

Akademia WSB

Dąbrowa Górnicza, Cieszyń, Olkusz, Żywiec, Kraków

Wydział Nauk Stosowanych

mgr inż. Sebastian Kałuża

**Diagnostyka szyn i podkładów kolejowych
z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej
na rozwiązaniach sztucznej inteligencji**

Autoreferat pracy doktorskiej napisanej pod kierunkiem:

Opiekun naukowy: prof. dr hab. inż. Marek Sitarz

Opiekun pomocniczy: dr inż. Paweł Buchwald

Dąbrowa Górnicza 2026

Spis treści

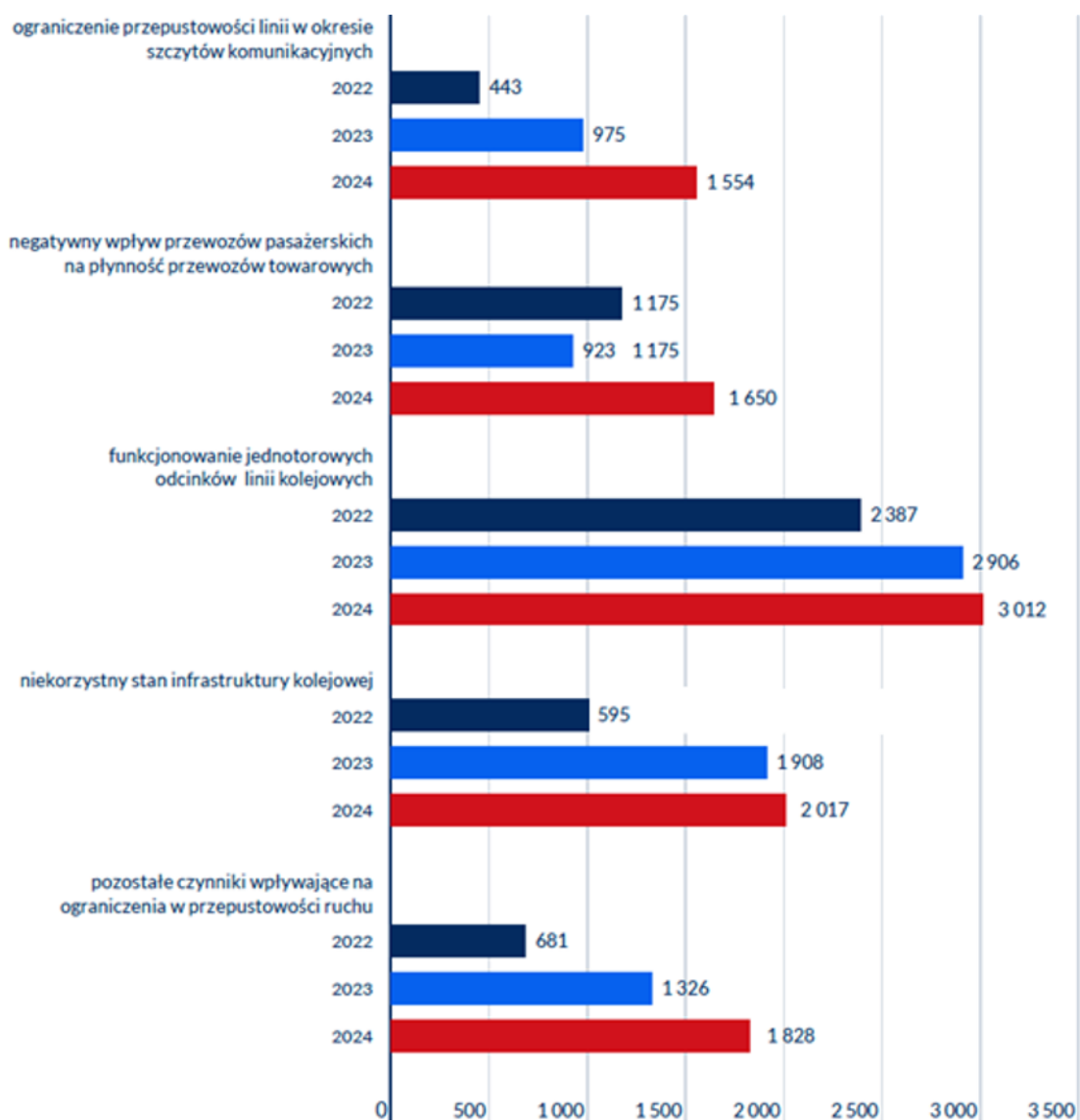
1. Przesłanki wyboru tematu pracy.....	3
2. Cele pracy i hipotezy badawcze.....	8
3. Struktura pracy i przebieg badań	9
4. Wyniki badań w kontekście hipotez badawczych	23
5. Wnioski końcowe	28
6. Wartość dodana pracy.....	28
7. Kierunek dalszych badań.....	29
8. Spis publikacji.....	31

1. PRZESŁANKI WYBORU TEMATU PRACY

Wzrost obciążenia sieci kolejowej oraz postępująca degradacja nawierzchni torowej zwiększają wymagania wobec systemu utrzymania infrastruktury. Tradycyjne metody inspekcji, oparte na obchodach torów, są czasochłonne, ograniczone kadrowo i nie zapewniają ciągłego monitoringu stanu technicznego.

Skalę problemu potwierdzają dane eksploatacyjne. W 2024 r. ograniczenia wynikające z złego stanu infrastruktury objęły 2017 km linii kolejowych (wzrost o 1422 km w stosunku do 2022 r.), co wskazuje na narastający charakter zjawiska (Wykres 1).

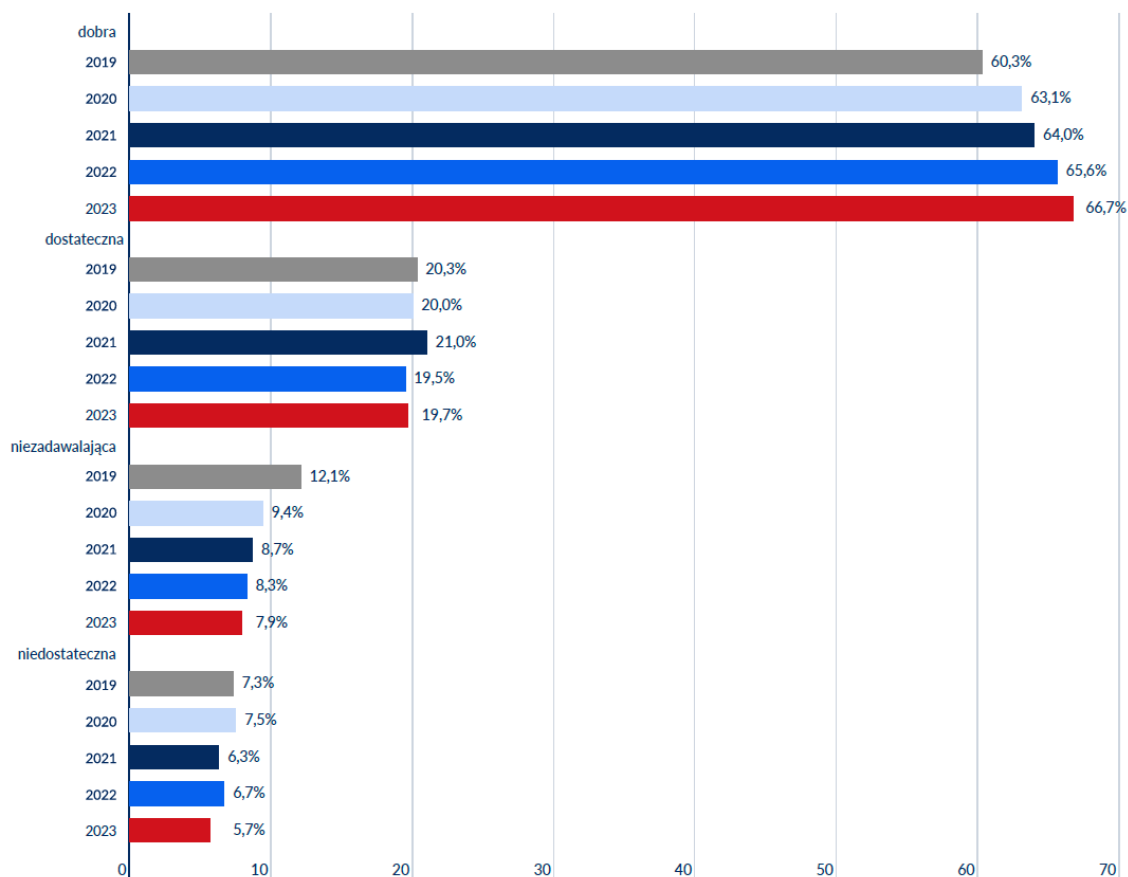
Wykres 1 Długość linii kolejowych z ograniczoną przepustowością ruchu w latach 2022–2024



Źródło: Urząd Transportu Kolejowego, Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego 2024

Pomimo realizowanych modernizacji, w 2023 r. 33,3% nawierzchni torowej pozostawało w stanie co najwyżej dostatecznym (19,7% dostateczny, 7,9% niezadawalający, 5,7% niedostateczny), co przedstawia Wykres 2.

Wykres 2 Ocena stanu technicznego nawierzchni kolejowej w Polsce w latach 2019–2023



Źródło: Urząd Transportu Kolejowego, Sprawozdanie ze stanu bezpieczeństwa ruchu kolejowego 2023

Jak wskazuje Urząd Transportu Kolejowego, zły stan techniczny infrastruktury kolejowej ma bezpośrednie przełożenie na bezpieczeństwo ruchu – w 2023 r. odnotowano 14 poważnych wypadków na liniach kolejowych oraz 36 na bocznicach spowodowanych jej niewłaściwym stanem technicznym.

Podstawowym narzędziem bieżącej oceny stanu torów pozostają tradycyjne obchody realizowane przez toromistrzów, których skuteczność i skalowalność zależy bezpośrednio od dostępnych zasobów kadrowych.

