



Niniejsza rozprawa powstała w wyniku realizacji jednego z zadań projektu pn. „Doktorat Wdrożeniowy”- II edycja, finansowanego ze środków budżetu Państwa. Id projektu: 410487, nr rej.: 0062/DW/2018. Dofinansowanie projektu 1 875 720 zł. Całkowita wartość projektu 1 875 720 zł.



**Politechnika  
Śląska**

**Dyscyplina Naukowa  
Inżynieria Lądowa, Geodezja  
i Transport**

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr Michał Batko

**Analiza możliwości przeprowadzania oceny stanu technicznego infrastruktury kolejowej w oparciu o zastosowanie technologii bezzałogowych pojazdów, w tym pojazdów latających**

Analysis of the feasibility of carrying out a technical condition assessment of railway infrastructure using unmanned vehicle technology including flying vehicles

Promotor

dr hab. inż. Jarosław Konieczny, prof. PŚ

Opiekun pomocniczy ze strony Przedsiębiorstwa

dr inż. Joanna Michalska-Ćwiek

Katowice, marzec 2023 r.

*„Każdy trud przynosi zyski,  
poprzestawanie na słowach - pewną biedę.”*

*Serdecznie dziękuję Panu Promotorowi  
dr hab. inż. Jarosławowi Koniecznemu, prof. PŚ  
za nieocenioną pomoc, wsparcie przy realizacji pracy  
oraz za wieloletnią opiekę w trakcie studiów doktoranckich.*

*Serdecznie dziękuję Pani Opiekunce pomocniczej  
dr inż. Joannie Michalskiej-Ćwiek za przekazaną wiedzę,  
wsparcie w prowadzeniu badań i wdrażaniu projektu w przedsiębiorstwie.*

*Moim wspaniałym Dzieciom  
Agacie, Hani i Frankowi*

## Spis treści

Streszczenie.....	5
Abstract .....	6
1. Przedstawienie istoty zagadnienia. ....	7
2. Uzasadnienie celowości podjęcia tematu. ....	9
2.1. Wykonywanie inspekcji infrastruktury kolejowej za pomocą załogowych i bezzałogowych pojazdów. ....	9
2.2. Bezzałogowe statki powietrzne do wykonywania inspekcji infrastruktury. ....	13
2.2.1. Wprowadzenie .....	13
2.2.2. Energetyka. ....	16
2.2.3. Platformy, mosty i statki.....	18
2.2.4. Wojska lądowe i marynarka wojenna.....	19
2.2.5. Ratowanie zdrowia i życia ludzkiego .....	20
2.3 Efektywność wykonywania inspekcji za pomocą załogowych i bezzałogowych pojazdów .....	22
2.4 Bezpieczeństwo eksploatacji urządzeń i prowadzenia ruchu kolejowego .....	24
3. Cel, zakres i teza pracy .....	28
3.1. Konwencjonalne wykonywanie oględzin.....	28
3.2. Wykonywanie inspekcji za pomocą bezzałogowych statków powietrznych.....	32
4. Metodologia badań .....	37
4.1. Przedmiot i miejsce badań.....	37
4.2. Ustalenie komponentów systemu.....	39
4.2.1. Kryteria wyboru BSP .....	41
4.2.2. Kryteria wyboru kamer .....	43
4.2.3. Kryteria wyboru garażu dla BSP .....	44
4.3. Analiza alternatywnych BSP i kamer do wykonywania lotów .....	47
4.4. Algorytm do analizy materiału zdjęciowego i wykrywania usterek .....	49
5. Wyniki badań.....	55
5.1. Opracowanie bazy danych treningowych oraz testowych na potrzeby detekcji i klasyfikacji uszkodzeń .....	55
5.1.1. Testy wysokości i jakości zdjęć.....	56

6.	Przeprowadzenie wykrywalności usterek na podstawie zdjęć .....	62
6.1.	Ustalenie elementów infrastruktury koniecznych do wykrywania na podstawie zdjęć.....	62
6.2.	Oznaczenie i rozpoznawanie elementów wymagających detekcji.....	62
6.2.1.	Oznaczanie i rozpoznawanie szyn i podkładów .....	62
6.2.2.	Oznaczanie i rozpoznawanie przytwierdzeń.....	70
6.2.3.	Oznaczanie i rozpoznawanie złączy podpartych, styków międzyszynowych, pęknięć szyn. 76	
6.2.3.	Pomiar rozstawu szyn .....	84
6.2.4.	Pomiar krótkich wstawek szyn oraz odległości pomiędzy szynami na ich styku.....	88
6.2.5.	Rozpoznawanie wybuksowań szyn.....	91
6.3.	Wyniki rozpoznawania elementów infrastruktury .....	96
6.4.	Model procesu monitoringu infrastruktury dla detekcji usterek za pomocą bezzałogowego statku powietrznego.....	103
7.	Uwarunkowania formalnoprawne wykonywanych lotów nad infrastrukturą kolejową.....	111
7.1.	Ogólne uwarunkowania dotyczące możliwości i warunków wykonywania lotów dronami ....	111
7.1.1.	Warunki wykonywania lotów na terenie obszaru kolejowego .....	114
7.1.2.	Zgody konieczne do uzyskania przed wykonywaniem lotów .....	115
7.1.3.	Warunki wykonywania lotów poza zasięgiem wzroku pilota, w tym wykonywanie lotów przez pilota oraz lotów autonomicznych.....	116
7.1.4.	Ochrona danych osobowych, odpowiedzialność cywilna i karna .....	119
8.	Kalkulacja kosztów i nakładów inwestycyjnych inspekcji nową metodą.....	122
6.3.	Kalkulacja kosztów oględzin metodą konwencjonalną. ....	123
6.4.	Kalkulacja kosztów wykonywania oględzin infrastruktury za pomocą BSP.....	124
6.5.	Wyniki analizy ekonomicznej.....	126
7.	Podsumowanie.....	134
8.	Wnioski.....	141
	Spis załączników.....	144
	Bibliografia .....	150
	Spis rysunków.....	161
	Spis tabel.....	164

## Streszczenie

Celem niniejszej pracy była analiza możliwości wdrożenia oryginalnego rozwiązania w dziedzinie monitoringu stanu infrastruktury kolejowej polegającego na zastąpieniu obecnie wykonywanych oględzin infrastruktury przez personel zarządcy inspekcjami wykonywanymi za pomocą bezzałogowych statków powietrznych. Z przepisów dotyczących utrzymania infrastruktury wynika, że cykliczne wykonywanie obchodów jest obowiązkowe, gdyż są one elementem systemu zarządzania bezpieczeństwem zarządcy infrastruktury. Z analizy literatury wynika, że technologia bezzałogowych statków powietrznych rozwija się bardzo szybko jednak nadal brak systemowego rozwiązania w zakresie inspekcji infrastruktury kolejowej. Dlatego zasadnym było przeprowadzenie badań, które potwierdzą możliwość zastosowania takich rozwiązań na kolei. W tym celu pozyskano zdjęcia bezzałogowymi statkami powietrznymi wyposażonymi w kamery wizyjne i nauczono algorytm automatycznego rozpoznawania usterek infrastruktury. Opracowano model segmentacji zdjęć w celu identyfikacji dużych elementów infrastruktury takich jak szyny i podkłady kolejowe. Algorytm bardzo skutecznie rozpoznawał takie obiekty uzyskując wskaźnik IoU na poziomie 0,9. W oparciu o algorytm RetinaNet przygotowano model detekcji małych obiektów takich jak wkręty, śruby i łapki.

W tym przypadku również osiągnięto dobre rezultaty choć wystąpiły nieliczne przypadki błędnej detekcji wynikające głównie z trudnych warunków pogodowych jakie wystąpiły podczas lotów. Osiągnięto bardzo dobre wyniki w detekcji styków międzyszynowych i rozwinięto na tej podstawie algorytm detekcji pęknięć szyn. Pomimo prób nie udało się znaleźć praktycznego rozwiązania do detekcji wyboczeń szyn oraz wybuksowań. W badaniach zastosowano skaner laserowy LIDAR i uzyskane wyniki dowiodły, że możliwa jest detekcja wybuksowań na podstawie chmury punktów, jednak konieczne jest wykonanie większej ilości lotów. Na podstawie przeprowadzonych badań wykazano, że zastąpienie konwencjonalnych obchodów monitoringiem z powietrza jest możliwe. Wykonano kalkulację wykazując, że zastosowanie nowej metody inspekcji jest niemal dwukrotnie szybsze od dotychczasowej metody oraz prowadzi do uzyskania istotnych oszczędności. Wykazano, że dokumentacja zdjęciowa stanowi jednoznaczny i czytelny materiał o stanie infrastruktury zwiększając bezpieczeństwo ruchu kolejowego i w połączeniu z systemem prewencyjnego utrzymania zwiększy korzyści zarządców infrastruktury i ich interesariuszy.

Słowa kluczowe: bezzałogowy statek powietrzny, monitoring infrastruktury kolejowej, detekcja usterek.

## Abstract

The aim of this study was to analyse the feasibility of implementing an original solution in the field of monitoring railway infrastructure condition by replacing infrastructure inspections of the carried out by the manager's staff with inspections carried out by unmanned aerial vehicles. Infrastructure maintenance regulations stipulate that cyclical inspections are mandatory as they are part of the infrastructure manager's safety management system. Literature analysis shows that UAV technology is developing very rapidly, however, there is still a lack of a systematic solution for the inspection of railway infrastructure. Therefore, it was reasonable to carry out research to confirm the feasibility of such solutions on the railway. To this end, images were acquired with UAVs equipped with vision cameras and an algorithm was taught to automatically recognise infrastructure defects. An image segmentation model was developed to identify large infrastructure elements such as rails and sleepers. The algorithm was very successful in recognising such objects, achieving an IoU of 0.9. Based on the RetinaNet algorithm, a model was developed to detect small objects such as screws, bolts and clamping claws.

In this case, good results were also achieved, although there were a few cases of false detection due mainly to difficult weather conditions during the flights. Very good results were achieved in detection of rail joints and an algorithm for detection of rail cracks was developed on this basis. Despite attempts, it was not possible to find a practical solution for rail buckling and rail burn detection. A LIDAR laser scanner was used in the study and the results proved that it is possible to detect rail burns based on a point cloud but more flights are required. Based on the research carried out, it was proven that replacing conventional inspections with aerial monitoring is possible. A calculation showed that the use of the new inspection method is almost twice as fast as the current method and leads to significant savings. It was proven that photo documentation provides unequivocal and readable material about infrastructure condition, increasing rail traffic safety and, in combination with a preventive maintenance system, will increase the benefits for infrastructure managers and their stakeholders.

Key words: unmanned aerial vehicle, UAV, rail infrastructure monitoring, defect detection

## 1. Przedstawienie istoty zagadnienia.

Procesy automatyzacji, robotyzacji i digitalizacji stają się coraz bardziej powszechne i dostępne w nowych obszarach gospodarki. Wpływa na to wiele czynników wśród których można wymienić ciągłą presję na zwiększanie efektywności produkcji i usług - wykonywanie tego samego zakresu prac w krótszym czasie z wykorzystaniem tej samej infrastruktury - nacisk na zmniejszanie kosztów produkcji, rosnący niedobór pracowników do wykonywania nieskomplikowanych i powtarzalnych czynności, utrzymanie lub zwiększenie poziomu bezpieczeństwa przy wzroście produkcji. Wśród tego rodzaju powtarzalnych czynności można wymienić regularne inspekcje szeroko pojętej przemysłowej infrastruktury. Należy zwrócić uwagę, że obecne metody inspekcji i monitoringu jej stanu technicznego są coraz częściej niebezpieczne i nieefektywne. Monitoring wież telekomunikacyjnych, elektrowni wiatrowych, platform wiertniczych wykonywane przez ludzi jest drogie, czasochłonne i ryzykowne. Analitycy szacują [44], że tylko wykorzystanie skanów 3D do rekonstrukcji obrazu może przynieść 75% oszczędności kosztów inspekcji oraz 60% redukcji czasu ich wykonania. To znowu powinno przynieść korzyści w oszczędności czasu i energii, zmniejszyć obciążenie pracą zespołów pracujących przy inspekcjach i przyczynić się do większej dbałości o infrastrukturę techniczną.

Transport kolejowy odgrywa istotną rolę w życiu gospodarczym i przemysłowym państw i w związku z tym nie jest odosobniony od zmian jakie dzieją się w innych obszarach przemysłu, w tym wdrażanych tam innowacjach. Zapewnienie niezawodnej i bezpiecznej infrastruktury kolejowej jest kluczowe dla jej konkurencyjności wobec innych gałęzi transportu. Jednocześnie w przypadku awarii infrastruktury kolejowej dochodzi do bardzo istotnych w skutkach zdarzeń i wypadków, a nawet katastrof kolejowych [45], stąd zapewnienie sprawnej infrastruktury jest niezbędne. Dodatkowo wraz z rozwojem kolei i zwiększaniem prędkości oraz obciążenia sieci kolejowej prawdopodobieństwo wystąpienia defektów nawierzchni kolejowej zwiększa się. Dlatego poszukiwanie nowych, bardziej efektywnych sposobów monitoringu stanu infrastruktury kolejowej celem zapewnienia bezpiecznej eksploatacji większej liczby pociągów staje się coraz większym wyzwaniem.

W niniejszej pracy przedstawiono możliwości zastosowania załogowych i bezzałogowych pojazdów do inspekcji infrastruktury kolejowej, ze szczególnym uwzględnieniem bezzałogowych statków powietrznych (dalej: BSP, dron; na potrzeby niniejszej pracy przez BSP rozumie się bezzałogowy statek powietrzny wraz z jego wyposażeniem, kamerą czujnikami i aparaturą sterującą) wskazując na rosnące

spektrum ich praktycznego zastosowania. Biorąc pod uwagę możliwości współczesnego wykorzystania dronów w różnych sektorach przemysłu wskazano relatywnie ich małą rolę w sektorze kolejowym. Analizując literaturę w przedmiotowym zakresie przedstawiono główne przyczyny tego zagadnienia prezentując przykłady wykorzystania dronów wyposażonych w urządzenia pomiarowe. W pracy zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych nad tworzeniem i udoskonalaniem systemu pomiarowego z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych i dedykowanych do tego hangarów. Przedstawiono również występujące problemy i wyzwania związane z rejestracją obrazu i zaproponowano możliwe ich rozwiązania wskazując ostatecznie na sposób należytego wdrożenia nowego rodzaju inspekcji u zarządcy infrastruktury. Wskazując na niewystarczające rozpoznanie monitoringu infrastruktury kolejowej za pomocą BSP w literaturze, uzasadniono konieczność dalszego prowadzenia badań i studiów literatury w celu poszukiwania możliwości szerszego, skutecznego i efektywniejszego pod względem finansowym zastosowania dronów przez zarządców infrastruktury przy jednoczesnym utrzymaniu bezpieczeństwa prowadzenia ruchu.



