wbudowaną funkcję bezpośredniego eksportu danych do chmury Nira. Na Rys. 6-4 przedstawiono interfejs platform Twinspect i gNext na przykładzie demonstracyjnych modeli udostępnionych przez producentów. Szczegółowy opis obsługi, interfejsu oraz funkcjonalności platformy Nira w kontekście badań własnych zostanie przedstawiony w pkt. 6.3.



Rys. 6-4 Interfejs platform Twinspect i gNext (modele demonstracyjne producentów)

W związku z ograniczoną dostępnością i funkcjonalnością komercyjnego oprogramowania dedykowanego inspekcji mostów w środowisku w pełni immersyjnym, podjęto decyzję o opracowaniu autorskiej aplikacji VR (opisanej szczegółowo w pkt. 6.4). W charakterze rozwiązań referencyjnych dla tego zadania testowano gotowe nakładki i przeglądarki VR (takie jak BIMXplorer oraz SimLab). Pozwalają one na szybką eksplorację modeli bryłowych w goglach, jednak posiadają ograniczone możliwości w zakresie importu niestandardowych danych (np. modeli fotogrametrycznych) oraz zaawansowanej interakcji z nimi.

W celu utworzenia własnego rozwiązania konieczne było wykorzystanie narzędzi deweloperskich. Głównym środowiskiem pracy był silnik gier Unity (ang. game engine). Jest to wieloplatformowe środowisko programistyczne do tworzenia interaktywnych aplikacji 2D/3D (w tym symulacji i środowisk VR/AR), dysponujące zaawansowaną obsługą renderowania, animacji i integracji z zewnętrznymi urządzeniami wejścia i wyjścia (m.in. goglami Meta Quest). Unity posłużyło do budowy wirtualnych scen, lokalizacji w nich obiektów oraz tworzenia architektury aplikacji. Skrypty sterujące zachowaniem programu importowano z dostępnych bibliotek oraz pisano w języku C# przy użyciu środowiska Visual Studio. Należy podkreślić, że zaimportowanie modeli siatkowych złożonych z wielu milionów komponentów bezpośrednio do silnika Unity (wymagającego optymalizacji pod kątem mobilnych układów graficznych gogli VR) było utrudnione bez ich uprzedniej obróbki. Do weryfikacji geometrii oraz tzw. retopologii (procesu redukcji liczby wielokątów przy jednoczesnym zachowaniu wizualnej szczegółowości) wykorzystywano oprogramowanie graficzne Blender.

Niezależnie od platform internetowych i środowiska immersyjnego, w analizach geometrii i weryfikacji danych przestrzennych stosowano standardowe oprogramowanie inżynierskie dedykowane pracy na chmurach punktów i modelach 3D (np. narzędzia do przeglądu, przekrojów, pomiarów i porównań). Dobierano je w zależności od specyfiki badanego przypadku, wykorzystano m.in. Autodesk ReCap, Revit, AutoCAD czy Trimble Connect. Rolą tych narzędzi było uzupełnienie opisanych wcześniej środowisk (nastawionych głównie na ocenę wizualną) o funkcje analityczne typowe dla pracy inżynierskiej na danych przestrzennych, w szczególności tam, gdzie wymagane były pomiary o podwyższonej precyzji lub analiza lokalnych cech geometrycznych.

6.3 Wirtualna inspekcja w środowisku komputerowym

6.3.1 Wizualna ocena stanu technicznego na dedykowanej platformie

6.3.1.1 Charakterystyka środowiska i dane wejściowe

Jak wykazano w podrozdziale 6.2.2, na podstawie przeprowadzonych analiz porównawczych dostępnych rozwiązań komercyjnych, głównym środowiskiem wytypowanym do realizacji wirtualnej inspekcji wizualnej w środowisku komputerowym została platforma Nira. Zgodnie z wcześniej przedstawioną charakterystyką, stanowi ona zaawansowane narzędzie do analizy i współdzielenia dużych zbiorów danych 3D. Kluczowym atutem tego rozwiązania jest autorski silnik renderujący, zapewniający szybkie ładowanie i płynną nawigację po rozbudowanych modelach. Istotna była również integracja z oprogramowaniem fotogrametrycznym RealityCapture, umożliwiająca bezpośredni eksport wygenerowanych modeli na serwery platformy z użyciem pojedynczego polecenia.

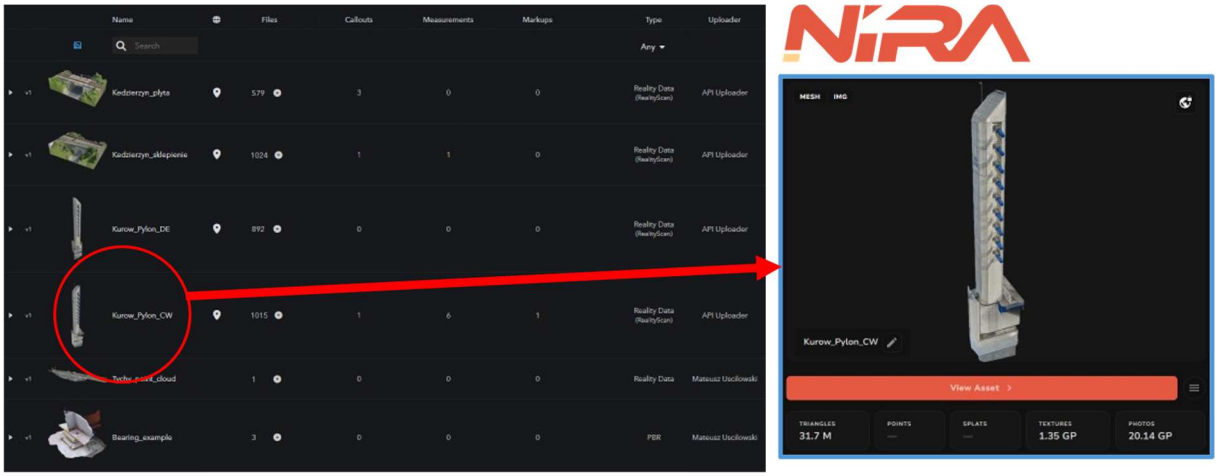
Środowisko umożliwia obsługę zróżnicowanych typów danych przestrzennych. Podstawowym materiałem wsadowym poddawanym analizie wizualnej były modele siatkowe z nałożonymi teksturami (modele fotogrametryczne), opracowane na etapie cyfrowego odwzorowania obiektu i przestrzennie powiązane z oryginalnymi, zorientowanymi zdjęciami wysokiej rozdzielczości. Platforma oferuje wsparcie dla chmur punktów, które również importowano do środowiska, jednak z uwagi na ograniczone narzędzia analityczne do ich obsługi w przeglądarce, funkcja ta znalazła zastosowanie głównie w szybkim udostępnianiu surowych danych innym uczestnikom procesu. W ramach prac badawczych testowano także import modeli bryłowych zapisanych w formacie FBX. Jednakże rozwiązanie to okazało się nieadekwatne dla tego typu plików, zarówno pod względem funkcjonalności, jak i jakości renderowania. Pierwotnie środowisko wspierało również otwarty standard wymiany danych IFC, jednak w wyniku aktualizacji i przebudowy architektury platformy przez producenta, możliwość ta została czasowo zawieszona.

Warunkiem użyteczności danych w wirtualnej inspekcji oraz ich poprawnego importu na platformę Nira jest zachowanie właściwej skali oraz nadanie jednoznacznego odniesienia przestrzennego w zdefiniowanym układzie geodezyjnym. Konieczne było zatem restrykcyjne dotrzymanie tych wymogów już na etapie przetwarzania danych. Ponadto doświadczenia zebrane podczas wirtualnej inspekcji potwierdziły również istotną zasadę optymalizacji (retopologii) modeli siatkowych: najwyższą jakość wizualną, niezbędną do identyfikacji detali i mikrouszkodzeń, osiąga się poprzez maksymalizację rozdzielczości (gęstości) samych tekstur, a nie poprzez nieograniczone zwiększanie liczby trójkątów siatki. Zastosowanie siatki o zoptymalizowanej gęstości, pokrytej wysokorozdzielczą teksturą, pozwala zachować czytelność detali, odciążając jednocześnie silnik renderujący w przeglądarce.

Przydatność platformy chmurowej jest również ściśle powiązana z jej elastycznym systemem opłat. W przeciwieństwie do tradycyjnego oprogramowania, opłata za licencję nie jest zależna od liczby stanowisk, lecz od rodzaju i objętości przetrzymywanych danych. Obciążenie przestrzeni roboczej wyceniane jest na podstawie pięciu głównych wskaźników pojemnościowych:

- liczby trójkątów w modelach siatkowych (wyrażanej w milionach),
- liczby punktów w chmurach punktów (wyrażanej w milionach),
- liczby elementów w modelach uzyskanych na bazie trójwymiarowego rozmycia Gaussa (ang. 3D Gaussian Splatting), tzw. splatów (ang. splats) (wyrażanej w milionach),
- sumarycznej rozdzielczości tekstur nałożonych na modele (wyrażanej w gigapikselach),
- sumarycznej rozdzielczości wgranych zdjęć źródłowych (wyrażanej w gigapikselach).

Taki system rozliczeń wymusza na inżynierze świadome zarządzanie rozmiarem danych eksportowanych do środowiska wirtualnego, promując wspomnianą wcześniej optymalizację geometrii na rzecz jakości tekstur. Na Rys. 6-5 przedstawiono interfejs startowy platformy obejmujący dostępne modele wraz z podstawowymi informacjami dotyczącymi m.in. typu danych, wielkości modelu, statusu inspekcji oraz liczby wykonanych pomiarów i adnotacji.

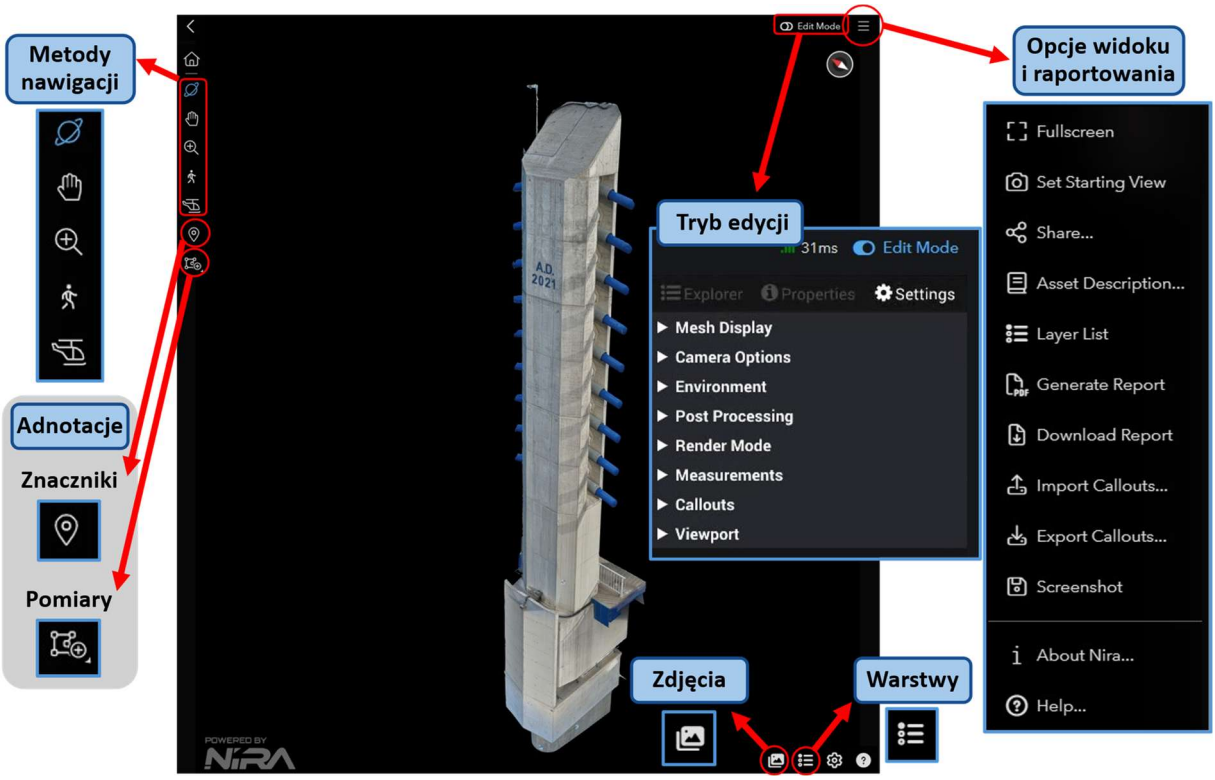


Rys. 6-5 Interfejs startowy platformy Nira

6.3.1.2 Interfejs użytkownika i zakres funkcji

Interfejs użytkownika platformy Nira.app został zaprojektowany w sposób minimalistyczny, co pozwala na maksymalizację obszaru roboczego przeznaczonego na wizualizację modelu 3D. Przejrzysty układ narzędzi, którego zestawienie zaprezentowano na Rys. 6-6, sprzyja intuicyjnej pracy w środowisku wirtualnym. Nawigacja w przestrzeni trójwymiarowej realizowana jest w sposób płynny, niezależnie od skali i stopnia złożoności wczytanego obiektu. Obsługa środowiska możliwa jest zarówno za pomocą standardowych urządzeń peryferyjnych (mysz, klawiatura, monitor), jak i ekranów dotykowych. Platforma udostępnia pięć zróżnicowanych metod nawigacji (m.in. tryb orbitalny i tryb pierwszoosobowy), pozwalając na precyzyjne dostosowanie ruchu kamery do specyfiki analizowanego fragmentu konstrukcji. Panel warstw umożliwia zarządzanie widocznością poszczególnych komponentów modelu oraz grup adnotacji.

Dostępne są również dodatkowe opcje dotyczące widoku i raportowania obejmujące m.in.: uruchomienie trybu pełnoekranowego, bezpieczne udostępnianie obszaru inspekcyjnego użytkownikom zewnętrznym, generowanie i pobieranie ustrukturyzowanych raportów PDF oraz import/eksport bazy zidentyfikowanych uszkodzeń. Osobną grupę stanowią zaawansowane narzędzia renderowania, dostępne po uruchomieniu trybu edycji. W tym trybie inspektor uzyskuje dostęp do panelu ustawień, pozwalającego na precyzyjną kontrolę nad sposobem wyświetlania modelu. Obejmuje to konfigurację wyświetlania siatki lub tekstury, wybór trybu renderowania oraz edycję parametrów kamery i efektów wizualnych poprawiających czytelność detali.

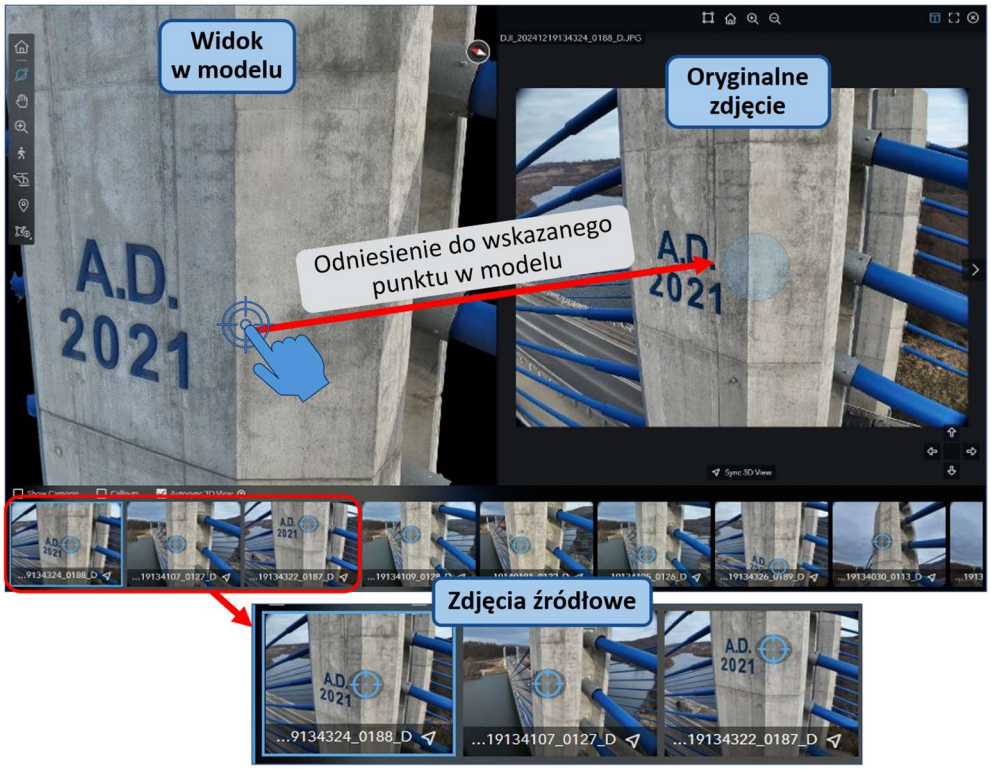


Rys. 6-6 Interfejs użytkownika platformy Nira w przestrzeni obsługi modelu

Kluczowym instrumentem w procesie dokumentowania stanu technicznego są adnotacje przestrzenne realizowane na dwa sposoby:

- Znaczniki (ang. callouts): pozwalają na precyzyjne umieszczanie wirtualnych pinezek bezpośrednio na powierzchni modelu 3D w miejscach zidentyfikowanych defektów. Do każdego znacznika inspektor przypisuje tytuł, szczegółowy opis (zawierający np. wstępną diagnozę) oraz odpowiednią kategorię.
- Pomiary (ang. measurements): narzędzia te umożliwiają określanie wymiarów liniowych, powierzchniowych oraz objętościowych bezpośrednio na modelu, co stanowi istotne wsparcie dla ilościowej oceny uszkodzeń.

Z perspektywy oceny stanu technicznego bardzo ważną funkcją platformy jest zintegrowany podgląd zdjęć źródłowych (wywoływany ikoną „Zdjęcia”). Po wskazaniu przez inspektora dowolnego punktu na modelu 3D, algorytmy platformy natychmiast wyszukują i wyświetlają w sąsiednim oknie oryginalne, nieprzetworzone zdjęcia fotogrametryczne, na których dany fragment konstrukcji jest najlepiej widoczny. Położenie wybranego punktu na zdjęciach oznaczane jest automatycznie niebieskim celownikiem. Rozwiązanie to pozwala na natychmiastową weryfikację detali, eliminując problem ewentualnej utraty szczegółowości lub rozmycia obrazu, które mogą wystąpić podczas optymalizacji i generowania tekstury modelu siatkowego. Zintegrowany widok inspekcyjny zaprezentowano na Rys. 6-7.



Rys. 6-7 Widok inspekcyjny modelu 3D z odpowiadającymi mu oryginalnymi zdjęciami

6.3.1.3 Proces inspekcyjny na platformie Nira

Proces inspekcyjny realizowany na platformie Nira uporządkowano zgodnie ze schematem przedstawionym w pkt. 6.1.3, przy czym poszczególne etapy zostały zaimplementowane w środowisku przeglądarkowym poprzez zestaw funkcji nawigacji, pomiarów oraz narzędzi do dokumentowania obserwacji. W praktyce platformę wykorzystywano przede wszystkim do realizacji etapów obejmujących orientację w modelu, wizualną identyfikację uszkodzeń oraz ich przestrzenne oznaczanie i eksport wyników (Etap 3–5). W sytuacjach wymagających pomiarów o najwyższej dokładności lub złożonych analiz geometrycznych, wizualna inspekcja stanowiła punkt wyjścia do dalszych prac w środowisku CAD (pkt. 6.3.2).

W celu ujednolicenia sposobu pracy, przed rozpoczęciem właściwej inspekcji określano cel sesji oraz strukturę zapisu obserwacji (np. nazewnictwo, etykietowanie). Następnie wykonywano weryfikację przydatności danych wejściowych (czytelność tekstur, kompletność odwzorowania, poprawność skali i orientacji) oraz przegląd globalny, który pozwalał wskazać obszary wymagające analizy szczegółowej. Dalszy etap obejmował oznaczanie obserwacji w przestrzeni modelu oraz na zdjęciach, a na końcu selekcję obserwacji i przygotowanie zestawienia wyników w formie raportu. Do prezentacji wyników badań wytypowano dwa obiekty reprezentujące odmienne warunki inspekcyjne oraz różne typy obserwacji: sklepiony wiadukt kolejowy w Kędzierzynie-Koźlu oraz jeden z pylonów mostu w Kurowie.

Wykorzystując dostępne w platformie Nira sposoby dodawania adnotacji, wyodrębniono trzy podstawowe sposoby zapisu, odpowiadające charakterowi i geometrii uszkodzenia (Rys. 6-8 i Rys. 6-9):

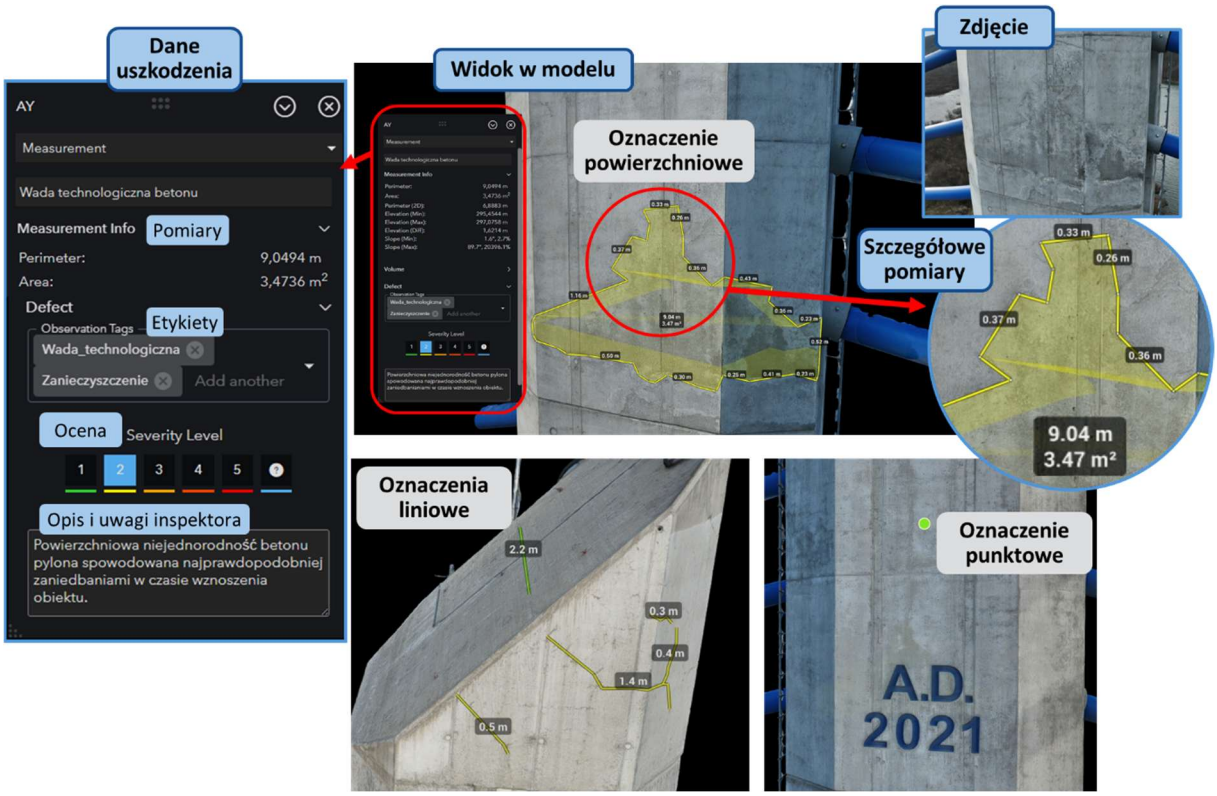
- **Uszkodzenia o przebiegu liniowym.** Do rejestracji zarysowań i pęknięć o charakterze liniowym wykorzystywano narzędzie do pomiaru długości. W przypadku wiaduktu

sklepionego umożliwiało to oznaczenie pęknięć przebiegających przez większą część powierzchni sklepienia, natomiast na pylonie w Kurowie – rejestrację rys skurczowych. Zapis liniowy porządkuje dokumentację, a długość uszkodzenia stanowi bezpośrednią informację ilościową przydatną m.in. w zestawieniach naprawczych.