Zapewnienie wymaganej częstotliwości obchodów torów ogranicza zmniejszająca się i starzejąca kadra zarządców infrastruktury. W 2024 r. zatrudnionych było 1361 toromistrzów (spadek o 81 osób w stosunku do 2021 r.). Jednocześnie 45,9% pracowników stanowiły osoby powyżej 50 roku życia, przy 11,2% poniżej 30 lat, co wskazuje na narastające ryzyko luki pokoleniowej i ograniczoną skalowalność tradycyjnych metod diagnostyki. Szczegółowe dane na ten temat przedstawia Tabela 1.

Tabela 1 Struktura zatrudnienia u zarządców infrastruktury

Zatrudnienie na stanowiskach pracy w latach 2020-2024					
stanowisko pracy	2020	2021	2022	2023	2024
zatrudnienie ogółem	40 130	39 474	38 885	38 648	38 137
stanowiska regulowane	21 021	20 554	19 992	19 619	19 344
automatyk	2 204	2 201	2 213	2 153	2 121
dróżnik przejazdowy	1 702	1 580	1 442	1 363	1 241
dyżurny ruchu	8 705	8 558	8 395	8 183	8 118
kierownik pociągu	17	11	10	12	10
manewrowy	11	0	0	0	0
maszynista	623	633	647	676	698
nastawniczy	4 745	4 463	4 224	4 157	3 919
prowadzący pojazdy kolejowe	110	80	1	4	6
rewident taboru	6	6	0	0	2
toromistrz	1 440	1 442	1 429	1 370	1361
ustawiacz	5	7	11	10	7
zwrotniczy	1 453	1 573	1 620	1 691	1 861
stanowiska nieregulowane	629	693	625	640	656
dyspozytor	629	640	623	638	656
pracownik utrzymania taboru	—	53	2	2	0
Przedział wiekowy pracowników zatrudnionych u zarządców infrastruktury w latach 2020-2024					
przedział wiekowy	2020	2021	2022	2023	2024
ekwiwalent czasu pracy	40 044	39 315	38 934	38 607	38 306
do 30 lat	4 234	4 168	4 138	3 935	4 301
od 31 do 50 lat	16 634	16 220	16 081	15 922	16 489
powyżej 50 lat	19 176	18 927	18 715	18 749	17 516

Źródło: Urząd Transportu Kolejowego, Sprawozdanie z funkcjonowania rynku transportu kolejowego 2024

Obchód torów stanowi ok. 11% czasu prac utrzymaniowych (Tabela 2), generując jednocześnie koszty szacowane na ok. 18 mln zł rocznie po stronie zarządców infrastruktury. Wysoki udział tej czynności w strukturze prac utrzymaniowych wskazuje na istotne obciążenie zasobów kadrowych i kosztowych.

Tabela 2 Czynności utrzymaniowe w procesie utrzymania infrastruktury kolejowej

	Nazwa zadania	Suma RBH/Rok	Udział procentowy [%]	Wartość skumulowana [%]
1	Obchód	6396	11	11
2	Akcja zima	5043	9	20
3	Dokręcanie / wymiana śrub / wkrętów	4774	8	28
4	Wymiana podkładów	3981	7	35
5	Czyszczenie	3980	7	41
6	Inne	3265	6	47
7	Transport	2678	5	52
8	Wybieranie podsypki	2656	5	56
9	Prace budowlano-porządkowe	2578	4	61
10	Miarkowanie luzów	2399	4	65
11	Remont toru	2217	4	68
12	Wymiana łubków	1373	2	71
13	Nadzór	1285	2	73
14	Pomiar kontrolny / badanie techniczne rozjazdów	1187	2	75
15	Usuwanie usterki	1143	2	77
16	Wycinanie / wykaszanie	999	2	79
17	Podbijanie	919	2	80
18	Obsypanie tłucznem	883	2	82
19	Wymiana podrozezdnic	877	2	83
20	Regulacja zamknięć nastawczych	825	1	85

Źródło: Butor, A., Labisz, K., Batko, M., & Okamfer, T. (2020). Klasyfikacja i analiza elementów utrzymania infrastruktury kolejowej w celu minimalizacji kosztów. Problemy Kolejnictwa

Wskazane uwarunkowania eksploatacyjne i organizacyjne uzasadniają potrzebę rozwoju nowych metod diagnostyki nawierzchni torowej, co stało się punktem wyjścia do przeprowadzenia analizy stanu wiedzy.

Analiza stanu wiedzy oraz identyfikacja luk badawczych

W celu określenia aktualnego stanu wiedzy przeprowadzono analizę literatury krajowej i zagranicznej dotyczącą diagnostyki infrastruktury kolejowej, utrzymania nawierzchni torowej, systemów inspekcji wizyjnej oraz metod sztucznej inteligencji. Analiza objęła publikacje naukowe, materiały konferencyjne, akty prawne oraz dokumentację patentową z lat 1978–2025. Łącznie przeanalizowano 217 pozycji literaturowych, przy czym znacząca część źródeł pochodzi z ostatniej dekady, co odzwierciedla dynamiczny rozwój metod uczenia maszynowego w zastosowaniach diagnostycznych.

Dodatkowo przeprowadzono analizę funkcjonalną komercyjnych systemów wizyjnych stosowanych w diagnostyce infrastruktury kolejowej. Analiza została oparta na dostępnej dokumentacji technicznej, materiałach producentów oraz opisach wdrożeń. Systemy te umożliwiają automatyczne wykrywanie wad elementów nawierzchni torowej oraz instalację na pojazdach kolejowych, jednak koncentrują się głównie na detekcji obiektów i identyfikacji anomalii. Nie zapewniają natomiast formalnej metody przekształcania wyników detekcji wizyjnej w mierzalny wskaźnik stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej. Wyniki analizy funkcjonalnej przedstawiono w Tabeli 3.

Tabela 3 Analiza porównawcza urządzeń diagnostycznych z systemem wizyjnym

Kategoria Urządzenie	Charakterystyka pomiarów i warunki eksploatacji	Funkcjonalność	Instalacja, modułowość i prędkość	Oprogramowa- nie i integracja	Suma punktów	Spełnienie wymagań
Goldsmith	23	19	4	9	55	74%
Mermec Vcube	24	18	7	9	58	78%
Pavemetrics	24	16	5	9	54	73%
DMA (TCVIS)	20	18	5	9	52	70%
RailTechnology	24	12	5	6	47	64%
ENSCO TCIS	24	14	5	9	52	70%
Omnivision	21	12	4	7	44	60%
Maksymalna liczba punktów	24	20	11	19	74	100%

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz systemów komercyjnych zidentyfikowano trzy zasadnicze luki badawcze:

1. brak opracowań obejmujących porównanie skuteczności tradycyjnych obchodów torów z systemami inspekcji wizyjnej opartymi na sztucznej inteligencji,
2. brak metod umożliwiających formalne przekształcenie wyników detekcji wizyjnej w mierzalny wskaźnik stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej,
3. brak opracowań integrujących automatyczną ocenę stanu nawierzchni torowej z procesem planowania utrzymania infrastruktury.

Zidentyfikowane luki badawcze stanowiły bezpośrednią przesłankę do opracowania metody umożliwiającej automatyczne wyznaczanie stopnia degradacji nawierzchni torowej oraz porównanie jej skuteczności z tradycyjną metodą obchodów torów.

2. CEL PRACY I HIPOTEZY BADAWCZE

Przedmiotem rozprawy jest opracowanie systemu diagnostycznego wykorzystującego inspekcję wizyjną oraz metody sztucznej inteligencji do oceny stanu nawierzchni torowej. System obejmuje część sprzętową zintegrowaną z pojazdem kolejowym oraz oprogramowanie analityczne przeznaczone do przetwarzania danych obrazowych.

Istotą opracowanego podejścia jest rozszerzenie klasycznej detekcji wad o formalny mechanizm oceny stanu technicznego elementów nawierzchni torowej. Umożliwia to ilościowe porównanie skuteczności inspekcji wizyjnej z tradycyjną metodą obchodów torów w warunkach eksploatacyjnych.

Cel główny

Celem niniejszej pracy jest opracowanie i ocena systemu diagnostycznego do detekcji wad powierzchniowych szyn i podkładów kolejowych z zastosowaniem inspekcji wizyjnej opartej na rozwiązaniach sztucznej inteligencji.

System powinien umożliwiać automatyczną identyfikację wad oraz wyznaczanie stopnia degradacji szyn i podkładów kolejowych na podstawie analizy obrazów nawierzchni torowej, stanowiąc narzędzie wspierające proces diagnostyki infrastruktury kolejowej.

Hipoteza główna

Zastosowanie opracowanego systemu inspekcji wizyjnej wspieranego przez algorytmy sztucznej inteligencji umożliwi automatyczną identyfikację wad nawierzchni torowej z dokładnością o 15–30% wyższą niż tradycyjne metody manualne, skrócenie czasu inspekcji o około 40–50% oraz redukcję kosztów inspekcji torów o 20–30%.

W celu weryfikacji hipotezy zastosowano następujące wskaźniki:

- wskaźnik dokładności identyfikacji wad – wzrost wykrywalności wad szyn i podkładów w porównaniu z tradycyjnymi obchodami torów,
- wskaźnik skrócenia czasu inspekcji – redukcja czasu realizacji inspekcji w stosunku do procedur manualnych,
- wskaźnik redukcji kosztów inspekcji – zmniejszenie kosztów prowadzenia inspekcji torów.

Cele cząstkowe

Aby zrealizować cel główny pracy oraz zweryfikować hipotezę, należało sformułować i zrealizować cele cząstkowe w trzech obszarach.