## 2. Uzasadnienie celowości podjęcia tematu.

### 2.1. Wykonywanie inspekcji infrastruktury kolejowej za pomocą załogowych i bezzałogowych pojazdów.

Zarządcy infrastruktury kolejowej są zobligowani do regularnych inspekcji oraz wykonywania badań technicznych infrastruktury kolejowej, których celem jest ocena stanu infrastruktury kolejowej dla zapewnienia bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego. Najczęściej odbywa się to przy użyciu konwencjonalnych metod i narzędzi lub wprost poprzez obchody dokonywane przez pracowników zarządcy. Zaniechanie lub nienależyte wykonywanie inspekcji oraz utrzymania infrastruktury wpływa negatywnie na dostępność infrastruktury kolejowej dla przewoźników, co jest wyrażane funkcją bezpieczeństwa ruchu, punktualności, przepustowości linii i kosztów jej utrzymania [36].

Jak zostanie wykazane poniżej na przykładach pochodzących z energetyki czy przemysłu górnictwa naftowego, postęp technologiczny jaki obecnie zachodzi wskazuje na dostępność nowych metod i technologii pomiarowych, które mogą być zastosowane przy diagnostyce i monitoringu stanu infrastruktury kolejowej. Dostępne technologie IT jak i szybko rozwijająca automatyzacja i robotyzacja umożliwiają wprowadzenie nowych oraz innowacyjnych rozwiązań do branży kolejowej co pozwoliłoby na zwiększenie wydajności, obniżenie kosztów i - co najmniej - utrzymanie aktualnego poziomu bezpieczeństwa ruchu kolejowego [34]. Holistyczne spojrzenie na system utrzymania kolei może pomagać zarządcom infrastruktury identyfikować przyczyny występujących problemów, a w połączeniu z mapami i zdjęciami wspomagać podejmowanie decyzji co do planowania jak i samego wykonywania utrzymania infrastruktury [35].

Jednym z ważnych powodów ograniczających rozwój zarządców kolejowych są wysokie i ciągle rosnące koszty utrzymania infrastruktury. Składają się na nie m.in. koszty remontów infrastruktury, konieczność dokonywania kapitałochłonnych inwestycji, odbudowy i modernizacji linii kolejowych oraz koszty bieżącego utrzymania i systematycznej diagnostyki infrastruktury [37, 38]. W szczególności powtarzające się czynności przeglądowe oraz badania diagnostyczne skłaniają zarządców do poszukiwania rozwiązań zmierzających do automatyzacji tych procesów. Taki kierunek pozwoli na wzrost konkurencyjności kolei wobec innych gałęzi transportu.

Na rynku znane są już kolejowe pojazdy pomiarowe wyposażone w funkcję rejestracji wykonywanych inspekcji, lokalizacji miejsca pomiaru czy też w system nawigacji satelitarnej GPS [39].

Pojazdy takie mogą zostać także wyposażone w optyczne lub laserowe urządzenia pomiarowe np. dla sprawdzania geometrii toru i rozjazdu, diagnostyki sieci trakcyjnej, badania stanu podkładów kolejowych oraz stanu przytwierdzenia szyn do podkładów czy wizualnej inspekcji. Jednakże w ww. przypadkach są to urządzenia wymagające obsługi przez wykwalifikowany personel techniczny a także powodujące zajętość linii kolejowej na czas wykonywania pomiarów co powoduje zmniejszenie przepustowości linii, co jest zawsze zjawiskiem niepożądanym z punktu widzenia realizacji przewozów, ponieważ w konsekwencji prowadzi do zmniejszenia przychodów zarządców z tytułu udostępniania linii kolejowych i strat lub utraty korzyści po stronie przewoźników kolejowych. Dodatkowo pozyskane w ten sposób dane powodują konieczność ich ręcznej analizy lub rozbudowy systemów wspierających analizę danych (według obsługującego pojazd podczas kilkudniowych pomiarów infrastruktury zebrano dziesiątki terabajtów danych diagnostycznych). Pojazdy diagnostyczne tego typu mogą być efektywne pod kątem ilości wykonywanych inspekcji. Posiadany przez PKP PLK S.A. pojazd diagnostyczny DP-560.00 jest w stanie badać ok. 400 km linii kolejowych dziennie i docelowo 40 000 km rocznie, jednakże w pierwszych pięciu miesiącach eksploatacji pojazdu osiągnięto poziom ok. 30 km dziennie [41]. W 2021r. skontrolowano pojazdem 24 600 km torów co daje ok. 67 km dziennie. Należy mieć zatem na uwadze, że pojazd ten uczestniczy w ruchu kolejowym prowadzonym na sieci, co oznacza konieczność zajęcia przepustowości dla innych pojazdów i uwzględnienia przejazdu w rozkładzie jazdy innych pociągów. Trwające obecnie inwestycje na sieci PKP PLK S.A. powodują dodatkowe utrudnienia w planowaniu i wykonywaniu badań pojazdem diagnostycznym.

Istnieją również samojezdne pojazdy diagnostyczne do precyzyjnych ultradźwiękowych pomiarów szyn kolejowych [40]. Można w ich przypadku rozbudowywać systemy pomiarowe, jednak wymaga to dodatkowych nakładów oraz modernizacji pojazdów co jest droгим rozwiązaniem i czasochłonne w wykonaniu i uzyskaniu niezbędnych homologacji.

Poniżej przedstawiono przykłady stosowanych pojazdów pomiarowych na infrastrukturze kolejowej (rys. 1-3):



*Rysunek 1. Nowoczesny pojazd diagnostyczny PKP PLK. S.A. [42].*



*Rysunek 2. Drezyna z systemem TMS do pomiarów rozjazdów kolejowych [39].*



*Rysunek 3. Drezyna pomiarowa typu DP-523.10 [40].*

Na rynku powstają również nowatorskie rozwiązania do inspekcji infrastruktury kolejowej oparte o bezzałogowe pojazdy samojezdne. Zadaniem takiego pojazdu jest zapewnienie bezzałogowej inspekcji infrastruktury celem zmniejszenia kosztów wykonywania, utrzymania i poprawy bezpieczeństwa kolejowego. Pojazd typu Railpod (rys.4) został zaprojektowany, by mógł być sprawnie przewożony samochodem wyposażonym w hak holowniczy pomiędzy lokalizacjami oraz by mógł być obsługiwany przez jednego operatora. Pojazd wykonuje pomiary geometrii toru w planie i w profilu, bada skrajnie toru, w tym w tunelach i pod mostami wyszukując potencjalnych usterek zagrażających przejazdowi pociągów. Rezultatem inspekcji jest dostęp do informacji o odchyleniach od oczekiwanego stanu technicznego toru. Technologia ta jest nadal rozwijana w kierunku wykrywania pęknięć szyn, wykrywania niepożądanych otworów czy pęknięć otworów na śruby. Istotną przewagą pojazdu jest możliwość sprawdzania wysokości i przesunięć sieci trakcyjnej umieszczonej nad torem. Zebrane dane są umieszczane w czasie rzeczywistym na platformie dostępnej dla użytkownika w każdym momencie, gdzie można je przeglądać i podjąć stosowne decyzje co do wykonania czynności utrzymania bądź wstrzymania ruchu. System nie wysyła zarządcy jednak samodzielnie alertów odnośnie stanów alarmowych infrastruktury kolejowej.



*Rysunek 4. Pojazd Railpod do wykonywania inspekcji infrastruktury kolejowej [43].*

Wymienione powyżej przykłady wskazują, że podejmowane są próby zapewnienia automatycznego wykonywania inspekcji przez bezzałogowe lub załogowe pojazdy, jednak nadal żaden z wymienionych systemów nie zapewnia możliwości zastąpienia oględzin infrastruktury przez personel kompletnym, efektywnym ekonomicznie systemem zapewniającym w pełni bezpieczeństwo prowadzenia ruchu kolejowego. Bezzałogowe pojazdy samojezdne wprawdzie dostarczają informacje o stanie

infrastruktury, jednak wymagają one obsługi przez personel, zarówno jeśli chodzi o zainstalowanie pojazdu na torach, jego sterowanie czy ponowny załadunek na platformę samochodową lub kolejową. Takie rozwiązanie jest jednak niekorzystne dla zarządcy infrastruktury, ponieważ wymaga dokonywania zamknięć badanego toru, a to zdecydowanie ogranicza przepustowość infrastruktury. Drezyny pomiarowe wymagają specjalistycznego personelu do ich obsługi a następnie analizy zebranych przez nie danych. To wszystko powoduje, że ww. rozwiązania są kosztowne i nieefektywne do wykonywania bieżących, powtarzalnych inspekcji stanu infrastruktury.

## 2.2. Bezzałogowe statki powietrzne do wykonywania inspekcji infrastruktury.

### 2.2.1. Wprowadzenie

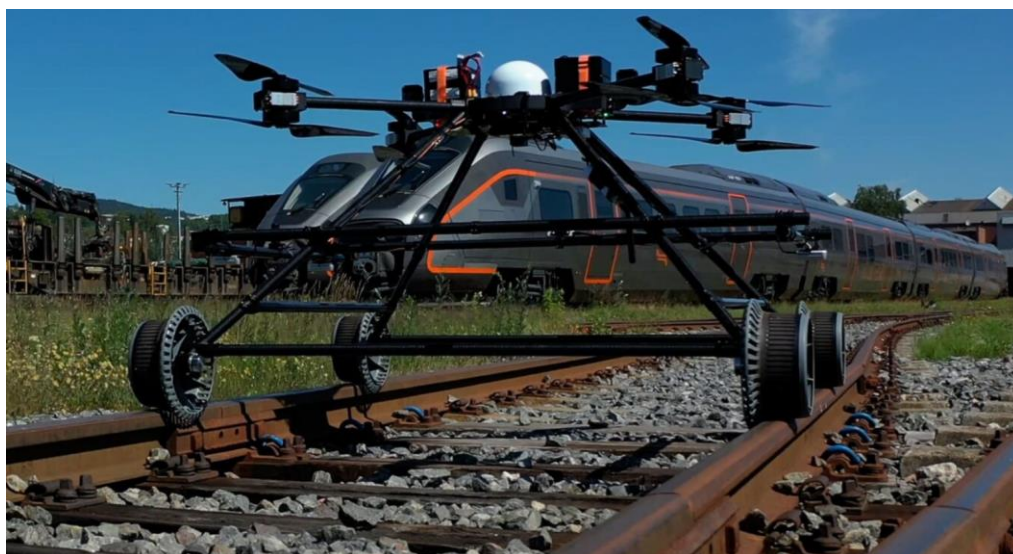
Drony to rodzaj statku powietrznego poruszającego się bez pilota lub załogi na jego pokładzie (rys. 5). Stosowane są różne nazwy dla współczesnych „bezzałogowców latających”. Przeważnie określa się je jako UAV – (ang. *Unmanned Aerial/Air Vehicle*). Natomiast według międzynarodowych organizacji: NATO (ang. *North Atlantic Treaty Organization*), ICAO (ang. *International Civil Aviation Organization*), EUROCONTROL zaleca się nazwę UAS (ang. *Unmanned Aircraft System*).

Bardzo dynamiczny rozwój dronów spowodował, iż są obecnie wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu i z powodzeniem zastępują pracę ludzi na przykład w sektorze wojskowym lub medycznym. Jest to przypisywane ich coraz większym możliwościom transportu ładunków, a także – przy odpowiednim wyposażeniu w kamery lub skanery - zdolnościom do nagrywania wysokiej jakości obrazów.



Rysunek 5. Przykład profesjonalnego ośmiowirnikowego drona Ebee SQ – SenseFly [23].

Szacuje się, że globalny komercyjny rynek dronów osiągnie 501,4 miliarda USD do roku 2028 [22]. Rosnące zapotrzebowanie na BSP przypisuje się właśnie zwiększającej się bazie aplikacji końcowych takich jak nieruchomości, budownictwo, rozrywka, media, rolnictwo. Oczekuje się, że w licznych przypadkach zastosowanie dronów nastąpi przez użytkowników końcowych procesów operacyjnych, co w konsekwencji przyczyni się do automatyzacji procesów biznesowych powodując istotny wzrost wydajności firm [23]. Co do zasady dron jest bezzałogowym statkiem powietrznym, jednak poszukując ich nowego zastosowania dodaje się im cechy pojazdu. Firma Nordic Unmanned z siedzibą w Norwegii [123] wyprodukowała dron będący w istocie bezzałogowym pojazdem latającym (rys. 6).



*Rysunek 6. Dron z możliwością przemieszczania się po torze [123].*

Jego podstawową cechą jest to, że ma możliwość poruszania się po torach jak również latania nad infrastrukturą kolejową. Ten rodzaj drona może kontrolować nawierzchnię kolejową podczas jazdy po torze. Jeśli dron kolejowy napotka nadjeżdżające pojazdy, może uniknąć niebezpiecznej sytuacji, lecąc na pobocze toru i przepuszczając pojazdy. Czujniki na pokładzie drona wykrywają zmiany infrastruktury dostarczając dane w czasie rzeczywistym do centrum utrzymania zarządcy infrastruktury. Przedstawiony pojazd latający może latać z jednego toru kolejowego na drugi, ustępować pierwszeństwa nadjeżdżającym pociągom i przenosić się na alternatywne tory. Dzięki możliwości niezakłócania normalnego ruchu pociągów dron ma znacznie usprawnić prace utrzymaniowe na norweskiej kolei.

Z uwagi na różnorodność zastosowania dronów trudno jest sklasyfikować je według jednego kryterium [7, 24, 68]. Najbardziej przejrzysty podział powstał dla celów militarnych, ponieważ konieczność współdziałania sojuszniczego wymusiła potrzebę ujednoczenia w tym zakresie. Według klasyfikacji militarnej BSP podzielono na trzy klasy i kategorie:

I - lekkie (do 150 kg), kategorie: Small, Mini, Mikro i Nano, używane głównie do realizacji zadań rozpoznania, nadzoru oraz identyfikacji celów naziemnych i nawodnych,

II – średnie (od 150 do 600 kg), kategoria *Tactical*, wysokość operacyjna do 10 000 stóp (3050 m) AGL, taktyczny promień działania do 200 km, do zabezpieczenia działań bojowych szczebla taktycznego,

III – ciężkie (ciężar powyżej 600 kg), kategorie: STRIKE/COMBAT – uderzeniowe/bojowe; HALE (ang. *High Altitude Long Endurance*) – duża wysokość i długotrwałość lotu, MALE (ang. *Medium Altitude Long Endurance*) – średnia wysokość i duża długotrwałość lotu do zastosowań operacyjno-strategicznych.

Powyżej specjalnie przedstawiono klasyfikację militarną, gdyż klasyfikacja cywilna jest w trakcie ustalania globalnego.

BSP można sklasyfikować także z uwagi na ich parametry techniczne. Z punktu widzenia efektywności wdrożenia monitoringu infrastruktury kolejowej za pomocą BSP, istotne będą takie parametry jak czas i zasięg lotu statku powietrznego. Ten podział został wybrany z punktu widzenia istotności misji, dla których BSP ma być przeznaczony (tab. 1).