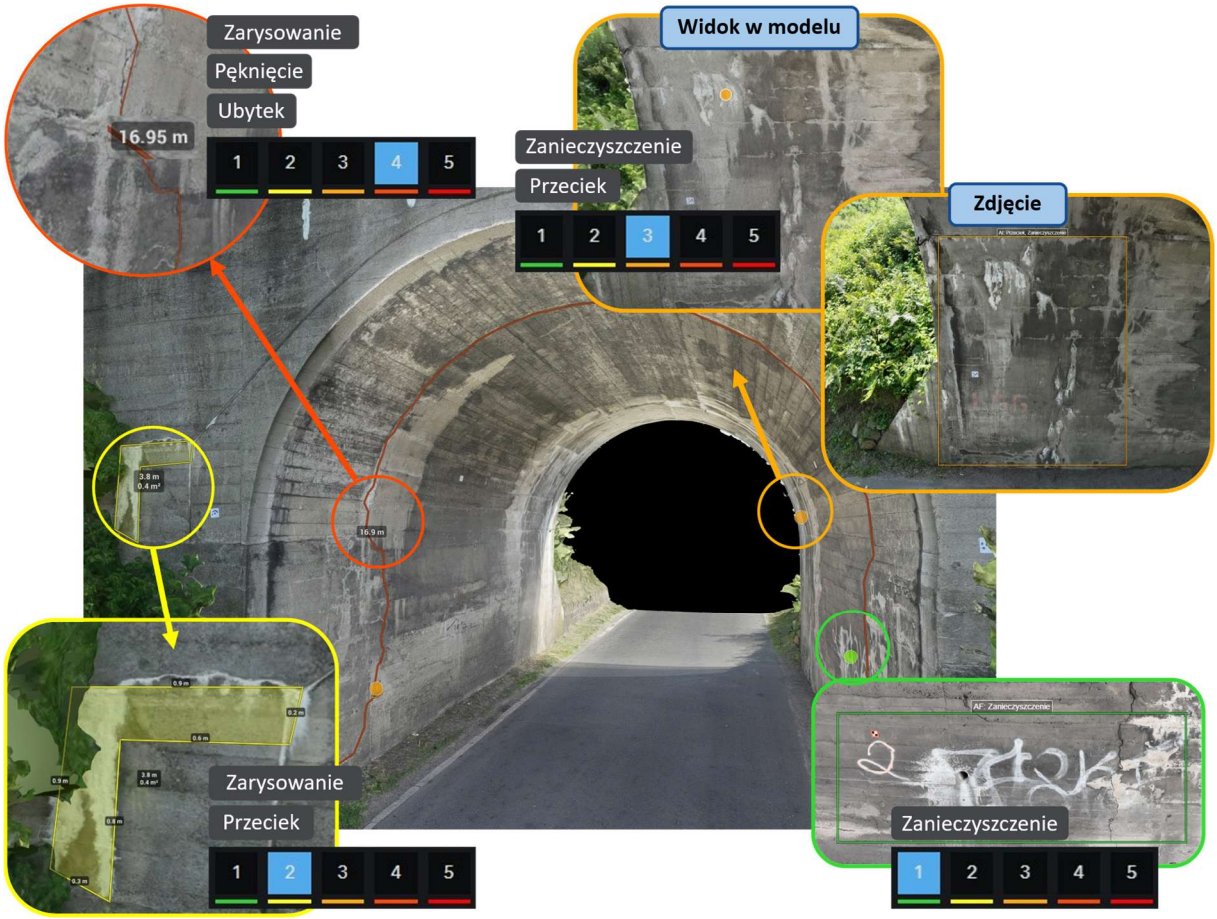
- **Uszkodzenia lokalne o charakterze powierzchniowym.** Do oceny lokalnych ubytków, przecieków oraz wad powierzchni betonu stosowano pomiary powierzchniowe. Przykładami są np. ubytki odsłaniające korodujące zbrojenie na obiekcie w Kędzierzynie-Koźlu, lokalne ślady zawilgoceń i przecieków na sklepieniu oraz wady betonu na pylonie w Kurowie. Powierzchnia uszkodzenia zapisana w sposób ilościowy może być bezpośrednio wykorzystana przy przedmiarach i szacowaniu zakresu napraw.
- **Uszkodzenia punktowe lub rozległe uszkodzenia powierzchniowe.** Do obserwacji uszkodzeń o nieregularnym kształcie, rozmytej granicy lub obejmujących większy obszar, bez jednoznacznego wymiaru liniowego lub obszarowego, stosowano znaczniki. Pozwalają one na umieszczenie informacji w przestrzeni modelu lub zdjęcia, gdzie kluczowe są lokalizacja i opis, a nie dokładny wymiar geometryczny.

Do każdego oznaczonego uszkodzenia (niezależnie od typu adnotacji) platforma umożliwia przypisanie zestawu informacji obejmujących (Rys. 6-8 i Rys. 6-9):

- indywidualną nazwę,
- etykiety klasyfikacyjne (umożliwiające elastyczne filtrowanie, np. według typu uszkodzenia lub obszaru występowania),
- umowną ocenę stanu technicznego w skali od 1 do 5, która jest wizualizowana barwą w skali od zielonego do czerwonego, co pozwala na natychmiastową, wizualną ocenę kondycji danego fragmentu obiektu na modelu,
- dłuższy opis tekstowy, zawierający kontekst i uwagi inspektora,
- automatycznie nadawane współrzędne geodezyjne (X, Y oraz wysokość n.p.m.),
- w przypadku użycia narzędzi pomiarowych: automatycznie zapisywaną długość lub powierzchnię obserwacji.

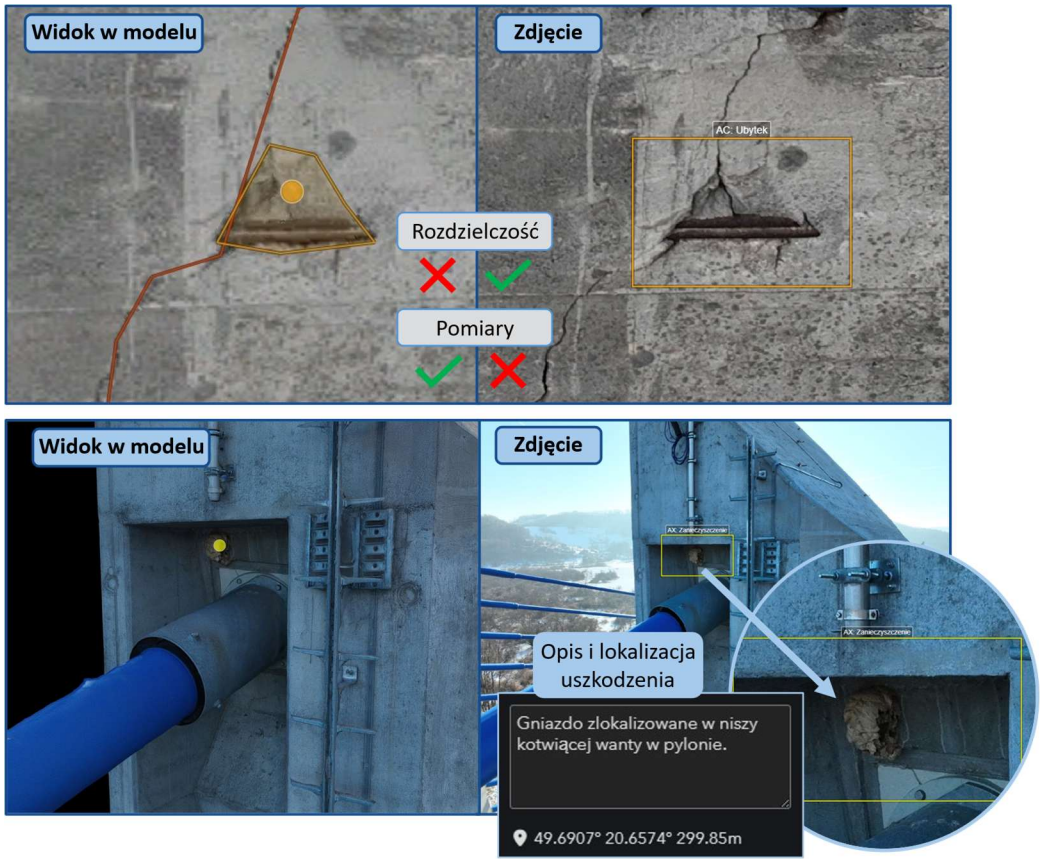


Rys. 6-8 Przykłady opisu uszkodzeń pylonu mostu w Kurowie na platformie Nira



Rys. 6-9 Przykłady opisu uszkodzeń wiaduktu kolejowego w Kędzierzynie-Koźlu na platformie Nira

Istotną cechą analizowanej platformy jest możliwość nanoszenia obserwacji zarówno na modelu 3D, jak i bezpośrednio na wybranym zdjęciu. W praktyce miało to znaczenie zwłaszcza w sytuacjach, gdy rozdzielczość tekstury modelu była niewystarczająca do jednoznacznego rozpoznania detalu, natomiast fotografia źródłowa przedstawiała go w wyższej rozdzielczości. Dotyczyło to m.in. lokalnego ubytku odsłaniającego zbrojenie wiaduktu sklepionego czy niewielkiego gniazda owadów na pylonie w Kurowie. Takie podejście zmniejsza ryzyko błędnej interpretacji wynikającej z lokalnych błędów rekonstrukcji i zwiększa wiarygodność dokumentowania uszkodzeń. Porównanie uszkodzeń opisanych na modelu 3D i na zdjęciach przedstawiono na Rys. 6-10.



Rys. 6-10 Porównanie uszkodzeń opisanych na modelu 3D oraz zdjęciu na platformie Nira

Platforma Nira wspiera ponadto pracę zespołową w środowisku sieciowym. Uszkodzenia mogą być inwentaryzowane, opisywane lub analizowane przez wielu inspektorów, przy czym główny administrator przestrzeni roboczej zarządza uprawnieniami dostępowymi, decydując, którzy uczestnicy procesu otrzymują model wyłącznie do wglądu (np. zarządca obiektu), a którzy dysponują prawami do edycji i wprowadzania adnotacji (zespół inspekcyjny). Pozwala to na uporządkowanie procesu w sytuacjach, gdy praca jest wykonywana równolegle przez kilka osób, jednocześnie ograniczając ryzyko niekontrolowanych zmian w modelu.

W ramach prac wdrożeniowych, poza indywidualną obsługą modelu i inspekcją z wykorzystaniem myszy, klawiatury oraz panoramicznego monitora o wysokiej rozdzielczości, przetestowano również wariant pracy zespołowej w czasie rzeczywistym na jednej stacji roboczej. Wykorzystano do tego dotykowy monitor interaktywny opisany w pkt. 6.2.1. Urządzenie to umożliwiło wspólny przegląd modelu, omawianie obserwacji oraz uzgadnianie interpretacji. W tym trybie, poza

standardowymi znacznikami rejestrowanymi na platformie, nanoszono również pomocnicze uwagi robocze bezpośrednio na ekranie przy użyciu rysików, co usprawniało wskazywanie elementów i komunikację w zespole (Rys. 6-11).



Rys. 6-11 Zespołowa inspekcja wirtualna przy użyciu monitora interaktywnego

Zwieńczeniem procesu wirtualnej inspekcji jest wygenerowanie raportu. Narzędzia platformy charakteryzują się w tym zakresie dużą elastycznością. To inspektor decyduje, które z uszkodzeń zaznaczonych w przestrzeni wirtualnej mają zostać włączone do końcowego dokumentu PDF. W zależności od tego, czy uszkodzenie oznaczono na modelu 3D, czy na zdjęciu źródłowym, w raporcie pojawia się odpowiednio zorientowany fragment modelu lub oryginalne zdjęcie z naniesionym znacznikiem, uzupełnione o zbliżenie wskazanego obszaru oraz zestaw opisów i parametrów wprowadzonych podczas inspekcji (nazwę, wymiary, współrzędne, klasyfikację i opis). Przykładowy wyciąg z raportu przedstawiono na Rys. 6-12.



Rys. 6-12 Sposób przedstawienia uszkodzeń w raporcie generowanym z platformy Nira

6.3.1.4 Ocena przydatności środowiska

Przeprowadzone badania i testy wdrożeniowe na rzeczywistych obiektach mostowych potwierdziły, że platforma Nira stanowi efektywne środowisko do realizacji wirtualnej inspekcji wizualnej na Poziomie 4 piramidy wirtualizacji. Szczególnie w zakresie orientacji w modelu, identyfikacji uszkodzeń oraz przestrzennego dokumentowania obserwacji. W praktyce środowisko to pozwala przenieść znaczną część czynności analitycznych do warunków biurowych, zapewniając możliwość wielokrotnego powrotu do tych samych fragmentów obiektu w bezpiecznych i kontrolowanych warunkach oraz zachowania powtarzalności w zakresie sposobu prezentacji i opisu obserwacji.

Do głównych atutów platformy, decydujących o jej wysokiej użyteczności wdrożeniowej, należą:

- **Niski próg wejścia i wysoka dostępność:** Dzięki architekturze opartej na usługach chmurowych użytkownicy końcowi (w tym zarządcy infrastruktury) nie muszą dysponować specjalistycznym oprogramowaniem ani utrzymywać rozbudowanego środowiska informatycznego do przeglądania danych. Dostęp do obszernych modeli jest możliwy z poziomu standardowej przeglądarki internetowej.
- **Wsparcie pracy zespołowej:** Platforma umożliwia udostępnianie modelu z różnymi poziomami uprawnień, równoległe nanoszenie obserwacji oraz generowanie ustrukturyzowanych raportów, co usprawnia komunikację i uzgadnianie interpretacji w zespole. W badaniach pozytywnie zweryfikowano także scenariusz zespołowej inspekcji z wykorzystaniem monitora interaktywnego, w którym wizualizacja modelu stanowiła wspólną płaszczyznę odniesienia dla dyskusji i wskazywania miejsc wymagających uwagi.
- **Zintegrowana weryfikacja wizualna model-zdjęcia:** Możliwość powiązania modelu 3D z materiałem źródłowym w postaci zorientowanych zdjęć stanowi istotną zaletę analityczną. Zintegrowany podgląd fotografii umożliwia szybką weryfikację detali w sytuacjach, gdy tekstura modelu ma zbyt niską rozdzielczość do jednoznacznej interpretacji lub gdy występują lokalne błędy rekonstrukcji.
- **Ustrukturyzowana ewidencja i wizualizacja uszkodzeń:** Szeroki wachlarz narzędzi do oznaczania defektów (punkty, linie, powierzchnie) oraz ujednolicona metodyka ich opisu (nazwa, kategoria, opis, współrzędne, wymiary) skutecznie wspierają proces oceny. Dodatkowo legenda kolorystyczna ułatwia globalną orientację w rozmieszczeniu oraz istotności zidentyfikowanych problemów.

Mimo wysokiej skuteczności i szerokiego spektrum zalet, platforma Nira nie stanowi środowiska w pełni dopasowanego do specyfiki inspekcji obiektów mostowych. W toku prac zidentyfikowano obszary, które mogłyby zostać rozwinięte lub usprawnione, co wynikało z następujących ograniczeń funkcjonalnych:

- **Brak pełnej integracji z modelami bryłowymi:** Środowisko jest zoptymalizowane pod kątem danych fotogrametrycznych, natomiast nie umożliwia równoległej analizy tych danych z modelami bryłowymi. Ogranicza to możliwość bezpośredniego powiązania zidentyfikowanych uszkodzeń z danymi pochodzącymi z modelu informacyjnego.
- **Niedoskonałości mechanizmów synchronizacji adnotacji model-zdjęcia:** Usprawnieniem byłaby automatyczna, dwukierunkowa synchronizacja obserwacji pomiędzy modelem

a zdjęciami (tj. odniesienie adnotacji wykonanych na modelu do odpowiednich obrazów źródłowych i odwrotnie). Mogłoby to przyspieszyć dokumentowanie, szczególnie w przypadkach wymagających pracy ze zdjęciami o wyższej rozdzielczości.

- **Ograniczona personalizacja oceny i raportowania: W** praktyce inspekcyjnej pożądane jest dostosowanie skali ocen, klasyfikacji i struktury raportów do konkretnych instrukcji i procedur stosowanych przez zarządców (np. możliwość definiowania własnych szablonów, pól i zestawień).
- **Brak modułu pełnej immersji (VR):** Platforma funkcjonuje wyłącznie w środowisku ekranowym, co ogranicza inspektorowi naturalną percepcję głębi oraz poczucie skali obiektu, istotne w części scenariuszy oceny.
- **Brak zautomatyzowanego wsparcia analitycznego:** System nie oferuje funkcji wstępnej, automatycznej lub półautomatycznej detekcji wybranych klas uszkodzeń wspieranej algorytmami sztucznej inteligencji, mimo dostępności takich rozwiązań na rynku (np. Twinspect).
- **Ograniczone narzędzia do analizy chmur punktów:** Platforma umożliwia import chmur punktów, jednak zakres narzędzi analitycznych do pracy z tego typu danymi jest ograniczony, przez co szczegółowe analizy geometryczne muszą być realizowane w środowisku CAD (patrz pkt 6.3.2).

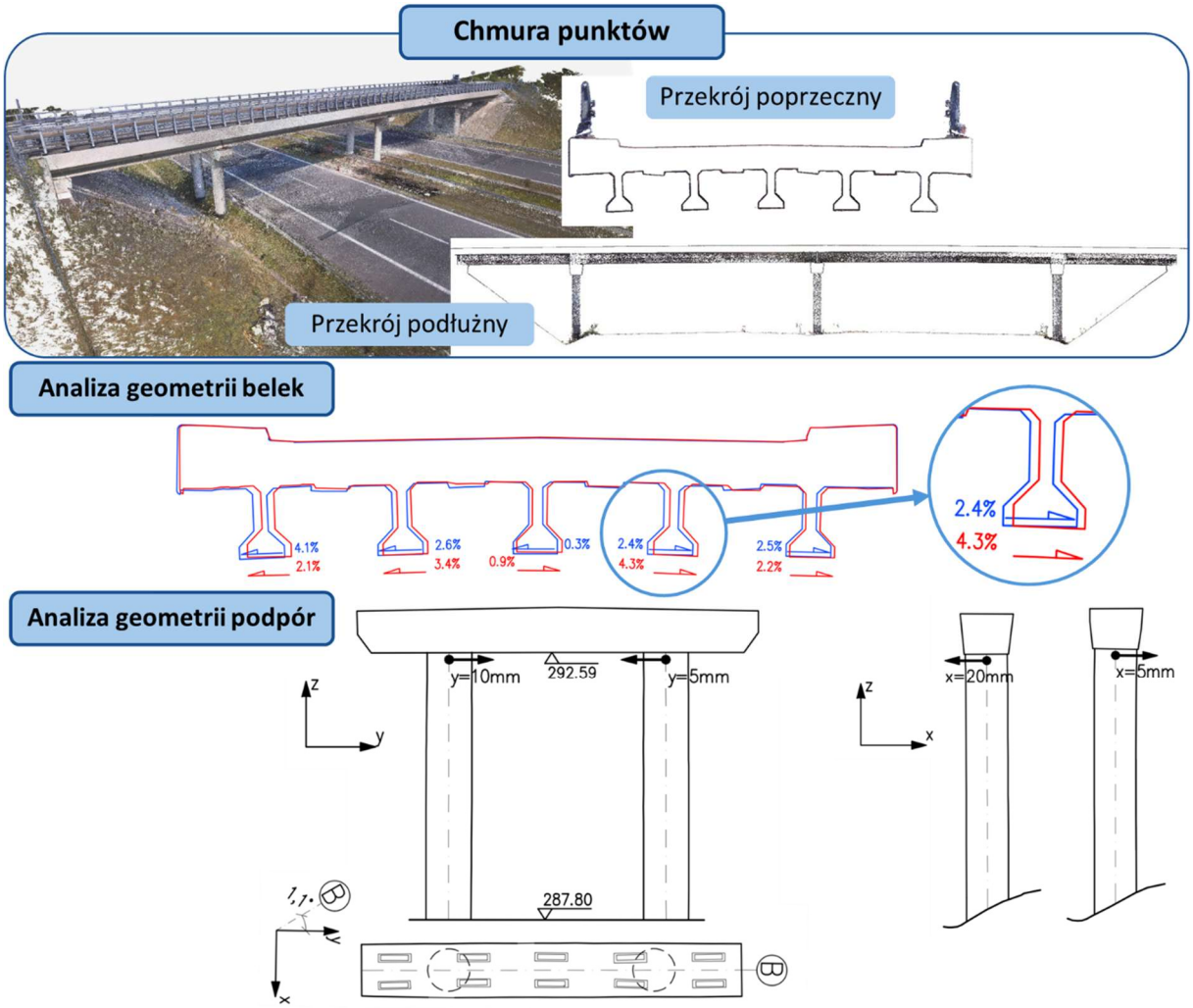
Podsumowując, platformę Nira należy ocenić jako narzędzie użyteczne do wirtualnej inspekcji wizualnej: umożliwia efektywną pracę przy dużych modelach, porządkuje dokumentowanie obserwacji, wspiera kolaborację i obniża barierę wdrożeniową dzięki działaniu w przeglądarce. Jednocześnie zidentyfikowane ograniczenia wskazują, że w kontekście inspekcji obiektów mostowych zasadne jest rozwijanie tego środowiska lub stworzenie nowego rozwiązania o analogicznej metodyce działania, lecz lepiej dopasowanego do specyfiki tej dziedziny. W szczególności poprzez integrację z modelami bryłowymi, większą personalizację ocen i raportów, usprawnienie powiązania modelu ze zdjęciami, a także rozszerzenie o tryb immersyjny oraz funkcje wspomagania analizy. W niniejszej pracy podjęto próbę odpowiedzi na wybrane z tych ograniczeń poprzez opracowanie autorskiego środowiska inspekcji immersyjnej, przedstawionego w dalszej części rozdziału (pkt 6.4).

6.3.2 Analiza danych przestrzennych i ocena geometrii

Oprócz wizualnej oceny stanu technicznego, realizowanej głównie w środowiskach platform internetowych, istotnym elementem wirtualnej inspekcji jest analiza danych przestrzennych ukierunkowana na ocenę geometrii obiektu. W praktyce dotyczy to przede wszystkim chmur punktów oraz modeli im pochodnych. Wykorzystanie pełnych chmur punktów o wysokiej gęstości w środowisku CAD umożliwia wykonywanie powtarzalnych i precyzyjnych pomiarów geometrycznych, w tym analiz trudnych do przeprowadzenia metodami tradycyjnymi. Przedstawione w niniejszym podrozdziale przykłady eksperymentów mają charakter wdrożeniowy i zostały zrealizowane w ramach działalności zawodowej autora. Celem było wykorzystanie danych przestrzennych jako narzędzia wspomagającego procesy inspekcyjne i projektowe: od diagnozy uszkodzeń, przez ocenę ich zasięgu, aż po przygotowanie i weryfikację rozwiązań naprawczych.

Pierwszym przykładem jest wiadukt zlokalizowany nad autostradą A4 w Mysłowicach, na którym przeprowadzono globalną analizę geometrii ustroju nośnego i podpór na podstawie chmury punktów. Zakres obejmował pomiary belek i podpór w ujęciu przestrzennym: ocenę ich położenia w planie, analizę przekrojów poprzecznych oraz weryfikację wybranych parametrów geometrycznych w trzech kierunkach. W takiej sytuacji chmury punktów wykazują przewagę nad tradycyjnymi metodami geodezyjnymi. Pomiary punktowe, oparte na identyfikacji wybranych punktów (np. za pomocą tachimetru), są obarczone ryzykiem błędu wynikającego z uogólnienia kształtu i pominięcia lokalnych anomalii. Dodatkowo w analizowanym przypadku prace terenowe byłyby znacznie utrudnione z uwagi na ciągły ruch autostradowy pod obiektem.

Pomiary na chmurze punktów, którą zaprezentowano na Rys. 5-28, ujawniły istotne nieprawidłowości: belki zostały rozmieszczone w sposób nieregularny i wykazywały odchylenia od projektowanych długości oraz rozstawów, co skutkowało m.in. zróżnicowaniem szerokości przerw dylatacyjnych. Ponadto analiza przekrojów poprzecznych wykazała znaczne odchylenia spadków spodów belek (obroty wokół osi podłużnej) od wartości projektowych, szczególnie w przypadku belek skrajnych. Geometria podpór wykazywała natomiast niewielkie odchylenia od pionu oraz przemieszczenia w planie. Przykładowe wyniki pomiarów i sposób ich prezentacji (przekroje, odchyłki, pomiary rozstawów) pokazano na Rys. 6-13.

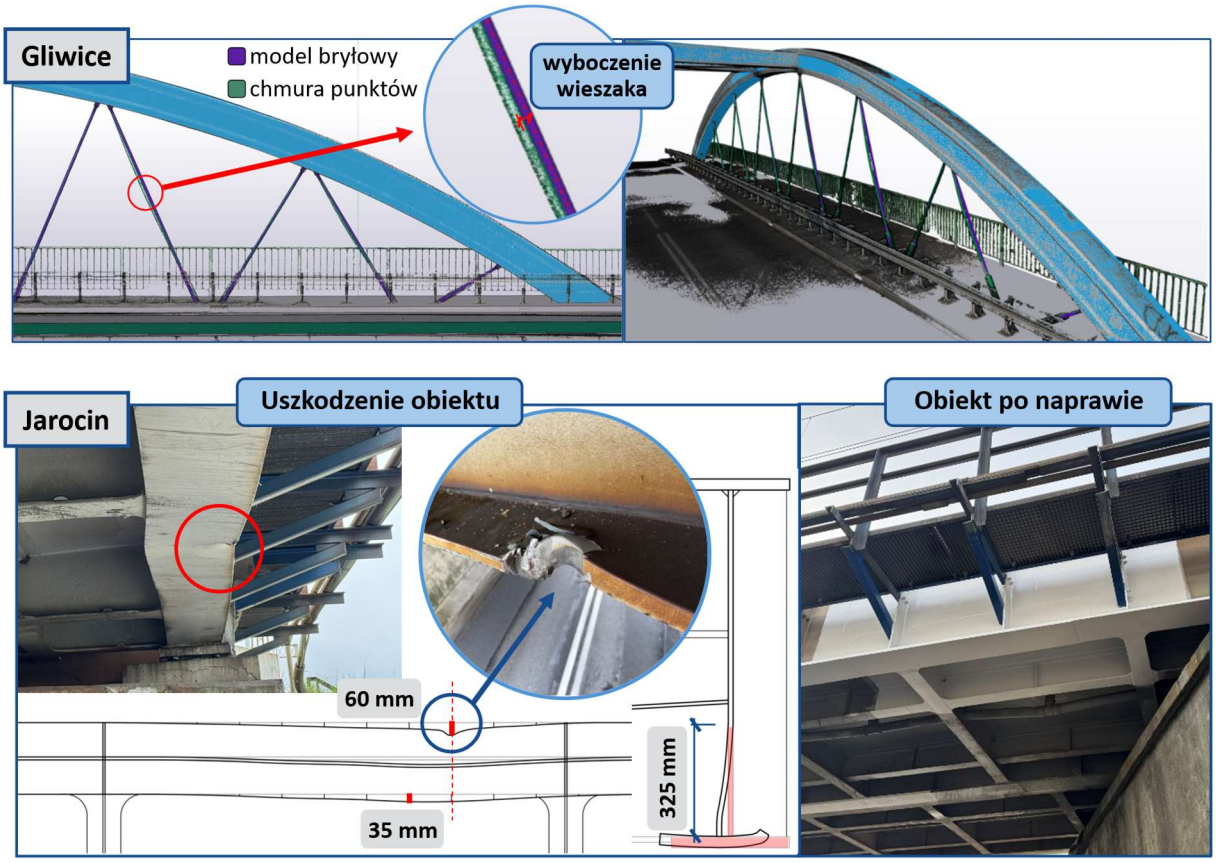


Rys. 6-13 Przykładowe efekty pomiarów odchyłek geometrycznych wiaduktu w Mysłowicach na podstawie chmury punktów

Na podstawie wirtualnej inspekcji stwierdzono, że charakter zidentyfikowanych anomalii wskazuje na prawdopodobny brak odpowiedniego reżimu technologicznego na etapie prefabrykacji elementów oraz ich montażu. Choć zjawiska te przypisano głównie niedokładnościom wykonawczym i uznano, że ich wpływ na nośność konstrukcji jest ograniczony, to precyzyjne udokumentowanie tych odchyłek (praktycznie nieosiągalne bez gęstej chmury punktów) ma istotne znaczenie dla planowania przyszłych prac utrzymaniowych lub modernizacyjnych

Chmury punktów znajdują zastosowanie nie tylko w analizach globalnych, lecz również w ocenie lokalnych uszkodzeń o skomplikowanym, nieregularnym przebiegu. W takich przypadkach deformacja elementu następuje zazwyczaj w kilku płaszczyznach jednocześnie, a pomiary oparte wyłącznie na lokalnych, pojedynczych odczytach mogą prowadzić do niepełnej oceny kształtu deformacji. Analiza chmury punktów umożliwia jednoznaczne odtworzenie przestrzennego przebiegu odkształceń i określenie ich charakteru. Przykładem takiego zastosowania była analiza geometrii stalowych wieszaków mostu łukowego w Gliwicach, gdzie nałożenie na chmurę punktów płaszczyzn odniesienia i osi teoretycznych pozwoliło na jednoznaczne określenie wektora oraz strzałki ich wyboczenia.