Cele metodyczne:

1. Adaptacja algorytmów uczenia maszynowego do analizy danych obrazowych w celu automatycznej detekcji wad szyn i podkładów z dokładnością na poziomie co najmniej 90%.
2. Opracowanie modelu oceny stopnia degradacji szyn i podkładów na podstawie danych z inspekcji wizyjnej.

Cele poznawcze:

1. Analiza porównawcza tradycyjnej metody obchodów torów i automatycznej inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej.
2. Zbadanie wpływu automatyzacji diagnostyki na planowanie utrzymania infrastruktury kolejowej.

Cele aplikacyjne:

1. Zbadanie wpływu zastosowania inspekcji wizyjnej na koszty utrzymania infrastruktury torowej.
2. Weryfikacja skuteczności opracowanego systemu w warunkach eksploatacyjnych polskiej infrastruktury kolejowej.

3. STRUKTURA PRACY I PRZEBIEG BADAŃ

Struktura rozprawy została podporządkowana procesowi badawczemu prowadzącemu od identyfikacji problemu naukowego do weryfikacji opracowanego rozwiązania w warunkach eksploatacyjnych. Układ pracy odzwierciedla kolejne etapy rozwoju koncepcji – od analizy stanu wiedzy i opracowania metody oceny degradacji, przez budowę i rozwój systemu diagnostycznego, aż po jego walidację oraz analizę porównawczą z tradycyjną metodą obchodów torów (Rys. 1).

Rozprawa została podzielona na sześć części obejmujących łącznie piętnaście rozdziałów.

Część 1 (rozdziały 1–3) obejmuje sformułowanie problemu badawczego, analizę stanu wiedzy oraz opracowanie autorskiej metody oceny stopnia degradacji szyn i podkładów (wskaźniki G_s i G_p).

Część 2 (rozdziały 4–5) dotyczy określenia wymagań technicznych systemu oraz budowy stanowiska laboratoryjnego umożliwiającego testowanie technologii inspekcji wizyjnej.

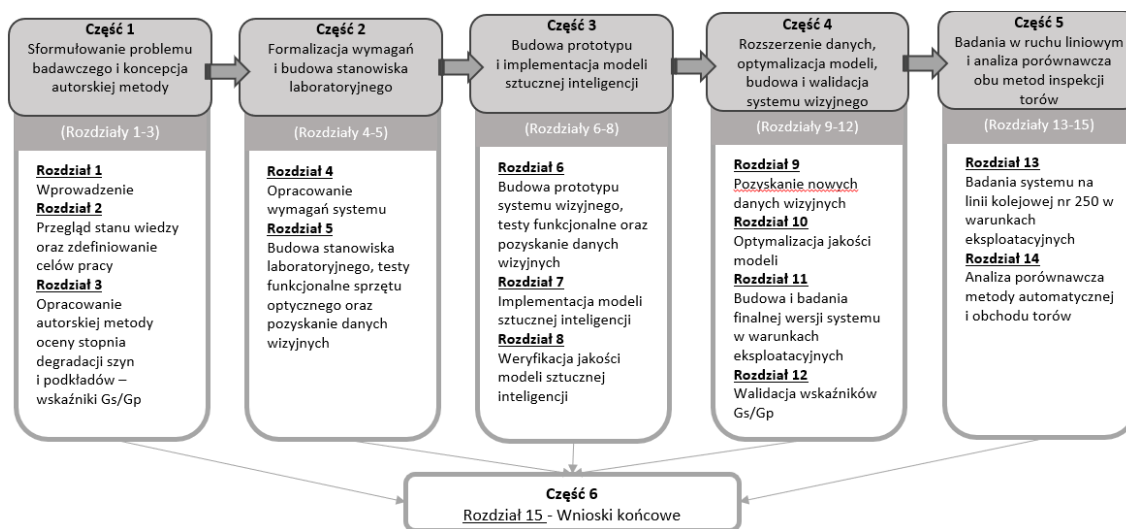
Część 3 (rozdziały 6–8) obejmuje budowę prototypu systemu wizyjnego oraz implementację i weryfikację modeli sztucznej inteligencji do detekcji wad nawierzchni torowej.

Część 4 (rozdziały 9–12) koncentruje się na rozszerzeniu zbioru danych, optymalizacji modeli oraz budowie finalnej wersji systemu diagnostycznego i walidacji wskaźników degradacji.

Część 5 (rozdziały 13–14) obejmuje badania systemu w warunkach ruchu liniowego oraz analizę porównawczą automatycznej inspekcji wizyjnej i tradycyjnej metody obchodów torów.

Część 6 (rozdział 15) zawiera wnioski końcowe, weryfikację hipotezy badawczej oraz wskazanie kierunków dalszych badań.

Rysunek 1 Struktura pracy doktorskiej



Źródło: Opracowanie własne

Przebieg badań

Realizacja celu pracy wymagała przeprowadzenia wieloetapowego procesu badawczego obejmującego projektowanie systemu diagnostycznego, rozwój algorytmów analizy obrazów oraz ich weryfikację w warunkach eksploatacyjnych. Przebieg badań podzielono na sześć etapów zgodnie z fazami rozwoju systemu – od budowy

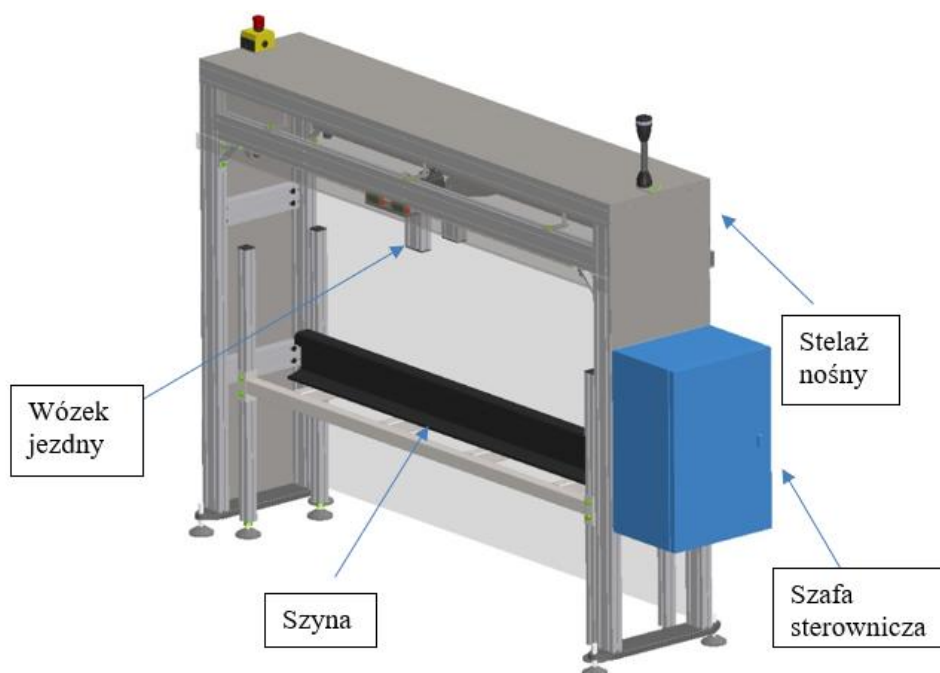
infrastruktury badawczej i prototypu, przez rozwój modeli sztucznej inteligencji, aż po walidację oraz analizę porównawczą z tradycyjną metodą obchodów torów.

1. Budowa infrastruktury badawczej i prototypu systemu

Pierwszy etap badań obejmował budowę infrastruktury badawczej umożliwiającej rozwój technologii inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej oraz pozyskanie danych obrazowych niezbędnych do trenowania modeli sztucznej inteligencji.

W pierwszej kolejności opracowano stanowisko badawcze (Rys. 2) umożliwiające testowanie różnych konfiguracji systemu optycznego oraz weryfikację parametrów akwizycji obrazu.

Rysunek 2 Wizualizacja stanowiska badawczego

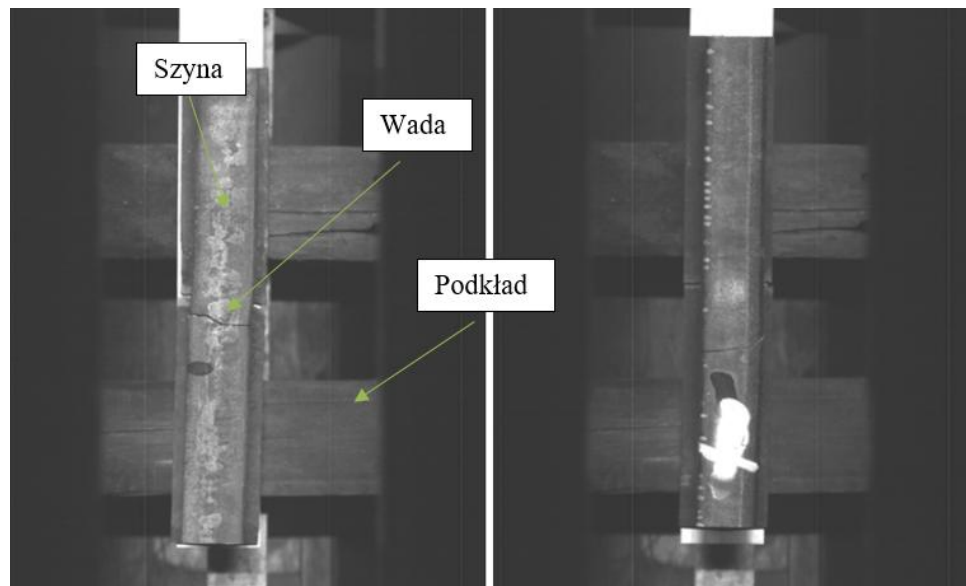


Źródło: Opracowanie własne

Stanowisko pozwalało na analizę wpływu parametrów takich jak geometria obserwacji, oświetlenie oraz stabilność ruchu na jakość rejestrowanych obrazów nawierzchni torowej (Rys. 3).