*Tabela 1. Podział ze względu na czas i zasięg lotu przedstawia poniższa tabela [68]*

Kategoria BSP ze względu na zasięg i czas lotu	Czas lotu [h]	Zasięg [km]
Wysoki	>24	>1 500
Średni	5-24	100-400
Niski	<100	<100

Dzięki tak szerokim możliwościom zastosowania dronów rynek bezzałogowych statków rośnie bardzo dynamicznie. Szacuje się że w latach 2017-2026 liczba dronów cywilnych na światowym rynku

osiągnie liczbę 55,8 mln sztuk (w Polsce 462,4 tys. sztuk), a wartość globalnego rynku dronów w tym czasie osiągnie 73,5 mld USD (w Polsce odpowiednio 3,26 mld zł) [24]. Bardzo mocno rozwijającą się gałęzią globalnego rynku lotniczego są wojskowe bezzałogowe statki powietrzne i rosnący popyt na nowe systemy bojowe, które napędzają jeszcze bardziej rozwój BSP. Wg badania Teal Group Corporation szacuje się [25], że tylko Stany Zjednoczone będą odpowiadać za 80% łącznych światowych wydatków wojskowych na badania naukowe nad technologią bezzałogowych statków powietrznych w ciągu następnej dekady i prawie 40% zamówień wojskowych. Raport ekonomiczny AUVSI (ang. *Association for Unmanned Vehicle Systems International*) przewiduje, że w samych Stanach Zjednoczonych do 2025 roku powstanie ponad 100 000 miejsc pracy, co będzie miało również wpływ ekonomiczny na 82 miliardy dolarów na rynku komercyjnych dronów [51].

Oznacza to, że jest ogromny obszar do zagospodarowania, który wymaga współpracy zarówno instytucji badawczych, przedsiębiorstw oraz instytucji finansowych, które jedynie współdziałając razem będą w stanie rozwijać dotychczasowe rozwiązania jak również wytworzyć nowe usługi w miejscach dotąd nieznanymi dla BSP.

Należy jednak zauważyć, że niektóre sektory przemysłu coraz odważniej szukają zastosowań dronów w swoim zakresie działania. Poniżej przedstawiono obszary, w których najczęściej obecnie wykorzystuje się BSP.

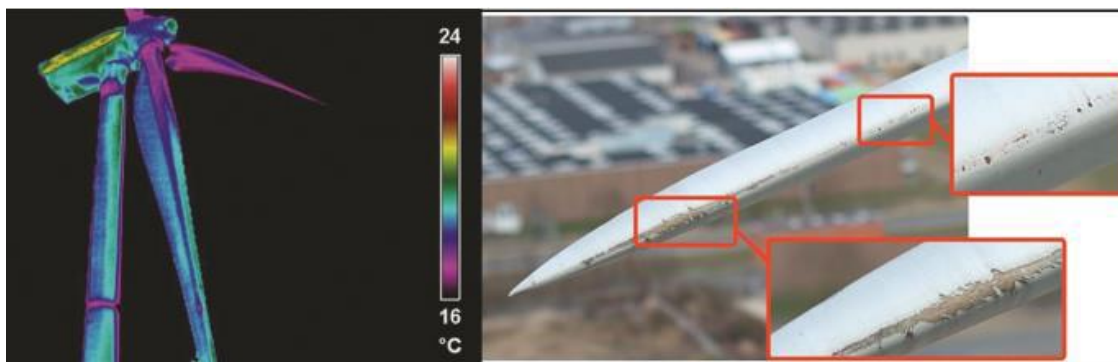
### 2.2.2. Energetyka.

Jedno z pierwszych zastosowań w energetyce przedstawiono już 12 lat temu [1], kiedy to podczas sesji VII Akademii Energetyki omawiano aspekty postępującej robotyki oraz sztucznej inteligencji w służbie przemysłu. Kolejne lata przyniosły faktyczne przykłady zastosowania dronów w monitoringu sieci elektroenergetycznych, elektrowni konwencjonalnych jak i powietrznych (rys. 6) czy też ogniw fotowoltaicznych [2, 69]. Zastosowanie dronów pomogło w ocenie m.in.:

- zniszczeń infrastruktury po anomaliach pogodowych,
- stopnia odrostów roślinności w pobliżu linii napowietrznych,
- stanu luster fotowoltaicznych,
- zniszczeń i uszkodzeń elektrowni atomowych,
- stanu turbin elektrowni wiatrowych,
- stanu podwodnej instalacji przesyłowej.



We wszystkich ww. dziedzinach zastosowanie BSP umożliwia szybką, bezpieczną i dokładną identyfikację stanu infrastruktury, co nie byłoby możliwe przy zastosowaniu konwencjonalnych metod w tak sprawny sposób. Wśród przykładów praktycznego wdrożenia monitoringu z powietrza można podać projekt SIEAREO opracowany przez firmę Siemens [3]. System ten jest przeznaczony do monitorowania i diagnostyki powietrznych sieci elektrycznych wysokiego napięcia. Początkowo system był zbudowany na bazie helikoptera a następnie BSP CAMCOPTER S-100 produkcji austriackiej. Jego zasięg to 200km i umożliwia transport sprzętu pomiarowego o masie do 50kg. Oprogramowanie SIEAREO służy do przechowywania danych, zarządzania nimi i analizy oraz jest zintegrowane w jednym systemie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego. Jednak obecnie większość krajów nie zezwala na loty BSP o takiej wielkości i wadze poza linią wzroku, co ogranicza możliwość zastosowania takiego rozwiązania.



*Rysunek 7. Zdjęcia elektrowni wiatrowych wykonane BSP [26].*

Podobnie australijska firma Skyline UAV wykorzystuje BSP do monitorowania i diagnostyki linii energetycznych za pomocą kamer [4]. Wykrywa i diagnozuje fizyczne uszkodzenia takie jak zużycie elementów drewnianych, korozję elementów metalowych, zniszczenia izolatorów. Wykorzystuje kamery na podczerwień do identyfikowania gorących punktów na liniach zasilających bądź ogniwach zapobiegając w ten sposób możliwym awariom urządzeń. Natomiast do monitorowania stanu turbin wystarczającym jest użycie wysokiej jakości kamery (rys.7), ponieważ do inspekcji pylonów i łopat wystarcza jedynie inspekcja wizualna [14]. Stosując skany z użyciem LIDAR'a (ang. *Light Detection and Ranging*) możliwe jest również budowanie trójwymiarowego modelu infrastruktury sieciowej, który zapewnia realistyczny obraz środowiska, w tym odległości do otaczającej roślinności lub do innych struktur i przedmiotów wewnątrz stref bezpieczeństwa. Interesującą cechą BSP firmy SKYLINE UAV jest możliwość autonomicznego podążania wzdłuż linii energetycznej.

### 2.2.3. Platformy, mosty i statki.

Platformy wiertnicze są konstrukcjami narażonymi na szybkie pogarszanie ich stanu technicznego z uwagi na trudne warunki eksploatacji. Dokumentacja systemu utrzymania platform wymaga regularnych inspekcji w celu utrzymania ich w sprawności i zachowania bezpieczeństwa przebywających tam pracowników. W tym celu są wykonywane oględziny poszczególnych elementów platformy. W przypadku użycia drona sterowanego przez operatora jest on w stanie dokonać oględzin w szczególności miejsc trudnodostępnych dla człowieka np. od strony morza. Stwarza to co najmniej dwie korzyści: pierwsza umożliwia wczesne wykrywanie usterek i możliwość ich naprawy zanim nastąpi poważne uszkodzenie podzespołu, druga umożliwia wykrycie sytuacji potencjalnie niebezpiecznych grożących wystąpieniem wypadku lub utraty życia pracowników. Duże zbiorniki i ładownie statków o wysokich konstrukcjach są również trudnodostępne i niedogodne do wykonywania inspekcji i bieżącego monitorowania ich sprawności. Wykonywanie tych czynności jest szczególnie niebezpieczne i wymaga dużego przygotowania i uwagi pracowników. W takich sytuacjach drony bardzo dobrze sprawdzają się do wykonywania inspekcji, ponieważ za pomocą kamer dostarczają bieżących danych o stopniu korozji, stanie ewentualnych uszkodzeń mechanicznych lub konieczności przeprowadzenia pozaplanowej konserwacji (rys. 8). Testy przeprowadzone przez firmę DNV GL potwierdzają, że wykonywanie takich inspekcji za pomocą BSP jest bardziej bezpieczne, wydajne i tańsze [12].



*Rysunek 8. Inspekcja platformy wiertniczej [12].*

Na Wydziale Inżynierii Systemów Technicznych na Florydzie od 2016 roku prowadzone są badania w jaki sposób BSP połączone z kamerami i czujnikami laserowymi można wykorzystać do kontroli mostów [97]. Badana technologia wykorzystuje zaprojektowane i skonstruowane na uniwersytecie BSP do zbierania zdjęć i nagrań video, a następnie wykorzystuje je do stworzenia serii modeli 3D do porównywania w czasie odchyleń w strukturze mostów.

Projekt jest oceniany jako bardzo obiecujący i uzyskał dofinansowanie na prowadzenie dalszych badań celem potwierdzenia słuszności koncepcji. Przedsięwzięcie jest prowadzone na dużą skalę, ponieważ przedmiotem kontroli raz na dwa lata jest poddawane około 7000 mostów i 4300 masztów. Obecnie inspekcje mostów lub słupów wymagają dużo pracy oraz specjalistycznego sprzętu (rys. 9), co powoduje, że często trwają tygodniami i wymagają zamknięcia pasów ruchu na głównych drogach (rys. 10).



*Rysunek 9. Inspekcje mostów z użyciem sprzętu alpinistycznego lub specjalnych platform [97].*



*Rysunek 10. Inspekcje mostów powodujące ograniczenia w ruchu drogowym [97].*

Wdrożenie kontroli za pomocą BSP doprowadzi do zmniejszenia zapotrzebowania na pracowników niezbędnych do przeprowadzania inspekcji i skróci kosztowne opóźnienia w ruchu drogowym wpływające na czas transportu towarów oraz poprawi bezpieczeństwo ludzi wykonujących inspekcje jak również uczestników ruchu drogowego.

#### 2.2.4. Wojska lądowe i marynarka wojenna.

Drony znajdują szerokie zastosowanie również w wojskach lądowych oraz marynarce wojennej. Lądowe wsparcie logistyczne pododdziałów na polu walki jest bardzo istotne dla powodzenia

wykonywanych działań wojennych, a jego brak zawsze stanowi duże niebezpieczeństwo dla żołnierzy. Konieczność prowadzenia walk w trudnym terenie jak Irak czy Afganistan były przyczynkiem do stworzenia systemów penetracji pola walki lub bezpośredniego prowadzenia ataków przy zastosowaniu bezzałogowych statków powietrznych. W zależności od przeznaczenia wojsko używa bardzo małych wręcz niewidocznych BSP, aż do bardzo dużych rozmiarów statków typu Predator [5] posiadających ładowność ok. 200 kg i mogących transportować pociski, broń i amunicję.

Amerykańska agencja DARPA<sup>1</sup> pracuje również nad projektem drona nawodnego, który ma być zdolny poszukiwać wrogie okręty podwodne [27]. Odpowiednia konstrukcja (podobna do katamaranu) oraz wyposażenie w dalmierze laserowe oraz LIDAR'y pozwalają prowadzić misje niezależnie od pogody i uzyskując zasięg do 15 km [1]. Jest to szczególnie ważne przy zastosowaniu dronów w takim środowisku, ponieważ warunki na morzu czy oceanie są często trudne i zmienne.

Już w roku 2015 US-Navy testowała zastosowanie podwodnych dronów UUV (ang. *Unmanned underwater vehicle*). Były one wykorzystywane do transportowania broni jak również przenoszenia płetwonurków oraz żołnierzy służb specjalnych [6].

Koncern Lockheed Martin stworzył ARES (ang. *Aerial Reconfigurable Embedded System*). Wchodzący w skład tego systemu dron miał być łatwy w obsłudze, skonstruowany w ten sposób by umożliwić pionowy start zmniejszając niezbędną przestrzeń do startu i lądowania. Miał być zdolny przenosić ładunki o masie 1300 kg na odległość do 460 km [13]. Jednakże w trakcie prac badawczych zdecydowano się zaprzestać dalszych badań i inwestycji z uwagi na istotny wzrost kosztów i opóźnienie projektu. Dalsze prace będą prowadzone w ramach innego projektu rozwijającego drony do transportu towarów na pole walki pod nazwą JTAARS (ang. *Joint Tactical Autonomous Aerial Resupply System*) [15]. Powyższe przykłady wskazują, że prace nad konstruowaniem dronów są nadal w fazie badań eksperymentalnych zmierzających do poszukiwania najlepszych rozwiązań dla danego zastosowania a badania z tym związane są bardzo drogie i mogą skutkować nawet zawieszeniem prac wielomilionowych projektów.

#### 2.2.5. Ratowanie zdrowia i życia ludzkiego

W sytuacji zagrożenia życia, gdzie ważnym elementem jest szybka reakcja i dotarcie do poszkodowanego by udzielić mu pomocy, BSP okazują się dobrym narzędziem do tego, aby w krótkim

---

<sup>1</sup> Defense Advanced Research Projects Agency – DARPA (Agencja Zaawansowanych Projektów Badawczych w Obszarze Obronności)

czasie odnaleźć i dotrzeć do tonącego człowieka oraz precyzyjnie zrzucić mu koło ratunkowe (rys. 11) [28, 64]. Wykorzystanie dronów przez służby ratunkowe wciąż pozostaje jednak na niskim poziomie. Wśród ograniczeń wpływających na tą sytuację wymienia się m.in. możliwość zastosowania BSP tylko określonych warunkach pogodowych, relatywnie krótki czas lotu z uwagi na żywotność baterii (20-30 minut) oraz wysokość i odległość lotu, ponieważ większość misji powinna się odbywać w zasięgu wzroku operatora.



*Rysunek 11. Użycie drona w akcji ratunkowej (zrzucenie koła ratunkowego) [28].*

Aktualnie prowadzone są również prace nad dostarczaniem za pomocą BSP krwi niezbędnej do ratowania życia w sytuacji poważnych wypadków w ruchu drogowym lub kolejowym. Planuje się, że drony stacjonujące w lokalizacji banku krwi będą gotowe w każdej chwili wykonać lot z wymaganą grupą krwi do wskazanego miejsca w mieście, często w zatłoczonej lub trudnodostępnej lokalizacji [32, 66]. Przy transporcie krwi występuje również wiele ograniczeń jakie należy wziąć pod uwagę jak wpływ transportu BSP na produkty krwiopochodne, utrzymanie i kontrola temperatury czy właściwości fizyczne komponentów krwi podczas transportu. Badania wykazują [29, 30, 31], że nie stwierdzono negatywnego wpływu transportu na produkty krwiopochodne i ich elementy, co oznacza że i w tym przypadku BSP są realną opcją transportu krwi.

Badania nad dostarczaniem defibrylatorów na miejsce zdarzenia wskazują, że na terenie miast w 32% przypadków zostały one dostarczone szybciej aniżeli karetką pogotowia, a oszczędność czasu

wyniosła średnio 1,5 minuty. Natomiast już na terenach wiejskich, aż w 93% przypadków dron dotarł do poszkodowanego średnio o 19 min wcześniej [98]. Model ten pokazał, że BSP był w stanie przybyć szybciej na miejsce udzielenia pierwszej pomocy w stosunku do konwencjonalnego systemu reagowania (karetka).