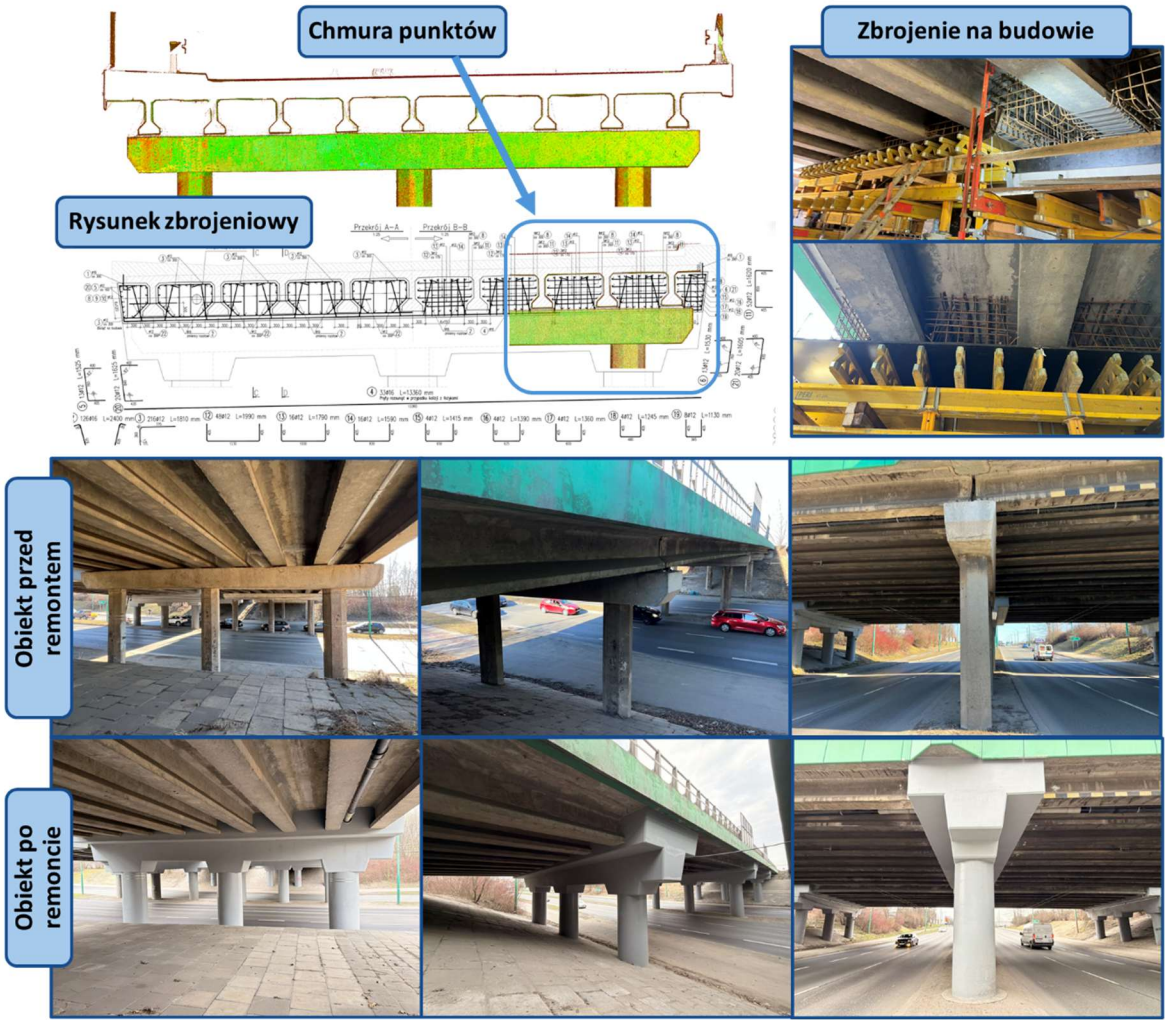
Podobną analizę przeprowadzono dla stalowego dźwigara wiaduktu kolejowego w Jarocinie, który uległ poważnemu uszkodzeniu w wyniku uderzenia przez pojazd samochodowy o zbyt dużej wysokości. Deformacja pasa dolnego i środnika była złożona i wielopłaszczyznowa, a chmura punktów okazała się kluczowa do określenia jej zasięgu i rozległości. Precyzyjna inwentaryzacja geometryczna, poza oceną stopnia uszkodzenia, posłużyła również bezpośrednio do zaprojektowania odpowiedniego elementu zamiennego dźwigara w ramach prac naprawczych. Na Rys. 6-14 przedstawiono przykład analizy geometrii wieszaków w Gliwicach oraz deformacji dźwigara w Jarocinie.



Rys. 6-14 Analiza geometrii wieszaków (Gliwice) oraz ocena deformacji dźwigara (Jarocin) na podstawie chmury punktów

Chmurę punktów zastosowano również podczas opracowywania projektu remontu wiaduktu w Tychach, obejmującego w szczególności zmianę geometrii węzłów podporowych i podpór. Inwentaryzacja pozornie powtarzalnych przestrzeni między belkami prefabrykowanymi oraz aktualnej geometrii podpór pośrednich bez użycia skanowania laserowego byłaby utrudniona i obarczona istotnym ryzykiem błędu. Pozyskana chmura punktów umożliwiła odwzorowanie rzeczywistej geometrii, co pozwoliło na dokładne zaprojektowanie gęstego zbrojenia wzmacnianych węzłów podporowych z uwzględnieniem faktycznych odchyłek wykonawczych istniejącej konstrukcji.

Takie podejście ułatwiło realizację robót budowlanych (w szczególności zbrojarskich i betoniarskich) oraz zwiększyło przewidywalność efektu końcowego. Na Rys. 6-15 przedstawiono geometrię obiektu przed remontem, reprezentację danych przestrzennych, elementy projektu (w tym zbrojenie węzłów), etap realizacji oraz stan po wykonaniu prac.



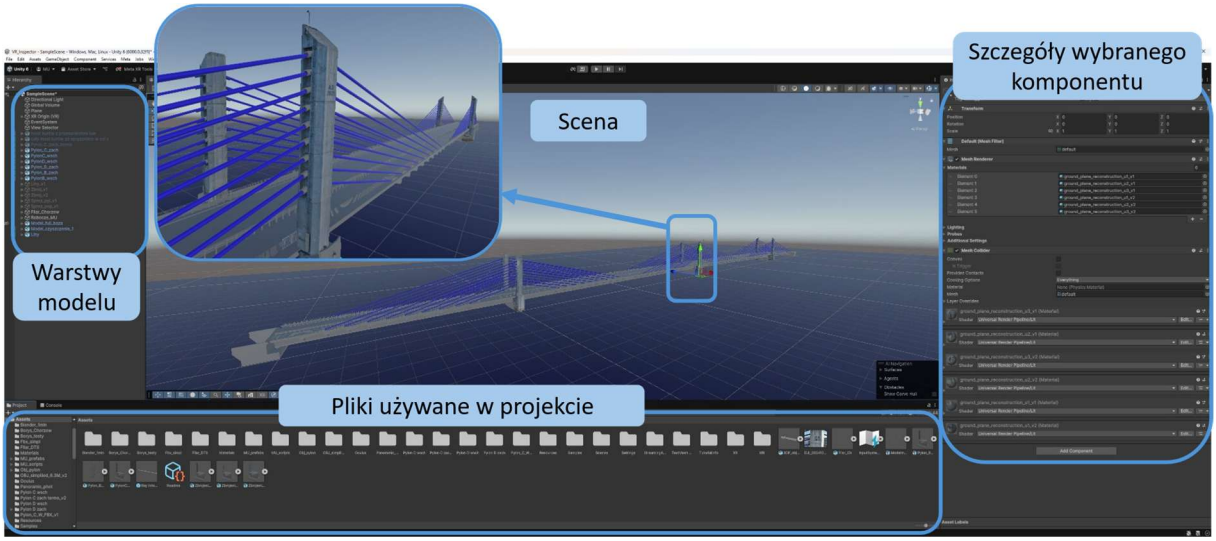
Rys. 6-15 Proces projektowania i realizacji remontu wiaduktu w Tychach z wykorzystaniem chmury punktów

Przedstawione przykłady eksperymentów potwierdzają, że szczegółowa analiza geometryczna danych przestrzennych stanowi istotne uzupełnienie wirtualnej inspekcji. Chmury punktów umożliwiają nie tylko weryfikację geometrii globalnej, lecz także rozpoznanie i ilościową ocenę lokalnych deformacji, szczególnie tych o nieregularnym przebiegu. W konsekwencji dane przestrzenne mogą pełnić rolę narzędzia diagnostycznego i projektowego, wspierającego zarówno identyfikację uszkodzeń, jak i przygotowanie oraz weryfikację zakresu działań naprawczych.

6.4 Autorska aplikacja do inspekcji w środowisku immersyjnym

6.4.1 Założenia projektowe i architektura aplikacji

W ramach oceny komercyjnych platform inspekcyjnych w środowisku komputerowym (pkt 6.3.1.4) stwierdzono, że stanowią one skuteczne narzędzie do wirtualnej inspekcji wizualnej, jednak nie pokrywają w pełni potrzeb związanych m.in. z poczuciem rzeczywistej skali obiektu, swobodą personalizacji narzędzi oraz integracją z modelami bryłowymi. Zidentyfikowane luki stanowiły bezpośredni impuls do opracowania dedykowanego oprogramowania. W ramach niniejszej pracy zaprojektowano i zaimplementowano autorską aplikację działającą w środowisku immersyjnym, z wykorzystaniem silnika Unity przedstawionego w pkt. 6.2.2, którego interfejs pokazano na Rys. 6-16. Aplikację roboczo nazwano *VR Inspector*.



Rys. 6-16 Interfejs środowiska Unity

Środek ciężkości aplikacji ukierunkowano na funkcje umożliwiające realizację Poziomu 4 piramidy wirtualizacji w wariancie immersyjnym: szybkie pozycjonowanie użytkownika względem obiektu, umieszczanie w jednej scenie modeli różnego typu (np. modelu fotogrametrycznego wraz z modelem bryłowym), selekcję warstw i wariantów wizualizacji oraz dokumentowanie obserwacji w sposób przestrzennie jednoznaczny. W konsekwencji przyjęto następujące cele funkcjonalne aplikacji:

- swobodne poruszanie się w wirtualnej przestrzeni,
- przełączanie predefiniowanych widoków,
- zarządzanie widocznością i przezroczystością warstw różnych typów modeli w scenie,
- inwentaryzację uszkodzeń za pomocą znaczników i notatek (w tym głosowych),
- wykonywanie prostych pomiarów,
- obsługa menu przestrzennego przypiętego do dłoni użytkownika.

Aplikację zrealizowano w silniku Unity z wykorzystaniem pakietu rozszerzonej rzeczywistości (XR Interaction Toolkit) oraz systemu obsługi urządzeń wejściowych (Unity Input System). Architektura bazuje na module `XR Origin (VR)`, który odpowiada za odwzorowanie „ciała użytkownika” w świecie wirtualnym. Typowe elementy tego modułu obejmują: kamerę, kontrolery oraz komponenty związane z ruchem, transformacją i sterowaniem. Interakcja użytkownika z aplikacją realizowana jest poprzez

akcje wejścia `InputActionManager` powiązane z przyciskami kontrolerów oraz interakcję z wiązką lasera `RayInteractor`, co umożliwia obsługę zarówno narzędzi inspekcyjnych, jak i elementów interfejsu użytkownika.

Zaprojektowana struktura aplikacji została uporządkowana warstwowo, co zapewnia jej modułowość i ułatwia testowanie oraz dalszy rozwój. Poza komponentami bazującymi na gotowych modułach Unity, spersonalizowane funkcje zrealizowano w postaci autorskich skryptów napisanych w języku C#, które zestawiono Tab. 6-2. Kluczowe warstwy systemu przedstawiają się następująco:

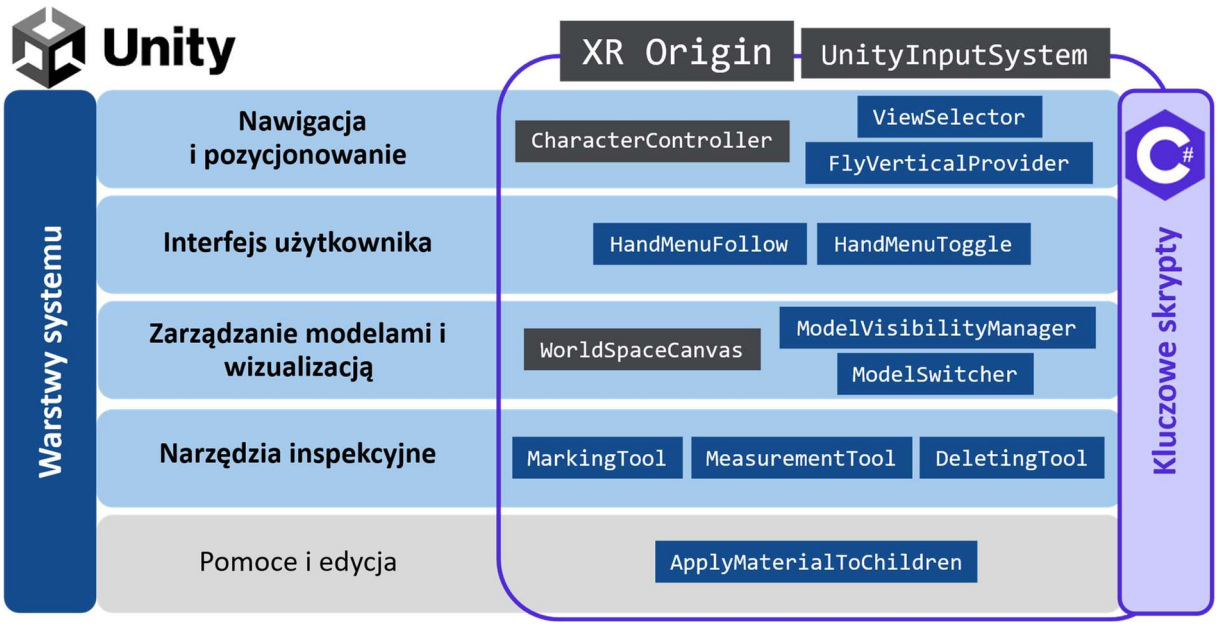
- **Warstwa nawigacji i pozycjonowania** (ang. locomotion) odpowiadająca za przemieszczanie użytkownika w scenie. Ruch w płaszczyźnie poziomej użytkownika realizowany jest przy wykorzystaniu standardowych mechanizmów `XR` i `InputSystem` współpracujących m.in. z komponentem `CharacterController`. Ruch pionowy (istotny przy inspekcji wysokich obiektów, np. pylonów i podpór) zrealizowano za pomocą autorskiego skryptu `FlyVerticalProvider`. Natychmiastową teleportację do zdefiniowanych punktów obserwacyjnych zapewnia moduł `ViewSelector`.
- **Warstwa interfejsu użytkownika** (ang. User Interface, UI) umożliwiająca obsługę paneli narzędziowych w przestrzeni 3D, z elementami takimi jak przyciski, przełączniki i suwaki. Do obsługi podręcznego menu przypiętego do dłoni wykorzystano autorskie skrypty `HandMenuFollow` (podążanie menu za ręką) i `HandMenuToggle` (zwijanie i rozwijanie menu).
- **Warstwa zarządzania modelami i wizualizacją** kontrolująca renderowanie i przełączanie obiektów 3D w scenie. Zarządzanie widocznością i wizualizacją zaimplementowano w postaci autorskich modułów: `ModelVisibilityManager`. (generowanie listy modeli w menu użytkownika i sterowanie przezroczystością) oraz `ModelSwitcher` (sekwencyjne przełączanie modeli w scenie). Jednym z kluczowych wyzwań okazało się stabilne sterowanie przezroczystością, które zaimplementowano przy użyciu wariantów modelu: nieprzezroczystego (ang. opaque) i przezroczystego (ang. transparent), pomiędzy którymi aplikacja przełącza się zależnie od potrzeb inspekcji.
- **Warstwa narzędzi inspekcyjnych** stanowiąca rdzeń diagnostyczny aplikacji i składająca się z zestawu autorskich skryptów. Dokumentowanie obserwacji umożliwia `MarkingTool`, odpowiedzialny za stawianie znaczników przy pomocy wiązki lasera `Raycast` na powierzchni obiektu oraz przypisanie notatki (w tym głosowej). Narzędzie pomiarowe `MeasurementTool` umożliwia wykonywanie prostych pomiarów na modelu, bazując na wskazaniu punktów promieniem z kontrolera. Utrzymanie porządku dokumentacji wspiera `DeletingTool`, pozwalający usuwać wcześniej utworzone znaczniki i pomiary.
- **Warstwa pomocnicza (edycyjna)** obejmująca narzędzia usprawniające przygotowanie sceny i materiałów. Wykorzystywano tu m.in. skrypt `ApplyMaterialToChildren`, automatyzujący masowe przypisywanie materiałów do setek obiektów w głębokich hierarchiach złożonych modeli bryłowych.

Szczegółowy opis danych wejściowych, interfejsu, mechaniki nawigacji oraz narzędzi inspekcyjnych przedstawiono w kolejnych podrozdziałach 6.4.2 i 6.4.3, natomiast w 6.4.4

zaprezentowano weryfikację działania aplikacji na wybranych obiektach mostowych. Na Rys. 6-17 pokazano ogólny schemat architektury aplikacji *VR Inspector*.

Tab. 6-2 Zestawienie autorskich skryptów C# aplikacji VR Inspector i ich roli w procesie inspekcyjnym

Skrypt	Warstwa systemu	Funkcja	Wejścia	Wyjście
FlyVertical Provider	Nawigacja i pozycjonowanie	pionowe przemieszczanie użytkownika	drążek kontrolera	szybki dostęp do różnych wysokości
ViewSelector	Nawigacja i pozycjonowanie	teleportacja do predefiniowanych punktów obserwacyjnych	interakcja z przyciskami menu	standaryzowane punkty oględzin i szybkie pozycjonowanie
HandMenu Follow	Interfejs użytkownika	podążanie menu za dłonią	dane wejściowe	stały dostęp do funkcji bez zasłaniania sceny dużym panelem
HandMenu Toggle	Interfejs użytkownika	zwijanie i rozwijanie menu na dłoni	przycisk kontrolera	szybkie ukrycie menu w trakcie inspekcji
ModelVisibility Manager	Zarządzanie modelami i wizualizacją	generowanie listy modeli warstw w menu, sterowanie widocznością i przezroczystością	interakcja z przełącznikami i suwakami menu	selekcja warstw w scenie, kontrola widoczności
ModelSwitcher	Zarządzanie modelami i wizualizacją	przełączanie modeli	przyciski kontrolerów	szybkie przełączanie wariantów
MarkingTool	Narzędzia inspekcyjne	stawianie znaczników w miejscu wskazanym promieniem i przypisanie notatki	przyciski kontrolera w kombinacji z promieniem	znacznik umieszczony w przestrzeni modelu + opis
Measurement Tool	Narzędzia inspekcyjne	pomiar odległości	przyciski kontrolera w kombinacji z promieniem	odcinek pomiarowy i wartość długości
DeletingTool	Narzędzia inspekcyjne	usuwanie utworzonych znaczników i pomiarów	przyciski kontrolera w kombinacji z promieniem	utrzymanie porządku dokumentacji
ApplyMaterial ToChildren	Pomoce i edycja	masowe przypisanie materiału do obiektów w hierarchii importowanych modeli	narzędzie przygotowania sceny	przyspieszenie przygotowania modeli w scenie



Rys. 6-17 Schemat architektury aplikacji VR Inspector

6.4.2 Dane wejściowe, interfejs użytkownika i mechanika nawigacji

Fundamentem funkcjonalnym aplikacji *VR Inspector* jest efektywne przetwarzanie danych przestrzennych oraz zapewnienie intuicyjnej interakcji inspektora z modelem w skali. Poniżej opisano strukturę danych wejściowych, architekturę interfejsu oraz mechanizmy nawigacji użytkownika w scenie.

Aplikacja obsługuje modele 3D zróżnicowanych obiektów, ze szczególnym uwzględnieniem konstrukcji mostowych. W procesie budowy sceny wykorzystywano dwa główne typy danych:

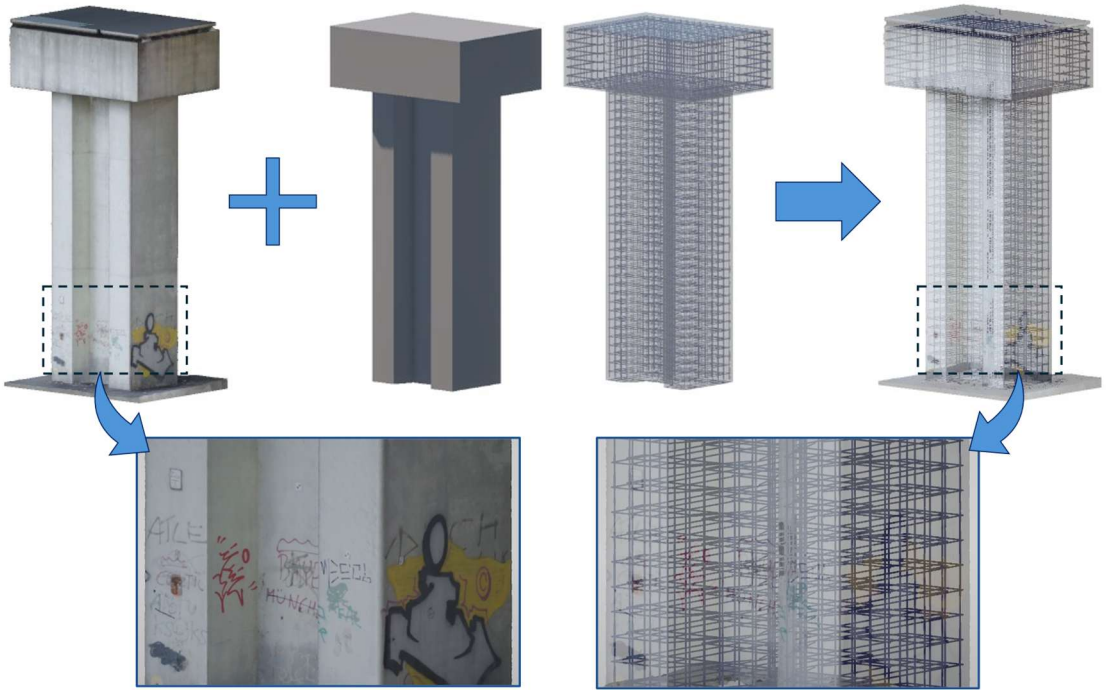
- **modele fotogrametryczne** importowane do sceny Unity w formacie **OBJ**,
- **modele bryłowe** importowane do sceny Unity w formacie **FBX**.

Modele fotogrametryczne przed importem do środowiska VR wymagały uproszczenia, co wynikało z konieczności zachowania płynności renderowania w goglach. W środowisku Unity każdy model przyjmuje postać obiektu sceny `GameObject`, będącego kontenerem dla zestawu komponentów definiujących jego właściwości. Obiekt ten posiada standardowy komponent transformacji `Transform`, który definiuje jego położenie, orientację i skalę w przestrzeni sceny. Geometria właściwa zapisana jest w filtrze siatki `MeshFilter`, natomiast za jej renderowanie odpowiada komponent `MeshRenderer` z przypisanymi materiałami `Materials`. W przypadku modeli fotogrametrycznych często występuje wiele materiałów przypisanych do jednego obiektu, co wynika z podziału tekstur na zestawy w procesie rekonstrukcji lub optymalizacji. Równolegle do warstwy wizualnej model posiada siatkowy komponent kolizyjny `MeshCollider`, który służy do wykrywania przecięć i trafień wiązką lasera `Raycast`.

Model bryłowy ma zbliżoną strukturę komponentów do modelu fotogrametrycznego. Mimo charakteru modelu, po eksporcie do Unity jest on w praktyce reprezentowany jako siatka (triangulacja powierzchni bryły), co umożliwia jego renderowanie w czasie rzeczywistym. Charakteryzują się one zazwyczaj prostszą strukturą materiałową i logicznym podziałem na komponenty (np. belki, podpory, elementy zbrojenia). W praktyce często są to rozbudowane hierarchie obiektów (np. zestawy prętów

zbrojeniowych), co wymaga grupowego zarządzania materiałami i właściwościami wizualnymi. W tym celu zastosowano autorski skrypt `ApplyMaterialToChildren`, który automatyzuje masowe przypisywanie materiałów w rozbudowanych hierarchiach.