Na podstawie wyników badań laboratoryjnych opracowano prototyp systemu inspekcji wizyjnej przeznaczony do pracy w warunkach rzeczywistej infrastruktury kolejowej.

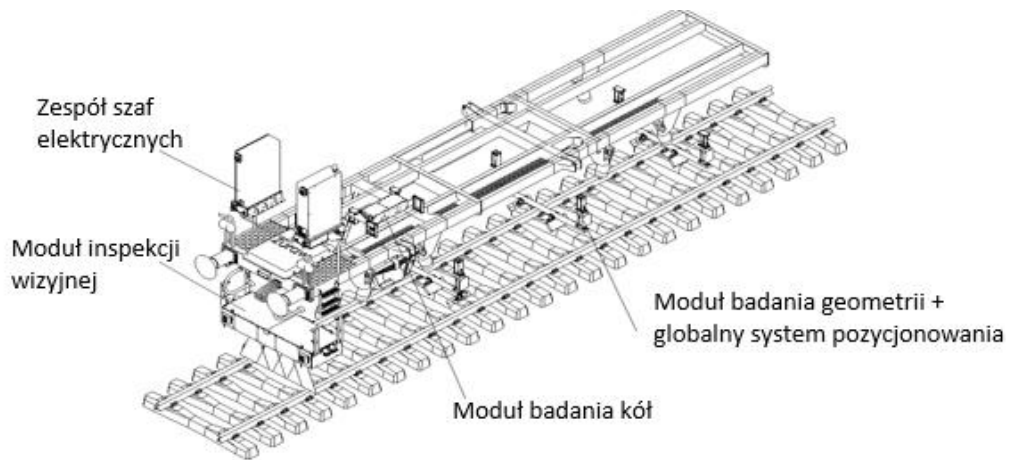
Rysunek 3 Testy sprzętu oraz akwizycja obrazów



Źródło: Opracowanie własne

System obejmował moduł akwizycji obrazu, układ przetwarzania danych oraz system zasilania i sterowania zintegrowany z pojazdem pomiarowym (Rys. 4).

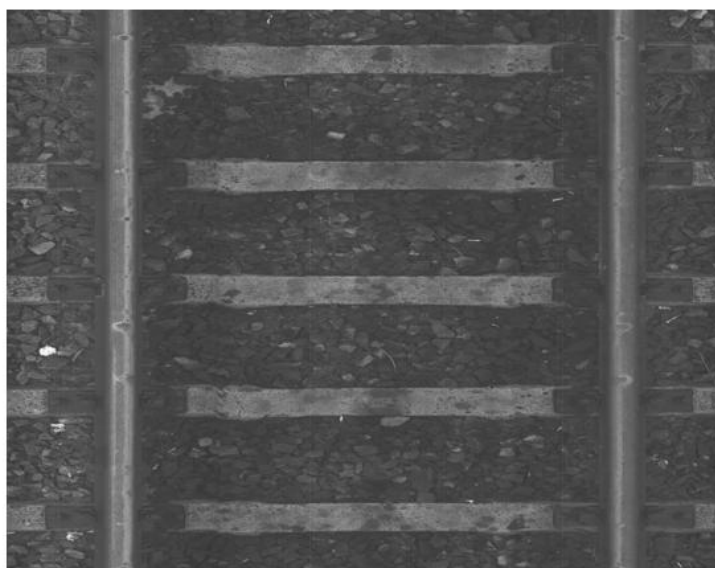
Rysunek 4 Montaż prototypu systemu wizyjnego



Źródło: Opracowanie własne

W trakcie badań wykorzystano kamerę liniową umożliwiającą rejestrację wysokorozdzielczych obrazów nawierzchni torowej podczas przejazdu pojazdu pomiarowego. Zastosowanie tego typu kamery wymagało opracowania dedykowanego algorytmu rekonstrukcji obrazu, umożliwiającego składanie kolejnych linii skanowania w spójny obraz powierzchni toru. Proces ten zapewniał zachowanie właściwej geometrii obrazu oraz ciągłość rejestrowanych danych (Rys. 5).

Rysunek 5 Złożenie obrazu nawierzchni torowej



Źródło: Opracowanie własne

Opracowany system został następnie poddany wstępnym testom funkcjonalnym, które pozwoliły na weryfikację poprawności działania układu akwizycji danych oraz przygotowanie pierwszego zbioru obrazów nawierzchni torowej wykorzystywanego w dalszych etapach badań.

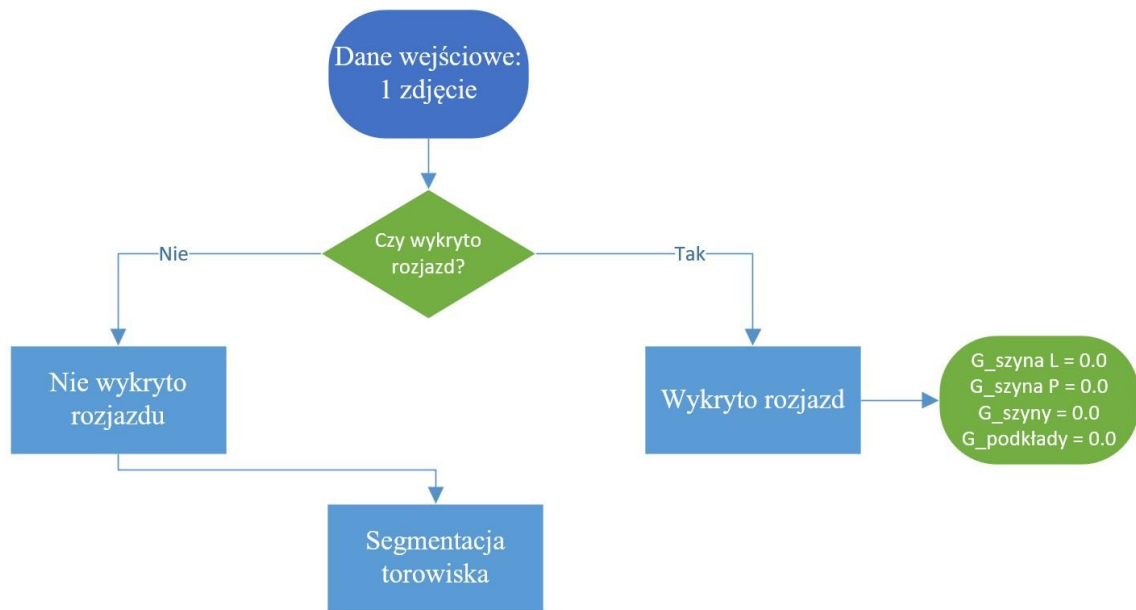
2. Dobór i adaptacja architektury modeli sztucznej inteligencji

Drugi etap badań obejmował dobór oraz adaptację architektury modeli sztucznej inteligencji przeznaczonych do analizy obrazów nawierzchni torowej. Celem tego etapu było opracowanie procesu przetwarzania danych umożliwiającego automatyczną identyfikację wad elementów nawierzchni torowej oraz wyznaczanie wskaźników degradacji.

Opracowana architektura przetwarzania danych obejmuje kilka etapów analizy obrazu: wstępną klasyfikację obrazów nawierzchni torowej, segmentację elementów infrastruktury oraz detekcję wad poszczególnych elementów.

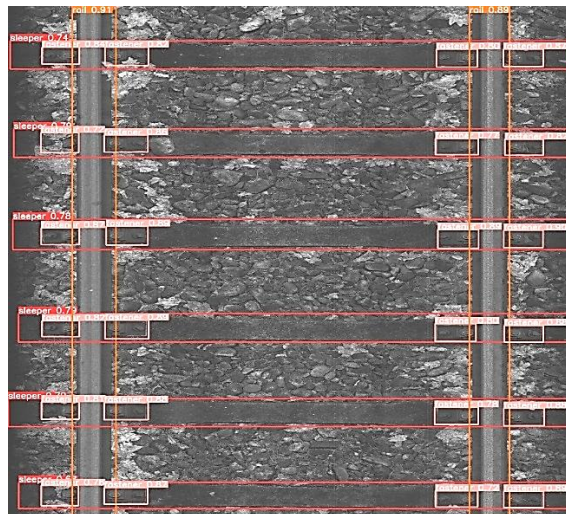
W pierwszym kroku wykonywana jest klasyfikacja binarna umożliwiająca identyfikację rozjazdów. W przypadku ich wykrycia obraz nie jest dalej analizowany (Rys. 6). Dla pozostałych przypadków wykonywana jest segmentacja elementów nawierzchni torowej umożliwiająca wyodrębnienie lewej i prawej szyny oraz podkładów (Rys. 7).