Podobnie przy poszukiwaniach na lądzie, po zapadnięciu zmroku kiedy widoczność jest ograniczona, drony wyposażone w kamery termowizyjne są zdolne do wykrycia zaginionej osoby i wysłania współrzędnych lokalizacji do grupy ratowników [8].

W przypadku produktów medycznych wymagających niskich temperatur i szybkiego ich podania pacjentom, BSP mogą również być odpowiednim rozwiązaniem. Przeprowadzone przez IJS Global badania wskazują, że prawie 75% szczepionek, które w ramach pomocy zostały wysłane na kontynent afrykański uległo zniszczeniu zanim dotarło do potrzebujących pacjentów [13]. Dzięki sprawnej logistyce za pomocą systemu BSP można spodziewać się minimalizacji również i takiego zjawiska zwłaszcza w rejonach gdzie szczepionki są tak bardzo potrzebne.

### 2.3 Efektywność wykonywania inspekcji za pomocą załogowych i bezzałogowych pojazdów

Ważnym elementem wpływającym na konkurencyjność transportu kolejowego są koszty udostępnienia infrastruktury. Te są w bardzo dużej mierze zależne od kosztów utrzymania infrastruktury. Na podstawie danych finansowych jednego z polskich zarządców infrastruktury można stwierdzić, że nakłady na utrzymanie infrastruktury za rok 2021 stanowią 56% wszystkich kosztów ponoszonych przez zarządcę w związku z udostępnianiem infrastruktury. Jest to duża część kosztów na którą składają się: naprawy planowe infrastruktury, odnowienie nawierzchni, modernizacje oraz bieżące konserwacje, utrzymanie prewencyjne, naprawy bieżące i awaryjne, a także wykonywanie obchodów.

Jednym z najbardziej kosztownych elementów każdego procesu decyzyjnego jest zbieranie danych, na podstawie których zostaje podjęta decyzja. Zwykle to nie tylko kwestia czasu zbierania danych, ale również ich jakości, rzetelności i dokładności. W rozdziale 2.1 zaprezentowano możliwe sposoby monitoringu i zbierania informacji o stanie infrastruktury załogowymi pojazdami. Wprawdzie dostarczają wiele dokładnych danych, jednakże konieczne jest zapewnienie wykwalifikowanego personelu do obsługi i zbierania danych jak również maszynistów do prowadzenia pociągu inspekcyjnego, którzy są bardzo poszukiwani obecnie na rynku. Posiadanie takiego pojazdu wiąże się również z wysokimi nakładami finansowymi na jego pozyskanie. Przykładowo opisana powyżej drezyna

pomiarowa DP-560 zakupiona przez PKP PLK kosztowała blisko 28,5 miliona złotych, co stanowi ogromny wydatek inwestycyjny, podlegający zwrotowi przez kolejnych kilkadziesiąt lat, na który zapewne wielu mniejszych zarządców nie jest w stanie sobie pozwolić z uwagi na konieczność posiadania wymaganej zdolności kredytowej oraz niewystarczającą skalę działalności do pełnego wykorzystania możliwości takiego pojazdu [73].

Dlatego też pozyskiwanie danych za pomocą urządzeń bezzałogowych, wykonujących docelowo misje w sposób zautomatyzowany bez konieczności angażowania pilota jak w przypadku BSP jest zdecydowanie tańszym rozwiązaniem. Niektórzy eksperci szacują [46], że oszczędności z zastąpienia tradycyjnych metod inspekcji, monitoringiem za pomocą BSP mogą być bardzo istotne:

- linie energetyczne: redukcja czasu inspekcji z 6-8 miesięcy do 8 tygodni,
- mosty, tunele, autostrady, przepusty, wiadukty: redukcja kosztów średnio o 40%,
- rurociągi gazowe i naftowe: redukcja kosztów do 90%,
- farmy solarne: redukcja kosztów w zakresie od 30% do 40%,
- turbiny wiatrowe: redukcja kosztów w zakresie od 30% do 50%,
- zapory wodne: redukcja kosztów w zakresie od 40% do 60%.

Dodatkowo dane zebrane za pomocą BSP dostarczyły znacznie lepsze i bardziej wiarygodne dane, w tym modele 3D, co prowadziło do bardziej świadomych decyzji w zakresie koniecznych napraw, remontów czy nakładów inwestycyjnych. Ponadto w przypadku przeglądów paneli fotowoltaicznych uzyskano większe przychody z produkcji energii solarnej unikając nieprzewidzianych awarii, a w przypadku turbin wiatrowych uzyskano zmniejszenie liczby wyłączeń na skutek awarii o 75% [46].

W literaturze można znaleźć wiele różnorodnych zastosowań dronów, gdzie podstawową motywacją jest obniżenie kosztów prowadzonej dotychczas działalności lub istotne skrócenie pozyskania informacji w wymaganym zakresie, na przykład z zakresu strat wywołanych klęskami żywiołowymi, gdzie potrzebne są pilnie analizy, na podstawie których będzie można udzielić pomocy poszkodowanym [49] czy szacowaniu i minimalizowaniu ryzyka niepożądanych zdarzeń [50].

Powyższe przykłady wskazują na wielość i szeroką skalę zastosowań BSP w celu poprawy efektywności procesów. Jednakże w każdym przypadku aplikacji takiego rozwiązania należy przeprowadzić pełną i kompleksową analizę efektywności, która powinna uzasadnić czy w danym przypadku wykorzystanie BSP będzie niosło za sobą oczekiwane korzyści. W zależności od środowiska i celu zastosowania BSP może to nie być rozwiązanie uzasadnione, biorąc pod uwagę słabe strony

dronów jakimi mogą okazać się: relatywnie mały zasięg, krótki czas lotu, dokładność wykonanych pomiarów czy przepisy prawne, które na chwilę obecną traktują dość restrykcyjnie wykorzystanie BSP do lotów autonomicznych lub poza zasięgiem wzroku operatora bezzałogowego statku powietrznego (tzw. loty BVLOS - ang. *Beyond Visual Line of Sight*). Dlatego w przypadku prac nad zastosowaniem BSP do inspekcji infrastruktury kolejowej należy dokładnie sprawdzić możliwości zastosowania jak i rachunek ekonomiczny takiego działania m.in. metodą CEA (ang. *Cost Effective Analysis*), która jest obligatoryjna do przeprowadzenia w przedsiębiorstwie współpracującym przy realizacji wdrożenia będącego przedmiotem niniejszej pracy [54]. Z uwagi na to, że ekonomiczna opłacalność jest kluczowa dla wdrożenia proponowanego rozwiązania, w dalszej części pracy przedstawiona zostanie analiza efektywności kilku wariantów wykonywania oględzin infrastruktury wykazująca zasadność przedsięwzięcia.

## 2.4 Bezpieczeństwo eksploatacji urządzeń i prowadzenia ruchu kolejowego

Kolejnym bardzo istotnym elementem wymagającym analizy przed wdrożeniem nowej metody oględzin infrastruktury jest wpływ zastosowania BSP do monitoringu infrastruktury na bezpieczeństwo jej dalszego użytkowania. W wyniku lotów BSP zostaje zebrany dokładny materiał zdjęciowy, który bezpośrednio lub po przetworzeniu zdjęć daje obraz stanu określonego fragmentu infrastruktury. Na tej podstawie następuje uruchomienie procesu decyzyjnego przez służby utrzymania ruchu przedsiębiorcy, w wyniku którego podejmowana jest decyzja co do dalszego używania infrastruktury lub wstrzymania jej eksploatacji z uwagi na wystąpienie usterki krytycznej. Jeśli wykonany materiał zdjęciowy jest nieprecyzyjny lub algorytm przetwarzający go zignorował niektóre anomalie może dojść do podjęcia błędnej decyzji i dopuszczenia do eksploatacji infrastruktury, która do tego się nie nadaje. Skutkiem takiej sytuacji mogą być wymierne straty finansowe z uwagi na nieplanowane awarie, przerwy techniczne zmniejszające przychody oraz – co najważniejsze – może dojść do wypadków z udziałem osób powodując uszczerbek na zdrowiu lub nawet utratę życia. Na ile jest to ważny element wskazują przykłady z literatury, gdzie dane w czasie rzeczywistym podawane przez BSP mają zapobiec potencjalnym wypadkom. Istnieją badania [52], na podstawie których wykazano wykrywanie sytuacji nietypowych w ruchu drogowym za pomocą wizji uzyskanych z BSP. Zaproponowany system wykrywał stojący pojazd i pojazd poruszający się a następnie na podstawie obserwacji system sygnalizował niebezpieczne sytuacje i klasyfikował je w ten sposób by pomóc kierowcy w podjęciu najlepszej i świadomej decyzji. Algorytmy w ten sposób opracowane niestety ograniczają się tylko do kilku



nietypowych sytuacji. Podobne badania prowadzone były również w odniesieniu do zachowań kierowców oraz oceny ich jazdy wpływających na bezpieczeństwo ruchu drogowego [53]. Mając jednak na uwadze konieczność szybkiego przepływu informacji od jej pozyskania do rekomendacji działania kierowcy oraz wielość sytuacji nietypowych i liczbę obserwowanych pojazdów, system ten pomimo wielu zalet będzie jeszcze wymagał dalszego rozwoju, ponieważ na jego podstawie kierujący pojazdem będzie podejmował decyzje niosące za sobą już konkretne konsekwencje i odpowiedzialność wobec twórców takiego systemu.

Dlatego wprowadzenie do stosowania w przedsiębiorstwach nowego procesu, który istotnie odbiega od dotychczas funkcjonujących wymaga dokładnego zbadania. Zgodnie z zasadami zdefiniowanymi w Dyrektywie w sprawie bezpieczeństwa kolei [56], pełną odpowiedzialność za bezpieczeństwo systemu kolejowego ponoszą jego uczestnicy, w tym w szczególności przewoźnicy kolejowi, zarządcy infrastruktury kolejowej, jednostki odpowiedzialne za utrzymanie taboru kolejowego, a także producenci taboru kolejowego i elementów infrastruktury. W szczególności przepisy kolejowe u przewoźników i zarządców infrastruktury zobowiązują do wykonania analizy znaczenia zmiany mającej wpływ na bezpieczeństwo [55], ponieważ właśnie do tych podmiotów należy zapewnienie należytego poziomu bezpieczeństwa, identyfikacja zagrożeń oraz zarządzanie ryzykiem. Aby ocenić ryzyko związane z wprowadzaniem zmiany w przedsiębiorstwie konieczne jest zebranie kompletu informacji mających na celu sklasyfikowanie zmiany jako mającej wpływ na bezpieczeństwo, bowiem tylko takie będą przedmiotem dalszej analizy.

W przypadku proponowanej zmiany polegającej na zastąpieniu obchodów zautomatyzowanym procesem monitoringu stanu infrastruktury za pomocą BSP będzie miała miejsce zmiana mająca znaczący wpływ na bezpieczeństwo [57]. Zatem konieczne będzie przeprowadzenie pełnej oceny zmiany u przedsiębiorcy zamierzającego wdrożyć nowe rozwiązanie zgodnie z obowiązującymi u niego procedurami zintegrowanego systemu zarządzania bezpieczeństwem [58]. Podczas analizy znaczenia zmiany identyfikuje się najważniejsze zagrożenia w systemie wynikające z charakteru wprowadzanego nowego rozwiązania. Do oceny ryzyka ujawnionych zagrożeń można stosować różne metody. Jednak należy mieć na uwadze aby zastosowana metoda była adekwatna do analizowanej zmiany i środowiska w jakim się ona odbywa. W przypadku zmiany sposobu dokonywania oględzin nawierzchni kolejowej można zastosować analizę FMEA (ang. *Failure Mode Effect Analysis*) [57]. Jest ona wykorzystywana przez przedsiębiorstwa przede wszystkim do zapobiegania lub ograniczania skutków wad, które występują w produktach lub w procesach produkcyjnych. Zastosowanie metody polega na badaniu

wszystkich możliwych do przewidzenia usterek przed zatwierdzeniem danego rozwiązania, a w przypadku już istniejącego procesu, badaniu występujących lub możliwych do wystąpienia wad. Jej ostatecznym celem jest ocena ryzyka związanego z planowanym lub przyjętym rozwiązaniem. Tym samym FMEA pozwala na realizowanie zasady minimalizacji wad systemu. Jeśli w wyniku analizy zidentyfikuje się potencjalne wady powodujące przekroczenie liczby ryzyka dopuszczalnego należy we wskazanych przypadkach wprowadzić działania zapobiegawcze zmniejszające poziom ryzyka. Dopiero po uzyskaniu akceptowalnego poziomu ryzyka można rekomendować zmianę procedur u zarządcy, która zostanie wówczas wprowadzona bezpiecznie do realizacji, a wymagany poziom bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego zostanie zachowany.

Powyższe zasady zachowania bezpieczeństwa dotyczą głównie samego systemu monitoringu stanu infrastruktury i zapewnienia tego by informacje pochodzące z systemu automatycznie wykrywającego usterki nie wpłynęły na bezpieczeństwo prowadzenia ruchu kolejowego. Biorąc pod uwagę bezpieczeństwo całego proponowanego rozwiązania należy jeszcze wziąć pod uwagę ryzyka związane z samym poruszaniem się BSP nad terenem kolejowych jak również w jego sąsiedztwie i na skrzyżowaniach z innymi elementami infrastruktury (sieci energetyczne, drogi, wiadukty) oraz potencjalny wpływ na ludzi znajdujących się na terenie wykonywanej misji przez BSP.

W literaturze można znaleźć szereg opracowań wskazujących na wpływ lotów BSP na bezpieczeństwo pracowników wskazując na kilka grup zagrożeń z tym związanych [59, 61]. Można wymienić wśród nich m.in. zagrożenia fizyczne wynikające z wykonywania pracy w rejonie prowadzonych lotów, koszty związane z ciągłego przywiązywania uwagi i skupienia na wykonywanych lotach i zagrożeniach z tym związanych, czy zagrożenia psychologicznych odczuwanych przez ludzi znajdujących się w obszarze lotu BSP.

Biorąc pod uwagę cel i zakres pracy należy mieć na uwadze powyższe zagrożenia w opracowanej analizie znaczenia zmiany, jednakże są to ryzyka, którym mogą być przypisane skuteczne działania zaradcze, zatem nie stanowią one zagrożenia dla realizacji projektu. Istnieją systemowe rozwiązania [60], które pozwalają na takie zarządzanie ryzykiem lotów BSP, które daje narzędzia do podejmowania decyzji, pozwalające identyfikować ryzyka operacyjne oraz określać najlepsze sposoby działania w danej sytuacji. Systemy te pozwalają zarządzać ryzykiem w sposób proaktywny, oparty na analizach i strategii zapobiegając niebezpiecznym sytuacjom, a nie wywoływać działania po wystąpieniu zdarzenia niebezpiecznego. W związku z tym, że monitoring za pomocą BSP będzie się odbywał na wydzielonym obszarze kolejowym, głównie zlokalizowanym poza wysoko zurbanizowanymi terenami, który co do

zasady przewiduje ograniczony dostęp osób trzecich, powyższe ryzyka będą mogły zostać zmniejszone do poziomu akceptowalnego.