W aplikacji stosowano warianty wizualizacji służące sterowaniu przezroczystością. W takim przypadku analogiczna struktura obiektów jest powielana dla każdego wariantu, przy czym różnica dotyczy konfiguracji materiałów w wariancie opaque i transparent, czyli wariantach przezroczystości. Aplikacja przełącza aktywny wariant w zależności od potrzeb inspektora. Dodatkowo w aplikacji wykorzystywano również szablony `Prefabs`, rozumiane jako zapisane w Unity wzorce gotowych obiektów i komponentów, które mogą być wielokrotnie wstawiane do sceny z zachowaniem konfiguracji. W praktyce dotyczyło to przede wszystkim szablonów znaczników (kształt, rozmiar, zachowanie) oraz elementów interfejsu (np. przełączników i suwaków). Wykorzystywano również szablony materiałów definiujące kolorystykę, typ powierzchni i przezroczystość, które przypisywano obiektom w scenie. Na Rys. 6-18 pokazano umieszczone w scenie przykładowy model fotogrametryczny, bryłowy oraz ich kombinację z nadaną przezroczystością.

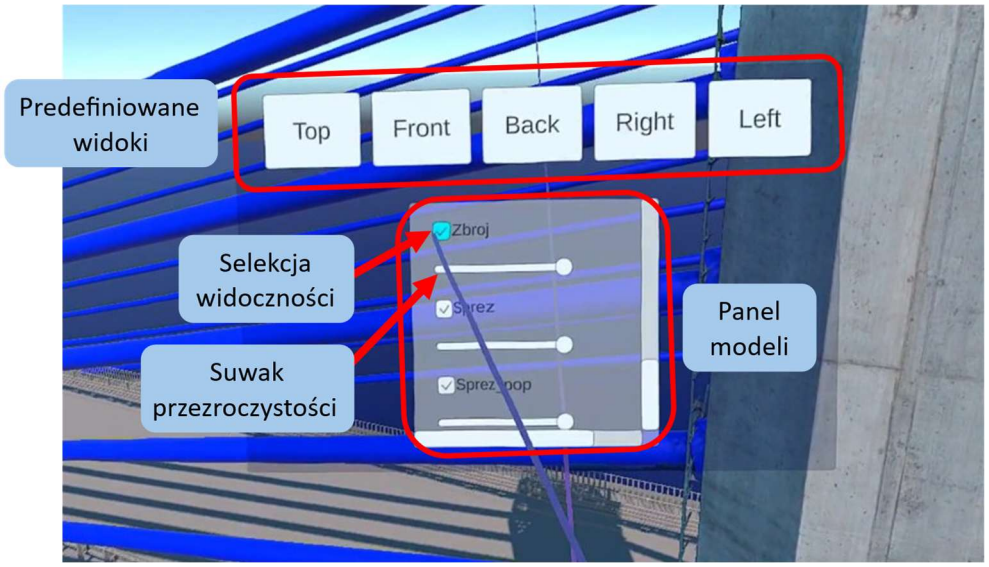


Rys. 6-18 Integracja modelu fotogrametrycznego i bryłowego w Unity

Interfejs użytkownika (UI) *VR Inspector* zaprojektowano jako przestrzenny interfejs typu `WorldSpaceCanvas`, tj. panel umieszczony w świecie 3D, dostępny z perspektywy użytkownika VR. Menu jest przypięte do lewego nadgarstka inspektora dzięki skryptowi `HandMenuFollow`. Może być zwijane i rozwijane jednym przyciskiem dzięki skryptowi `HandMenuToggle`, co zmniejsza ryzyko zasłaniania pola widzenia podczas poruszania się wokół obiektu.

Menu aplikacji obejmuje wybór predefiniowanych widoków oraz selekcji widoczności i przezroczystości modeli (Rys. 6-19). Lista modeli w scenie jest prezentowana w postaci przewijanego panelu, a elementy listy mogą być generowane dynamicznie w zależności od liczby i struktury wczytanych obiektów. Wybór modeli realizowany jest za pomocą przełączników (ang. toggles), a przezroczystość ustawiana jest suwakami (ang. sliders). Interakcja z UI odbywa się za pomocą wiązki

lasera generowanej przez kontroler, który pełni rolę kursora w wirtualnej przestrzeni. Umożliwia to obsługę przycisków, przełączników i suwaków bezpośrednio w środowisku VR. Funkcje te zrealizowano w oparciu o `UnityInputSystem` oraz `XR InteractionToolkit`.



Rys. 6-19 Menu podręczne aplikacji VR Inspector

Jednym z kluczowych wymagań *VR Inspector* była możliwość sprawnego przemieszczania się wokół obiektu oraz ustawiania pozycji inspektora w miejscach istotnych diagnostycznie. Rdzeniem mechaniki ruchu jest moduł `XR Origin` wraz z kamerą, kontrolerami oraz komponentem `CharacterController`, który odpowiada za detekcję kolizji i podstawowy ruch w scenie. W aplikacji zastosowano dwa mechanizmy przemieszczenia:

- **Ruch swobodny**: realizowany za pomocą drążka kontrolera. Na potrzeby inspekcji obiektów o znacznej wysokości (np. pylonów) dodano funkcję przemieszczania pionowego realizowaną przez skrypt `FlyVerticalProvider`.
- **Widoki predefiniowane**: obsługiwane przez skrypt `ViewSelector`, umożliwiające natychmiastową teleportację do ustalonych punktów obserwacyjnych (np. rzut z góry, z boku, z przodu). zachować powtarzalność ujęć diagnostycznych i redukuje ryzyko dezorientacji przestrzennej.

Podczas testów zidentyfikowano konieczność synchronizacji komponentów ruchu z systemem kolizji. Aby uniknąć błędnych korekt pozycji przez `CharacterController` w momencie teleportacji, zastosowano podejście polegające na chwilowej dezaktywacji wybranych elementów ruchu i wykrywania kolizji w trakcie operacji zmiany widoku. Zwiększa to stabilność pozycjonowania i ogranicza ryzyko niepożądanych korekt.

Podsumowując, opisane rozwiązania w zakresie importu danych wejściowych, interfejsu użytkownika i mechaniki nawigacji tworzą spójne środowisko pracy. Pozwala ono inspektorowi na swobodne zarządzanie warstwami informacyjnymi modelu oraz poruszanie się w wirtualnej przestrzeni.

6.4.3 Zarządzanie modelami, wizualizacja oraz narzędzia inspekcyjne

Opisane w pkt. 6.4.2 rozwiązania w zakresie danych wejściowych, interfejsu użytkownika oraz mechaniki nawigacji stanowią fundament pracy w środowisku immersyjnym. Kluczową częścią aplikacji *VR Inspector* są jednak funkcje umożliwiające zarządzanie warstwami modeli, dostosowanie wizualizacji do celu inspekcji oraz przestrzenne dokumentowanie obserwacji bezpośrednio w modelu.

Obiekty inżynierskie importowane do Unity nie występują jako pojedyncze, jednorodne obiekty, lecz jako zestawy wielu obiektów z przypisanymi komponentami siatkowymi `MeshRenderer` i materiałami `Materials`. Dotyczy to zarówno modeli fotogrametrycznych (często dzielonych na kilka zestawów materiałów i tekstur), jak i modeli bryłowych, które mogą obejmować liczne podkomponenty (np. elementy zbrojenia, łożyska, urządzenia dylatacyjne). Z tego względu w *VR Inspector* przyjęto podejście warstwowe. Całkowity model traktowany jest jako zgrupowana struktura obiektów sceny, a system sterowania oddziałuje na grupy elementów, zdefiniowane na etapie budowy środowiska.

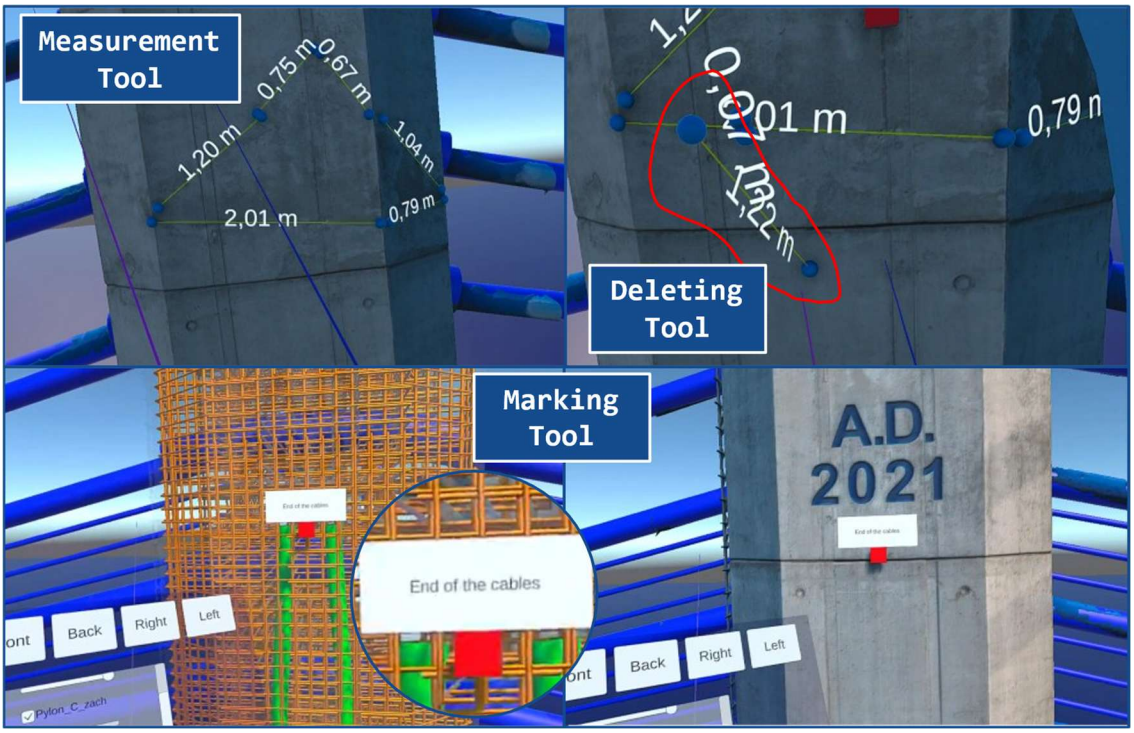
Podstawowym mechanizmem zarządzania widocznością jest skrypt `ModelVisibilityManager`, który odpowiada za dynamiczne generowanie listy dostępnych modeli (warstw) w menu użytkownika oraz za przełączanie ich widoczności. W praktyce inspektor może włączać i wyłączać poszczególne warstwy (np. model fotogrametryczny, pogrupowane komponenty modelu bryłowego) w zależności od analizowanego fragmentu obiektu oraz celu inspekcji. Rozwiązanie to umożliwia prowadzenie analizy porównawczej polegającej na zestawianiu informacji wizualnej z fotogrametrii z geometrią referencyjną wynikającą z modelu bryłowego. Uzupełnieniem powyższego podejścia jest skrypt `ModelSwitcher`, oferujący tryb sekwencyjnego przełączania między modelami.

W ramach prac dążono również do odtworzenia w środowisku VR efektu „prześwietlenia" konstrukcji, co jest typowe dla koncepcji AR i MR omawianych w pkt. 6.1.2. W mieszanej rzeczywistości wynika to z nakładania danych cyfrowych na obraz obiektu rzeczywistego, natomiast w *VR Inspector* uzyskano analogiczny rezultat poprzez kontrolę przezroczystości oraz współistnienie w jednej scenie modeli o różnej naturze: modelu fotogrametrycznego jako „powłoki" obiektu i nośnika informacji wizualnej oraz modelu bryłowego jako geometrii referencyjnej i reprezentacji „wnętrza" obiektu.

W toku prac rozważano podejście polegające na dynamicznej zmianie parametrów renderowania materiałów w czasie rzeczywistym. W praktyce okazało się ono jednak mniej stabilne i trudniejsze do standaryzacji, zwłaszcza przy rozbudowanych hierarchiach obiektów. Z tego względu przyjęto architekturę dwóch wariantów wizualizacji modelu: nieprzezroczystego oraz przezroczystego (transparent). Warianty te różnią się konfiguracją materiałów, natomiast struktura obiektów w scenie pozostaje analogiczna. Aplikacja przełącza aktywny wariant w zależności od żądania inspektora. Sterowanie wariantami oraz poziomem przezroczystości realizowane jest z poziomu menu użytkownika przy pomocy suwaków, a efektem jest możliwość obserwacji relacji przestrzennych pomiędzy warstwami danych bez utraty orientacji w modelu.

Wyposażenie inspektora stanowią autorskie narzędzia inspekcyjne zintegrowane z kontrolerami (Rys. 6-20), których zadaniem jest umożliwienie przestrzennego dokumentowania obserwacji bezpośrednio na modelu 3D. Interakcje te oparte są na wskazywaniu punktów na powierzchni modelu promieniem `Raycast` generowanym z kontrolera:

- **Znaczniki i notatki** `MarkingTool`**.** Narzędzie umożliwia osadzenie wirtualnego znacznika na powierzchni modelu. Umieszczenie znacznika odbywa się poprzez trafienie promieniem w model, a następnie zapisanie punktu kontaktu jako pozycji znacznika. Skrypt dodatkowo pobiera orientację płaszczyzny powierzchni w punkcie trafienia, a ustawienie znacznika jest od niej bezpośrednio zależne (tj. ustawiany jest prostopadle do danej powierzchni), co poprawia czytelność zapisu i ogranicza ryzyko „wtopienia" znacznika w model. Ponieważ środowisko VR utrudnia wprowadzanie dłuższego tekstu, w aplikacji zastosowano mechanizm notatek głosowych: inspektor naciska przycisk na kontrolerze i nagrywa komentarz przy użyciu mikrofonu wbudowanego w gogle, a nagranie jest przypisywane do utworzonego znacznika.
- **Pomiary przestrzenne** `MeasurementTool`**.** Narzędzie umożliwia wykonywanie prostych pomiarów na modelu 3D. Mechanizm działania opiera się na wskazaniu dwóch punktów na powierzchni modelu promieniem z kontrolera i obliczeniu odległości przestrzennej pomiędzy nimi. Wynik jest prezentowany w postaci dwóch znaczników sferycznych połączonych odcinkiem pomiarowym oraz wartości liczbowej. Dokładność pomiaru zależy od jakości danych wejściowych (w szczególności od zachowania skali modelu oraz gęstości siatki) oraz precyzji wskazania punktów w VR.
- **Zarządzanie ewidencją** `DeletingTool`**.** Narzędzie umożliwia usuwanie wcześniej utworzonych znaczników i pomiarów, co ułatwia zachowanie porządku w dokumentacji i korektę ewentualnych błędów popełnionych podczas inspekcji.



Rys. 6-20 Narzędzia inspekcyjne aplikacji VR Inspector

Opisane mechanizmy zarządzania modelami oraz narzędzia inspekcyjne wspierają ustandaryzowany przepływ pracy zgodny ze schematem z pkt. 6.1.3: inspektor ustawia się względem obiektu, dobiera widoczność i sposób prezentacji danych, a następnie wykonuje inspekcję,

dokumentując obserwacje. Dzięki temu *VR Inspector* stanowi środowisko, w którym zachowana jest metodyka pracy z danych przestrzennych, a jednocześnie wzbogacona o cechy wynikające z immersji, naturalnej percepcji skali oraz możliwości integracji modeli.7

6.4.4 Weryfikacja działania aplikacji na wybranych obiektach mostowych

Weryfikację działania aplikacji *VR Inspector* przeprowadzono wykorzystując dane przestrzenne pozyskane z wybranych obiektów mostowych. Celem testów była ocena, czy aplikacja umożliwia realizację podstawowych etapów wirtualnej inspekcji w środowisku immersyjnym zgodnie ze schematem z pkt. 6.1.3, a w szczególności czy zapewnia:

- sprawne pozycjonowanie inspektora względem obiektu,
- selekcję warstw i wariantów wizualizacji,
- stabilne oznaczanie obserwacji oraz wykonywanie pomiarów,
- utrzymanie ergonomii pracy podczas dłuższych sesji.

Jako główny przypadek testowy przyjęto most w Kurowie, ze szczególnym uwzględnieniem jego wysokich pylonów. W scenie umieszczono model bryłowy obiektu obejmujący jego pełną geometrię oraz szczegóły wnętrza pylonów w postaci zbrojenia miękkiego, kabli sprężających oraz lin. Równolegle zaimportowano również modele fotogrametryczne sześciu pylonów. Taki zestaw danych stanowił właściwe środowisko do weryfikacji ruchu pionowego, przełączania widoków oraz pracy na warstwach o różnej naturze: modelach fotogrametrycznych jako nośnikach informacji wizualnej (powierzchnia i detale) oraz modelach bryłowych jako odniesieniach geometrycznych i reprezentacjach elementów wewnętrznych. Dodatkowo przeprowadzono testy poprawności działania aplikacji na danych z filara wiaduktu w Chorzowie. Przypadek ten potraktowano jako materiał uzupełniający, służący weryfikacji kompatybilności mechanizmów aplikacji z odmienną organizacją sceny oraz inną hierarchią modeli.

Testy zrealizowano w formie scenariusza pracy odzwierciedlającego przebieg wirtualnej inspekcji (pkt. 6.1.3). Ujęcia z procesu inspekcji pylonu mostu w Kurowie w środowisku immersyjnym przedstawiono na Rys. 6-22, natomiast analogiczne ujęcia z inspekcji filara wiaduktu w Chorzowie na Rys. 6-21. Proces obejmował następujące kroki:

- **Uruchomienie sceny i wstępna orientacja:** po wczytaniu sceny użytkownik wykonywał przegląd globalny, ustalając położenie względem obiektu i identyfikując obszary wymagające analizy szczegółowej. Wykonywano także pomiary referencyjne w celu weryfikacji poprawności skali oraz osadzenia modeli w scenie
- **Nawigacja po obiekcie:** poza klasycznym przemieszczeniem w płaszczyźnie poziomej przy użyciu drążków kontrolerów, wykorzystano funkcje lotu wzdłuż wysokich podpór. Dodatkowo stosowano skoki do predefiniowanych punktów widokowych rozmieszczonych wokół pylonu lub filara.
- **Dobór warstw i wizualizacji danych: w** zależności od analizowanego elementu włączano i wyłączano warstwy modeli oraz dostosowywano poziom przezroczystości. Pozwalało to m.in. na lokalizację zbrojenia miękkiego w podporach oraz odniesienie przebiegu kabli sprężających i lin w pylonach mostu w Kurowie do stanu powierzchni betonowej, w tym obserwowanych nieciągłości oraz wad materiałowych, które były widoczne w danych fotogrametrycznych.

- **Dokumentowanie obserwacji i pomiary robocze:** po zbliżeniu się do wybranych fragmentów konstrukcji rejestrowano obserwacje w postaci znaczników osadzanych na powierzchni modelu wraz z powiązaną notatką głosową. W obszarach wymagających oceny ilościowej wykonywano pomiary odległości pomiędzy punktami wskazanymi promieniem z kontrolera. W przypadku potrzeby korekty wykorzystywano narzędzie usuwania znaczników i pomiarów, co pozwalało zachować czytelność sceny i porządek ewidencji.

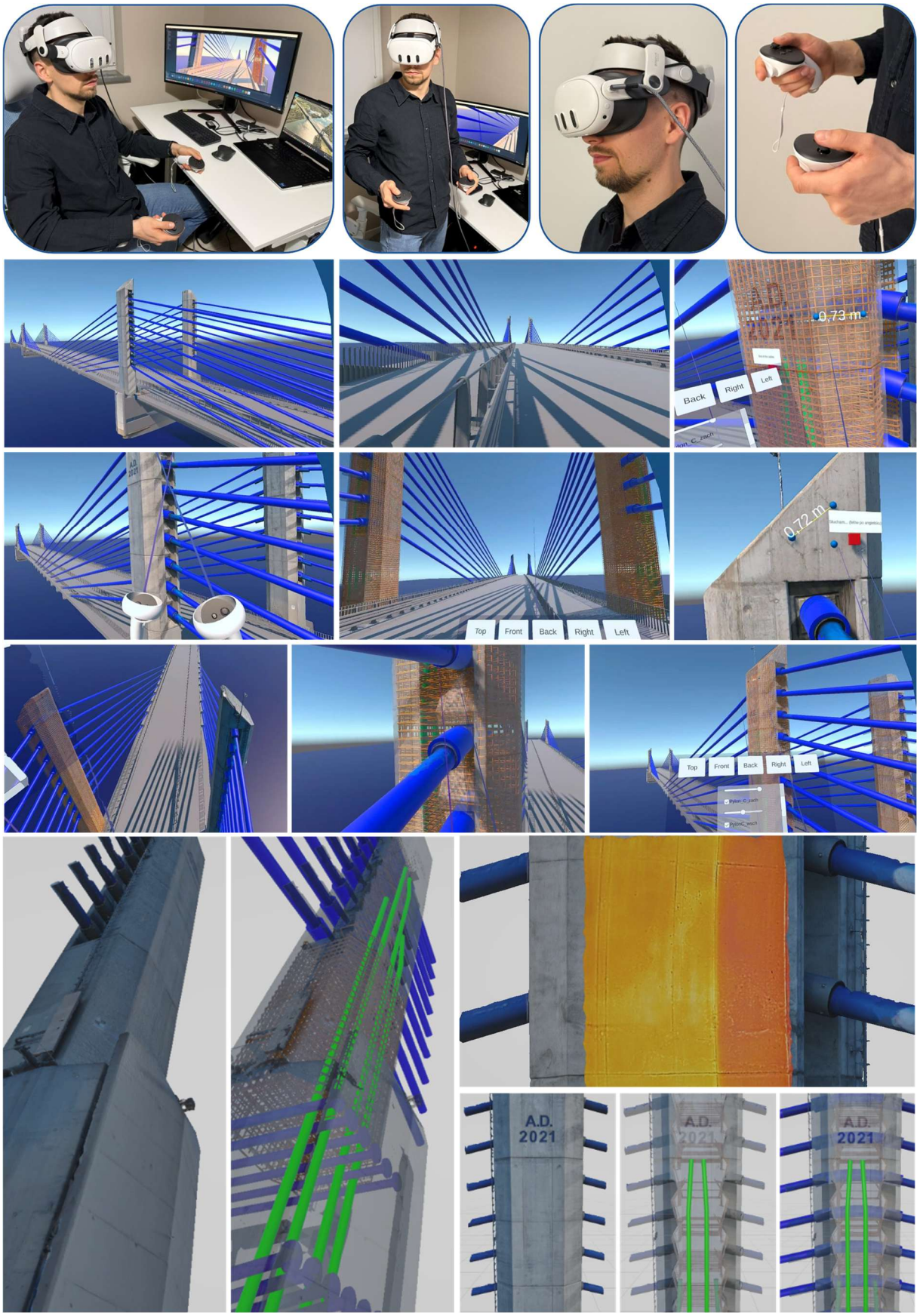


Rys. 6-21 Proces inspekcji filara wiaduktu w Chorzowie w środowisku immersyjnym

Testy wykazały, że aplikacja umożliwia sprawne poruszanie się użytkownika w środowisku immersyjnym, które, w odróżnieniu od typowego środowiska komputerowego, zapewnia naturalną percepcję głębi oraz możliwość obserwowania obiektów w ich rzeczywistych rozmiarach. Pozytywnie oceniono zarówno mechanikę nawigacji (w tym ruch pionowy i skoki do widoków), jak i funkcje związane z zarządzaniem warstwami danych oraz sterowaniem przezroczystością. Rozwiązania te umożliwiały analizę relacji przestrzennych pomiędzy modelami o różnym charakterze, co stanowi przewagę *VR Inspector* nad testowanymi rozwiązaniami opartymi wyłącznie na przeglądarce.

Narzędzia inspekcyjne w postaci znaczników, pomiarów oraz notatek głosowych również zostały pozytywnie zweryfikowane pod względem ergonomii i użyteczności. Należy jednak zaznaczyć, że dokładność pomiarów zależy od jakości danych wejściowych oraz precyzji wskazania punktów w VR. Mając na uwadze, że aplikacja pozwala na obsługę teoretycznie nieograniczonej liczby warstw pochodzących z różnych źródeł danych, podjęto również pierwsze, pozytywne próby integracji z fragmentarycznymi danymi termograficznymi. Stwierdzono jednak, że do uzyskania w pełni użytecznego efektu inżynierskiego niezbędne jest przygotowanie materiałów wsadowych o odpowiedniej jakości i kompletności, które nie były dostępne w ramach niniejszego badania.

W trakcie weryfikacji zidentyfikowano również ograniczenia aktualnej, prototypowej wersji aplikacji. Stabilność części funkcji jest w pewnym stopniu zależna od sposobu przygotowania sceny i hierarchii modeli (np. konsekwentnego nazewnictwa i organizacji wariantów opaque/transparent), co wymaga podstawowej znajomości środowiska Unity przy przygotowywaniu scen dla nowych obiektów. Ponadto dokumentowanie wyników w wersji prototypowej ma charakter tymczasowy. Obserwacje mogą być oznaczane w czasie rzeczywistym, jednak po zakończeniu sesji nie są jeszcze automatycznie zapisywane ani dostępne podczas kolejnych uruchomień. Naturalnym kierunkiem rozwoju jest zatem integracja trwałego zapisu, ustrukturyzowanego raportowania oraz eksportu danych do powszechnie wykorzystywanych formatów.



Rys. 6-22 Proces inspekcji pylonu mostu w Kurowie w środowisku immersyjnym

Doświadczenia zebrane podczas projektowania, budowy i testowania aplikacji wskazują na szeroki potencjał jej dalszego rozwoju. Do priorytetowych kierunków przyszłych prac zaliczyć należy:

- dalszą personalizację procesu dokumentowania (szablony opisów, klasyfikacje, eksport obserwacji),
- rozszerzenie integracji danych o dodatkowe warstwy diagnostyczne (np. termowizja, dane z georadarów),
- wdrożenie systemów wspomagających diagnostykę, opartych na sztucznej inteligencji, m.in. poprzez półautomatyczną detekcję wybranych klas uszkodzeń oraz wsparcie agenta AI w trakcie inspekcji,
- stworzenie komplementarnej wersji desktopowej aplikacji umożliwiającej obsługę w środowisku komputerowym bez użycia gogli,
- kompilację aplikacji do wersji autonomicznej, działającej bez stacji roboczej, przy zachowaniu akceptowalnej wydajności.