Rysunek 6 Schemat przetwarzania danych – segmentacja nawierzchni torowej



Źródło: Opracowanie własne

Rysunek 7 Automatyczna segmentacja nawierzchni torowej

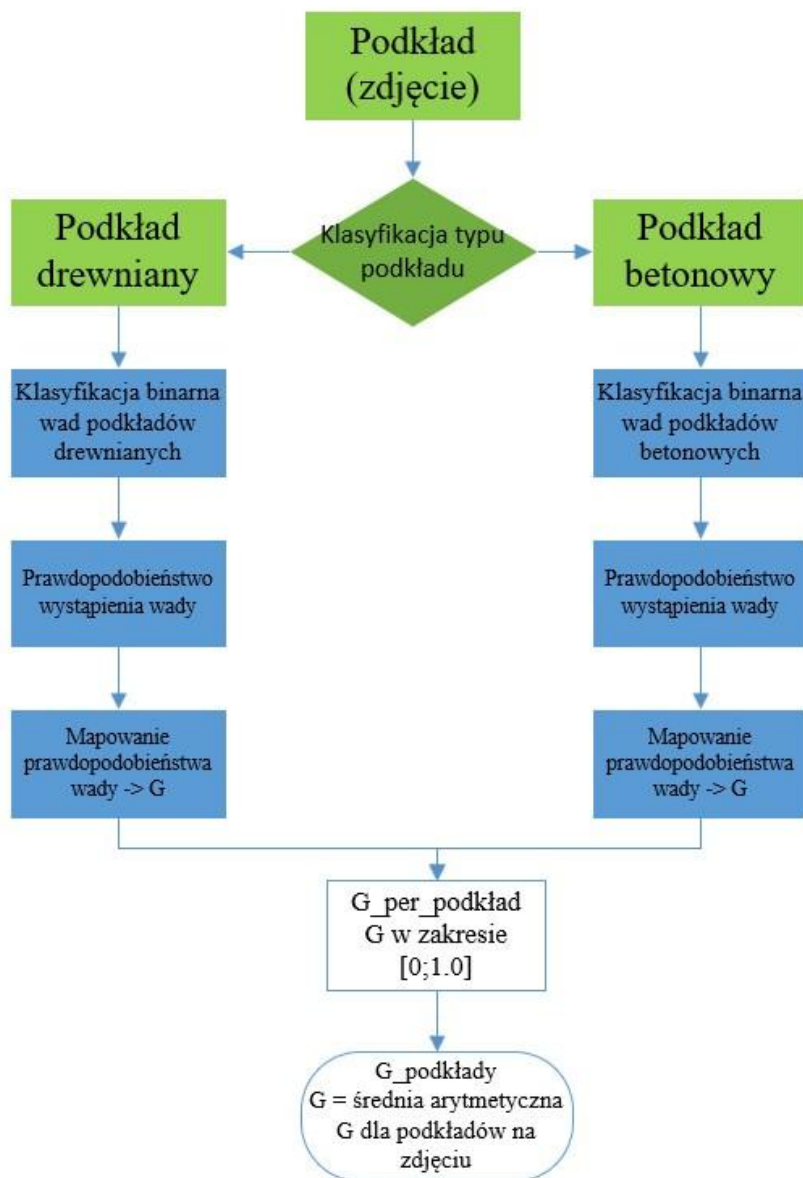


Źródło: Opracowanie własne

Dla wyodrębnionych fragmentów szyn zastosowano modele klasyfikacji binarnej identyfikujące obecność wady wraz z przypisaniem prawdopodobieństwa jej wystąpienia. W przypadku podkładów w pierwszym etapie wykonywana jest klasyfikacja typu elementu (drewniany lub betonowy), a następnie detekcja wad właściwych dla danego typu podkładu.

Uzyskane prawdopodobieństwa detekcji stanowią dane wejściowe do wyznaczania wskaźników degradacji szyn (Gs) oraz podkładów (Gp), co umożliwia przejście od detekcji wizualnej do ilościowej oceny stanu nawierzchni torowej (Rys. 8).

Rysunek 8 Schemat przetwarzania danych - identyfikacja wad szyn i podkładów



Źródło: Opracowanie własne

3. Rozbudowa bazy danych i optymalizacja modeli

Trzeci etap badań obejmował rozszerzenie zbioru danych obrazowych nawierzchni torowej oraz optymalizację architektury modeli sztucznej inteligencji. W celu zwiększenia różnorodności danych oraz poprawy zdolności generalizacji modeli przeprowadzono dodatkowe kampanie pomiarowe z wykorzystaniem mobilnego wózka pomiarowego (Rys. 9).

Rysunek 9 Kampanie pomiarowe z wykorzystaniem mobilnego wózka pomiarowego



Rys. 9a



Rys. 9b

Źródło: Opracowanie własne

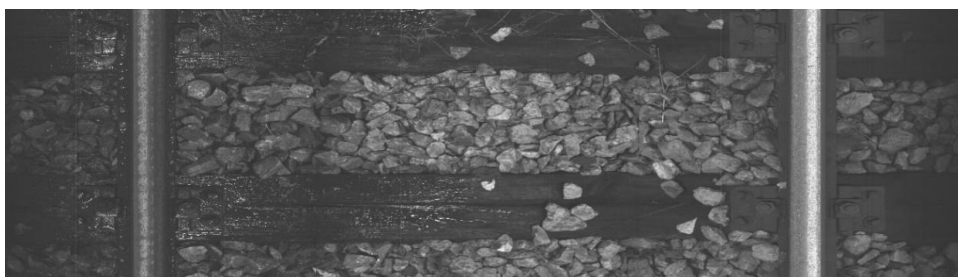
Zastosowanie dedykowanego wózka pomiarowego umożliwiło pozyskanie danych obrazowych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych, w szczególności na bocznicach kolejowych oraz w miejscach o zróżnicowanym stanie technicznym nawierzchni torowej (Rys. 10, Rys. 11). Rozwiązanie to pozwoliło na rejestrację obrazów elementów nawierzchni torowej w różnych warunkach oświetleniowych, przy zróżnicowanym stopniu degradacji infrastruktury, co było istotne z punktu widzenia budowy reprezentatywnego zbioru treningowego.

Rysunek 10 Akwizycja danych – przykład 1



Źródło: Opracowanie własne

Rysunek 11 Akwizycja danych – przykład 2



Źródło: Opracowanie własne

Pozyskane dane znacząco rozszerzyły wcześniej utworzony zbiór obrazów, który obejmował dane zebrane na stanowisku laboratoryjnym oraz podczas wstępnych testów prototypu systemu wizyjnego. W wyniku przeprowadzonych pomiarów utworzono nowe podzbiory danych przeznaczone do trenowania, walidacji oraz testowania modeli klasyfikujących wady elementów nawierzchni torowej.

Struktura zbiorów danych dla modeli klasyfikujących wady szyn przedstawiona została w Tabeli 4, natomiast dla modeli klasyfikujących wady podkładów drewnianych oraz betonowych odpowiednio w Tabelach 5 i 6. W każdym przypadku zastosowano podział danych na podzbiór treningowy, walidacyjny oraz testowy, przy zachowaniu możliwie zrównoważonego udziału klas.

Tabela 4 Liczba obserwacji z każdej klasy w podzbiorach użytych do treningu i walidacji modelu uczenia maszynowego klasyfikującego binarnie wady szyn po zbalansowaniu danych

Podzbiór	0	1
treningowy	386 (50%)	386 (50%)
walidacyjny	97 (50,3%)	96 (49,7%)
testowy	54 (50%)	54 (50%)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie zebranego zbioru danych

Tabela 5 Liczba obserwacji z każdej klasy w podzbiorach użytych do treningu i walidacji nowego modelu uczenia maszynowego klasyfikującego binarnie wady podkładów drewnianych

Podzbiór	0	1
treningowy	127 (51.6%)	119 (48,4%)
walidacyjny	15 (50%)	15 (50%)
testowy	8 (53,3%)	7 (46,7%)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie zebranego zbioru danych

Tabela 6 Liczba obserwacji z każdej klasy w podzbiorach użytych do treningu i walidacji nowego modelu uczenia maszynowego klasyfikującego binarnie wady podkładów betonowych

Podzbiór	0	1
treningowy	140 (53,8%)	120 (46,2%)
walidacyjny	35 (53%)	31 (47,0%)
testowy	20 (52,6%)	18 (47,4%)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie zebranego zbioru danych

Rozszerzenie zbioru danych umożliwiło ponowne trenowanie modeli sztucznej inteligencji oraz przeprowadzenie procesu ich optymalizacji z wykorzystaniem nowych danych obrazowych nawierzchni torowej.

4. Implementacja algorytmów oceny stopnia degradacji szyn i podkładów

Czwarty etap badań obejmował opracowanie autorskiego algorytmu umożliwiającego przekształcenie wyników detekcji wad uzyskiwanych przez modele sztucznej inteligencji w syntetyczne wskaźniki degradacji elementów nawierzchni torowej.

Na podstawie analizy literatury dotyczącej degradacji infrastruktury kolejowej oraz wymagań instrukcji utrzymaniowej Id-1 „Warunki techniczne utrzymania nawierzchni na liniach kolejowych” opracowano dwa wskaźniki oceny stanu technicznego: wskaźnik degradacji szyn G_s (Wzór 1) oraz wskaźnik degradacji podkładów G_p (Wzór 2).

$$G_s = w \cdot F_{wad} + (1 - w) \cdot D_{wad} \quad (\text{Wzór 1})$$

Gdzie,

F_{wad} – udział segmentów z wykrytą wadą

D_{wad} – miara rozkładu przestrzennego wad

w = parametr kalibracyjny

$$G_p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n G_{p,i} \quad (\text{Wzór 2})$$

Gdzie,

$G_{p,i}$ – lokalna wartość degradacji podkładu wyznaczona na podstawie prawdopodobieństwa wady

n – liczba podkładów na zdjęciu

Wskaźnik G_s określa stopień degradacji szyn na podstawie udziału segmentów z wykrytą wadą oraz rozkładu przestrzennego tych wad w analizowanym odcinku toru. W przypadku podkładów zastosowano wskaźnik G_p , wyznaczany jako syntetyczną miarę

degradacji elementów widocznych w obrazie nawierzchni torowej, obliczaną na podstawie prawdopodobieństwa wystąpienia wady dla poszczególnych podkładów.

Dane wejściowe algorytmu stanowią prawdopodobieństwa wykrycia wad generowane przez modele sztucznej inteligencji, które następnie przekształcane są w syntetyczne wskaźniki degradacji opisujące stan techniczny analizowanego fragmentu toru. Poprawność wyznaczania wskaźników oceniono poprzez porównanie wyników algorytmu z oceną ekspercką, przyjmując jako kryterium akceptacji średni błąd bezwzględny $MAE \leq 0,25$, co odpowiada maksymalnie 25-procentowemu odchyleniu wartości wskaźnika od oceny referencyjnej.

Zaproponowane podejście umożliwia przejście od klasycznej detekcji wad do ilościowej oceny stopnia degradacji nawierzchni torowej, stanowiąc podstawę dalszej walidacji oraz analizy porównawczej z tradycyjną metodą obchodów torów.