### 3. Cel, zakres i teza pracy

#### 3.1. Konwencjonalne wykonywanie oględzin

Obowiązek cyklicznego wykonywania obchodów wynika z instrukcji wewnętrznych każdego autoryzowanego zarządcy infrastruktury [9], które są elementem systemu zarządzania bezpieczeństwem zapewniającym bezpieczne prowadzenie ruchu kolejowego. Są to procesy czasochłonne i wymagające zaangażowania personelu technicznego zarządcy. Brak wykonanego przeglądu lub brak przeprowadzonego obchodu w wyznaczonym czasie jest istotnym uchybieniem w zakresie utrzymania infrastruktury generującym niebezpieczeństwo wystąpienia zdarzenia lub wypadku kolejowego. Wykonywanie obchodów może być przedmiotem kontroli organów nadzoru m.in. przez Urząd Transportu Kolejowego (dalej: UTK). UTK nadaje każdemu zarządcy infrastruktury autoryzację bezpieczeństwa, która stanowi dokument potwierdzający ustanowienie przez zarządcę infrastruktury systemu zarządzania bezpieczeństwem oraz zdolność spełniania przez niego wymagań niezbędnych do bezpiecznego projektowania, eksploatacji i utrzymania infrastruktury kolejowej. W przypadku stwierdzenia uchybień w zakresie sposobu utrzymania infrastruktury (brak lub nierzetelne wykonywanie obchodów i właściwego utrzymania infrastruktury na tej podstawie) mogą zostać nałożone na zarządcę stosowne sankcje z odebraniem autoryzacji bezpieczeństwa włącznie.

Głównym zadaniem realizowanym podczas obchodów są oględziny torów, podczas których dokonuje się wizualnego sprawdzenia stanu torowiska, obiektów inżynierskich, sieci trakcyjnej oraz innych urządzeń stałych w celu zachowania ciągłości i bezpieczeństwa ruchu kolejowego. Dozorowanie linii kolejowych obejmuje m.in.:

- a) roczne badanie techniczne,
- b) obchody normalne,
- c) obchody nadzwyczajne,
- d) objazdy sprawdzające.

W niniejszej pracy przedmiotem badań będzie zastąpienie obchodów normalnych monitoringiem wykonywanym przez BSP, jako czynności powtarzalnych, wykonywanych często i w regularnych odstępach czasu. Tym samym nie będą brane pod uwagę przeglądy infrastruktury określone w pkt a), c)-d) powyżej z wykorzystaniem specjalistycznych narzędzi, pojazdów i urządzeń jakie są wykonywane jedynie kilka razy w roku w celu precyzyjnego sprawdzenia stanu poszczególnych elementów infrastruktury. Nie wyklucza się jednak, że wyniki badań potwierdzą, że część danych zbieranych

podczas lotów BSP może zostać użytych do innych badań wykonywanych przez torowców i przez to przyspieszą ten proces.

Obchody normalne może wykonywać torowca lub dróżnik obchodowy podlegający bezpośrednio torowcowi. Co istotne, pracownicy biorący udział w wykonywaniu obchodów powinni posiadać kwalifikacje wymagane dla danego stanowiska zgodnie z obowiązującymi powszechnie przepisami prawa i regulacjami wewnętrznymi zarządcy infrastruktury. Pracowników tych powinien także charakteryzować stan zdrowia wymagany dla tego stanowiska i wykonywanych czynności [63]. Podkreślenia wymaga fakt, że wykonywanie obchodów jest sklasyfikowane jako praca wymagająca dużego wysiłku o czym świadczy wydatek energetyczny jaki występuje przy tego typu czynnościach wykonywanych przez obchodowego. Pomiar wydatku wskazuje na duży poziom ciężkości pracy (wydatek energetyczny powyżej 1500 kcal) co zobowiązuje pracodawcę do wydawania posiłków profilaktycznych lub napojów przy pracach na otwartej przestrzeni prowadzonych w temperaturze otoczenia poniżej 10°C lub powyżej 25°C [75].

Obchód torów jest wykonywany z częstotliwością ustaloną w zależności od kategorii linii, jej obciążenia i stanu technicznego, przy czym maksymalna wymagana ilość to 2 obchody w ciągu tygodnia. Dodatkowo zachodzi konieczność diagnostyki elementów infrastruktury kolejowej np. dokonanie pomiarów i oceny stanu technicznego rozjazdów i torów. Taka diagnostyka ma miejsce 1-2 razy w ciągu roku. Ponadto część zarządców wprowadziła dodatkowy obowiązek przeprowadzenia obchodów linii kolejowych po dwóch lub więcej dniach wolnych od pracy w celu upewnienia się czy dana linia kolejowa zapewnia bezpieczne prowadzenie pociągów (przejezdność szlaków, sprawdzenie czy nie doszło do kradzieży lub dewastacji infrastruktury zagrażającej bezpiecznemu prowadzeniu ruchu pociągów). Obchody normalne torów powinny być wykonywane zgodnie z obowiązującym cyklem dozoru ujętym w harmonogramie i zgodnie z ustawowym nominalnym czasem pracy. Cykl dozoru powinien wynikać z wyznaczonej kategorii użytkowania i klasy intensywności obciążenia. Minimalne częstotliwości wykonywania obchodów normalnych (ogłędzin) wg instrukcji największego polskiego zarządcy infrastruktury PKP PLK S.A. oraz zarządcy Infra Silesia S.A., gdzie wykonywane są prace badawcze przedstawia poniższa tabela nr 3.

Tabela 2. Częstotliwość wykonywania normalnych obchodów [9, 62]

PKP PLK S.A.					
Kategoria użytkowania	Klasa intensywności obciążenia	Tory szlakowe, główne i zasadnicze		Pozostałe tory stacyjne	Tory czasowo wyłączone z eksploatacji lub zamknięte
KTU-1	KIO-1	14 dni przy intensywności obciążenia $I \leq 80$	10 dni przy intensywności obciążenia $80 < I \leq 160$	jak w torach głównych i zasadniczych	6 miesięcy
KTU-2	KIO-2	7 dni		7 dni	
KTU-3	KIO-3	5 dni			
KTU-4	KIO-4	2 razy w tygodniu			
Infrasilesia S.A.					
Nie dotyczy	Nie dotyczy	1 raz w tygodniu		1 raz w tygodniu	Nie dotyczy
Dodatkowo obchód po więcej niż dwóch dniach wolnych od pracy					Nie dotyczy

Źródło: Opracowanie własne na podstawie instrukcji zarządców PKP PLK S.A. i Infra Silesia S.A.

Podstawowym celem wykonywania obchodu jest wzrokowa identyfikacja zmian stanu technicznego toru oraz pozostałych elementów infrastruktury kolejowej i ujawnienie na tej podstawie usterek lub nieprawidłowości zagrażających bezpiecznemu ruchowi kolejowemu. Zakres techniczny obchodów jest szeroki i obejmuje:

- a) tor kolejowy,
- b) rozjazdy,
- c) podtorze kolejowe,

- d) podsypkę,
- e) obiekty inżynieryjne,
- f) przejazdy kolejowo-drogowe,
- g) urządzenia trakcyjne, energetyczne i automatyki (jeśli występują).

Podczas wykonywania oględzin należy zwracać uwagę na stan konstrukcji nawierzchni, urządzenia zainstalowane w torze lub obok toru mające związek z prowadzeniem ruchu kolejowego. W przypadku stwierdzenia podczas obchodów usterki zagrażającej bezpieczeństwu ruchu kolejowego należy podjąć czynności zmierzające do jej natychmiastowego usunięcia lub – jeśli to niemożliwe – dokonać odpowiedniego zabezpieczenia zanim naprawa zostanie wykonana. Fakt wykonania obchodów oraz wszelkie spostrzeżenia pracownik obchodowy powinien udokumentować w książce lub dzienniku obchodów zgodnie z obowiązującą u zarządcy instrukcją [9, 62]. Ponadto stwierdzone usterki obchodowy powinien zgłosić toromistrzowi lub przełożonemu celem podjęcia stosownych działań naprawczych.

Należy mieć na uwadze, że w przypadku wystąpienia szczególnych warunków, przez które rozumie się warunki utrudniające lub uniemożliwiające przeprowadzenie obchodów jak niebezpieczne zjawiska pogodowe (burze, zamiecie, śnieżne, silne zamglenie), konieczność udzielenia pomocy osobie rannej lub strzeżenia zwłok, konieczność osłonięcia miejsca niebezpiecznego, utrata zdolności do wykonywania obchodu z uwagi na stan zdrowia – należy przerwać obchód i kontynuować go po ustaniu przyczyn powodujących uniemożliwienie obchodu. Jeśli to możliwe obchód powinien być kontynuowany najpóźniej dnia następnego.

Przyjmuje się, że maksymalna prędkość przy realizacji obchodów to 2 km/h, natomiast przy zleceniu pracownikowi innej pracy niż obchód torów (np. dokręcanie śrub, smarowanie części rozjazdów) zakłada się, że faktyczna prędkość wykonywania oględzin obniża się do poziomu 1,2 km/h. Taka czasochłonność wykonywanych obchodów powoduje duże zaangażowanie pracowników w bardzo rutynowe czynności. Wskazane ilości oraz zakres niezbędnej diagnostyki infrastruktury powoduje, że jest to istotny czynnik kosztotwórczy oraz wpływający na ograniczenie przepustowości linii kolejowych. Jest to zatem zakres działalności każdego zarządcy w którym należy szukać optymalizacji operacyjnej jak i kosztowej w celu poprawy konkurencyjności przedsiębiorstwa oraz poprawy bezpieczeństwa prowadzenia ruchu jak i samych pracowników dozoru infrastruktury. Szczegółowa analiza efektywności wykonywania obchodów zostanie przedstawiona w rozdziale 8.

### 3.2. Wykonywanie inspekcji za pomocą bezzałogowych statków powietrznych

Nowym podejściem do rozwiązania opisanego powyżej problemu może być zastosowanie oryginalnego procesu sprawdzania stanu infrastruktury kolejowej polegającego na zastosowaniu BSP do czynności wykonywanych dotychczas przez człowieka. Pierwsze kroki w tym kierunku podjęła PKP Cargo S.A., a kiedy po serii testów w 2015 roku rozpoczęto regularnie wykorzystywać BSP do przeprowadzania inspekcji pociągów [13, 65]. Głównym zadaniem było ochrona składów oraz infrastruktury kolejowej przed aktami wandalizmu i kradzieży. Wprowadzenie dronów skutkowało istotnymi korzyściami finansowymi, ponieważ już w pierwszej połowie 2015 roku PKP Cargo odnotowała spadek liczby incydentów związanych z kradzieżą o 44% a skradzionych towarów i przesyłek aż o 59% w porównaniu z rokiem 2014. Jednakże nadal zastosowanie BSP w służbie kolei w zakresie bardziej zaawansowanym, wspomagającym częste, wymagające i rutynowe czynności jest na niewielkim poziomie.

Przedstawione powyżej przykłady zastosowania BSP z innych gałęzi przemysłu, a także biorąc pod uwagę dostępne technologie wykonywania monitoringu różnego rodzaju infrastruktury z powietrza uprawniają do stwierdzenia, że możliwe jest skonfigurowanie urządzenia w celu wykonywania oględzin torów oraz wybranych elementów infrastruktury kolejowej, które wyeliminują w większości przypadków konieczność dokonywania obchodów na rzecz monitoringu z powietrza z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych.

Wybrane przykłady wykorzystania dronów w monitoringu infrastruktury kolejowej podjęto w Ośrodku Certyfikacji Transportu na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej [16]. Jednym z założeń prowadzanego tam projektu było przeprowadzenie inspekcji elementów infrastruktury kolejowej, która umożliwi stworzenie cyfrowej dokumentacji oraz pozwoli na obiektywną ocenę jej stanu. W badaniach skupiono się na ocenie kondycji przytorowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym. Przeprowadzone badania wykazały, że materiał zdjęciowy jest wystarczająco dobry dla oceny stanu technicznego semaforów, ich położenia czy powłoki malarskiej. Jednakże dokonany zapis, pomimo zastosowania wysokiej jakości zapisu (rozdzielczość 4K), nie pozwala na sprawdzenie stabilności przymocowania głowicy sygnalizatora, zgodnie z wymogami instrukcji PKP PLK S.A. [9].

Nie ma również możliwości prawidłowego sprawdzenia widoczności sygnałów z wymaganych instrukcją odległości, ponieważ źródło światła na obrazie jest widoczne jedynie jako plama bez możliwości prawidłowej oceny wskazania podawanego sygnału.



W Norwegii w ramach projektu zarządcy infrastruktury Bane Nor trwają prace nad systemem do inspekcji i monitorowania kluczowych komponentów, w tym torów, zwrotnic i napowietrznych sieci trakcyjnych, z wykorzystaniem rejestracji danych z kamery i automatycznej analizy obrazu [17]. Rozwiązanie to umożliwi kontrolę i analizę infrastruktury kolejowej w szybki, bezpieczny i obiektywny sposób bez zatrzymywania ruchu pociągów. Zdjęcia i nagrania wideo z pociągów pomiarowych, pociągów pasażerskich, maszyn roboczych i dronów, a także zamontowanych na stałe kamer, które Bane Nor już zainstalował, to przykłady obszarów, w których automatyczna analiza obrazu, w tym pozyskiwana z BSP jest przydatna oraz intensywnie rozwijana.

Wysiłki badawcze Bane Nor skupiają się na dostosowaniu istniejących ogólnych algorytmów opartych na głębokim uczeniu się do zastosowań kolejowych i uczeniu tych algorytmów w celu rozpoznawania odpowiednich błędów i niezgodności. Jednakże prace te nie są jeszcze zakończone. Zarządca oczekuje, że system zwiększy liczbę wykrywanych usterek i umożliwi ich wcześniejsze wykrywanie, przy zwiększonym nakładzie pracy równym co najmniej zmniejszeniu liczby wykonywanych prac kontrolnych. Dobór odpowiednich algorytmów do analizy obrazu jest ważnym zagadnieniem dla osiągnięcia celu niniejszej pracy, dlatego zostanie szczegółowo przedstawione w rozdziale 4.

Bane Nor po raz pierwszy przetestował drony do utrzymania infrastruktury kolejowej w kwietniu 2018 roku, kiedy dron został z powodzeniem użyty do smarowania zwrotnicy rozjazdu na torze testowym. Zaledwie dwa miesiące później, w czerwcu 2018 roku, Bane Nor wykorzystał autonomicznego drona do wykonania smarowania w terenie, co zostało skutecznie wykonane pomimo silnego wiatru i niesprzyjających warunkach atmosferycznych [18].