Podsumowując przeprowadzone testy wdrożeniowe, należy stwierdzić, że autorska aplikacja *VR Inspector* pomyślnie zweryfikowała koncepcję inspekcji w środowisku immersyjnym. Umożliwiła ona realizację kluczowych czynności inspekcyjnych w VR i stanowi praktyczne rozwinięcie metodyki Poziomu 4 piramidy wirtualizacji. Przeniesienie procesu diagnostycznego z tradycyjnego środowiska komputerowego do wirtualnej rzeczywistości pozwoliło uzyskać naturalną percepcję głębi oraz poczucie rzeczywistej skali obiektu. Dodatkowym atutem aplikacji względem testowanych rozwiązań przeglądarkowych była integracja modeli o różnej naturze oraz możliwość „prześwietlenia" obiektu dzięki sterowaniu przezroczystością.

Obecna architektura oprogramowania ma charakter prototypowy, a przeprowadzone testy wskazały obszary, które mogą zostać rozwinięte w kolejnych wersjach aplikacji, w szczególności w zakresie standaryzacji przygotowania scen, integracji eksportu wyników oraz rozszerzenia funkcji wspomagania analizy. Mimo to już na tym etapie można stwierdzić, że wirtualna rzeczywistość staje się użytecznym środowiskiem pracy dla inspektorów.

6.5 Scenariusze pracy inspektora na etapie wirtualnej inspekcji

Etap wirtualnej inspekcji odpowiadający Poziomowi 4 piramidy wirtualizacji można przedstawić jako zestaw powtarzalnych scenariuszy pracy, w których inspektor wykorzystuje cyfrowe odwzorowanie obiektu do identyfikacji uszkodzeń, ich dokumentowania oraz przygotowania materiału do dalszych decyzji i analiz. Dobór konkretnego scenariusza zależy przede wszystkim od celu sesji inspekcyjnej oraz przyjętego środowiska pracy. W praktyce scenariusze te nie są rozłączne, mogą być stosowane sekwencyjnie lub równolegle, a ich łączenie stanowi naturalny sposób wykorzystania mocnych stron różnych narzędzi.

Poniżej wyróżniono pięć scenariuszy obejmujących typowe sytuacje występujące na etapie inspekcji w środowisku wirtualnym. Ich graficzną reprezentację przedstawiono na Rys. 6-23. Każdy scenariusz opisano w ujednoliconym schemacie uwzględniającym: środowisko i dane, cel, charakterystykę procesu oraz zalety i ograniczenia.

Scenariusz A: Inspekcja wizualna w środowisku komputerowym

- **Środowisko i dane wejściowe:** Standardowa przeglądarka internetowa lub dedykowana aplikacja desktopowa na stacji roboczej wyposażonej w monitor wysokiej rozdzielczości. Podstawowymi materiałami wsadowymi są zoptymalizowane fotogrametryczne modele siatkowe powiązane przestrzennie ze zdjęciami oraz modele bryłowe.
- **Cel i zastosowanie:** Ocena wizualna stanu technicznego, wskazanie obszarów wymagających uwagi i ewentualnej pogłębionej analizy.
- **Charakterystyka procesu i rezultat:** Praca ma charakter indywidualny. Inspektor wykonuje przegląd z użyciem klasycznych urządzeń peryferyjnych (mysz, klawiatura), oznacza uszkodzenia i selekcjonuje je do raportu. Rezultatem jest uporządkowana lista obserwacji oraz ustrukturyzowany raport zawierający karty uszkodzeń wraz z metadanymi.
- **Główna zaleta i ograniczenie wdrożeniowe:** Zaletą jest najniższy próg wejścia i brak konieczności inwestowania w specjalistyczny sprzęt komputerowy oraz pełna elastyczność pracy z dowolnego miejsca. Ograniczeniem jest brak naturalnej percepcji skali i głębi oraz utrudniona ocena geometrii uszkodzeń w skomplikowanych konstrukcjach, szczególnie gdy ich przebieg jest nietypowy.

Scenariusz B: Precyzyjna inspekcja geometryczna

- **Środowisko i dane wejściowe:** Specjalistyczne oprogramowanie inżynierskie CAD/BIM zainstalowane na stacji roboczej o wysokiej mocy obliczeniowej. Praca odbywa się najczęściej na surowych chmurach punktów o wysokiej gęstości oraz na modelach pochodnych.
- **Cel i zastosowanie:** Pogłębiona analiza geometrii wymagająca precyzyjnych pomiarów, w tym weryfikacja deformacji, rozstawów, pionowości, przekrojów czy skrajni.
- **Charakterystyka procesu i rezultat:** Wykwalifikowany inspektor wykonuje na chmurach punktów oraz modelach przekroje, pomiary, porównania i zestawienia odchyłek, a wyniki odnosi do obserwacji z przeglądu wizualnego. Rezultatem są dokładne dane geometryczne uszkodzeń służące do dalszych analiz obliczeniowych i formułowania zaleceń naprawczych.
- **Główna zaleta i ograniczenie wdrożeniowe:** Zaletą jest możliwość uzyskania wyników o wysokiej wiarygodności i przydatności metrologicznej (także do analiz porównawczych w czasie). Ograniczeniem są wymagania kompetencyjne personelu (praca na chmurach punktów bywa mało intuicyjna) oraz koszty licencji i utrzymania oprogramowania.

Scenariusz C: Inspekcja immersyjna

- **Środowisko i dane wejściowe:** Środowisko wirtualnej rzeczywistości zapewniające pełne zanurzenie (immersję) z wykorzystaniem dedykowanych gogli VR. Materiał wsadowy jest analogiczny do scenariusza A.
- **Cel i zastosowanie:** Ocena relacji przestrzennych i praca w skali 1:1, szczególnie istotne dla obiektów wysokich, rozległych i złożonych geometrycznie.
- **Charakterystyka procesu i rezultat:** Przebieg oraz rezultat procesu są zbliżone do scenariusza A. Jednak sposób interakcji i odczucie skali i głębi bardziej przypominają pracę na rzeczywistym obiekcie.

- **Główna zaleta i ograniczenie wdrożeniowe:** Zaletą jest uzyskanie naturalnej percepcji głębi i poczucia rzeczywistej skali konstrukcji. Ograniczeniami pozostają wyższa bariera technologiczna (konieczność posiadania gogli i konfiguracji stanowiska VR) oraz ryzyko wystąpienia objawów zmęczenia po długotrwałych sesjach.

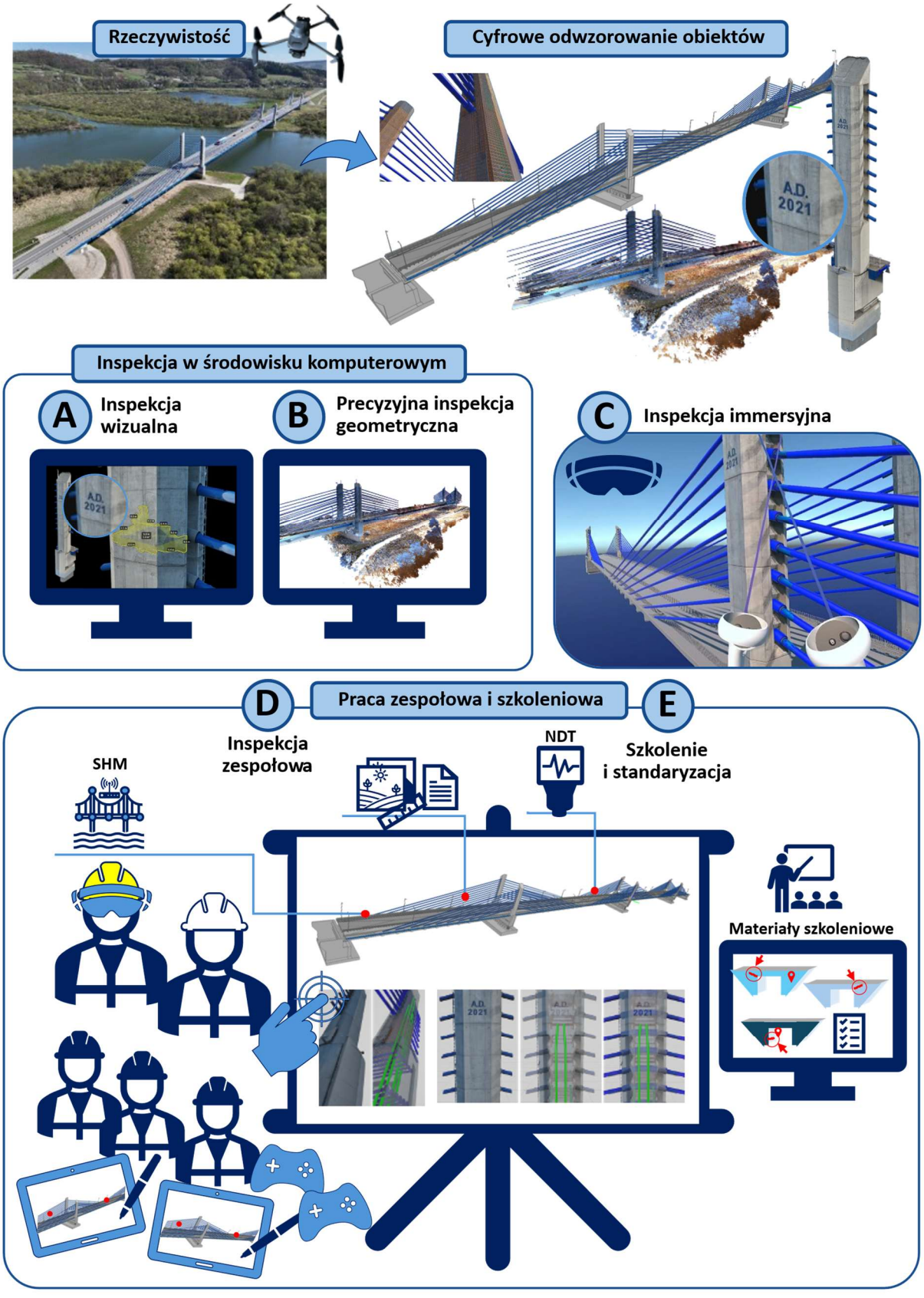
Scenariusz D: Inspekcja zespołowa

- **Środowisko i dane wejściowe:** Przestrzeń pracy grupowej: stacja robocza połączona z wielkoformatowym monitorem interaktywnym dla głównego użytkownika oraz urządzenia pomocnicze (np. tablet, kontrolery) dla uczestników, możliwa również praca zdalna. Alternatywnie scenariusz może być realizowany w środowisku immersyjnym w trybie wieloużytkownikowym (ang. multi-user). Materiał wsadowy jest analogiczny do tego używanego w scenariuszach A, B i C.
- **Cel i zastosowanie:** Zespołowe rozwiązywanie problemów oraz konsultacje z innymi uczestnikami procesu (np. zarządcami infrastruktury). Uzgadnianie interpretacji, priorytetów i dalszych działań.
- **Charakterystyka procesu i rezultat:** Zespół synchronicznie przegląda model i obserwacje, doprecyzowuje opisy i klasyfikację, decyduje o zakresie raportu oraz ustala plan uzupełnienia danych lub przeprowadzenia analiz. Dopuszczalne jest nanoszenie uwag roboczych na ekranie za pomocą rysika. Rezultatem jest zatwierdzona dokumentacja przeglądowa.
- **Główna zaleta i ograniczenie wdrożeniowe:** Zaletą jest przyspieszenie procesu decyzyjnego, ograniczenie błędów wynikających z barier komunikacyjnych oraz możliwość skutecznego przekazywania stanu technicznego między członkami zespołu. Ograniczeniem są dodatkowe wymagania organizacyjne i sprzętowe, np. wyposażenie sal konferencyjnych w specjalistyczny sprzęt do wizualizacji.

Scenariusz E: Szkolenie i standaryzacja

- **Środowisko i dane wejściowe:** Kontrolowane i w pełni bezpieczne środowisko wirtualne (komputerowe lub immersyjne). Materiałem bazowym jest zestaw modeli referencyjnych, z oznaczonymi uszkodzeniami, wzorcowymi opisami i punktami kontrolnymi (ang. checkpoints).
- **Cel i zastosowanie:** Szkolenie nowych inspektorów lub doszkalanie zespołu, kalibracja ocen, ujednolicenie sposobu dokumentowania oraz budowa biblioteki przykładów diagnostycznych.
- **Charakterystyka procesu i rezultat:** Użytkownicy analizują modele zgodnie z przyjętą metodyką (oznaczanie, opisy, oceny), porównują wyniki ze wzorcami i omawiają różnice. Środowisko może pełnić także funkcję egzaminacyjną, np. w formie zadań z punktami kontrolnymi. Rezultatem jest zestaw przykładów referencyjnych, poprawa spójności ocen w zespole oraz skrócenie czasu wdrożenia nowych osób, bez narażania personelu na ryzyko związane z pracą w terenie.
- **Główna zaleta i ograniczenie wdrożeniowe:** Zaletą jest powtarzalność, bezpieczeństwo i możliwość obiektywizacji oceny kompetencji przed dopuszczeniem do prac terenowych.

Ograniczeniem jest jednorazowy, duży nakład pracy konieczny do wyselekcjonowania i przygotowania modeli wzorcowych oraz potrzeba utrzymania jakości bazy szkoleniowej.



Rys. 6-23 Scenariusze pracy inspektora na etapie wirtualnej inspekcji

W praktyce scenariusze A–D mogą być ze sobą komplementarne i łączone. Przykładowym układem jest rozpoczęcie od przeglądu wizualnego (A), następnie, zależnie od potrzeb, przejście do analizy geometrycznej (B) lub inspekcji immersyjnej (C), a na końcu uzgodnienie wyników w trybie zespołowym (D) oraz przygotowanie raportu. Należy również pamiętać, że niezależnie od scenariusza podstawową korzyścią jest przeniesienie znacznej części prac inspekcyjnych do bezpiecznego środowiska biurowego. Natomiast głównym ograniczeniem pozostaje zależność od jakości danych wsadowych (modele, zdjęcia, chmury punktów).

Podsumowując, przedstawione scenariusze opisują typowe zastosowania narzędzi wirtualnej inspekcji i pokazują, że w praktyce nie istnieje jedno uniwersalne środowisko optymalne dla wszystkich zadań. Najlepszy efekt uzyskuje się poprzez świadome łączenie metod i środowisk, zależnie od celu inspekcji, jakości danych oraz wymaganej dokładności. Przedstawione scenariusze odnoszą się do Poziomu 4 piramidy wirtualizacji, natomiast na wyższych poziomach możliwe byłoby ich wzbogacenie zarówno o wsparcie algorytmów sztucznej inteligencji, jak i o systemy predykcyjne powiązane z danymi analitycznymi (np. SHM).

7 Podsumowanie i wnioski

7.1 Podsumowanie

Niniejsza rozprawa podejmuje próbę systematycznego ujęcia zagadnienia wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych zarówno w aspekcie naukowym, jak i wdrożeniowym. Główną motywacją do podjęcia tego tematu były osobiste wyzwania zawodowe i doświadczenie autora, który od wielu lat czynnie wykonuje terenowe inspekcje obiektów mostowych, a także rosnące problemy związane z utrzymaniem starzejącej się infrastruktury mostowej w wielu krajach świata, również w Polsce. W warunkach pogłębiającej się degradacji istniejących konstrukcji mostów, równoczesnego wzrostu liczby nowych obiektów oraz ograniczonych zasobów kadrowych i finansowych coraz większego znaczenia nabiera poszukiwanie rozwiązań umożliwiających podniesienie jakości, bezpieczeństwa, powtarzalności i efektywności procesu diagnostycznego. Jednocześnie rozwój technologii cyfrowych, technik przechwytywania rzeczywistości oraz środowisk wirtualnych stwarza możliwość stopniowej transformacji tradycyjnego modelu realizacji procesu inspekcji.

W ramach przeprowadzonych prac dokonano szczegółowej, krytycznej analizy krajowych oraz wybranych zagranicznych regulacji i praktyk dotyczących inspekcji obiektów mostowych. Opisano występujące problemy systemowe w zakresie diagnostyki mostów w Polsce, wraz ze wskazaniem propozycji ich rozwoju oraz kierunków modernizacji. Analiza ta pozwoliła również na identyfikację głównych ograniczeń tradycyjnych metod inspekcji, stanowiących punkt wyjścia do przedstawienia współczesnych technologii i narzędzi wspomagających inspekcję. Obejmowały one m.in. fotogrametrię, skanowanie laserowe, technologie immersyjne oraz roboty mobilne i sztuczną inteligencję.

Jednym z głównych osiągnięć rozprawy było opracowanie autorskiej koncepcji 9-poziomowej piramidy wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych, opisanej w rozdziale 4 i stanowiącej fundament naukowy pracy. Model ten porządkuje kolejne poziomy rozwoju procesu od inspekcji tradycyjnej po rozwiązania autonomiczne i systemy predykcyjne. Istotą tego modelu jest założenie, że wdrażanie kolejnych elementów wirtualizacji powinno mieć charakter stopniowy, a każdy poprzedni poziom stanowi podstawę dla kolejnego. Kluczowym etapem procesu jest cyfryzacja danych oraz stworzenie centralnych systemów organizacji informacji diagnostycznych. Uzupełnieniem tej koncepcji była propozycja standaryzacji identyfikacji elementów obiektów mostowych, ukierunkowana na stworzenie podstaw do integracji i przetwarzania danych diagnostycznych w środowisku cyfrowym.

Ze względu na szeroki i interdyscyplinarny charakter zagadnienia, rozprawa nie obejmowała eksperymentalnej weryfikacji wszystkich poziomów piramidy wirtualizacji. Badania ograniczono do rozwiązań możliwych do wdrożenia w warunkach o ograniczonych nakładach finansowych i organizacyjnych. Skupiono się głównie na zagadnieniach związanych z przechwytywaniem rzeczywistości, rekonstrukcją 3D oraz inspekcją w środowisku wirtualnym. Pozostałe elementy procesu, w szczególności te związane z automatyczną klasyfikacją uszkodzeń, integracją z systemami zarządzania infrastrukturą oraz rozwiązaniami predykcyjnymi, potraktowano jako kierunki dalszego rozwoju.

Cześć badawcza i wdrożeniowa obejmowała praktyczną weryfikację dwóch etapów piramidy: cyfrowego odwzorowania (poziom 3) oraz inspekcji w środowisku wirtualnym (poziom 4) poprzez realizację prac na reprezentatywnych poligonach badawczych (m.in. mosty w Kurowie i Gliwicach oraz wiadukt w Kędzierzynie-Koźlu). Opracowano metodykę pozyskiwania, przetwarzania i integracji danych przestrzennych z wykorzystaniem fotogrametrii i naziemnego skanowania laserowego. Wykazano możliwość tworzenia modeli cyfrowych o jakości wystarczającej do prowadzenia inspekcji wizualnej oraz analiz geometrycznych. Następnie przeanalizowano wykorzystanie środowisk wirtualnych do identyfikacji uszkodzeń, analizy trudno dostępnych elementów oraz pracy zespołowej nad wspólnym modelem obiektu. Wykorzystano do tego komercyjne platformy komputerowe oraz opracowano własną aplikację VR Inspector w środowisku Unity. Główne obszary rozprawy oraz relacje pomiędzy nimi przedstawiono schematycznie na Rys. 7-1.



Rys. 7-1 Graficzne podsumowanie struktury rozprawy

W ramach rozprawy zrealizowano wszystkie cele pracy przyjęte na wstępie. Dokonano analizy krajowych i zagranicznych regulacji oraz praktyk dotyczących inspekcji obiektów mostowych, zidentyfikowano główne ograniczenia podejścia tradycyjnego oraz przeprowadzono przegląd współczesnych technik wspomagających proces diagnostyczny. Opracowano autorską koncepcję wirtualizacji procesu inspekcji oraz metodykę cyfrowego odwzorowania wybranych obiektów mostowych na potrzeby inspekcji w środowisku wirtualnym. W ramach badań wykorzystano wybrane środowiska wirtualne do prowadzenia analiz na opracowanych modelach cyfrowych, a następnie oceniono skuteczność tego podejścia w ograniczaniu wybranych słabości metod tradycyjnych. Efektem końcowym było również sformułowanie wniosków oraz scenariuszy praktycznego zastosowania elementów wirtualizacji w procesie inspekcji obiektów mostowych.

Przeprowadzone badania, analizy oraz prace doświadczalne pozwoliły potwierdzić główną tezę rozprawy, zgodnie z którą wdrożenie elementów wirtualizacji procesu inspekcji wybranych obiektów mostowych, opartych na integracji danych uzyskanych za pomocą technik przechwytywania rzeczywistości oraz środowisk wirtualnych, pozwala na skuteczne niwelowanie ograniczeń podejścia tradycyjnego. Weryfikacja ta opiera się na potwierdzeniu czterech tez pomocniczych.

- Wykazano, że techniki przechwytywania rzeczywistości umożliwiają opracowanie modeli o jakości wystarczającej do prowadzenia wiarygodnych analiz wizualnych i geometrycznych w środowisku wirtualnym.
- Potwierdzono, że środowiska wirtualne wspomagają identyfikację uszkodzeń oraz analizę trudno dostępnych elementów konstrukcji, umożliwiając przeniesienie części działań diagnostycznych do bezpiecznych i powtarzalnych warunków biurowych.
- Wykazano, że integracja danych geometrycznych, fotograficznych i opisowych w ramach wspólnego modelu cyfrowego (m.in. na platformie Nira) wspomaga organizację informacji diagnostycznych, ich archiwizację oraz późniejszą analizę przez różnych uczestników procesu.
- Potwierdzono, że skuteczne wdrażanie wirtualizacji wymaga podejścia etapowego. Zakres zastosowania nowoczesnych technologii powinien być dostosowany zarówno do specyfiki obiektu, jak i możliwości organizacyjnych, technicznych oraz ekonomicznych jednostki prowadzącej inspekcję. Opracowana piramida wirtualizacji porządkuje ten proces i wskazuje kierunki jego rozwoju.

Uzyskane wyniki potwierdzają, że zastosowanie elementów wirtualizacji na wybranych obiektach może stanowić wartościowe uzupełnienie tradycyjnych metod inspekcji, szczególnie w zakresie dokumentowania stanu technicznego, trwałej archiwizacji danych oraz poprawy bezpieczeństwa pracy inspektorów.

7.2 Wnioski

7.2.1 Ograniczenia podejścia tradycyjnego i potrzeba transformacji cyfrowej

Przeprowadzone analizy krajowych i zagranicznych regulacji oraz doświadczenia praktyczne związane z realizacją inspekcji obiektów mostowych pozwoliły na identyfikację głównych ograniczeń obecnego systemu inspekcji oraz sformułowanie wniosków dotyczących dalszych kierunków rozwoju:

- **Problemy systemowe i regulacyjne:** Utrzymanie obiektów mostowych staje się coraz większym wyzwaniem ze względu na starzenie się istniejącej infrastruktury, przyrost liczby nowych obiektów oraz ograniczone zasoby kadrowe i finansowe. Polski system inspekcji obiektów mostowych pozostaje niespójny pod względem regulacyjnym i organizacyjnym. Systemy drogowe i kolejowe stosują odmienne klasyfikacje, nazewnictwo, sposoby oceny oraz opisu uszkodzeń, a część obowiązujących regulacji nie nadąża za rozwojem technologii cyfrowych i nowoczesnych metod diagnostycznych. Dla rozwoju krajowego systemu kluczowe znaczenie mają: cyfryzacja ewidencji, standaryzacja opisów, uporządkowanie terminologii, rozwój centralnych baz danych oraz wprowadzenie podejścia semantycznego i ontologicznego. W przyszłości zasadne może być dążenie do ujednolicenia wytycznych na poziomie europejskim, jednak obecne zróżnicowanie krajowych systemów sprawia, że takie rozwiązanie jest trudne do wdrożenia.
- **Konieczność cyfryzacji:** Chaos ewidencyjny, rozproszona dokumentacja oraz brak centralnych systemów cyfrowych stanowią jedne z głównych ograniczeń rozwoju nowoczesnego zarządzania mostami. Analiza rozwiązań zagranicznych wskazuje, że skuteczna cyfryzacja opiera się przede wszystkim na standaryzacji danych, uporządkowaniu terminologii oraz centralnych bazach informacji diagnostycznych.
- **Ograniczona dostępność i bezpieczeństwo:** W ramach inspekcji obiektów mostowych często wymagany jest bezpośredni dostęp do elementów konstrukcji, co w przypadku obiektów wysokich, rozległych lub trudno dostępnych znacząco utrudnia prowadzenie diagnostyki. Dostęp do elementów takich jak łożyska, przęsła znajdujące się wysoko nad terenem czy głowice pylonów bywa nie tylko kosztowny i czasochłonny, ale przede wszystkim wiąże się z bezpośrednim ryzykiem dla zdrowia i życia inspektorów oraz koniecznością stosowania specjalistycznych środków dostępu. W części przypadków wiarygodna ocena wybranych elementów przy użyciu wyłącznie tradycyjnych technik może być znacznie utrudniona lub wręcz niemożliwa.
- **Powtarzalność i archiwizacja danych:** Istotnym ograniczeniem tradycyjnego procesu diagnostycznego jest niska powtarzalność i subiektywny charakter oceny stanu technicznego. Kolejne inspekcje często wykonują różni inspektorzy, a możliwość późniejszej analizy zależy głównie od jakości sporządzonej dokumentacji opisowej i fotograficznej, która nie zawsze pozwala na pełne odtworzenie rzeczywistego stanu obiektu. Rozproszony i nieustrukturyzowany charakter danych utrudnia również ich dalsze wykorzystanie analityczne, porównywanie zmian w czasie oraz budowę bardziej zaawansowanych systemów wspomagania decyzji.

- **Znaczenie wirtualizacji:** Wirtualizacja procesu inspekcji nie powinna być rozumiana jako próba całkowitego zastąpienia metod tradycyjnych, lecz jako stopniowa, systemowa transformacja sposobu gromadzenia, przetwarzania i wykorzystywania informacji diagnostycznych, skutecznie wspierająca pracę inspektora oraz rozszerzająca jego dotychczasowe możliwości analityczne.