5. Walidacja eksploatacyjna

Piąty etap badań obejmował budowę finalnej wersji systemu inspekcji wizyjnej oraz jego walidację w warunkach eksploatacyjnych. System został zintegrowany z pojazdem kolejowym i wyposażony w moduł inspekcji wizyjnej, układ akwizycji danych oraz oprogramowanie umożliwiające przetwarzanie obrazów nawierzchni torowej w czasie przejazdu pojazdu (Rys. 12).

Rysunek 12 Testy finalnej wersji systemu wizyjnego na bocznicy Warszawa Grochów



Źródło: Opracowanie własne

W ramach tego etapu przeprowadzono testy funkcjonalne systemu na bocznicy kolejowej Warszawa Grochów, w trakcie których zweryfikowano poprawność działania układów akwizycji obrazu, stabilność pracy systemu oraz możliwość pozyskiwania danych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

Równolegle przeprowadzono walidację jakości działania modeli sztucznej inteligencji po rozszerzeniu zbioru danych. W tym celu porównano skuteczność detekcji wad elementów nawierzchni torowej dla modelu pierwotnego oraz modelu ponownie wytrenowanego po rozbudowie bazy danych (Tabela 7).

Tabela 7 Porównanie miar jakości detekcji (przed vs po rozszerzeniu danych)

Kategoria wad	Model Pierwotny			Model Douczony		
	Precyzja	Czułość	Miara F1	Precyzja	Czułość	Miara F1
Szyny	82%	81%	82%	91%	90%	90%
Podkłady drewniane	84%	83%	82%	100%	100%	100%
Podkłady betonowe	86%	87%	86%	95%	96%	95%

Źródło: Opracowanie własne

Uzyskane wyniki wskazują na istotną poprawę skuteczności detekcji. W przypadku szyn uzyskano wartości precyzji na poziomie 91%, czułości 90% oraz miary $F1 = 90\%$. Dla podkładów drewnianych osiągnięto wartości 100% dla wszystkich analizowanych miar jakości, natomiast dla podkładów betonowych odpowiednio 95% precyzji, 96% czułości oraz 95% miary $F1$.

Dodatkowo przeprowadzono walidację zaproponowanych wskaźników degradacji G_s i G_p z wykorzystaniem miary średniego błędu bezwzględnego MAE. W tym celu przygotowano zbiór 40 obrazów nawierzchni torowej, które zostały niezależnie ocenione przez toromistrza. Na tej podstawie porównano wartości wskaźników degradacji wyznaczonych przez algorytm z oceną referencyjną eksperta. Uzyskane wartości błędu wyniosły $MAE = 0,032$ dla szyn oraz $MAE = 0,027$ dla podkładów, przy przyjętym progu akceptacji $MAE \leq 0,25$.

Uzyskane wyniki potwierdzają stabilność działania zaproponowanej metody oceny degradacji oraz spełnienie założonych celów metodycznych pracy w zakresie uzyskania miar jakości przekraczających poziom 90%.

6. Testy na linii kolejowej nr 250 oraz analiza porównawcza

Ostatni etap badań obejmował weryfikację działania opracowanego systemu w warunkach rzeczywistej eksploatacji oraz analizę wyników uzyskanych podczas przejazdów pomiarowych. Finalna wersja systemu wizyjnego została zainstalowana na pojeździe szynowym PWM15, który był sprzęgnięty z wózkiem motorowym WM15-A, co umożliwiło prowadzenie inspekcji nawierzchni torowej w trakcie przejazdu pojazdu (Rys. 13).

Rysunek 13 Montaż systemu wizyjnego na przyczepie PWM15

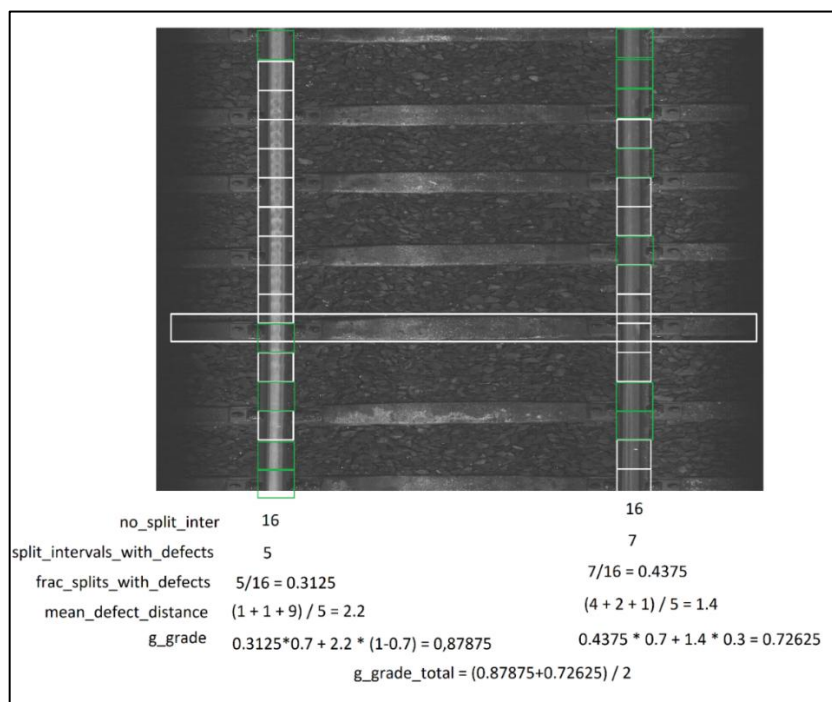


Źródło: Opracowanie własne

Podczas przejazdów testowych system rejestrował obrazy nawierzchni torowej, które następnie były przetwarzane przez modele sztucznej inteligencji w celu identyfikacji wad elementów infrastruktury oraz wyznaczania wskaźników degradacji. Przykład działania algorytmu detekcji wad oraz obliczania wskaźnika degradacji szyn przedstawiono na Rysunku 14.

Badania eksploatacyjne przeprowadzono na dwutorowej linii kolejowej nr 250 Gdańsk Główny – Rumia o długości 32 km, gdzie wykonano serię przejazdów pomiarowych w warunkach rzeczywistego ruchu kolejowego. Łącznie przeanalizowano 22 974 obrazy nawierzchni torowej, obejmujące zarówno szyny, jak i podkłady o różnym stopniu degradacji.

Rysunek 14 Detekcja wad i ocena stopnia degradacji szyn



Źródło: Opracowanie własne

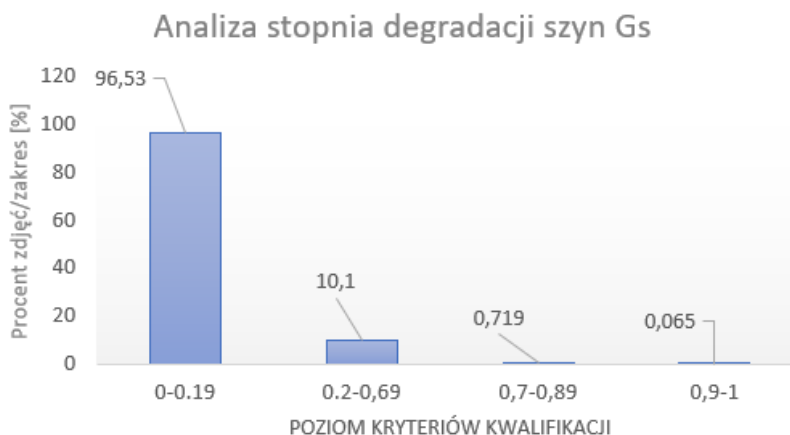
Na podstawie uzyskanych wyników przeprowadzono analizę rozkładu wartości wskaźników degradacji G_s dla szyn oraz G_p dla podkładów. Wyniki analizy przedstawiono odpowiednio na Wykresach 3 i 4 prezentujących rozkład stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej.

W przypadku szyn zdecydowana większość analizowanych obserwacji została zakwalifikowana do kategorii małego zużycia ($G < 0,2$), które stanowiło 96,53% wszystkich analizowanych przypadków (wykres analizy degradacji szyn G_s). Mniejszy udział stanowiły obserwacje odpowiadające poziomowi zużycia przeciętnego (10,1%) oraz wysokiego (0,719%).

Analogiczna analiza przeprowadzona dla podkładów wykazała, że 99,16% obserwacji odpowiadało klasie małego zużycia, natomiast pozostałe przypadki zostały zakwalifikowane do wyższych klas degradacji (wykres analizy degradacji podkładów G_p).

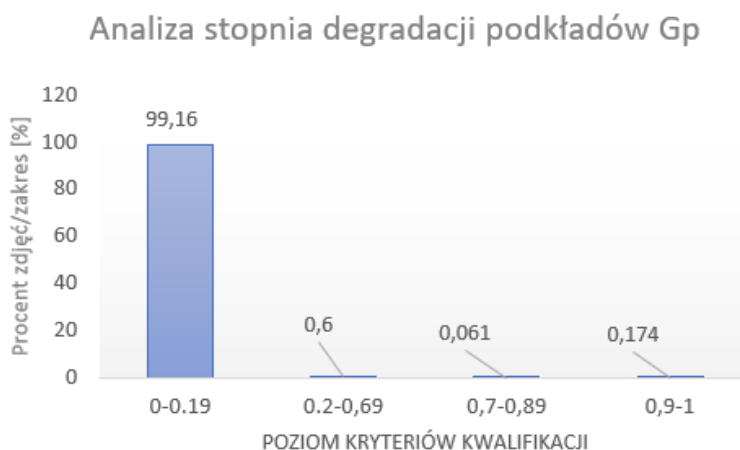
Klasyfikacja elementów nawierzchni torowej została przeprowadzona zgodnie z przyjętymi kryteriami kwalifikacji, w których wyróżniono cztery poziomy stanu technicznego: małe zużycie ($G < 0,2$), zużycie przeciętne ($0,2 \leq G < 0,7$), zużycie duże ($0,7 \leq G < 0,9$) oraz zużycie bardzo duże ($0,9 \leq G \leq 1,0$).