Prace nad zastosowaniem dronów do inspekcji infrastruktury kolejowej rozpoczęto również w Australii. Utrzymanie szóstej co do długości linii kolejowej na świecie niesie za sobą wiele wyzwań z uwagi na rozpiętość sieci kolejowej i duże odległości pomiędzy miastami a tym samym pomiędzy potencjalnymi punktami utrzymania infrastruktury. Instytut Technologii Kolejowej (IRT) Uniwersytetu Monash opracowuje bezzałogowe systemy autonomiczne UAS (ang. *Unmanned Vehical Systems*), aby pomóc w przejściu z inspekcji manualnych do autonomicznych, zwłaszcza tam, gdzie inspekcje infrastruktury kolejowej są przeprowadzane na odległych obszarach [19]. Wdrożenie bezzałogowych systemów powietrznych tworzy alternatywne narzędzie do zdalnej inspekcji torów kolejowych i eliminuje konieczność dodatkowego szkolenia w zakresie bezpieczeństwa zasobów ludzkich, ponieważ kontrole infrastruktury kolejowej wymagają personelu, który przebywa w obszarze kolejowym w celu

wykonania inspekcji wizualnych. Pomimo ciągłego zwiększania szkoleń, środków ostrożności i wyposażania pracowników w środki ochrony indywidualnej, występuje duże zagrożenie związane z upadkiem, a częste przebywanie w międzytorzu powoduje możliwość wpadnięcia do studzienek kanalizacyjnych czy zagłębień.

Dla zminimalizowania ryzyka wprowadzono szereg protokołów bezpieczeństwa, ale wiąże się to z długotrwałą zajętością linii w celu inspekcji odcinków torów, często w sytuacji gdy na długich odcinkach tory nie mają wyraźnie dostępnych lub wydzielonych stref bezpieczeństwa. UAS są również specjalnie zaprojektowane przez IRT w trybie autonomicznym do obsługi ograniczonych przestrzeni, takich jak wykopy, tunele i przepusty. Wykorzystując różne czujniki, w tym skaner typu LIDAR, UAS może mierzyć w czasie rzeczywistym kształt i stan infrastruktury w takich ograniczonych przestrzeniach. Uzyskane informacje są następnie wykorzystywane do rekonstrukcji cyfrowych modeli 3D infrastruktury w celu zidentyfikowania krytycznych wymagań dotyczących pogorszenia stanu i wykonania niezbędnej konserwacji urządzeń [69, 70].

Analiza problemu przeprowadzona w poprzednich rozdziałach upoważnia do stwierdzenia, że podjęcie i realizacja tematu badawczego będącego przedmiotem niniejszej pracy znajduje uzasadnienie w obszarze poznawczym jakim jest inspekcja infrastruktury kolejowej ze szczególnym ukierunkowaniem na cel użyteczny jakim jest wdrożenie nowego, kompleksowego systemu monitorowania stanu infrastruktury kolejowej za pomocą bezzałogowych statków powietrznych. Przeprowadzenie badań własnych oraz analiza tych wyników badań, będzie zarówno poszerzeniem wiedzy w tym zakresie, ale również przyczynią się do ułatwienia pracy pracowników obchodowych, zmniejszenia wypadków i sytuacji potencjalnie niebezpiecznych, poprawią efektywność ekonomiczną wykonywanych inspekcji oraz zapewnią poprawę bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego. Jak wykazano powyżej na podstawie przykładów z innych gałęzi przemysłu, monitoring za pomocą BSP jest możliwy. Brak jednak podobnych i kompleksowych rozwiązań w obszarze utrzymania infrastruktury a zastosowanie nowatorskiego rozwiązania za pomocą monitoringu z powietrza wydaje się możliwe i uzasadnione.

Należy podkreślić, że w dotychczas stosowanych metodach monitorowania infrastruktury kolejowej nie stosowano BSP dla tak kompleksowego spectrum badania prowadzącego do wyeliminowania personelu technicznego przy obchodach infrastruktury. Dostępne materiały oraz dokonany przegląd literatury wskazują na podejmowanie prób, często skutecznych, do zbadania za pomocą BSP wybranych elementów infrastruktury takich jak uszkodzenia szyn, pęknięć podkładów

kolejowych, stan przytorowej sygnalizacji i in. [20, 21, 71, 72] nie dając jednak odpowiedzi na pytanie czy możliwe jest zastąpienie obchodów w pełnym zakresie poprzez monitoring BSP. Poszukiwanie nowego rozwiązania technicznego i zdobycie wiedzy w proponowanym zakresie jest zatem zasadne i wskazuje na oryginalność podjętego tematu badawczego. To następnie pozwala na osiągnięcie celu użytecznego pracy jakim jest zweryfikowanie podczas badań eksperymentalnych możliwości zastosowania BSP w inspekcjach infrastruktury kolejowej, w tym lotów autonomicznych i automatycznego rozpoznawania usterek. Ważnym elementem pracy jest przeprowadzenie doświadczalnej identyfikacji usterek infrastruktury kolejowej jakie zwyczajowo są identyfikowane przez obchodowego i przeprowadzenie analizy porównawczej z inspekcją wykonaną przez BSP. Osiągnięcie tego celu wymaga przeprowadzenia badań eksperymentalnych na wydzielonym obszarze kolejowym, gdzie wykonane zostaną obchody zarówno przez obchodowego jak i system BSP. To następnie wskaże na podstawowy cel poznawczy pracy, którym jest określenie czy i ewentualnie jakie występują różnice w wykrywaniu usterek infrastruktury oboma sposobami inspekcji.

Ostatecznym rezultatem będzie wskazanie zasad i wytycznych w zakresie wykonywania lotów, wskazanie odpowiedniego BSP oraz jego wyposażenia w celu uzyskania wymaganej jakości danych i zachowania lub poprawy bezpieczeństwa wykonywania inspekcji infrastruktury w stosunku do obecnie stosowanych konwencjonalnych metod inspekcji.

Zrealizowanie podjętego tematu rozprawy doktorskiej, a zarazem osiągnięcie celów naukowych i użytecznych wymagało realizacji następujących zadań:

- a) analizy celowości podjęcia tematu w kontekście aktualnej wiedzy technicznej i literatury,
- b) wyboru miejsca aplikacji systemu inspekcji za pomocą BSP na terenie wskazanego zarządcy infrastruktury,
- c) wyboru BSP oraz urządzeń na nim zainstalowanych (kamera, czujniki),
- d) opracowania metodyki badań eksperymentalnych i symulacyjnych dla wykrywania usterek infrastruktury,
- e) przeprowadzenia lotów BSP i zebrania materiału badawczego,
- f) analizy wyników uzyskanych podczas badań eksperymentalnych,
- g) wykonania oceny znaczenia zmiany sposobu inspekcji infrastruktury kolejowej,
- h) opracowania instrukcji wykonywania inspekcji za pomocą BSP wskazującej warunki, przy których wykonanie lotów jest możliwe; wskazanie parametrów technicznych BSP,
- i) opracowania wniosków końcowych, posumowania i rekomendacji dalszych badań.

Mając na uwadze wyniki analizy literatury, a także przyjęty zakres i założone cele niniejszej pracy doktorskiej, uzasadnionym jest sformułowanie następującej tezy:

**„zasadnym jest zastąpienie wizualnej inspekcji infrastruktury kolejowej wykonywanej przez dróżników obchodowych, poprzez monitoring z zastosowaniem bezzałogowych statków powietrznych, w celu zwiększenia efektywności procesu obchodów jak również zwiększenia bezpieczeństwa kolejowego”.**

## 4. Metodologia badań

Dla sprawdzenia poprawności sformułowanej tezy konieczne jest przeprowadzenie badań weryfikujących w praktyce możliwości zastosowania nowej metody inspekcji. W tym celu opracowano metodologię i sposób przeprowadzenia badań, dokonano wyboru miejsca wykonania badań oraz doboru urządzeń dla wykonania lotów badawczych. Zebrany w ten sposób materiał został poddany analizie poprzez odpowiedni algorytm a następnie porównany ze stanem faktycznym infrastruktury kolejowej zebrany w dokumentacji obchodowych z tego samego rejonu.

### 4.1. Przedmiot i miejsce badań

Za przedmiot badań wybrano część infrastruktury kolejowej należącej do autoryzowanego zarządcy infrastruktury – spółki Infracap S.A. z siedzibą w Rybniku. Spółka zarządza infrastrukturą [76], w skład której wchodzi ponad 36 kilometrów linii kolejowych i niemal 110 kilometrów torów, ponad 250 rozjazdów i kilkadziesiąt przejazdów kolejowo-drogowych, a także obiekty inżynieryjne i budynki posterunków technicznych. Ponadto na rzecz osób trzecich spółka utrzymuje tory o łącznej długości ponad 200 kilometrów. Spółka we własnym zakresie utrzymuje infrastrukturę kolejową na zarządzanej przez siebie infrastrukturze oraz na bocznicach i centrach logistycznych należących do innych podmiotów. Do obowiązków w zakresie utrzymania należy między innymi: bieżące utrzymanie i diagnostyka nawierzchni torowej, urządzeń sterowania ruchem kolejowym, serwisowanie systemów łączności przewodowej i radiołączności pociągowej oraz utrzymanie obiektów inżynieryjnych. Z uwagi na fakt, że spółka prowadzi ruch kolejowy na własnej infrastrukturze, w ramach ciążących na niej obowiązków polegających na zapewnieniu bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego, Infracap S.A. zatrudnia m.in. dróżników obchodowych, których zadaniem jest regularne przeglądanie nawierzchni kolejowej, w szczególności poprzez dokonywanie wzrokowej kontroli torów, rozjazdów, podtorza, obiektów inżynieryjnych, przejazdów, urządzeń trakcyjnych i automatyki. Należy zatem stwierdzić, że Spółka posiada wszystkie cechy i elementy niezbędne do prawidłowego przeprowadzenia badań będących przedmiotem niniejszej pracy.

Z uwagi na fakt dużej rozpiętości infrastruktury kolejowej, zdecydowano do badań wybrać część infrastruktury kolejowej należącej do Infracap S.A. Jako kryteria wyboru zastosowano:

- a) najszerszy zakres elementów będących przedmiotem wzrokowej inspekcji przez dróżnika obchodowego,

- b) różny stan techniczny infrastruktury kolejowej, w tym zawierającej usterki,
- c) minimalizację wpływu na ograniczenie przepustowości podczas prowadzenia badań,
- d) bezpieczne przeprowadzenie lotów nad infrastrukturą, z pominięciem infrastruktury krytycznej.

O powodzeniu zastosowania nowej metody inspekcji przez BSP świadczyć będzie m.in. skuteczność wykrycia usterek jakie znajdują się na infrastrukturze. Zatem wybrana do badań infrastruktura powinna posiadać jak najwięcej elementów, które są przedmiotem oględzin przez obchodowego, ponieważ dzięki temu badany nowy model inspekcji infrastruktury będzie mógł być szeroko przetestowany. Z uwagi na to, że użyty do modelu algorytm będzie wymagał poznania i „nauczenia się” rozpoznawania usterek infrastruktury, konieczne jest by na obszarze dedykowanym do badań znalazło się jak najwięcej przypadków usterek jakie model ma wykrywać. Kolejne dwa kryteria wymienione w pkt c) i d) powyżej odnoszą się do bezpieczeństwa i efektywności prowadzenia ruchu kolejowego podczas wykonywania obchodów, które są uznawane przez zarządcę infrastruktury jako priorytetowe.

Biorąc pod uwagę powyższe kryteria, do badań wybrano infrastrukturę zarządcy Infra Silesia S.A. położoną w rejonie Rybnika tj. bocznice kolejowe KWK Jankowice, KWK Chwałowice, KWK Marcel, bocznice kolejową „Rybnik Kłokocin” oraz linie i stacje kolejowe w rejonie Sosnowca - Jęzor Centralny, okręgi nastawcze JCA i JCC. Są to typowe bocznice kolejowe zawierające większość elementów infrastruktury będącej przedmiotem zwyczajowych oględzin wykonywanych przez dróżnika obchodowego. Co istotne, na terenie tych bocznic znajdują się tory zamknięte lub wyłączone z eksploatacji zawierające różne usterki, które mogły posłużyć jako platforma do trenowania algorytmu nowego modelu inspekcji za pomocą BSP.

W pierwszej kolejności należy ustalić zakres przeglądów nawierzchni kolejowej wykonywanych przez dróżnika kolejowego. Zgodnie z instrukcją zarządcy Infra Silesia S.A. oraz biorąc pod uwagę elementy infrastruktury znajdujące się na wybranym terenie, podczas obchodów należy zwracać uwagę, między innymi na:

- a) stopień zużycia lub uszkodzeń nawierzchni,
- b) stan obsypania podsypką czół podkładów, oraz ewentualne ślady deformacji toru,
- c) stan elementów łączących i przytwierdzających szyny,
- d) zachowanie skrajni taboru,
- e) sprawdzenie czy stan obiektów inżynierskich nie stwarza zagrożenia dla ich bezpiecznej eksploatacji,

- f) stwierdzenie ewentualnych uszkodzeń elementów obiektów inżynierskich widocznych z poziomu toru,
- g) stan i czytelność zastosowanego oznakowania i sygnałów,
- h) stan nawierzchni na przejazdach,
- i) powstawanie oznak wskazujących na pogarszanie się stanu podtorza,
- j) drożność rowów odwadniających i przepustów,
- k) odkształcenia toru w planie i profilu,
- l) stan trójkątów widoczności w obrębie przejazdów kolejowo-drogowych.

Podczas obchodów należy w podobny sposób dokonać oględzin rozjazdów, zgodnie z kryteriami określonymi w Instrukcji zarządcy. W rejonach z posterunkami ruchu z obsadą miejscową oględzin rozjazdów dokonuje pracownik posterunku raz dziennie, a fakt dokonania oględzin i stwierdzone usterki należy odnotować w Dzienniku drogowym. W rejonach bez obsady miejscowej oględzin rozjazdów dokonuje drużyna manewrowa i trakcyjna. Z tego powodu możliwe jest wyłączenie oględzin rozjazdów z obowiązków obchodowego, a tym samym zasadne jest pominięcie w niniejszej pracy analizy działania inspekcji rozjazdów za pomocą BSP.

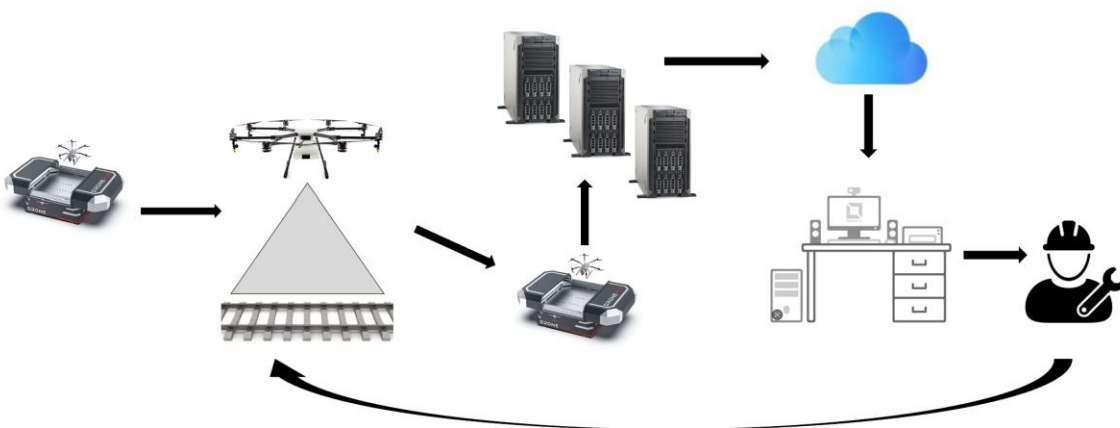
#### 4.2. Ustalenie komponentów systemu

Ważną czynnością przed rozpoczęciem badań była ocena i wybór głównych komponentów systemu. W celu wdrożenia nowego rozwiązania odpowiedzialnego za przeprowadzenie inspekcji w zamian obchodów dokonywanych przez dróżnika konieczne jest stworzenie komplementarnego systemu realizującego poszczególne funkcje. Wśród niezbędnych elementów systemu wymienić należy w szczególności:

- a) bezzałogowy statek powietrzny,
- b) kamery do akwizycji zdjęć i filmów wideo,
- c) stacje dokujące (garaże) do BSP,
- d) infrastrukturę do przesyłania danych pomiędzy BSP, stacjami dokującymi a aplikacją do analizy obrazów,
- e) aplikację do przetwarzania obrazu i wykrywania usterek,
- f) aplikację do wizualizacji usterek na terenie infrastruktury,
- g) infrastrukturę techniczną do analizy oraz archiwizacji materiału zdjęciowego.