7.2.2 Cyfrowe odwzorowanie i inspekcja w środowisku wirtualnym

Badania przeprowadzone w ramach rozprawy pozwoliły ocenić możliwości wykorzystania technik przechwytywania rzeczywistości oraz środowisk wirtualnych w procesie inspekcji obiektów mostowych. Wynikające z tych prac wnioski i przemyślenia dotyczące metodyki ujęto w poniższych punktach:

- **Cyfrowe odwzorowanie obiektu:** Cyfrowe odwzorowanie stanowi fundament późniejszej inspekcji w środowisku wirtualnym i powinno być traktowane jako uporządkowany proces obejmujący przygotowanie, pozyskiwanie danych, ich przetwarzanie oraz pracę na nich. Należy przy tym ściśle rozróżniać przechwytywanie rzeczywistości (proces pozyskiwania danych terenowych) od rekonstrukcji 3D (przetwarzania danych w uporządkowaną reprezentację cyfrową).
- **Dobór technik przechwytywania rzeczywistości:** Przechwytywanie rzeczywistości nie powinno być traktowane jako obowiązkowy element każdej inspekcji, lecz jako jedna z możliwych ścieżek postępowania. Nie istnieje jedna uniwersalna technika odpowiednia dla wszystkich scenariuszy inspekcyjnych. Fotogrametria zapewnia bardzo dobrą informację wizualną i dobrze sprawdza się przy analizie powierzchni oraz prostszych geometrii, natomiast naziemne skanowanie laserowe gwarantuje wyższą jakość geometryczną i jest szczególnie wartościowe przy analizach deformacji czy złożonej geometrii obiektu. Biorąc pod uwagę mocne strony obu technik i ich komplementarny charakter, zaleca się ich integrację.
- **Jakość i łączenie danych:** Kluczowy wpływ na jakość modelu cyfrowego mają warunki pozyskiwania danych, odpowiednie pokrycie zdjęciami, rozmieszczenie stanowisk skanera oraz poprawność integracji danych z różnych źródeł. Przeprowadzone badania wykazały również, że nie w każdym przypadku możliwe jest osiągnięcie oczekiwanej jakości rekonstrukcji. Niemniej jednak poprawnie dobrane techniki przechwytywania rzeczywistości umożliwiają tworzenie cyfrowych odwzorowań obiektów mostowych o jakości w pełni wystarczającej do prowadzenia analiz wizualnych i geometrycznych.
- **Potencjał natychmiastowej rekonstrukcji**: Proste techniki szybkiej rekonstrukcji dostępne m.in. w urządzeniach mobilnych wyposażonych w czujniki LiDAR, mimo swoich ograniczeń, pełnią kluczową rolę w oswajaniu inżynierów z technologią 3D. Natychmiastowy efekt wizualny stanowi istotny czynnik zachęcający do wdrażania bardziej złożonych metod przechwytywania rzeczywistości, a w wielu przypadkach uzyskany efekt bywa wystarczający do dalszych analiz i prac diagnostycznych.
- **Typy modeli:** W wyniku cyfrowego odwzorowania mogą powstawać różne typy modeli o różnym profilu zastosowania (chmury punktów, modele siatkowe, fotogrametryczne, bryłowe, pozycjonujące oraz hybrydowe). Każdy z nich wymaga innego nakładu pracy

zarówno w terenie, jak i w biurze. Ostatecznie to inspektor powinien decydować o rodzaju modelu oraz wymaganym stopniu jego szczegółowości w zależności od konkretnego przypadku.

- **Integracja danych z badań NDT**: Wykazano możliwość łączenia modeli cyfrowych 3D z wynikami badań nieniszczących. Skuteczna implementacja tego podejścia w praktyce diagnostycznej wymaga jednak usystematyzowanego i skoordynowanego sposobu pozyskiwania danych terenowych, co umożliwia precyzyjną lokalizację przestrzenną oraz wizualizację wyników badań NDT bezpośrednio w strukturze modelu cyfrowego, istotnie podnosząc jego wartość w kontekście analizy stanu technicznego.
- **Ograniczenia w tworzeniu modeli:** Obecnie istotnym ograniczeniem dla tworzenia modeli bryłowych istniejących obiektów pozostaje czasochłonna, manualna interpretacja chmur punktów oraz konieczność ręcznego modelowania geometrii. Automatyzacja przetwarzania danych 3D i rozpoznawania komponentów konstrukcyjnych jest jednym z kluczowych warunków szerszego wdrażania modeli BIM dla istniejącej infrastruktury.
- **Inspekcja w środowisku wirtualnym:** Środowiska wirtualne umożliwiają przeniesienie części prac diagnostycznych do bezpiecznego środowiska biurowego, wspierają pracę zespołową oraz pozwalają na wielokrotną analizę danych bez konieczności ponownej wizyty na obiekcie. Platformy wykorzystywane w tradycyjnym środowisku komputerowym dobrze sprawdzają się przy analizie dokumentacji fotograficznej i modeli, natomiast środowiska immersyjne dodatkowo zwiększają percepcję przestrzenną oraz poczucie rzeczywistej skali obiektu.
- **Ograniczenia środowisk wirtualnych:** Skuteczność inspekcji w środowisku wirtualnym jest bezpośrednio zależna od jakości danych wejściowych uzyskanych na etapie cyfrowego odwzorowania. Główne ograniczenia stanowią konieczność przygotowania wysokiej jakości modeli, utrzymania uporządkowanych baz danych oraz zapewnienia ergonomii pracy podczas długotrwałych sesji wirtualnych.

7.2.3 Znaczenie praktyczne i kierunki wdrażania wirtualizacji

Na podstawie przeprowadzonych badań, analiz oraz doświadczeń zawodowych sformułowano wnioski dotyczące praktycznych aspektów wdrażania elementów wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych. Szczególną uwagę zwrócono na etapowość transformacji, znaczenie organizacji danych oraz rolę inspektora w tym procesie:

- **Podejście systemowe i etapowość wdrażania:** Wirtualizacja procesu inspekcji wymaga podejścia systemowego i nie może być utożsamiana wyłącznie z wdrożeniem pojedynczych narzędzi lub modeli 3D. Opracowana w rozprawie piramida wirtualizacji pokazuje, że transformacja procesu diagnostycznego ma charakter ewolucyjny i etapowy, a każdy kolejny poziom wymaga odpowiednich podstaw wypracowanych na niższych poziomach.
- **Znaczenie cyfryzacji:** Kluczowym etapem rozwoju procesu wirtualizacji jest cyfryzacja polegająca na stworzeniu uporządkowanych systemów organizacji i archiwizacji danych. Choć poszczególne poziomy piramidy mogą być rozwijane częściowo niezależnie, to ich skuteczna implementacja systemowa wymaga osiągnięcia odpowiedniego poziomu cyfryzacji.

- **Zakres wdrażania technologii:** Nie każdy obiekt mostowy wymaga osiągnięcia najwyższych poziomów piramidy wirtualizacji. Zakres wykorzystania nowoczesnych technologii powinien wynikać z charakteru obiektu, jego znaczenia, dostępności elementów oraz rzeczywistych potrzeb diagnostycznych. Proces wdrażania powinien być dostosowany do możliwości organizacyjnych, technicznych i ekonomicznych jednostki prowadzącej inspekcję i zarządcy.
- **Zmiana roli inspektora:** Wirtualizacja nie oznacza eliminacji inspektora, lecz stopniową zmianę jego roli. Od bezpośredniego wykonawcy wszystkich czynności po nadzorcę, weryfikatora i interpretatora danych, zgodnie z logiką human-in-the-loop. Skuteczne wdrażanie elementów wirtualizacji wymaga jednocześnie odpowiednich kompetencji technicznych oraz przygotowania organizacyjnego zespołów diagnostycznych.
- **Standaryzacja i identyfikacja elementów:** Standaryzacja identyfikacji elementów obiektów mostowych jest niezbędna dla skutecznego funkcjonowania cyfrowych systemów diagnostycznych oraz dalszej automatyzacji analiz. Proponowany system identyfikacji elementów oraz wykorzystanie oznaczeń terenowych, takich jak QR, NFC czy RFID, mogą wspierać integrację danych diagnostycznych i powiązanie fizycznego obiektu z jego cyfrową reprezentacją.
- **Edukacja i popularyzacja:** Środowiska wirtualne mogą wspierać tworzenie środowisk szkoleniowych, bibliotek uszkodzeń, a co za tym idzie, wpływać na proces nauki i oswojenia inspektorów z nowoczesnymi technikami diagnostycznymi. Ponadto platformy sieciowe i środowiska immersyjne zwiększają dostępność danych diagnostycznych oraz ułatwiają współpracę pomiędzy uczestnikami procesu utrzymaniowego.
- **Rozwój i efekty wirtualizacji**: Stały rozwój wirtualizacji procesu inspekcji wymaga zarówno postępu technologicznego, jak i stopniowej aktualizacji procedur, standardów oraz podejścia organizacyjnego do diagnostyki obiektów mostowych. W efekcie, biura inżynierskie i zarządcy sukcesywnie wdrażający elementy wirtualizacji mogą zwiększać precyzję wybranych działań diagnostycznych oraz ograniczać czas potrzebny na analizę danych. Szczególne znaczenie ma możliwość wielokrotnego powrotu do zgromadzonych informacji bez konieczności ponownego wykonywania części prac terenowych. Długofalowo podejście to umożliwia również budowę trwałych baz wiedzy o obiektach.

7.3 Stopień wdrożenia opracowanych rozwiązań

Realizacja rozprawy odbywała się w ramach programu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Doktorat wdrożeniowy". Badania prowadzone były we współpracy z przedsiębiorstwem **Mostoprojekt Katowice Sp. z o.o.**, co umożliwiło ich prowadzenie w bezpośrednim powiązaniu z rzeczywistymi potrzebami praktyki inżynierskiej. Część opracowanych rozwiązań została pomyślnie zweryfikowana podczas realizacji rzeczywistych, komercyjnych zadań diagnostycznych i eksperckich, natomiast pozostałe osiągnęły poziom gotowości umożliwiający ich dalsze wdrażanie. Przeprowadzone działania pozwoliły ocenić zarówno praktyczną użyteczność proponowanych metod, jak i możliwości ich implementacji w działalności przedsiębiorstwa zajmującego się diagnostyką i projektowaniem obiektów mostowych. Efekty badań w działalności firmy objęły trzy kluczowe obszary:

- **Wdrożenie technik przechwytywania rzeczywistości i rekonstrukcji 3D:** W ramach działalności przedsiębiorstwa wdrożono i rozwinięto wykorzystanie technik przechwytywania rzeczywistości, obejmujących głównie fotogrametrię i naziemne skanowanie laserowe oraz rekonstrukcję natychmiastową. Technologie te zostały wykorzystane podczas rzeczywistych prac diagnostycznych obejmujących m.in. inspekcje, ekspertyzy i inwentaryzacje obiektów mostowych. Efektem było wypracowanie praktycznych procedur pozyskiwania, przetwarzania i integracji danych przestrzennych dostosowanych do specyfiki infrastruktury mostowej. Pozwoliło to rozszerzyć zakres informacji możliwych do pozyskania podczas inspekcji oraz zwiększyć bezpieczeństwo realizacji wybranych prac terenowych.
- **Wykorzystanie cyfrowych modeli obiektów i środowisk wirtualnych:** W ramach prowadzonych prac opracowano i wykorzystano modele cyfrowe wybranych obiektów mostowych na potrzeby analiz stanu technicznego, obejmujących zarówno ocenę geometryczną, jak i wizualną. Potwierdzono możliwość wykorzystania takich modeli jako uzupełnienia danych pozyskiwanych metodami tradycyjnymi oraz jako narzędzia wspomagającego pracę zespołów diagnostycznych i projektowych. Przeprowadzono również praktyczną ocenę przydatności środowisk wirtualnych, w tym platform sieciowych, do pracy na danych diagnostycznych. Wyniki przeprowadzonych prac potwierdziły przydatność tego typu rozwiązań do prowadzenia analiz w rozproszonych zespołach specjalistów, usprawniając przepływ informacji wewnątrz struktur firmy oraz wspomagając proces raportowania.
- **Opracowanie demonstratora technologii VR Inspector:** W ramach badań opracowano autorską prototypową aplikację VR Inspector stanowiącą demonstrator technologii umożliwiający prowadzenie inspekcji w środowisku immersyjnym. Przeprowadzone testy potwierdziły możliwość wykorzystania środowisk VR do identyfikacji uszkodzeń oraz analizy elementów trudno dostępnych. Opracowane rozwiązanie stanowi podstawę do dalszego rozwoju i potencjalnego wdrożenia w przyszłych systemach diagnostycznych.

Realizacja badań przyczyniła się do rozwoju kompetencji przedsiębiorstwa w zakresie przechwytywania rzeczywistości, modelowania 3D oraz wykorzystania środowisk wirtualnych w procesie diagnostycznym i projektowym. Równocześnie rozbudowano zaplecze sprzętowe, programowe i organizacyjne umożliwiające dalsze wdrażanie elementów wirtualizacji procesu inspekcji. W efekcie firma osiągnęła gotowość techniczną i organizacyjną do realizacji nowoczesnych usług diagnostycznych odpowiadających kierunkom transformacji cyfrowej zachodzącej w budownictwie i zarządzaniu infrastrukturą.

Stopień wdrożenia oraz dojrzałości technologicznej rezultatów rozprawy można odnieść do skali Poziomu Gotowości Technologicznej (ang. Technology Readiness Level, TRL), wykorzystywanej do oceny gotowości technologii do praktycznego zastosowania. W przypadku niniejszej rozprawy ocenę tę należy odnosić nie do pojedynczych narzędzi informatycznych lub pomiarowych, lecz do zintegrowanej metodyki wirtualizacji procesu inspekcji obiektów mostowych. W zakresie zaprezentowanym i przebadanym w ramach niniejszej pracy, obejmującym pozyskiwanie danych, cyfrowe odwzorowanie obiektu, inspekcję wirtualną oraz wykorzystanie środowisk immersyjnych, metodyka ta osiągnęła

poziom gotowości zbliżony do TRL 7. Oznacza to, że w tym zdefiniowanym obszarze rozwiązanie zostało pomyślnie zweryfikowane w warunkach operacyjnych przedsiębiorstwa i osiągnęło poziom umożliwiający jego praktyczne stosowanie. Dalszy rozwój może natomiast polegać na standaryzacji procedur, rozszerzaniu zakresu zastosowań oraz uzupełnianiu opracowanego podejścia o kolejne poziomy piramidy wirtualizacji. Autorska aplikacja VR Inspector stanowi w tym ujęciu prototypowy komponent metodyki, potwierdzający możliwość wykorzystania środowisk immersyjnych w procesie inspekcji, a nie odrębny produkt informatyczny oceniany niezależnie w skali TRL.

Szczególnie istotnym wnioskiem wdrożeniowym wynikającym z rozprawy jest potwierdzenie zasadności etapowego podejścia do wdrażania elementów wirtualizacji procesu inspekcji. Opracowana piramida wirtualizacji okazała się użytecznym narzędziem porządkującym proces transformacji cyfrowej również na poziomie przedsiębiorstwa. Wskazuje ona, że skuteczne wykorzystanie bardziej zaawansowanych rozwiązań, takich jak środowiska wirtualne czy automatyczna analiza danych, wymaga wcześniejszego osiągnięcia odpowiedniego poziomu cyfryzacji danych, organizacji procesów oraz integracji informacji diagnostycznych. Doświadczenia z realizacji pracy potwierdziły, że również w firmie inżynierskiej proces ten powinien mieć charakter ewolucyjny i ściśle dostosowany do jej rzeczywistych potrzeb, dojrzałości technologicznej oraz możliwości organizacyjnych. W praktyce oznacza to, że poszczególne poziomy mogą być osiągane sukcesywnie, a korzyści operacyjne wynikające z transformacji pojawiają się już na jej wczesnych etapach wdrożenia, bez konieczności natychmiastowej implementacji bardziej skomplikowanych rozwiązań.

7.4 Kierunki dalszych badań

Ze względu na szeroki i interdyscyplinarny charakter tematyki wirtualizacji procesu inspekcji, przedstawione w rozprawie badania nie wyczerpują wszystkich zagadnień związanych z rozwojem diagnostyki obiektów mostowych. Przeprowadzone analizy oraz badania otwierają jednak nowe perspektywy naukowe i wdrożeniowe. Można wskazać szereg kierunków dalszych badań i rozwoju technologicznego, organizacyjnego oraz metodycznego:

- **Rozwój wyższych poziomów piramidy wirtualizacji:** Szczególnie istotnym kierunkiem dalszych prac jest rozwój cyfryzacji oraz wyższych poziomów piramidy związanych z automatyczną detekcją uszkodzeń, wspomaganiem inspekcji terenowej, robotyzacją w procesie diagnostycznym oraz systemami predykcyjnymi. Wymaga to dalszych badań nad integracją danych diagnostycznych, monitoringiem konstrukcji (SHM) oraz wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji.
- **Aktualizacja procedur i regulacji:** Rozwój elementów wirtualizacji procesu inspekcji będzie wymagał stopniowej i konsekwentnej aktualizacji procedur diagnostycznych, wytycznych oraz podejścia organizacyjnego do zarządzania infrastrukturą mostową. Szczególnie istotne wydaje się opracowanie zasad wykorzystania modeli cyfrowych i środowisk wirtualnych jako elementów wspomagających oficjalne procedury inspekcyjne, przy jednoczesnym rozwoju cyfrowych systemów gospodarki mostowej.
- **Standaryzacja, ontologie i semantyka danych:** Istotnym kierunkiem dalszych badań pozostaje rozwój systemów standaryzacji identyfikacji elementów obiektów mostowych oraz semantycznego opisu danych diagnostycznych. Rozwiązania te stanowią podstawę

automatyzacji analiz oraz wdrażania narzędzi opartych na sztucznej inteligencji. Przyszłe prace powinny koncentrować się na powiązaniu tych danych z otwartymi standardami openBIM, takimi jak IFC, a także standardy IDS oraz IDM. Pozwoli to na przełożenie instrukcji zarządców infrastruktury na język maszynowo czytelnych i automatycznie weryfikowalnych specyfikacji.

- **Automatyzacja przetwarzania danych 3D:** Jednym z kluczowych ograniczeń obecnych procesów kameralnych pozostaje konieczność ręcznego opracowywania modeli cyfrowych oraz interpretacji danych przestrzennych. Dalsze badania powinny koncentrować się na automatyzacji segmentacji chmur punktów, identyfikacji elementów konstrukcyjnych oraz generowaniu modeli bryłowych istniejących obiektów mostowych.
- **Integracja danych diagnostycznych:** Dalsze prace powinny obejmować rozwój metod integracji danych geometrycznych, fotograficznych, opisowych, pomiarowych oraz danych z badań diagnostycznych w ramach wspólnych środowisk cyfrowych. Wymaga to usystematyzowanego i skoordynowanego sposobu pozyskiwania danych terenowych, w tym również danych z badań NDT.
- **Rozwój środowisk wirtualnych:** Konieczne są dalsze badania dotyczące ergonomii pracy w środowiskach wirtualnych, w tym immersyjnych, dokładności prowadzonych analiz oraz zasad projektowania interfejsów wspomagających pracę inspektora. W zakresie rozwoju autorskiej aplikacji VR Inspector perspektywicznym kierunkiem jest rozbudowa modułów integracji danych, pracy wieloosobowej, dokumentowania obserwacji oraz opracowanie wariantu przeznaczonego do pracy w tradycyjnym środowisku komputerowym.

Obecne ograniczenia związane z czasochłonnością pozyskiwania i przetwarzania danych oraz zarządzaniem bardzo dużymi zbiorami informacji stanowią dziś jedną z głównych barier w powszechnym wdrażaniu wirtualizacji procesu inspekcji. Należy jednak zauważyć, że dynamiczny rozwój technologiczny ostatnich dekad wyraźnie pokazuje, jak szybko bariery te mogą być redukowane dzięki stałemu wzrostowi mocy obliczeniowej, automatyzacji przetwarzania danych, rozwiązaniom chmurowym oraz intensywnemu rozwojowi narzędzi opartych na sztucznej inteligencji. Wiele zagadnień, które współcześnie mogą wydawać się trudne do wdrożenia lub technologicznie odległe, w perspektywie kolejnych lat może stać się naturalnym standardem inżynierskim. Obecne ograniczenia nie powinny więc zniechęcać do zmian, wręcz przeciwnie, uzasadniają one potrzebę stopniowego budowania cyfrowych fundamentów pod te technologie już teraz.

Bibliografia

[1] Abu Dabous S., Al-Ruzouq R., Llort D.: Three-dimensional modeling and defect quantification of existing concrete bridges based on photogrammetry and computer aided design. Ain Shams Engineering Journal, 2023, s. 102231, https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102231

[2] Achuthan K., Hay N., Aliyari M., et al.: A Digital Information Model Framework for UAS-Enabled Bridge Inspection. Energies, 2021, s. 6017, https://doi.org/10.3390/en14196017

[3] Agdas D., Rice J. A., Martinez J. R., et al.: Comparison of Visual Inspection and Structural-Health Monitoring As Bridge Condition Assessment Methods. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2016, s. 04015049, https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0000802

[4] Agnisarman S., Lopes S., Chalil Madathil K., et al.: A survey of automation-enabled human-in-the-loop systems for infrastructure visual inspection. Automation in Construction, 2019, s. 52–76, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.019

[5] AINOP – Portale Infrastrutture. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti [Internet]. [dostęp: 06.09.2025]. Dostępne na: https://ainop-coll.mit.gov.it/portale/#/,

[6] Akbarieh A., Tetervov V.: Semantic modelling to support design for decommissioning and reuse through OpenBIM and the buildingSMART data dictionary. Digital Engineering, 2026, s. 100112, https://doi.org/10.1016/j.dte.2026.100112

[7] Akula M., Lipman R. R., Franaszek M., et al.: Real-time drill monitoring and control using building information models augmented with 3D imaging data. Automation in Construction, 2013, s. 1–15, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.08.010

[8] Aliyari M., Ashrafi B., Ayele Y. Z.: Hazards identification and risk assessment for UAV–assisted bridge inspections. Structure and Infrastructure Engineering, 2022, s. 412–428, https://doi.org/10.1080/15732479.2020.1858878

[9] Aliyari M., Droguett E. L., Ayele Y. Z.: UAV-Based Bridge Inspection via Transfer Learning. Sustainability, 2021, s. 11359, https://doi.org/10.3390/su132011359

[10] Alizadehsalehi S., Hadavi A., Huang J. C.: From BIM to extended reality in AEC industry. Automation in Construction, 2020, s. 103254, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103254

[11] Al-Sabbag Z. A., Yeum C. M., Narasimhan S.: Enabling human–machine collaboration in infrastructure inspections through mixed reality. Advanced Engineering Informatics, 2022, s. 101709, https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101709

[12] Altuntas C., Karabork H., Tusat E.: Georeferencing of ground-based LIDAR data using continuously operating reference stations. Optical Engineering, 2014, s. 114110, https://doi.org/10.1117/1.OE.53.11.114110

[13] Anastasiou E., Balafoutis A. T., Fountas S.: Applications of extended reality (XR) in agriculture, livestock farming, and aquaculture: A review. Smart Agricultural Technology, 2023, s. 100105, https://doi.org/10.1016/j.atech.2022.100105

[14] Araya-Santelices P., Grande Z., Atencio E., et al.: Bridge management with AI, UAVs, and BIM. Automation in Construction, 2025, s. 106170, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106170

[15] Ayele Y. Z., Aliyari M., Griffiths D., et al.: Automatic Crack Segmentation for UAV-Assisted Bridge Inspection. Energies, 2020, s. 6250, https://doi.org/10.3390/en13236250

[16] Bao Y., Tang Z., Li H., et al.: Computer vision and deep learning–based data anomaly detection method for structural health monitoring. Structural Health Monitoring, 2019, s. 401–421, https://doi.org/10.1177/1475921718757405

[17] Barone D., Jiang L., Amyot D., et al.: Reasoning with Key Performance Indicators. Springer Berlin Heidelberg, 2011, https://doi.org/10.1007/978-3-642-24849-8_7

[18] Barrile V., Bilotta G., Nunnari A.: UAV and computer vision, detection of infrastructure losses and 3D modeling. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2017, s. 135–139, https://doi.org/10.5194/isprs-annals-IV-4-W4-135-2017

[19] Barrile V., Candela G., Fotia A., et al.: UAV Survey of Bridges and Viaduct: Workflow and Application. Springer International Publishing, 2019, https://doi.org/10.1007/978-3-030-24305-0_21

[20] Bellon F. G., Martins A. C. P., Franco De Carvalho J. M., et al.: IFC framework for inspection and maintenance representation in facility management. Automation in Construction, 2025, s. 106157, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106157

[21] Bień J.: Uszkodzenia i diagnostyka obiektów mostowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2010, ISBN: 978-83-206-1791-7

[22] Bień J.: Wprowadzenie do terminologii inżynierii mostowej. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2022, ISBN: 978-83-7125-296-9

[23] Bień J.: Mosty kolejowe - uszkodzenia, awarie, katastrofy. XXIV Konferencja Naukowo-Techniczna Awarie Budowlane, Szczecin-Międzyzdroje, 2009

[24] Bień J.: Modelowanie obiektów mostowych w procesie ich eksploatacji. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2002

[25] BIM-M-01. Powiązanie wymagań technicznych dotyczących drogowych obiektów inżynierskich z technologią BIM, Ministerstwo Infrastruktury, 2021

[26] Boccacci G., Frasca F., Bertolin C., et al.: Diagnosis of Historic Reinforced Concrete Buildings: A Literature Review of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques. Procedia Structural Integrity, 2024, s. 160–167, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.02.021

[27] Boddupalli C., Sadhu A., Rezazadeh Azar E., et al.: Improved visualization of infrastructure monitoring data using building information modeling. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, s. 1247–1263, https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1602150

[28] Bolourian N., Hammad A.: LiDAR-equipped UAV path planning considering potential locations of defects for bridge inspection. Automation in Construction, 2020, s. 103250, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103250

[29] Bono A., D'Alfonso L., Fedele G., et al.: Path Planning and Control of a UAV Fleet in Bridge Management Systems. Remote Sensing, 2022, s. 1858, https://doi.org/10.3390/rs14081858

[30] Brennen J. S., Kreiss D.: Digitalization. Wiley, 2016, https://doi.org/10.1002/9781118766804.wbiect111

[31] Bruinspeksjon med drone og infrarødt kamera. Resultater fra innledende forsøk. Statens vegvesens rapporter nr. 264, Statens vegvesen, 2019

[32] Bruinspeksjon med drone. Statens vegvesens rapporter nr. 224, Statens vegvesen, 2019

[33] Calvert G., Neves L., Andrews J., et al.: Modelling interactions between multiple bridge deterioration mechanisms. Engineering Structures, 2020, s. 111059, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111059

[34] Camozzi Automation – The creation process of the robots for the New Bridge in Genoa. YouTube, 2020 [Internet]. [dostęp: 06.09.2025]. Dostępne na: https://www.youtube.com/watch?v=ZDdezoQye5M&ab_channel=CamozziAutomation,

[35] Cano M., Pastor J. L., Tomás R., et al.: A New Methodology for Bridge Inspections in Linear Infrastructures from Optical Images and HD Videos Obtained by UAV. Remote Sensing, 2022, s. 1244, https://doi.org/10.3390/rs14051244

[36] Casas L., Ciccone L., Çimen G., et al.: Multi-reality games: an experience across the entire reality-virtuality continuum. Proceedings of the 16th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and its Applications in Industry, Tokyo Japan, 2018, s. 1–4, https://doi.org/10.1145/3284398.3284411

[37] Castellani M., A. M., E. G.-M., et al.: UAV photogrammetry and laser scanning of bridges: a new methodology and its application to a case study. Procedia Structural Integrity, 2024, s. 193–200, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.033

[38] Catbas F. N., Luleci F., Zakaria M., et al.: Extended Reality (XR) for Condition Assessment of Civil Engineering Structures: A Literature Review. Sensors, 2022, s. 9560, https://doi.org/10.3390/s22239560

[39] Cheema P., Alamdari M. M., Chang K. C., et al.: A drive-by bridge inspection framework using non-parametric clusters over projected data manifolds. Mechanical Systems and Signal Processing, 2022, s. 109401, https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2022.109401

[40] Chen S., Laefer D. F., Mangina E., et al.: UAV Bridge Inspection through Evaluated 3D Reconstructions. Journal of Bridge Engineering, 2019, s. 05019001, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001343

[41] Chen W., Zhang X., Yuan B., et al.: Adaptive drone inspection strategy for bridge based on multi-level representation learning. Advanced Engineering Informatics, 2025, s. 103589, https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103589

[42] Chen Y., Li H., Zhu H., et al.: Concrete Bridge Crack Detection Using Unmanned Aerial Vehicles and Image Segmentation. Infrastructures, 2025, s. 161, https://doi.org/10.3390/infrastructures10070161

[43] Chen Y., Yang H., Fu W., et al.: Gaussian processes-based Bayesian updating framework for time-dependent reliability assessment of aging bridges with limited inspection data.