Wykres 3 Ocena stopnia degradacji szyn na linii kolejowej nr 250



Źródło: Opracowanie własne

Wykres 4 Ocena stopnia degradacji podkładów na linii kolejowej nr 250



Źródło: Opracowanie własne

Uzyskane wyniki potwierdzają możliwość wykorzystania zaproponowanej metody do automatycznej oceny stanu nawierzchni torowej w warunkach eksploatacyjnych oraz stanowią podstawę do przeprowadzenia analizy porównawczej z tradycyjną metodą inspekcji torów realizowaną w formie obchodów torowych.

4. WYNIKI BADAŃ W KONTEŚCIE HIPOTEZ BADAWCZYCH

W niniejszym rozdziale zaprezentowano analizę wyników badań w odniesieniu do sformułowanych hipotez badawczych. W tym celu przeprowadzono porównanie skuteczności opracowanego systemu inspekcji wizyjnej z tradycyjną metodą inspekcji

torów realizowaną w formie obchodów torowych. Analiza została wykonana na podstawie danych pozyskanych podczas badań eksploatacyjnych na linii kolejowej nr 250.

W trakcie prowadzonych badań równolegle realizowany był tradycyjny obchód torów wykonywany przez toromistrza, co umożliwiło bezpośrednie porównanie wyników obu metod w tych samych warunkach eksploatacyjnych.

Porównanie skuteczności identyfikacji wad

Porównanie liczby zidentyfikowanych potencjalnych wad wykazało istotną różnicę pomiędzy analizowanymi metodami (Tabela 8). System automatyczny zidentyfikował 1137 potencjalnych wad szyn, podczas gdy w trakcie obchodów torowych wskazano 396 przypadków, co oznacza różnicę +741 obserwacji. W przypadku podkładów system automatyczny wskazał 238 potencjalnych wad, natomiast metoda manualna 97 przypadków, co odpowiada różnicy +141 obserwacji.

Tabela 8 Liczba zidentyfikowanych potencjalnych istotnych wad (szt.)

Element nawierzchni	Metoda automatyczna	Metoda manualna	Różnica (automatyczna - manualna)	Względna różnica (%)
Szyny	1 137	396	+741	+187%
Podkłady	238	97	+141	+145%

Źródło: Opracowanie własne

Wspólna analiza wyników z udziałem toromistrza wykazała, że znaczna część dodatkowo wykrytych przypadków dotyczyła wad o niewielkiej skali, które podczas manualnej inspekcji zostały pominięte lub uznane za nieistotne z punktu widzenia bezpieczeństwa ruchu kolejowego.

Pomimo znacząco większej liczby wykrytych wad przez system automatyczny, analiza zagregowanych wskaźników degradacji szyn Gs oraz podkładów Gp wykazała, że końcowa ocena stanu technicznego infrastruktury pozostaje zbliżona dla obu metod (Tabela 9). Różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi metodą automatyczną a oceną wynikającą z obchodów torowych nie przekraczały 0,1 w skali wskaźnika degradacji.

Tabela 9 Zagregowane wskaźniki stopnia degradacji szyn i podkładów – porównanie metod

Element toru	Tor	Metoda automatyczna	Obchód torów	Różnica (bezwzględna)
Podkłady (Gp)	1	0.12	0.09	+0.03
Podkłady (Gp)	2	0.11	0.08	+0.03
Szyny (Gs)	1	0.31	0.21	+0.10
Szyny (Gs)	2	0.30	0.19	+0.11

Skala wskaźników degradacji: 0–1

Źródło: Opracowanie własne

Otrzymane wyniki wskazują, że zwiększona czułość systemu automatycznej inspekcji umożliwiła identyfikację większej liczby potencjalnych wad, jednak nie prowadzi do istotnego zawyżenia końcowej oceny stopnia degradacji elementów nawierzchni torowej. Wynik ten potwierdza możliwość wykorzystania opracowanego systemu jako narzędzia wspierającego proces diagnostyki infrastruktury kolejowej.

Porównanie czasu inspekcji

Druga hipoteza badawcza dotyczyła porównania czasu realizacji pełnego cyklu inspekcyjnego przy zastosowaniu metody automatycznej oraz tradycyjnego obchodu torów. W przypadku metody automatycznej proces obejmował przejazd diagnostyczny pojazdu pomiarowego, transfer danych, automatyczną analizę obrazów z wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji oraz wygenerowanie raportu diagnostycznego. Łączny czas realizacji jednego cyklu inspekcyjnego wyniósł 7 godzin 59 minut (479 minut).

Dla porównania czas realizacji inspekcji metodą tradycyjnego obchodu torów obejmował fizyczne przejście badanego odcinka przez toromistrza oraz przygotowanie dokumentacji z przeprowadzonej inspekcji. Całkowity czas realizacji procesu wyniósł 33 godziny 19 minut (1999 minut), przy czym sam obchód torów stanowił zdecydowaną większość tego czasu.

Porównanie wyników wskazuje na redukcję czasu realizacji inspekcji o około 76% (Rys. 15) przy zastosowaniu systemu automatycznej inspekcji wizyjnej.

Rysunek 15 Porównanie czasu inspekcji metody automatycznej oraz tradycyjnej



Źródło: Opracowanie własne

W przeciwieństwie do metody manualnej, wszystkie etapy procesu w metodzie automatycznej realizowane są w ramach jednego cyklu diagnostycznego, co znacząco skraca czas uzyskania wyników inspekcji.

Uzyskane wyniki potwierdzają spełnienie drugiej hipotezy badawczej dotyczącej istotnego skrócenia czasu realizacji inspekcji nawierzchni torowej.

Analiza ekonomiczna

Trzecia hipoteza badawcza dotyczyła oceny wpływu zastosowania automatycznej inspekcji wizyjnej na koszty realizacji procesu diagnostyki nawierzchni torowej. Analiza została przeprowadzona w formie studium dwóch scenariuszy eksploatacyjnych, różniących się skalą sieci infrastrukturalnej.

W pierwszym scenariuszu analizowano krótki odcinek infrastruktury odpowiadający zakresowi badań eksploatacyjnych – 64 km linii kolejowej nr 250. W tym przypadku przeprowadzona analiza ekonomiczna wykazała, że inwestycja w system automatycznej inspekcji wizyjnej nie osiąga progu opłacalności w horyzoncie 20 lat eksploatacji. Wynika to przede wszystkim z ograniczonej skali infrastruktury, przy której koszty inwestycyjne systemu nie mogą zostać zrekomensowane oszczędnościami wynikającymi z redukcji kosztów manualnych obchodów torów.

W drugim scenariuszu przeanalizowano zastosowanie systemu w warunkach dużej sieci infrastrukturalnej obejmującej 956 km linii kolejowych. W takim przypadku efekty ekonomiczne stają się wyraźnie bardziej korzystne. Analiza wykazała, że

w czwartym roku eksploatacji następuje przekroczenie poziomu kosztów odpowiadających realizacji manualnych obchodów torów, natomiast w dziewiątym roku eksploatacji możliwe jest osiągnięcie redukcji kosztów inspekcji na poziomie około 20% (Tabela 10).

Uzyskane wyniki wskazują, że efektywność ekonomiczna zastosowania automatycznej inspekcji wizyjnej ma charakter skalowalny – wraz ze wzrostem długości analizowanej sieci infrastrukturalnej skraca się czas osiągnięcia progu rentowności. Oznacza to, że rozwiązanie to jest szczególnie uzasadnione ekonomicznie w przypadku zarządców infrastruktury zarządzających rozległą siecią linii kolejowych.

Tabela 10 Porównanie kosztów dla linii kolejowej nr 3 (956 km, zakres techniczny 26%)

Rok	Koszt manualny (PLN)	Koszt manualny (-26%)	CAPEX (zakup urządzenia) (PLN)	Suma (CAPEX + manualny zredukowany) (PLN)
1	967 950	716 283	687 000	1 403 283
2	1 984 298	1 468 380	692 000	2 160 380
3	3 051 462	2 258 082	697 000	2 955 082
4	4 171 985	3 087 269	702 000	3 789 269
5	5 348 535	3 957 916	707 000	4 664 916
6	6 583 912	4 872 095	712 000	5 584 095
7	7 881 057	5 831 982	717 000	6 548 982
8	9 243 060	6 839 864	722 000	7 561 864
9	10 673 163	7 898 141	727 000	8 625 141
10	12 174 771	9 009 331	732 000	9 741 331

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowanie weryfikacji hipotez badawczych

Przeprowadzone badania potwierdziły zasadność przyjętych założeń badawczych oraz skuteczność opracowanej metody automatycznej inspekcji nawierzchni torowej. Uzyskane wyniki wykazały istotny wzrost liczby wykrywanych potencjalnych wad w porównaniu z tradycyjną metodą obchodów torów, przy jednoczesnym zachowaniu porównywalnej oceny zagregowanego stopnia degradacji infrastruktury. Zastosowanie systemu inspekcji wizyjnej umożliwiło również znaczące skrócenie czasu realizacji procesu diagnostycznego, co potwierdza jego wysoką efektywność operacyjną. Analiza ekonomiczna wykazała natomiast, że korzyści kosztowe mają charakter

skalowalny i są szczególnie widoczne w przypadku dużych sieci infrastrukturalnych. (Tabela 11).

Tabela 11 Weryfikacja Hipotezy Badawczej

Założenie hipotezy		Wynik badań		Status
Wzrost dokładności identyfikacji wad o	15-30%	Wzrost liczby wykrytych potencjalnych wad o	145-187%	● Potwierdzona
Skrócenie czasu inspekcji o	40-50%	Redukcja czasu pełnego cyklu inspekcji o	76%	● Potwierdzona
Redukcja kosztów inspekcji o	20-30%	Potwierdzona dla dużych sieci	(956 km, CAPEX)	● Warunkowo

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że cel główny pracy oraz cele cząstkowe zostały zrealizowane, a zaproponowana metoda stanowi skuteczne narzędzie wspierające proces diagnostyki infrastruktury kolejowej.

5. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania potwierdziły, że opracowany system diagnostyczny umożliwia skuteczną identyfikację wad oraz wiarygodną ocenę stopnia degradacji szyn i podkładów na podstawie danych pozyskiwanych w procesie inspekcji wizyjnej nawierzchni torowej. Zaproponowane rozwiązanie pozwala na automatyczne przetwarzanie dużych zbiorów obrazów oraz przekształcenie wyników detekcji wad w syntetyczne wskaźniki degradacji, które mogą być wykorzystywane w procesie oceny stanu technicznego infrastruktury kolejowej.

Istotnym rezultatem pracy było opracowanie mechanizmu integrującego algorytmy sztucznej inteligencji z modelem oceny degradacji elementów nawierzchni torowej. Pozwoliło to na przejście od klasycznej detekcji wizualnej wad do ich ilościowej interpretacji w postaci wskaźników degradacji zgodnych z praktyką utrzymaniową stosowaną przez zarządców infrastruktury. Uzyskane wyniki wskazują, że zastosowanie automatycznej inspekcji wizyjnej może zwiększyć skuteczność identyfikacji wad, przy jednoczesnym skróceniu czasu realizacji procesu diagnostycznego oraz ograniczeniu subiektywności ocen wynikających z manualnej interpretacji stanu infrastruktury.

6. WARTOŚĆ DODANA PRACY

Wartość dodana rozprawy obejmuje zarówno wkład naukowy, aplikacyjny, jak i społeczny w rozwój metod diagnostyki nawierzchni torowej wspieranej przez algorytmy

sztucznej inteligencji. W wymiarze naukowym kluczowym osiągnięciem jest opracowanie autorskich wskaźników oceny stopnia degradacji szyn (Gs) i podkładów (Gp), które umożliwiają przekształcenie wyników automatycznej detekcji wad w ilościową ocenę stanu technicznego elementów nawierzchni torowej. Zaproponowane podejście stanowi rozwinięcie metod analizy obrazowej poprzez powiązanie wyników działania algorytmów sztucznej inteligencji z praktyką utrzymaniową stosowaną przez zarządców infrastruktury kolejowej.

W wymiarze aplikacyjnym opracowane rozwiązanie stanowi narzędzie wspierające podejmowanie decyzji w procesie utrzymania nawierzchni torowej. Integracja systemu detekcji wad z algorytmami oceny degradacji umożliwia automatyczną analizę dużych zbiorów danych obrazowych oraz dostarczanie syntetycznych informacji o stanie infrastruktury, które mogą być wykorzystywane w planowaniu działań diagnostycznych i utrzymaniowych.

Istotnym elementem wartości dodanej pracy jest również aspekt społeczny związany z poprawą bezpieczeństwa pracy. Częściowa automatyzacja procesu inspekcji nawierzchni torowej ogranicza konieczność prowadzenia manualnych obchodów torów w warunkach czynnego ruchu kolejowego, zmniejszając tym samym ekspozycję pracowników na zagrożenia związane z ruchem pociągów. W tym ujęciu proponowane rozwiązanie może przyczyniać się nie tylko do zwiększenia efektywności diagnostyki infrastruktury, lecz także do podniesienia poziomu bezpieczeństwa w procesie jej utrzymania.

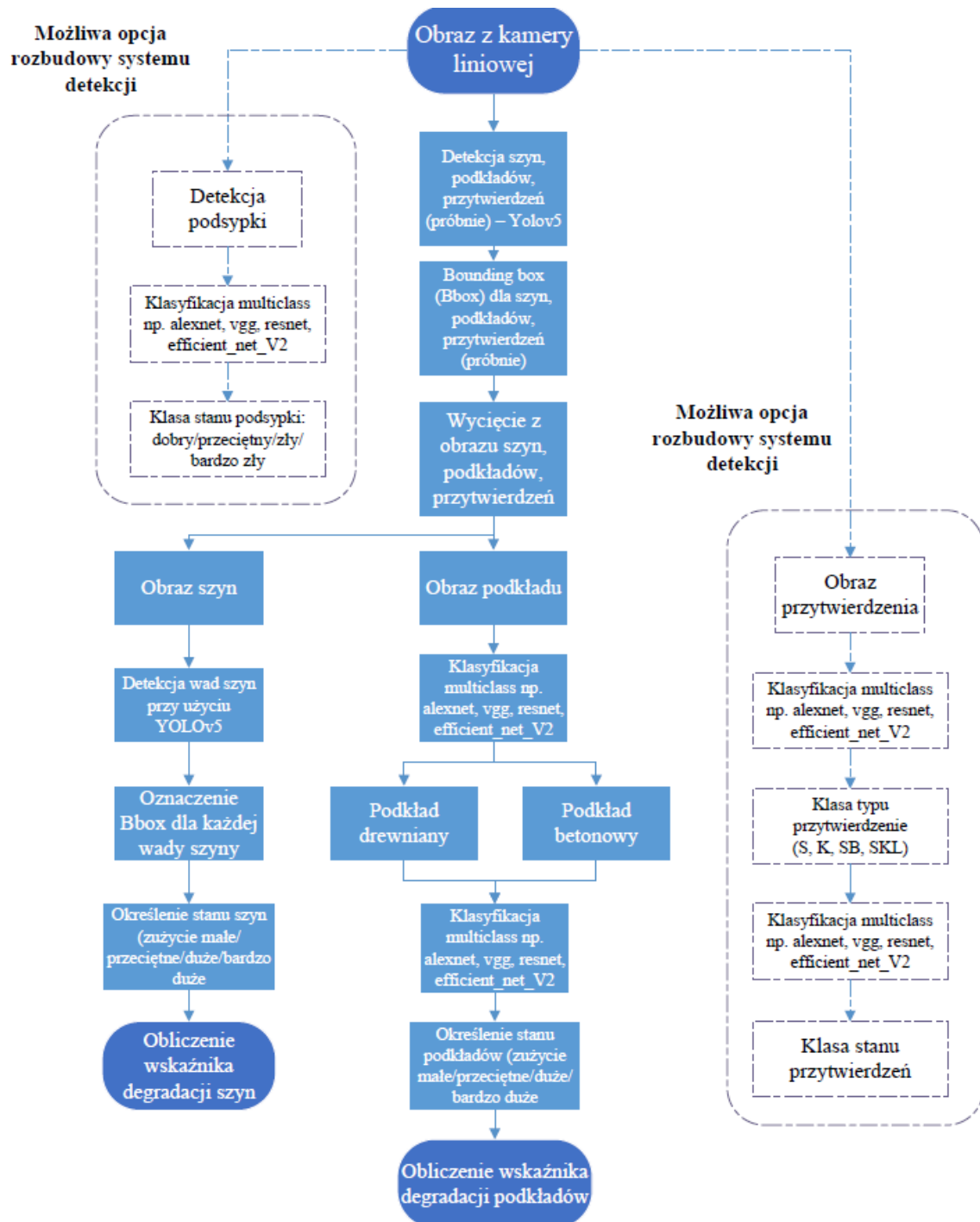
7. KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Należy podkreślić, że opracowane rozwiązanie nie stanowi systemu zamkniętego i wymaga dalszych prac rozwojowych. Uzyskane wyniki potwierdzają skuteczność zaproponowanej metody, jednak wskazują również na kilka istotnych kierunków dalszych badań.

Pierwszym obszarem jest rozwój warstwy algorytmicznej. Pomimo wysokiej skuteczności modeli sztucznej inteligencji, dalsze prace powinny koncentrować się na zwiększeniu wyjaśnialności decyzji algorytmów oraz rozszerzeniu klasyfikacji o bardziej szczegółowe typy wad. Istotne jest również uwzględnienie w procesie oceny degradacji dodatkowych zmiennych kontekstowych, takich jak natężenie ruchu czy kategoria eksploatacyjna linii kolejowej.

Drugim kierunkiem jest rozszerzenie zakresu diagnostycznego systemu. Obecna wersja rozwiązania obejmuje analizę szyn i podkładów, jednak architektura systemu umożliwia jego dalszą rozbudowę o diagnostykę podsypki oraz elementów przytwierdzenia. Przykładową koncepcję takiej rozbudowy przedstawiono na schemacie architektury systemu (Rys. 16).

Rysunek 16 Architektura systemu inspekcji wizyjnej po rozszerzeniu funkcji



Źródło: Opracowanie własne

Trzecim obszarem jest integracja systemu z procesami zarządzania utrzymaniem infrastruktury. Wdrożenie rozwiązania w praktyce wymaga integracji z systemami wspierającymi zarządzanie utrzymaniem oraz dostosowania obowiązujących regulacji i instrukcji utrzymaniowych do wykorzystania narzędzi opartych na sztucznej inteligencji.

Przedstawiona rozprawa stanowi zatem próbę odpowiedzi na współczesne wyzwania związane z diagnostyką nawierzchni torowej oraz wykorzystaniem metod sztucznej inteligencji w procesie utrzymania infrastruktury kolejowej.

8. SPIS PUBLIKACJI

1. Kałuża S., Kornaszewski M. (2015): *Analiza porównawcza konstrukcji wózków wagonowych przystosowanych do prędkości 200 k/h i powyżej*. Technika Transportu Szynowego 2623 – 12/2015.
2. Kałuża S., Kornaszewski M. (2017): *Utrzymanie predykcyjne w transporcie kolejowym. Efektywność Transportu*. Autobusy 6/2017.
3. Kałuża. S. (2024): *Automatyzacja diagnostyki infrastruktury kolejowej. Przegląd i analiza urządzeń do inspekcji wizyjnych*. Debiuty młodych naukowców w ujęciu interdyscyplinarnym 2024. Akademia WSB.