Podstawowym komponentem systemu jest bezzałogowy statek powietrzny. Wyposażony w odpowiednie kamery i urządzenia GPS jest on niezbędny do pozyskiwania zdjęć z powietrza i ich lokalizacji. Z uwagi na rozpiętość infrastruktury konieczne dla skuteczności działania systemu konieczne są tzw. hub'y (garaże) dla BSP, w których drony oczekują na kolejne misje lub w których jest dokonywana wymiana baterii przed kolejnym lotem. Garaże służą również do przejmowania i przechowywania danych zebranych przez BSP podczas lotów. Kolejnym komponentem systemu są serwery i aplikacja, w której odpowiedni algorytm analizuje zdjęcia wyszukując anomalie, które są traktowane jako usterki. Taka informacja jest dostępna lub przesyłana do służb utrzymania infrastruktury, które na jej podstawie dokonują oceny usterki i podejmują dalsze decyzje o wyrażeniu zgody na prowadzeniu ruchu kolejowego. Całość systemu powinna być połączona i skomunikowana ze sobą za pomocą sieci przewodowych lub bezprzewodowych, jednak z uwagi na powszechny dostęp do tego typu infrastruktury nie jest ona przedmiotem analiz w niniejszej pracy.

Całość systemu powinna być ujęta i opisana w przepisach wewnętrznych zarządcy w celu utrzymania bezpiecznej infrastruktury kolejowej oraz bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego. Proponowane w tym zakresie zmiany instrukcji zarządcy zostaną opracowane podczas przeprowadzonych badań na podstawie zebranych wniosków. Schemat niezbędnych komponentów systemu przedstawia poniższy rysunek (rys. 12).



*Rysunek 12. Schemat komponentów systemu do monitoringu infrastruktury. Opracowanie własne.*

Jako główne komponenty systemu należy uznać BSP, kamery oraz garaże dla BSP. Dla wszystkich trzech głównych komponentów przygotowano listę kryteriów jakie zostały wykorzystane w procesie



podejmowania decyzji. Kolejne podrozdziały określają listę kryteriów oceny dla każdego komponentu oraz znaczenie każdego kryterium w odniesieniu do celów pracy.

#### 4.2.1. Kryteria wyboru BSP

W celu doboru komponentu jakim jest BSP opracowano zestaw sześciu kryteriów zgodnie z potrzebami pracy. Kryteria te zostały wybrane na podstawie przeglądu literatury, obserwacji doświadczonych operatorów lotów BSP oraz inspekcji terenowych przeprowadzonych przez doświadczonego toromistrza zarządcy infrastruktury. Następujące kryteria były podstawą do porównania różnych opcji BSP:

- a) zwrotność i stabilność: zdolność poruszania się po zakrętach, w małych przestrzeniach, zawisanie w stabilnej pozycji oraz możliwość odzyskania siły po utracie siły nośnej. Cechy te są pożądane podczas lotów pod mostami, wiaduktami, elementami urządzeń załadunkowych na kopalniach oraz przejazdach kolejowych, pod lub nad trakcją elektryczną;
- b) adaptacyjność: możliwość dostosowania pożądanych cech fizycznych BSP, takich jak uniwersalność BSP, dopasowanie do standardu hangaru dla BSP, rozmiar baterii, śmigła oraz rozmiar samego BSP;
- c) ładowność: maksymalna ładowność, jaką BSP może przenosić jako ładunek użyteczny po pełnym naładowaniu. Ładunek obejmuje kamerę, GPS, dodatkowe oświetlenie i zaprojektowane do wykonywania misji czujniki;
- d) rozmiar: fizyczna charakterystyka BSP, taka jak całkowity rozmiar, masa, oraz możliwość przechowywania w kompaktowej formie w dedykowanym garażu, gdy nie jest używany;
- e) kontrola użytkownika: ten parametr opisuje elementy sterujące interfejsu użytkownika, w tym ilość danych wejściowych użytkownika potrzebnych do lotu, całkowity czas szkolenia w celu obsługi tych elementów i zaprogramowania automatycznych lotów. Interfejs kontroli użytkownika stanowi bardzo ważny element systemu. Potrzeba uproszczonego interfejsu użytkownika z minimalną kontrolą użytkownika w zakresie lotów i pozyskiwania zdjęć jest uważana za klucz do udanej zmiany systemu inspekcji infrastruktury.

Po dokonaniu wyboru kryteriów, kolejnym krokiem było przypisanie wag określających ważność każdego kryterium dla procesu selekcji BSP. Tabela 3 przedstawia rozkład wagi dla każdego kryterium zastosowanego do oceny alternatywnych BSP. Kolumna (1) pokazuje wybrane kryteria. Trzech oddzielnych uczestników badania oceniło poszczególne kryteria na podstawie tego, w jaki sposób każde

z nich odnosiło się do projektu, co pokazano w kolumnie (2). Przed przypisaniem indywidualnych wag do kryteriów każdy z trzech badaczy zebrał informacje od doświadczonych pilotów biorących udział w badaniach oraz wspólny wkład inspektorów lub toromistrzów zarządcy. Kolumna (3) przedstawia obliczoną średnią z indywidualnych ocen. Kolumna (4) pokazuje wyliczone wagi, które zostały obliczone poprzez podzielenie średniej oceny z kolumny (3) dla każdego kryterium przez sumę z kolumny (3).

*Tabela 3. Rozkład wag dla kryteriów wyboru BSP.*

Kryterium	Ocena indywidualna		Waga (%)
	1-5 (1-nieistotne, 5-bardzo istotne)	Średnia ocena grupy ekspertów	
(1)	(2)	(3)	(4)
Kontrola użytkownika	4,5,5	4,67	26,42
Zwrotność i stabilność	4,4,4	4,00	22,64
Rozmiar	3,5,3	3,67	20,75
Ładowność	4,2,3	3,00	16,98
Adaptacyjność	3,2,2	2,33	13,21
	<b>Razem</b>	<b>17,67</b>	<b>100,00</b>

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 3 pokazuje, że największy nacisk położono na interfejs użytkownika i elementy sterujące, ponieważ zdecydowano, że najważniejszym czynnikiem jest uczynienie systemu łatwym w obsłudze dla pracowników w terenie po minimalnym przeszkoleniu. Zwrotności i stabilności lotu przyznana została drugą najwyższą wagą ze względu na znaczenie możliwości prawidłowego latania BSP w trudnym terenie, pod mostami i wiaduktami, liniami telekomunikacyjnymi i energetycznymi. Ładowności i rozmiarom przypisano najniższe wagi z listy, ponieważ maksymalna oczekiwana masa ładunku mieści się w pojemności całego alternatywnego zestawu rozważanych BSP. Istotnym parametrem pozostaje kształt i rozmiar BSP z uwagi na konieczność umieszczenia go w garażu, który jest określonych rozmiarów. Wprawdzie jest możliwe dopasowanie go to BSP jednak zawsze będzie się to wiązało

z dodatkowymi kosztami czego należy unikać. Adaptowalności nadano najniższą wagę, ponieważ założono, że zmiana komponentów sprzętowych może nie być krytyczna dla realizacji planowanych misji.

#### 4.2.2. Kryteria wyboru kamer

Do wyboru kamer opracowano następujący zestaw siedmiu kryteriów:

- a) wydajność: możliwość wykonywania typowych funkcji (np. włączanie zasilania) przechwytywania wideo w czasie rzeczywistym i przechowywania dużych ilości zdjęć i filmów. Kryterium wydajności uwzględnia również rozdzielczość kamery,
- b) masa: fizyczna masa aparatu i wszelkich dołączonych akcesoriów,
- c) wymiary: fizyczny rozmiar aparatu/kamery,
- d) cena: koszt aparatu/kamery,
- e) czas pracy baterii: całkowity dostępny czas pracy przy zachowaniu pełnego wykorzystania systemu,
- f) łatwość obsługi: poziom trudności obsługi funkcji aparatu/kamery, w tym elementów sterujących, technologii bezprzewodowej, czasu reakcji i ustawiania ostrości. Łatwość obsługi uwzględnia również dostępne akcesoria, takie jak wodoodporna obudowa, Wi-Fi, akumulatory i mocowania,

Tabela 4 przedstawia rozkład wagi kryteriów stosowanych do oceny różnych aparatów/kamer. Proces wyboru i oceny kryteriów przebiegał jak w przypadku wyboru BSP w pkt 4.2.1.

Biorąc pod uwagę jak ważna jest możliwość szczegółowego dostrzeżenia defektów infrastruktury podczas inspekcji z powietrza, wydajność została oceniona najwyżej. Masa i czas pracy baterii została również oceniona bardzo wysoko z uwagi na ich bezpośredni wpływ na wybór BSP. Wymiary i łatwość obsługi były następne na skali wag opartej na potrzebie dopasowania urządzenia do przechwytywania obrazu do aplikacji, a następnie możliwości zdalnego sterowania urządzeniem do przechwytywania obrazu przy minimalnym udziale użytkownika. Cena miała najmniejszą wagę z uwagi na relatywnie dużą dostępność alternatywnych rozwiązań spełniających wymagania systemu.

Tabela 4. Rozkład wag dla kryteriów wyboru aparatu/kamery.

Kryterium	Ocena indywidualna		Waga (%)
	1-5 (1-nieistotne, 5-bardzo istotne)	Średnia ocena grupy ekspertów	
(1)	(2)	(3)	(4)
Wydajność	5,5,5	5,00	20,00
Masa	5,5,4	4,67	18,67
Czas pracy baterii	4,5,5	4,67	18,67
Łatwość obsługi	4,4,5	4,33	17,33
Wymiary	3,5,4	4,00	16,00
Cena	3,2,2	2,33	9,33
	<b>Razem</b>	<b>25,00</b>	<b>100,00</b>

Źródło: opracowanie własne.

#### 4.2.3. Kryteria wyboru garażu dla BSP

W celu wyboru rodzaju garaży (zwanymi również hubami) opracowano następujący zestaw następujących kryteriów:

- a) uniwersalność: możliwość adaptacji garażu do przechowywania i obsługi różnych typów BSP, wymiany różnych rodzajów baterii BSP, wielkość i gabaryty garażu;
- b) sprawność: zdolność do przygotowania BSP do kolejnych lotów, w tym czas wymiany i ładowania baterii;
- c) funkcjonalność: wyposażenie w klimatyzację, integracja z systemami zewnętrznymi zarządcy infrastruktury, pojemność dysków do przechowywania danych oraz możliwości przesyłu danych, możliwość adaptacji urządzeń w trudnym terenie, ładowanie za pomocą odnawialnych źródeł energii.

Tabela 5 przedstawia rozkład wagi kryteriów stosowanych do oceny garaży. Proces wyboru i oceny kryteriów przebiegał w analogiczny sposób jak w pozostałych komponentach systemu.

Tabela 5. Rozkład wag dla kryteriów wyboru garażu (huba).

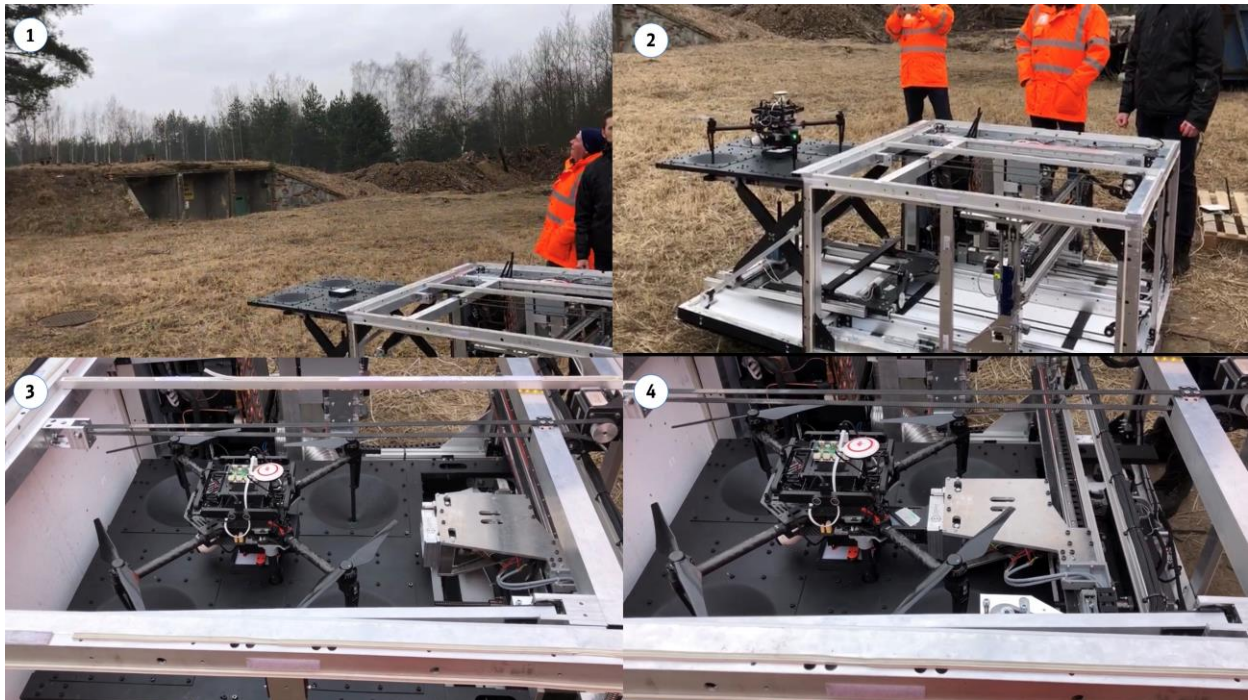
Kryterium	Ocena indywidualna		Waga (%)
	1-5 (1-nieistotne, 5-bardzo istotne)	Średnia ocena grupy ekspertów	
(1)	(2)	(3)	(4)
Uniwersalność	5,5,5	5,00	26,79
Łatwość obsługi	5,4,5	4,67	25,00
Funkcjonalność	4,5,4	4,33	23,21
Sprawność	4,5,5	4,67	25,00
	<b>Razem</b>	<b>25,00</b>	<b>100,00</b>

Źródło: opracowanie własne.