Probabilistic Engineering Mechanics, 2025, s. 103820, https://doi.org/10.1016/j.probengmech.2025.103820

[44] Cherapanukorn V., Pattanasak P., Wudhikarn R.: Key performance indicators for sustainable business incubation: identification and prioritization. Sustainable Futures, 2025, s. 101284, https://doi.org/10.1016/j.sftr.2025.101284

[45] Chi H.-L., Kim M.-K., Liu K.-Z., et al.: Rebar inspection integrating augmented reality and laser scanning. Automation in Construction, 2022, s. 104183, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104183

[46] Chou J.-S., Lien J.-S., Liu C.-Y.: Integrative AI and UAV-based visual recognition with metaheuristics for automated repair cost analysis of bridge structural deterioration. Automation in Construction, 2025, s. 106273, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106273

[47] Chou J.-S., Liu C.-Y., Shih H.-Y., et al.: Automated annotation of steel corrosion in UAV-captured images from beneath bridge decks using metaheuristic-optimized computer vision. Structures, 2025, s. 108696, https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108696

[48] Ciprian Firu A., Ion Tapîrdea A., Ioana Feier A., et al.: Virtual reality in the automotive field in industry 4.0. Materials Today: Proceedings, 2021, s. 4177–4182, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.037

[49] Cuong N. D., Nguyen Q., Shim C., et al.: Developing a mixed-reality based application for bridge inspection and maintenance. The 20th International Conference on Construction Applications of Virtual Reality (CONVR 2020), Curve Building, Southfield Rd, Middlesbrough TS1 3JN, UK, 2020

[50] Daineko Y., Turzhanov U., Uali M., et al.: Virtual Basic Military Training: Using XR Technologies to Develop Basic Skills in a Cyber Environment. Procedia Computer Science, 2025, s. 610–615, https://doi.org/10.1016/j.procs.2025.07.227

[51] Damar M., Özen A., Çakmak Ü. E., et al.: Super AI, Generative AI, Narrow AI and Chatbots: An Assessment of Artificial Intelligence Technologies for The Public Sector and Public Administration. Journal of AI, 2024, s. 83–106, https://doi.org/10.61969/jai.1512906

[52] Damas Mollá L., Sagarna Aranburu M., Uriarte J. A., et al.: Understanding the pioneering techniques in reinforced concrete: the case of Punta Begoña Galleries, Getxo, Spain. Building Research & Information, 2020, s. 785–801, https://doi.org/10.1080/09613218.2019.1702498

[53] Dang N., Shim C.: Bridge assessment for PSC Girder Bridge using Digital Twins Model. Springer Singapore, 2020, https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_199

[54] Dang N., Shim C.: BIM-based innovative bridge maintenance system using augmented reality technology. Springer Singapore, 2020, https://doi.org/10.1007/978-981-15-0802-8_195

[55] Das T., Guchhait S.: A hierarchical framework for real-time damage localization and quantification of steel truss bridges using dual-stage GRU-LSTM deep learning model. Structures, 2025, s. 110272, https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.110272

[56] Dayan V., Chileshe N., Hassanli R., et al.: Sustainable bridge management using refined feature selection for machine learning-aided bridge condition prediction: Incorporation of Pareto

distribution in MRMR method. Applied Soft Computing, 2025, s. 113878, https://doi.org/10.1016/j.asoc.2025.113878

[57] Decreto ministeriale numero 204 del 1 luglio 2022, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2022

[58] Decreto ministeriale numero 578 del 17 dicembre 2020, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, 2020

[59] Di Mucci V. M., Cardellicchio A., Ruggieri S., et al.: Artificial intelligence in structural health management of existing bridges. Automation in Construction, 2024, s. 105719, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105719

[60] Di Pietro A., Buffarini G., Clemente P., et al.: UAS-based methodology to create digital models of bridges and viaducts. Procedia Structural Integrity, 2024, s. 755–762, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.09.103

[61] Ding Y., Hao J.: The application of educational games based on virtual reality technology in teaching english in universities. Systems and Soft Computing, 2025, s. 200380, https://doi.org/10.1016/j.sasc.2025.200380

[62] Dixit M., Gupta A. K.: A Review of Different Assessment Methods of Corrosion of Steel Reinforcement in Concrete. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2022, s. 735–752, https://doi.org/10.1007/s40996-021-00644-5

[63] Dong A., Tang C.-S., Zhu C., et al.: 3D reconstruction and characterization of soil desiccation cracks using smartphone photogrammetry method. Computers and Geotechnics, 2025, s. 107384, https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2025.107384

[64] Dorafshan S., Maguire M.: Bridge inspection: human performance, unmanned aerial systems and automation. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2018, s. 443–476, https://doi.org/10.1007/s13349-018-0285-4

[65] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych. T. 1: Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2010, ISBN: 978-83-01-16103-3

[66] Eksperci po katastrofie w Dreźnie: jest pięć po dwunastej. Deutsche Welle, 2024 [Internet]. [dostęp: 06.09.2025]. Dostępne na: https://www.dw.com/pl/eksperci-po-katastrofie-w-dre%C5%BAnie-jest-pi%C4%99%C4%87-po-dwunastej/a-70197649,

[67] Escobar-Wolf R., Oommen T., Brooks C. N., et al.: Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Based Assessment of Concrete Bridge Deck Delamination Using Thermal and Visible Camera Sensors: A Preliminary Analysis. Research in Nondestructive Evaluation, 2018, s. 183–198, https://doi.org/10.1080/09349847.2017.1304597

[68] Fahad M., Basri T., Hamza M. A., et al.: The Benefits and Risks of Artificial General Intelligence (AGI). Springer Nature Singapore, 2025, https://doi.org/10.1007/978-981-97-3222-7_2

[69] Fang Y., Mitoulis S.-A., Boddice D., et al.: Scan-to-BIM-to-Sim: Automated reconstruction of digital and simulation models from point clouds with applications on bridges. Results in Engineering, 2025, s. 104289, https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104289

[70] Fawad M., Salamak M., Chen Q., et al.: Development of immersive bridge digital twin platform to facilitate bridge damage assessment and asset model updates. Computers in Industry, 2025, s. 104189, https://doi.org/10.1016/j.compind.2024.104189

[71] Feroz S., Abu Dabous S.: UAV-Based Remote Sensing Applications for Bridge Condition Assessment. Remote Sensing, 2021, s. 1809, https://doi.org/10.3390/rs13091809

[72] Fijačko N., Metličar Š., Kleesiek J., et al.: Virtual Reality, Augmented Reality, Augmented Virtuality, or Mixed Reality in cardiopulmonary resuscitation: Which Extended Reality am I using for teaching adult basic life support? Resuscitation, 2023, s. 109973, https://doi.org/10.1016/j.resuscitation.2023.109973

[73] Gagliolo S., Fagandini R., Passoni D., et al.: Parameter optimization for creating reliable photogrammetric models in emergency scenarios. Applied Geomatics, 2018, s. 501–514, https://doi.org/10.1007/s12518-018-0224-4

[74] Gao Y., Li H., Fu W., et al.: Damage volumetric assessment and digital twin synchronization based on LiDAR point clouds. Automation in Construction, 2024, s. 105168, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105168

[75] Genoa's San Giorgio Bridge is a Technological Marvel. Engineering.com, 2022 [Internet]. [dostęp: 06.09.2025]. Dostępne na: https://www.engineering.com/genoas-san-giorgio-bridge-is-a-technological-marvel/,

[76] Golewski G. L.: The Phenomenon of Cracking in Cement Concretes and Reinforced Concrete Structures: The Mechanism of Cracks Formation, Causes of Their Initiation, Types and Places of Occurrence, and Methods of Detection—A Review. Buildings, 2023, s. 765, https://doi.org/10.3390/buildings13030765

[77] Google Maps [Internet]. Dostępne na: https://google.com/maps,

[78] Griffith E. F., Schurer J. M., Mawindo B., et al.: The Use of Drones to Deliver Rift Valley Fever Vaccines in Rwanda: Perceptions and Recommendations. Vaccines, 2023, s. 605, https://doi.org/10.3390/vaccines11030605

[79] Grycuk A.: Kluczowe wskaźniki efektywności (KPI) jako narzędzie doskonalenia efektywności operacyjnej firm produkcyjnych zorientowanych na lean. Przegląd Organizacji, 2010, s. 28–31, https://doi.org/10.33141/po.2010.02.08

[80] Hackl J., Adey B. T., Woźniak M., et al.: Use of Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry to Obtain Topographical Information to Improve Bridge Risk Assessment. Journal of Infrastructure Systems, 2018, s. 04017041, https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000393

[81] Hagedorn P., Liu L., König M., et al.: BIM-Enabled Infrastructure Asset Management Using Information Containers and Semantic Web. Journal of Computing in Civil Engineering, 2023, s. 04022041, https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0001051

[82] Halder S., Afsari K.: Real-time Construction Inspection in an Immersive Environment with an Inspector Assistant Robot. ASC2022. 58th Annual Associated Schools of Construction International Conference, s. 389–379, https://doi.org/10.29007/ck81

[83] Hallermann N., Morgenthal G., Rodehorst V.: Unmanned Aerial Systems (UAS) – Case Studies of Vision Based Monitoring of Ageing Structures. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), Berlin, 2015

[84] Han Y., Feng D., Liao Y.: Computer vision-assisted lateral cooperative performance assessment of assembled box girder bridges under normal traffic conditions. Engineering Structures, 2025, s. 119683, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119683

[85] Harwood T., Maltby J., Mukaetova-Ladinska E. B.: Role of Artificial Intelligence (AI) Art in Care of Ageing Society: Focus on Dementia. OBM Geriatrics, 2019, s. 1–1, https://doi.org/10.21926/obm.geriatr.1903062

[86] Helmerich R., Niederleithinger E., Bien J., et al.: Guideline for Inspection and Condition Assessments of Railway Bridges. Including advices on the use of non-destructive testing. Sustainable Bridges, 2007

[87] Hristov I., Chirico A.: The Role of Sustainability Key Performance Indicators (KPIs) in Implementing Sustainable Strategies. Sustainability, 2019, s. 5742, https://doi.org/10.3390/su11205742

[88] Hu F., Gou H., Yang H., et al.: Digital twin-based fatigue life assessment of orthotropic steel bridge decks using inspection robot and deep learning. Automation in Construction, 2025, s. 106022, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106022

[89] Huang Z., Kang C., Liu J., et al.: Digital Measurement Method for Main Arch Rib of Concrete-Filled Steel Tube Arch Bridge Based on Laser Point Cloud. Infrastructures, 2025, s. 185, https://doi.org/10.3390/infrastructures10070185

[90] Huang Z., Zhu Y., Xiong W., et al.: Lightweight learning-based sonar point cloud semantic segmentation for underwater bridge inspection. Automation in Construction, 2025, s. 106387, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106387

[91] Hussain A., Akhtar S.: Review of Non-Destructive Tests for Evaluation of Historic Masonry and Concrete Structures. Arabian Journal for Science and Engineering, 2017, s. 925–940, https://doi.org/10.1007/s13369-017-2437-y

[92] IFC 4.3.2 Documentation [Internet]. [dostęp: 20.05.2026]. Dostępne na: https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/,

[93] Informacja o wynikach kontroli. Utrzymanie i ochrona drogowych obiektów inżynierskich., Najwyższa Izba Kontroli, 2023

[94] Instrukcja o dozorowaniu linii kolejowych. Id-7, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2015

[95] Instrukcja utrzymania kolejowych obiektów inżynieryjnych na liniach kolejowych do prędkości 250 km/h. Id-16, PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2025

[96] ISO 16739-1:2024 – Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries. Part 1: Data schema,

[97] ISO 31000:2018-08 – Zarządzanie ryzykiem – Wytyczne,

[98] ISO 55000:2024 – Asset management – Vocabulary, overview and principles,

[99] ISO/IEC 17020:2012 – Conformity assessment – Requirements for the operation of various types of bodies performing inspection,

[100] Italferr Uses Digital Twins to Build Pergenova Viaduct in Genoa, Italy, Bentley Systems, 2020

[101] Jakober J., Kunz M., Kreher R., et al.: Design, development, and evaluation of an immersive augmented virtuality training system for transcatheter aortic valve replacement. Computers & Graphics, 2025, s. 104414, https://doi.org/10.1016/j.cag.2025.104414

[102] Janků M., Cikrle P., Grošek J., et al.: Comparison of infrared thermography, ground-penetrating radar and ultrasonic pulse echo for detecting delaminations in concrete bridges. Construction and Building Materials, 2019, s. 1098–1111, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.320

[103] Jasiński M., Uściłowski M., Łaziński P., et al.: Kontrola infrastruktury mostowej na potrzeby transportu nienormatywnego. Diagnostyka i utrzymanie obiektów mostowych. Seminarium Naukowo-Techniczne Wrocławskie Dni Mostowe, J. Biliszczuk (redaktor), 2024, s. 484–491

[104] Jeong E., Seo J., Wacker J.: Literature Review and Technical Survey on Bridge Inspection Using Unmanned Aerial Vehicles. Journal of Performance of Constructed Facilities, 2020, s. 04020113, https://doi.org/10.1061/(ASCE)CF.1943-5509.0001519

[105] Jeong E., Seo J., Wacker J. P.: UAV-aided bridge inspection protocol through machine learning with improved visibility images. Expert Systems with Applications, 2022, s. 116791, https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.116791

[106] Jeong S., Hou R., Lynch J. P., et al.: A scalable cloud-based cyberinfrastructure platform for bridge monitoring. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, s. 82–102, https://doi.org/10.1080/15732479.2018.1500617

[107] Ji W., Liu S., Deng L., et al.: WDI-YOLO: A lightweight steel bridge weld defect detection algorithm using UAV images. Journal of Constructional Steel Research, 2025, s. 109833, https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2025.109833

[108] Jiang S., Yang Y., Gu S., et al.: Bridge Geometric Shape Measurement Using LiDAR–Camera Fusion Mapping and Learning-Based Segmentation Method. Buildings, 2025, s. 1458, https://doi.org/10.3390/buildings15091458

[109] Jimenez-Cano A. E., Sanchez-Cuevas P. J., Grau P., et al.: Contact-Based Bridge Inspection Multirotors: Design, Modeling, and Control Considering the Ceiling Effect. IEEE Robotics and Automation Letters, 2019, s. 3561–3568, https://doi.org/10.1109/LRA.2019.2928206

[110] Jirawattanasomkul T., Hang L., Srivaranun S., et al.: Digital twin-based structural health monitoring and measurements of dynamic characteristics in balanced cantilever bridge. Resilient Cities and Structures, 2025, s. 48–66, https://doi.org/10.1016/j.rcns.2025.08.001

[111] John Samuel I., Salem O., He S.: Defect-oriented supportive bridge inspection system featuring building information modeling and augmented reality. Innovative Infrastructure Solutions, 2022, s. 247, https://doi.org/10.1007/s41062-022-00847-3

[112] Jongerius A.: The use of unmanned aerial vehicles to inspect bridges for Rijkswaterstaat. University of Twente, 2018

[113] Karaaslan E., Bagci U., Catbas F. N.: Artificial Intelligence Assisted Infrastructure Assessment using Mixed Reality Systems. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2019, s. 413–424, https://doi.org/10.1177/0361198119839988

[114] Karjalainen V., Hakala T., George A., et al.: A drone system for autonomous mapping flights inside a forest – a feasibility study and first results. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2023, s. 597–603, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W2-2023-597-2023

[115] Katastrofa w Genui. Nagrano moment zawalenia się mostu. Onet Wiadomości, 2018 [Internet]. [dostęp: 06.09.2025]. Dostępne na: https://wiadomosci.onet.pl/swiat/wlochy-katastrofa-w-genui-nagrano-moment-zawalenia-sie-mostu/q378gh9,

[116] Kermarrec G., Kargoll B., Alkhatib H.: Deformation Analysis Using B-Spline Surface with Correlated Terrestrial Laser Scanner Observations—A Bridge Under Load. Remote Sensing, 2020, s. 829, https://doi.org/10.3390/rs12050829

[117] Khaloo A., Lattanzi D., Cunningham K., et al.: Unmanned aerial vehicle inspection of the Placer River Trail Bridge through image-based 3D modelling. Structure and Infrastructure Engineering, 2018, s. 124–136, https://doi.org/10.1080/15732479.2017.1330891

[118] Kim I.-H., Yoon S., Lee J. H., et al.: A Comparative Study of Bridge Inspection and Condition Assessment between Manpower and a UAS. Drones, 2022, s. 355, https://doi.org/10.3390/drones6110355

[119] Kim M.-K., Sohn H., Chang C.-C.: Localization and Quantification of Concrete Spalling Defects Using Terrestrial Laser Scanning. Journal of Computing in Civil Engineering, 2015, s. 04014086, https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000415

[120] Kim P., Youn J.: Drone Path Planning for Bridge Substructure Inspection Considering GNSS Signal Shadowing. Drones, 2025, s. 124, https://doi.org/10.3390/drones9020124

[121] Kobayashi H., Ono K., Mizokami Y., et al.: Applicability of Fatigue Crack Detection with Infrared Thermography Camera for Bridges in Denmark. AITA 2025, 2025, s. 49, https://doi.org/10.3390/proceedings2025129049

[122] Köliö A., Pakkala T. A., Hohti H., et al.: The corrosion rate in reinforced concrete facades exposed to outdoor environment. Materials and Structures, 2017, s. 23, https://doi.org/10.1617/s11527-016-0920-7

[123] Kong A., Wang Y., Zhao J.: Lightweight and accurate infrared rangefinder-fused LiDAR-inertial localization for UAV-based bridge inspection in GPS-denied environments. Measurement, 2025, s. 118983, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.118983

[124] Kong X., Liu Z., Liu H., et al.: Recent advances on inspection, monitoring, and assessment of bridge cables. Automation in Construction, 2024, s. 105767, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105767

[125] Kong X., Pettijohn T. F., Torikyan H.: From Photogrammetry to Virtual Reality: A Framework for Assessing Visual Fidelity in Structural Inspections. Sensors, 2025, s. 4296, https://doi.org/10.3390/s25144296

[126] Kononen A., Kaartinen H., Kukko A., et al.: Fully automated extraction of railtop centerline from mobile laser scanning data. Automation in Construction, 2024, s. 105812, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105812

[127] Korus K.: Digital twins of bridges: establishing principles of virtualization with practical use cases. Politechnika Śląska, Katedra Mechaniki i Mostów, 2023

[128] Kristufek L., Sanchez L. F. M., Martín-Pérez B., et al.: Visual and Non-Destructive Testing of ASR Affected Piers from Montreal's Champlain Bridge. Buildings, 2025, s. 3262, https://doi.org/10.3390/buildings15183262

[129] Kwiatkowski J., Anigacz W., Beben D.: Comparison of Non-Destructive Techniques for Technological Bridge Deflection Testing. Materials, 2020, s. 1908, https://doi.org/10.3390/ma13081908

[130] Kwiatkowski J., Anigacz W., Beben D.: A Case Study on the Noncontact Inventory of the Oldest European Cast-iron Bridge Using Terrestrial Laser Scanning and Photogrammetric Techniques. Remote Sensing, 2020, s. 2745, https://doi.org/10.3390/rs12172745

[131] La H. M., Dinh T. H., Pham N. H., et al.: Automated robotic monitoring and inspection of steel structures and bridges. Robotica, 2019, s. 947–967, https://doi.org/10.1017/S0263574717000601

[132] Lachowicz J., Rucka M.: Application of GPR method in diagnostics of reinforced concrete structures. Diagnostyka, 2015

[133] Lachowicz J., Rucka M.: Diagnostics of pillars in St. Mary's Church (Gdańsk, Poland) using the GPR method. International Journal of Architectural Heritage, 2019, s. 1223–1233, https://doi.org/10.1080/15583058.2018.1501117

[134] Lattanzi D., Miller G.: Review of Robotic Infrastructure Inspection Systems. Journal of Infrastructure Systems, 2017, s. 04017004, https://doi.org/10.1061/(ASCE)IS.1943-555X.0000353

[135] Lee U.-K.: Tourism Using Virtual Reality: Media Richness and Information System Successes. Sustainability, 2022, s. 3975, https://doi.org/10.3390/su14073975

[136] Lei B., Ren Y., Wang N., et al.: Design of a new low-cost unmanned aerial vehicle and vision-based concrete crack inspection method. Structural Health Monitoring, 2020, s. 1871–1883, https://doi.org/10.1177/1475921719898862

[137] Leibbrandt A., Caprari G., Angst U., et al.: Climbing robot for corrosion monitoring of reinforced concrete structures. 2012 2nd International Conference on Applied Robotics for the Power Industry (CARPI), Zurich, 2012, s. 10–15, https://doi.org/10.1109/CARPI.2012.6473365

[138] Li F., Kunze O.: A Comparative Review of Air Drones (UAVs) and Delivery Bots (SUGVs) for Automated Last Mile Home Delivery. Logistics, 2023, s. 21, https://doi.org/10.3390/logistics7020021

[139] Li X., Chen Y., Chen Z., et al.: Coverage path planning of bridge inspection with Unmanned aerial vehicle. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2025, s. 111253, https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.111253

[140] Li X.-X., Deng E., Wang Y.-W., et al.: 3D laser scanning for predicting the alignment of large-span segmental precast assembled concrete cable-stayed bridges. Automation in Construction, 2023, s. 105056, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105056

[141] Lin J. J., Ibrahim A., Sarwade S., et al.: Bridge Inspection with Aerial Robots: Automating the Entire Pipeline of Visual Data Capture, 3D Mapping, Defect Detection, Analysis, and Reporting. Journal of Computing in Civil Engineering, 2021, s. 04020064, https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000954

[142] Lin T.-H., Putranto A., Chen P.-H., et al.: High-mobility inchworm climbing robot for steel bridge inspection. Automation in Construction, 2023, s. 104905, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.104905

[143] Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistent, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2020

[144] Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistent. Appendici e allegati, Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2020

[145] Liu K., El-Gohary N.: Ontology-based semi-supervised conditional random fields for automated information extraction from bridge inspection reports. Automation in Construction, 2017, s. 313–327, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.02.003

[146] Lõhmus H., Ellmann A., Märdla S., et al.: Terrestrial laser scanning for the monitoring of bridge load tests – two case studies. Survey Review, 2018, s. 270–284, https://doi.org/10.1080/00396265.2016.1266117

[147] Lovelace B.: Unmanned Aircraft System Bridge Inspection Demonstration Project Phase II. 2017

[148] Lu M. Y., Chen B., Williamson D. F. K., et al.: A multimodal generative AI copilot for human pathology. Nature, 2024, s. 466–473, https://doi.org/10.1038/s41586-024-07618-3

[149] Luck M.: Freedom, AI and God: why being dominated by a friendly super-AI might not be so bad. AI & SOCIETY, 2025, s. 291–298, https://doi.org/10.1007/s00146-024-01863-w

[150] Luleci F., Catbas F. N.: A brief introductory review to deep generative models for civil structural health monitoring. AI in Civil Engineering, 2023, s. 9, https://doi.org/10.1007/s43503-023-00017-z

[151] Luleci F., Li L., Chi J., et al.: Structural Health Monitoring of a Foot Bridge in Virtual Reality Environment. Procedia Structural Integrity, 2022, s. 65–72, https://doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.060

[152] Lv Z., Dong S., Xia Z., et al.: Enhanced real-time detection transformer (RT-DETR) for robotic inspection of underwater bridge pier cracks. Automation in Construction, 2025, s. 105921, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105921

[153] Lyu C., Lin S., Lynch A., et al.: UAV-based deep learning applications for automated inspection of civil infrastructure. Automation in Construction, 2025, s. 106285, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106285

[154] Łaziński P., Jasiński M., Uściłowski M., et al.: GPR in Damage Identification of Concrete Elements—A Case Study of Diagnostics in a Prestressed Bridge. Remote Sensing, 2024, s. 35, https://doi.org/10.3390/rs17010035

[155] Marchewka A., Ziółkowski P., Aguilar-Vidal V.: Framework for Structural Health Monitoring of Steel Bridges by Computer Vision. Sensors, 2020, s. 700, https://doi.org/10.3390/s20030700

[156] Martins A. C. P., Castellano I. R., Lenz César Júnior K. M., et al.: BIM-based mixed reality application for bridge inspection. Automation in Construction, 2024, s. 105775, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105775

[157] Mascareñas D. D., Ballor J. P., McClain O. L., et al.: Augmented reality for next generation infrastructure inspections. Structural Health Monitoring, 2021, s. 1957–1979, https://doi.org/10.1177/1475921720953846

[158] Maskinlesbar V440. For bedre dataflyt i prosjekt bru over Bjørnafjorden, Statens vegvesen, 2020

[159] McLaughlin E., Charron N., Narasimhan S.: Automated Defect Quantification in Concrete Bridges Using Robotics and Deep Learning. Journal of Computing in Civil Engineering, 2020, s. 04020029, https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000915

[160] Mejía-Moncayo C., Chaabane A., Kenné J.-P., et al.: Key performance indicators for sustainable remanufacturing: A literature review and methodological framework. Cleaner Logistics and Supply Chain, 2025, s. 100260, https://doi.org/10.1016/j.clscn.2025.100260

[161] Milgram P., Takemura H., Utsumi A., et al.: Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum. Photonics for Industrial Applications, Boston, MA, 1995, s. 282–292, https://doi.org/10.1117/12.197321

[162] Milovanović B., Banjad Pečur I.: Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete. Journal of Imaging, 2016, s. 11, https://doi.org/10.3390/jimaging2020011

[163] Mohammadi P., Asgari S., Rashid A.: Advancing culvert inspection automation using deep learning and dataset optimization. Joint CSCE Construction Specialty & CRC Conference, Montreal, Quebec, 2025

[164] Mokrzański M.: Wdrożenie BIM w PLK S.A. [niepublikowane materiały konferencyjne]. infraBIM, Kraków, 2025

[165] Montecinos-Orellana S., Muñoz La Rivera F., Mora-Serrano J., et al.: Multi-User Virtual Reality Tool for Remote Communication in Construction Projects: Bridge Maintenance Application. Systems, 2025, s. 789, https://doi.org/10.3390/systems13090789

[166] Moreu F., Bleck B., Vemuganti S., et al.: Augmented Reality Tools for Enhanced Structural Inspection. Structural Health Monitoring 2017, 2017, https://doi.org/10.12783/shm2017/14221

[167] Morgenthal G., Hallermann N., Kersten J., et al.: Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges. Automation in Construction, 2019, s. 77–95, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.10.006

[168] Morimoto T., Kobayashi T., Hirata H., et al.: XR (Extended Reality: Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality) Technology in Spine Medicine: Status Quo and Quo Vadis. Journal of Clinical Medicine, 2022, s. 470, https://doi.org/10.3390/jcm11020470

[169] N401 Bruforvaltning fylkesveg, Statens vegvesen, 2021

[170] Na Y.-H., Kim D.-K.: Deep Learning Strategy for UAV-Based Multi-Class Damage Detection on Railway Bridges Using U-Net with Different Loss Functions. Applied Sciences, 2025, s. 8719, https://doi.org/10.3390/app15158719

[171] Nisa U., Shirazi M., Saip M. A., et al.: Agentic AI: The age of reasoning—A review. Journal of Automation and Intelligence, 2025, s. S2949855425000516, https://doi.org/10.1016/j.jai.2025.08.003

[172] Nuti C., Briseghella B., Chen A., et al.: Relevant outcomes from the history of Polcevera Viaduct in Genova, from design to nowadays failure. Journal of Civil Structural Health Monitoring, 2020, s. 87–107, https://doi.org/10.1007/s13349-019-00371-6

[173] N-V441 Bruinspeksjon, Statens vegvesen, 2023

[174] Omar T., Nehdi M. L.: Remote sensing of concrete bridge decks using unmanned aerial vehicle infrared thermography. Automation in Construction, 2017, s. 360–371, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.024

[175] Omer M., Hewitt S., Mosleh M. H., et al.: Performance evaluation of bridges using virtual reality. 6th European Conference on Computational Mechanics (ECCM 6)7th European Conference on Computational Fluid Dynamics (ECFD 7), 2018

[176] Omer M., Margetts L., Hadi Mosleh M., et al.: Use of gaming technology to bring bridge inspection to the office. Structure and Infrastructure Engineering, 2019, s. 1292–1307, https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1615962

[177] Osman M., Xia Y., Mahdi M., et al.: Hybrid VTOL UAV technologies: Efficiency, customization, and sector-specific applications. Alexandria Engineering Journal, 2025, s. 13–49, https://doi.org/10.1016/j.aej.2024.12.087

[178] Otepka J., Ghuffar S., Waldhauser C., et al.: Georeferenced Point Clouds: A Survey of Features and Point Cloud Management. ISPRS International Journal of Geo-Information, 2013, s. 1038–1065, https://doi.org/10.3390/ijgi2041038

[179] Ottaviano E., Rea P., Figuli L.: Simulation of a Hybrid Robot for Bridge Inspection. Transportation Research Procedia, 2023, s. 648–655, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.193

[180] Paes D., Feng Z., King M., et al.: Optical see-through augmented reality fire safety training for building occupants. Automation in Construction, 2024, s. 105371, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105371

[181] Pan Y., Dong Y., Wang D., et al.: Three-Dimensional Reconstruction of Structural Surface Model of Heritage Bridges Using UAV-Based Photogrammetric Point Clouds. Remote Sensing, 2019, s. 1204, https://doi.org/10.3390/rs11101204

[182] Panigati T., Zini M., Striccoli D., et al.: Drone-based bridge inspections: Current practices and future directions. Automation in Construction, 2025, s. 106101, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106101

[183] Pantoja-Rosero B. G., Salamone S.: Integrating extended reality and AI-based damage segmentation for near real-time, traceable bridge inspections. Automation in Construction, 2025, s. 106567, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106567

[184] Parviainen P., Tihinen M., Kääriäinen J., et al.: Tackling the digitalization challenge: how to benefit from digitalization in practice. International Journal of Information Systems and Project Management, 2022, s. 63–77, https://doi.org/10.12821/ijispm050104

[185] Peel H., Luo S., Cohn A. G., et al.: Localisation of a mobile robot for bridge bearing inspection. Automation in Construction, 2018, s. 244–256, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.003

[186] Pérez J., De Sanjosé Blasco J., Atkinson A., et al.: Assessment of the Structural Integrity of the Roman Bridge of Alcántara (Spain) Using TLS and GPR. Remote Sensing, 2018, s. 387, https://doi.org/10.3390/rs10030387

[187] Pérez-Gracia V., García García F., Rodriguez Abad I.: GPR evaluation of the damage found in the reinforced concrete base of a block of flats: A case study. NDT & E International, 2008, s. 341–353, https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2008.01.001

[188] Pinto L., Bianchini F., Nova V., et al.: Low-cost UAS photogrammetry for infrastructures' inspection. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2020, s. 1145–1150, https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-1145-2020

[189] Piotrowski D., Jasiński M., Nowoświat A., et al.: The Performance of an ML-Based Weigh-in-Motion System in the Context of a Network Arch Bridge Structural Specificity. Sensors, 2025, s. 4547, https://doi.org/10.3390/s25154547

[190] PN-EN ISO 9001:2015-10 – Systemy zarządzania jakością – Wymagania,

[191] PN-EN ISO 19650:2019 – Organizacja i digitalizacja informacji o budynkach i budowlach, w tym modelowanie informacji o obiekcie budowlanym (BIM) – Zarządzanie informacjami za pomocą modelowania informacji o obiekcie budowlanym,

[192] PN-EN ISO/IEC 17025:2018-02 – Ogólne wymagania dotyczące kompetencji laboratoriów badawczych i wzorcujących,

[193] Poku-Agyemang K. N., Reiterer A.: Model-based planning of complex 3D laser scanning campaigns for bridge digitisation. Automation in Construction, 2025, s. 106289, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106289

[194] Polz A.-S., Frickenstein F., De Haag M. U.: Flight Test Evaluation of a LIDAR/inertial Navigator for Autonomous Drone Operations in GNSS-denied Urban Environments. 2025 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS), Salt Lake City, UT, USA, 2025, s. 878–889, https://doi.org/10.1109/PLANS61210.2025.11028504

[195] Poux F.: The Smart Point Cloud: Structuring 3D intelligent point data. 2019, https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20457.75367

[196] Pozzer S., Ramos G., Nooralishahi P., et al.: Integration of thermographic inspection data with BIM for enhanced concrete infrastructure assessment. Automation in Construction, 2025, s. 105965, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.105965

[197] Pucinotti R.: Reinforced concrete structure: Non destructive in situ strength assessment of concrete. Construction and Building Materials, 2015, s. 331–341, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.11.023

[198] Qi Y., Lin P., Yang G., et al.: Crack detection and 3D visualization of crack distribution for UAV-based bridge inspection using efficient approaches. Structures, 2025, s. 109075, https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109075

[199] R411 Bruforvaltning riksveg. Forvaltning av bærende konstruksjoner på riksveg, Statens vegvesen, 2018

[200] Radoglou-Grammatikis P., Sarigiannidis P., Lagkas T., et al.: A compilation of UAV applications for precision agriculture. Computer Networks, 2020, s. 107148, https://doi.org/10.1016/j.comnet.2020.107148

[201] Reagan D., Sabato A., Niezrecki C.: Unmanned aerial vehicle acquisition of three-dimensional digital image correlation measurements for structural health monitoring of bridges. SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Portland, Oregon, United States, 2017, s. 1016909, https://doi.org/10.1117/12.2259985

[202] Reinsborg S.: Kontroll av modellbaserte bruer og andre bærende konstruksjoner. Statens vegvesen, 2018

[203] Ren G., Ding R., Li H.: Building an ontological knowledgebase for bridge maintenance. Advances in Engineering Software, 2019, s. 24–40, https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2019.02.001

[204] Ribeiro D., Rakoczy A. M., Cabral R., et al.: Methodologies for Remote Bridge Inspection—Review. Sensors, 2025, s. 5708, https://doi.org/10.3390/s25185708

[205] Ricciardi G., Scalas M., Apreda C., et al.: Quantitative Key Performance Indicators for risk and resilience assessment of the built environment assets under climatic and non-climatic hazards. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2025, s. 105720, https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2025.105720

[206] Riveiro B., González-Jorge H., Varela M., et al.: Validation of terrestrial laser scanning and photogrammetry techniques for the measurement of vertical underclearance and beam geometry in structural inspection of bridges. Measurement, 2013, s. 784–794, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2012.09.018

[207] Rodriguez-Gonzalvez P., Gonzalez-Aguilera D., Lopez-Jimenez G., et al.: Image-based modeling of built environment from an unmanned aerial system. Automation in Construction, 2014, s. 44–52, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.08.010

[208] Roussel J.-R., Auty D., Coops N. C., et al.: lidR: An R package for analysis of Airborne Laser Scanning (ALS) data. Remote Sensing of Environment, 2020, s. 112061, https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.112061

[209] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 16 lutego 2005 r. w sprawie sposobu numeracji i ewidencji dróg publicznych, obiektów mostowych, tuneli, przepustów i promów oraz rejestru numerów nadanych drogom, obiektom mostowym i tunelom (Dz.U. 2005 nr 67 poz. 582),

[210] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych (Dz.U. 2022 poz. 1518),

[211] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. 1999 nr 43 poz. 4304 z późn. zm.),

[212] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 10 września 1998 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle kolejowe i ich usytuowanie (Dz.U. 1998 nr 151 poz. 987 z późn. zm.),

[213] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz.U. 2000 nr 63 poz. 735 z późn. zm.),

[214] Rymsza J.: Causes of the Collapse of the Polcevera Viaduct in Genoa, Italy. Applied Sciences, 2021, s. 8098, https://doi.org/10.3390/app11178098

[215] Salamak M.: BIM w cyklu życia mostów. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2021, ISBN: 978-83-01-21364-0

[216] Salamak M., Łaziński P., Poprawa G., et al.: Kontrola infrastruktury mostowej z użyciem mobilnej aplikacji w związku z transportem maszyny TBM. Przegląd Budowlany, 2023, s. 80–87, https://doi.org/10.5604/01.3001.0053.8496

[217] Saleem M. R., Park J.-W., Lee J.-H., et al.: Instant bridge visual inspection using an unmanned aerial vehicle by image capturing and geo-tagging system and deep convolutional neural network. Structural Health Monitoring, 2021, s. 1760–1777, https://doi.org/10.1177/1475921720932384

[218] Sanchez-Cuevas P. J., Ramon-Soria P., Arrue B., et al.: Robotic System for Inspection by Contact of Bridge Beams Using UAVs. Sensors, 2019, s. 305, https://doi.org/10.3390/s19020305

[219] Santini S., Forte A., Sguerri L.: The Structural Diagnosis of Existing RC Buildings: The Role of Nondestructive Tests in the Case of Low Concrete Strength. Infrastructures, 2020, s. 100, https://doi.org/10.3390/infrastructures5110100

[220] Sapkota R., Roumeliotis K. I., Karkee M.: AI Agents vs. Agentic AI: A Conceptual taxonomy, applications and challenges. Information Fusion, 2026, s. 103599, https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.103599

[221] Savini F., Marra A., Cordisco A., et al.: A complex Virtual Reality system for the management and visualization of bridge data. SCIRES-IT - SCIentific RESearch and Information Technology, 2022, https://doi.org/10.2423/i22394303v12n1p49

[222] Scheerer S., Schacht G., Fiedler M., et al.: Die wechselvolle Geschichte der Carolabrücke in Dresden. 34. Dresdner Brückenbausymposium Planung, Bauausführung, Instandsetzung und Ertüchtigung von Brücken, 19. und 20. März 2025, 2025, s. 15–33, https://doi.org/10.25368/2025.054

[223] Seo J., Duque L., Wacker J.: Drone-enabled bridge inspection methodology and application. Automation in Construction, 2018, s. 112–126, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.006

[224] Shatokhin O., Dzedzickis A., Pečiulienė M., et al.: Extended Reality: Types and Applications. Applied Sciences, 2025, s. 3282, https://doi.org/10.3390/app15063282

[225] Shu J., Xia Z., Gao Y.: BIM-Based Trajectory Planning for Unmanned Aerial Vehicle-Enabled Box Girder Bridge Inspection. Remote Sensing, 2025, s. 682, https://doi.org/10.3390/rs17040682

[226] Shu J., Zeng Z., Li W., et al.: Automatic geometric digital twin of box girder bridge using a laser-scanned point cloud. Automation in Construction, 2024, s. 105781, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105781

[227] Soemantoro R., Yue H., Omer M., et al.: An AI automated self-organising, feature imitating approach for point cloud data reduction. Loughborough University, 2021, https://doi.org/10.17028/RD.LBORO.14596068.V1

[228] Sonbul O. S., Rashid M.: Bridge Structural Health Monitoring: A Multi-Dimensional Taxonomy and Evaluation of Anomaly Detection Methods. Buildings, 2025, s. 3603, https://doi.org/10.3390/buildings15193603

[229] Spencer B. F., Hoskere V., Narazaki Y.: Advances in Computer Vision-Based Civil Infrastructure Inspection and Monitoring. Engineering, 2019, s. 199–222, https://doi.org/10.1016/j.eng.2018.11.030

[230] Su Y., Song Y., Zhan Z., et al.: Research on Intelligent Identification Technology for Bridge Cracks. Infrastructures, 2025, s. 102, https://doi.org/10.3390/infrastructures10050102

[231] Sutter B., Lelevé A., Pham M. T., et al.: A semi-autonomous mobile robot for bridge inspection. Automation in Construction, 2018, s. 111–119, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.013

[232] Tamura H., Mizokami Y., Oto T., et al.: Development of Detection System for Fatigue Cracks on Orthotropic Steel Deck Using Infrared Thermography and Inspection Results. AITA 2025, 2025, s. 60, https://doi.org/10.3390/proceedings2025129060

[233] Tan D., Li W., Tao Y., et al.: Bridge Deformation Monitoring Combining 3D Laser Scanning with Multi-Scale Algorithms. Sensors, 2025, s. 3869, https://doi.org/10.3390/s25133869

[234] Tešić K., Baričević A., Serdar M.: Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced Concrete Using Ground-Penetrating Radar: A Review. Materials, 2021, s. 975, https://doi.org/10.3390/ma14040975

[235] Tomaszkiewicz K.: Wsparcie wybranych procesów oceny stanu technicznego obiektów mostowych za pomocą głębokiego uczenia maszynowego oraz gromadzenie wyników oceny w modelach informacyjnych BIM. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, 2025

[236] Tomiczek A. P., Whitley T. J., Bridge J. A., et al.: Bridge Inspections with Small Unmanned Aircraft Systems: Case Studies. Journal of Bridge Engineering, 2019, s. 05019003, https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001376

[237] TP 59 - Technické Podmienky. Zadávanie a výkon diagnostiky mostov a lávok, Ministerstvo dopravy a výstavby SR, 2024

[238] TP 60 - Technické Podmienky. Prehliadky, údržba a opravy cestných komunikácií. Mosty, Ministerstvo dopravy a výstavby SR, 2012

[239] TP 61 - Technické Podmienky. Katalóg porúch mostných objektov na diaľniciach, rýchlostných cestách a cestách I., II. a III. Triedy, Ministerstvo dopravy a výstavby SR, 2019

[240] Truong-Hong L., Laefer D. F.: Application of Terrestrial Laser Scanner In Bridge Inspection: Review and an Opportunity. IABSE Symposium, Madrid 2014: Engineering for Progress, Nature and People, Madrid, Spain, 2014, s. 2713–2720, https://doi.org/10.2749/222137814814070190

[241] Uhm J.-P., Kim S., Do C., et al.: How augmented reality (AR) experience affects purchase intention in sport E-commerce: Roles of perceived diagnosticity, psychological distance, and perceived risks. Journal of Retailing and Consumer Services, 2022, s. 103027, https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2022.103027

[242] Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. - Prawo lotnicze (Dz.U. 2002 nr 130 poz. 1112 z późn. zm.),

[243] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. - Prawo budowlane (Dz.U. z 1994 r. nr 89, poz. 414 z późn. zm.),

[244] Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych (Dz.U. 1985 nr 14 poz. 60 z późn. zm.),

[245] Uściłowski M., Kopeć B., Salamak M., et al.: 3D reconstruction and solid modeling in bridge inspection using virtual techniques. MATERIAŁY BUDOWLANE, 2025, s. 130–142, https://doi.org/10.15199/33.2025.07.17

[246] V440 Bruregistrering, Statens vegvesen, 2023

[247] Valença J., Puente I., Júlio E., et al.: Assessment of cracks on concrete bridges using image processing supported by laser scanning survey. Construction and Building Materials, 2017, s. 668–678, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.04.096

[248] Vasquez L. D. F.: Development of a Virtual Reality Testbed to Study Inconsistencies among Bridge Inspectors. 2023, https://doi.org/10.25394/PGS.24582714

[249] Venkatesh P., Alapati M.: Condition Assessment of Existing Concrete Building Using Non-Destructive Testing Methods for Effective Repair and Restoration-A Case Study. Civil Engineering Journal, 2017, s. 841–855, https://doi.org/10.28991/cej-030919

[250] Villarino A., Valenzuela H., Antón N., et al.: UAV Applications for Monitoring and Management of Civil Infrastructures. Infrastructures, 2025, s. 106, https://doi.org/10.3390/infrastructures10050106

[251] Vink L.-S., Walzl B.: Redefining Human Performance in complex socio-technical systems Human Performance as key-performance indicator. Transportation Research Procedia, 2025, s. 31–39, https://doi.org/10.1016/j.trpro.2025.05.004

[252] Vital W., Silva R., De Morais M. V. G., et al.: Application of bridge information modelling using laser scanning for static and dynamic analysis with concrete damage plasticity. Alexandria Engineering Journal, 2023, s. 608–628, https://doi.org/10.1016/j.aej.2023.08.023

[253] Wang F., Zou Y., Chen X., et al.: Rapid in-flight image quality check for UAV-enabled bridge inspection. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2024, s. 230–250, https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2024.05.008

[254] Wang F., Zou Y., Del Rey Castillo E., et al.: Optimal UAV Image Overlap for Photogrammetric 3D Reconstruction of Bridges. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2022, s. 022052, https://doi.org/10.1088/1755-1315/1101/2/022052

[255] Wang G. H., Yun J. H., Jeon J.-S.: Explainable machine learning model for classifying vehicle-impact damage of reinforced concrete bridge columns. Engineering Structures, 2025, s. 121292, https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.121292

[256] Wang P., Wu P., Wang J., et al.: A Critical Review of the Use of Virtual Reality in Construction Engineering Education and Training. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, s. 1204, https://doi.org/10.3390/ijerph15061204

[257] Wang Q., Guo J., Kim M.-K.: An Application Oriented Scan-to-BIM Framework. Remote Sensing, 2019, s. 365, https://doi.org/10.3390/rs11030365

[258] Wang S., Zargar S. A., Yuan F.-G.: Augmented reality for enhanced visual inspection through knowledge-based deep learning. Structural Health Monitoring, 2021, s. 426–442, https://doi.org/10.1177/1475921720976986

[259] Warunki techniczne dla kolejowych obiektów inżynieryjnych. Id-2 (D2), PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., 2005

[260] WR-M-81. Wytyczne oceny stanu technicznego drogowych obiektów inżynierskich, Ministerstwo Infrastruktury, 2021

[261] Wu C., Wu P., Wang J., et al.: Ontological knowledge base for concrete bridge rehabilitation project management. Automation in Construction, 2021, s. 103428, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103428

[262] Wu J., Ye Y., Du J.: Multi-objective reinforcement learning for autonomous drone navigation in urban areas with wind zones. Automation in Construction, 2024, s. 105253, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2023.105253

[263] Wu Y., Xu T., Qin Y., et al.: AirboardNet: A UAV onboard girder inspection approach for high-speed railroad bridge using multi-task knowledge distillation☆. Advanced Engineering Informatics, 2025, s. 103544, https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103544

[264] Xu Y., Zhao M., Xu C., et al.: Efficient in-site laser scanning scheme with adaptive angular resolution for long-span bridge geometry measurement. Measurement, 2024, s. 114704, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114704

[265] Yan J., Zhang H., Ai Q., et al.: Digital twin-based bridge geometric quality inspection using knowledge mapping and data-driven method. Automation in Construction, 2025, s. 106383, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106383

[266] Yan J., Zhu Y., Xiong W., et al.: High-fidelity 3D sonar point cloud data reconstruction of underwater bridge caisson foundation for scour inspection. Measurement, 2025, s. 116480, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116480

[267] Yan K., Liu G., Li Q., et al.: Corrosion characteristics and evaluation of galvanized high-strength steel wire for bridge cables based on 3D laser scanning and image recognition. Construction and Building Materials, 2024, s. 135845, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135845

[268] Yasin Yiğit A., Uysal M.: Virtual reality visualisation of automatic crack detection for bridge inspection from 3D digital twin generated by UAV photogrammetry. Measurement, 2025, s. 115931, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.115931

[269] Zakaria M., Karaaslan E., Necati Catbas F.: Real-Time AI-Based Bridge Inspection Using Mixed Reality Platform. Structures Congress 2023, New Orleans, Louisiana, 2023, s. 120–131, https://doi.org/10.1061/9780784484777.012

[270] Zákon č. 135/1961 Zb. o pozemných komunikáciách (cestný zákon),

[271] Załącznik do Zarządzenia nr 35 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 28 września 2020 roku - Instrukcja przeprowadzania przeglądów drogowych obiektów inżynierskich, GDDKiA, 2020

[272] Zasady stosowania skali ocen punktowych stanu technicznego i przydatności do użytkowania drogowych obiektów inżynierskich – część I. Obiekty mostowe, GDDKiA, 2018

[273] Zasady stosowania skali ocen punktowych stanu technicznego i przydatności do użytkowania drogowych obiektów inżynierskich – część II. Tunele, przepusty i konstrukcje oporowe, GDDKiA, 2018

[274] Zawadzak M.: Drony: aspekty prawne i zasady użytkowania. Universitas, 2025, ISBN: 978-83-242-4140-8

[275] Zhang B., Ren Y., He S., et al.: A review of methods and applications in structural health monitoring (SHM) for bridges. Measurement, 2025, s. 116575, https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.116575

[276] Zhang C., Lei X., Xia Y.: Enhancing bridge inspection data quality using machine learning. Automation in Construction, 2025, s. 106182, https://doi.org/10.1016/j.autcon.2025.106182

[277] Zhang C., Zou Y., Wang F., et al.: Towards fully automated unmanned aerial vehicle-enabled bridge inspection: Where are we at? Construction and Building Materials, 2022, s. 128543, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128543

[278] Zhang W., Li Y., Li P., et al.: A BIM and AR-based indoor navigation system for pedestrians on smartphones. KSCE Journal of Civil Engineering, 2025, s. 100005, https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100005

[279] Zhang Y., Liu Y., Lei G., et al.: An Enhanced Information Retrieval Method Based on Ontology for Bridge Inspection. Applied Sciences, 2022, s. 10599, https://doi.org/10.3390/app122010599

[280] Zhu Y., Guo Y.: Structural Characteristics and Damage Analysis of Beijing Wanning Bridge Under the Coupling Effect of Dynamic Traffic and Subway Vibrations. Infrastructures, 2025, s. 251, https://doi.org/10.3390/infrastructures10090251

[281] Zollini S., Alicandro M., Dominici D., et al.: UAV Photogrammetry for Concrete Bridge Inspection Using Object-Based Image Analysis (OBIA). Remote Sensing, 2020, s. 3180, https://doi.org/10.3390/rs12193180

[282] Żarski M.: Wizja komputerowa i transfer learning w inspekcjach betonowych obiektów mostowych. Politechnika Śląska, Katedra Mechaniki i Mostów, 2022