Kryterium uniwersalności zostało ocenione najwyżej. Zdolność do adaptacji garażu jest bardzo ważna, ponieważ w zależności od miejsca wykonywania lotów koniecznym może się okazać stosowanie różnych dronów. Ma to również niebagatelne znaczenie z uwagi na wysoką cenę garażu który jeśli mógłby być używany do obsługi większej ilości typów dronów będzie obniżał koszty pozyskania i utrzymania systemu garaży. Łatwość obsługi została oceniona jako drugie ważne kryterium. Zarówno z punktu widzenia pilotów jak i obsługujących system pracowników zarządcy infrastruktury ważnym jest łatwość obsługi, standaryzacja procesu utrzymania co daje gwarancję wysokiej sprawności obsługi lotów z punktu widzenia przechowywania i ładowania BSP. Funkcjonalność i sprawność zostały ocenione na tym samym poziomie, jako mniej istotne kryteria. Czas wymiany baterii ma wysokie znaczenie dla zarządcy infrastruktury z uwagi na możliwość szybkiego powrotu do lotów inspekcyjnych co zapewnia płynność wykonywanych misji i szybką dostępność do informacji o stanie infrastruktury. Ułatwia to także prowadzącym ruch kolejowy na koncentrowanie czynności związanych z lotem w krótkim czasie.

Kierując się kryteriami opisanymi w tabeli 6, przetestowano dwa rodzaje garaży: pierwszy z wysuwaną boczną platformą do ładowania (rys. 13) oraz drugi z platformą do ładowania na dachu garażu (rys. 14). W związku z mniejszą awaryjnością mechanizmów garażu, łatwiejszą obsługą i procesem startu oraz ładowania na dachu garażu jako ich dostawcę rekomendowano hub firmy Dronehub. Jest on

również już dopasowywany do jednego z dronów, który może być wytypowany do celu i sposobu prowadzenia misji.



Rysunek 13. Garaż dla drona z wysuwaną platformą boczną testowany na stacji Sosnowiec Jęzor JCA, zdjęcia 1 - przygotowanie platformy do lądowania, 2 – lądowanie, 3,4 - automatyczna wymiana baterii wewnątrz garażu.








Rysunek 14. Garaż dla drona z lądowiskiem na dachu (rekomendowany).

Hub wymienia baterię drona w zaledwie 2 minuty dzięki systemowi automatycznej wymiany baterii w garażu, umożliwiającemu nieprzerwaną obsługę drona w cyklu 24 godzin przez 7 w tygodniu. Hub jest wyposażony w klimatyzację i stację pogodową, może działać w każdych warunkach pogodowych, dzięki czemu może być zainstalowany na zewnątrz nastawni w rejonie bocznicy kolejowej. Inteligentne zarządzanie akumulatorami utrzymuje akumulatory drona na optymalnym poziomie temperatury, znacznie wydłużając ich żywotność i wydajność podczas lotu. Garaż posiada wytrzymałą konstrukcję co sprawia, że jest on odporny na akty wandalizmu i kradzieży w szczególności w miejscach pozbawionych bezpośredniej ochrony i nadzoru. W związku z tym, że po zakończeniu badań zostanie przedstawiony BSP jaki jest rekomendowany do wdrożenia w spółce Infra Silesia S.A., ostateczny rodzaj garażu zostanie wówczas przedstawiony.

#### 4.3. Analiza alternatywnych BSP i kamer do wykonywania lotów

W ramach prac badawczych rozważono różne alternatywy dronów i kamer do wykonywania inspekcji z powietrza. Na podstawie ww. kryteriów oraz mając na uwadze dostępne nowoczesne technologie dronów i kamer przyjęto do porównania kilka urządzeń, które odpowiadają potrzebom projektu badawczego. W ramach tego procesu wybrano do testów pięć rodzajów BSP oraz cztery kamery oraz LIDAR (tabela nr 7) [77-81]. W trakcie prac skupiono się przede wszystkim na statkach powietrznych pionowego startu i lądowania z uwagi na sposób wykonywania lotów oraz zaplanowaną konieczną współpracę z garażami dronów. Jeden typ drona (tabela 9 poz. 2) wyposażono w dodatkowe oświetlenie celem wykonania zdjęć w miejscach bez dostępu światła słonecznego i zbadania wykrywalności usterek przy wykorzystaniu oświetlenia sztucznego. W celu zbadania wykrywalności ubytków w główce szyny powstałych na skutek wybuchów zastosowano do badań dron wyposażony w LIDAR. Po wykonaniu badań zostało przedstawione ostateczne rekomendowanie rozwiązanie w zakresie BSP i jego wyposażenia.

Tabela 6. Lista alternatywnych BSP i kamer przyjęta do badań.

Typ BSP	Charakterystyka BSP	Charakterystyka Kamery	Zdjęcie
(1)	(2)	(3)	(4)
1. Autel EVO II PRO V2 6K	Zasięg: 5000m Czas lotu: 40min Waga: 1,2kg Kompaktowa konstrukcja	Przesłona: f2.8 - f11 Czułość ISO max: 12 800 Max rozdzielczość 8000 x 6000	
2. DJI S900 Hexacopter	Zasięg: 5000m Czas lotu: 18min Waga: 3,3kg	Przesłona: f2.8 Czułość ISO max: 25600	
3. DJI Matrice 200 V2 i kamera Zenmuse Z30	Zasięg: 5000m Czas lotu: 38min Waga: 4,7kg	Przesłona: f1,6 Czułość ISO max: b/d 1920x1080	
4. DJI Air 2S	Zasięg: 18500m Czas lotu: 31min Waga: 0,6kg	Przesłona: f2.8 Czułość ISO max: 12800 Max rozdzielczość 5472x3648	
5. DJI Matrice 300 RTK i Kamera/Lidar DJI Zenmuse L1	Zasięg: 8000m Czas lotu: 55min Waga: 3,3kg	Dokładność: 3cm na wysokości 100m Maksymalna ilość odbić: 3 (480 000 punktów na sekundę) pole widzenia 70°	

Źródło: opracowanie własne.



Wszystkie opisane w tabeli 6 BSP oraz kamery przetestowano na terenie infrastruktury Infra Silesia S.A., której schematy zostały zaprezentowane w załącznikach 1-5 niniejszej pracy. Na podstawie analizy materiału zdjęciowego, wykonanych testów w terenie, ocenie stabilności, zwrotności i czasu lotu poszczególnych BSP rekomendowano do kalkulacji kosztów i dalszych prac dron DJI Matrice 300 RTK. Istotnym elementem jest posiadanie Modułu RTK (ang. *Real-Time Kinematic*) zapewniającego dokładność pozycjonowania, dzięki czemu wykonywanie precyzyjnie zautomatyzowanych misji w trudnym środowisku jest bardziej efektywne. Alternatywnym rozwiązaniem jest dron HAKA zbudowany na zamówienie firmy Dronhub, z którym rekomendowany hub jest zintegrowany i zapewnia stabilności pracy, tj. przede wszystkim stabilnego startu, lądowania i obsługi. Ma też oczekiwane parametry techniczne i można w nim zainstalować dowolny komponent łączności, tj. zarówno LTE jak i łączność radiową, która sprawdzi się w przypadku miejsc ze słabym zasięgiem GSM.

#### 4.4. Algorytm do analizy materiału zdjęciowego i wykrywania usterek

Niezbędnym elementem systemu monitoringu infrastruktury za pomocą BSP jest algorytm służący do analizy zdjęć i wykrywania usterek. Przedmiotem niniejszej pracy nie jest opracowanie algorytmu od podstaw, a wykorzystanie dostępnych narzędzi do celu pracy jakim jest m.in. skuteczne wykrywanie usterek znajdujących się na infrastrukturze kolejowej. Dlatego jako kryterium wyboru aplikacji (algorytmu) było:

- a) aktualnie dostępne (nowoczesne) aplikacje,
- b) wielkość populacji używającej aplikację,
- c) funkcjonujące na bieżąco wsparcie techniczne,
- d) dostęp do aplikacji bez dopłat – otwarty kod źródłowy,
- e) obróbka i detekcja małych obiektów, łatwość obsługi oraz czas wykonywania operacji.

Pozyskanie zdjęć jest pierwszym etapem prac badawczych, które następnie służą do wytrenowania algorytmu, a potem do wykrywania usterek. Zanim to nastąpi konieczne jest oznaczenie wszystkich elementów infrastruktury kolejowej jakie powinny być rozpoznawane na zdjęciach. Do tego celu służą oparte na sieci Web narzędzia do adnotacji (etykietowania) obrazów i filmów, które są przeznaczone do oznaczania danych dla algorytmów widzenia komputerowego, co będzie istotne w kolejnym etapie prac badawczych. Na podstawie dostępnych najbardziej popularnych narzędzi [99] do porównania przyjęto 4 funkcjonujące na rynku narzędzia do etykietowania obiektów, które są dostępne nieodpłatnie i w większości oparte na otwartym kodzie źródłowym:

CVAT – (ang. *Computer Vision Annotation Tool*) to narzędzie do tworzenia adnotacji obrazów i wideo oparte na sieci Web, o otwartym kodzie źródłowym, obsługiwane i utrzymywane przez firmę Intel. CVAT przeznaczony jest do oznaczania w szczególności obiektów, klasyfikacji i segmentacji obrazów. Oferuje cztery podstawowe typy adnotacji: prostokąty, wielokąty, polilinie i punkty. Kluczowymi cechami CVAT są: łatwość wdrożenia i instalacji, półautomatyczna adnotacja, funkcjonalny pulpit nawigacyjny z listą projektów adnotacji i zadań, obsługuje dużą liczbę instrumentów automatyzacji, w tym automatyczne adnotacje przyspieszające etykietowanie elementów. Poprawki i ulepszenia aplikacji dokonywane są na bieżąco.

LabelMe - to internetowe narzędzie do oznaczania elementów na obrazach stworzone przez Laboratorium Informatyki i Sztucznej Inteligencji MIT. LabelMe obsługuje różne typy etykietowania, takie jak: wielokąt, prostokąt, okrąg, linia, punkt. Jednym z jego ograniczeń jest to, że pliki można zapisywać i eksportować tylko w formacie JSON (ang. *JavaScript Object Notation*). Ostatnie poprawki i ulepszenia programu dokonane były w 2022 roku.

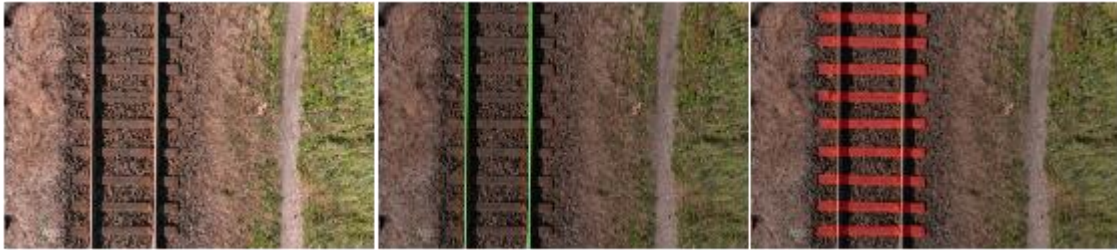
Labelimg - narzędzie etykietuje obiekty na zdjęciach za pomocą ramek ograniczających. Pliki można eksportować w formacie XML oraz PASCAL VOC. W podstawowej wersji Labelimg oferuje tylko jeden typ adnotacji w kształcie prostokąta. Słabą stroną aplikacji jest możliwość oznaczania jedynie zdjęć oraz fakt, że aplikacja musi być zainstalowana lokalnie. Zmiany i poprawki aplikacji ostatni raz wykonano na początku 2022 roku.

VoTT - (ang. *Visual Object Tagging Tool*) jest narzędziem o otwartym kodzie źródłowym opracowane przez firmę Microsoft. Umożliwia etykietowanie zarówno zdjęć jak i nagrań video. Interesującą cechą programu jest możliwość opisywania katalogów obrazów lub samodzielnych plików oraz szeroka gama formatów do eksportowania i importowania danych takich jak format CNTK, Tensorflow (PascalVOC) lub YOLO.

Na podstawie powyższego porównania oraz analizując cechy poszczególnych aplikacji do etykietowania zdecydowano w dalszych pracach posługiwać się aplikacją CVAT. Spełnia ona wszystkie wymagane kryteria (jest bezpłatne, posiada otwarty kod źródłowy, jest nowoczesną, opartą na sieci Web aplikacją wykorzystywaną przez wielu użytkowników, co świadczy o jej popularności i ciągle rozwijana oraz wspierana przez jej twórców). Na podstawie informacji o dokonywanych ulepszeniach [108], dokonywane są one co kilka dni, co świadczy o ciągłym doskonaleniu aplikacji przez jej użytkowników. Wszystkie pozostałe aplikacje posiadały ostatnia ulepszenie w 2022 roku lub wcześniej co oznacza przy otwartym kodzie źródłowym, że nie są zbyt często aktualizowane. Istotną cechą mającą wpływ na wybór

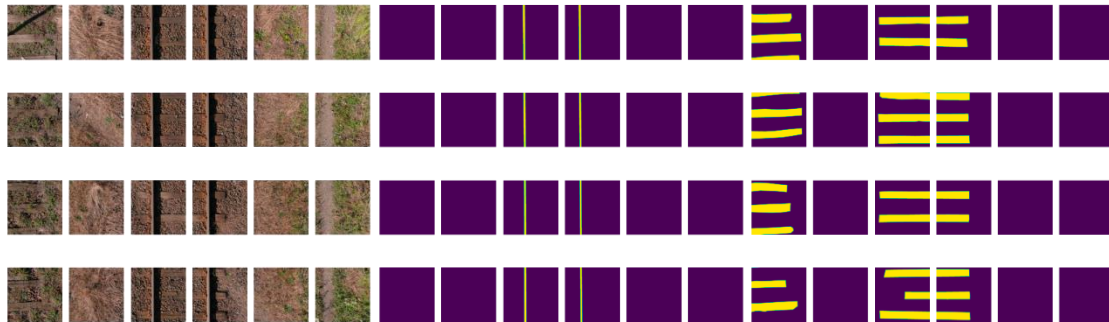
CVAT była funkcjonalność półautomatycznego etykietowania obiektów, która zdecydowanie przyspiesza pracę.

Do kolejnego etapu prac polegającego na wykrywaniu usterek konieczne było ustalenie algorytmu do ich identyfikacji. Przyjęty model działania zakłada, że oznaczone w CVAT elementy infrastruktury takie jak szyny i podkłady zwracają maski tych przedmiotów (rys. 15).



*Rysunek 15. Oznaczenie na oryginalnych zdjęciach szyn i podkładów.*

Z uwagi na fakt, że trenowanie algorytmu na jednym całym zdjęciu jest bardzo trudne z uwagi na rozmiar zdjęcia, a także ze względu na to, że duża część zdjęcia często nie jest zajęta przez poszukiwaną infrastrukturę, zastosowano model segmentacji, który dokonuje podziału zdjęcia na mniejsze segmenty celem dalszej ich obróbki. Do trenowania algorytmu użyto już tylko segmentów zawierających szynę lub podkład (rys. 16).



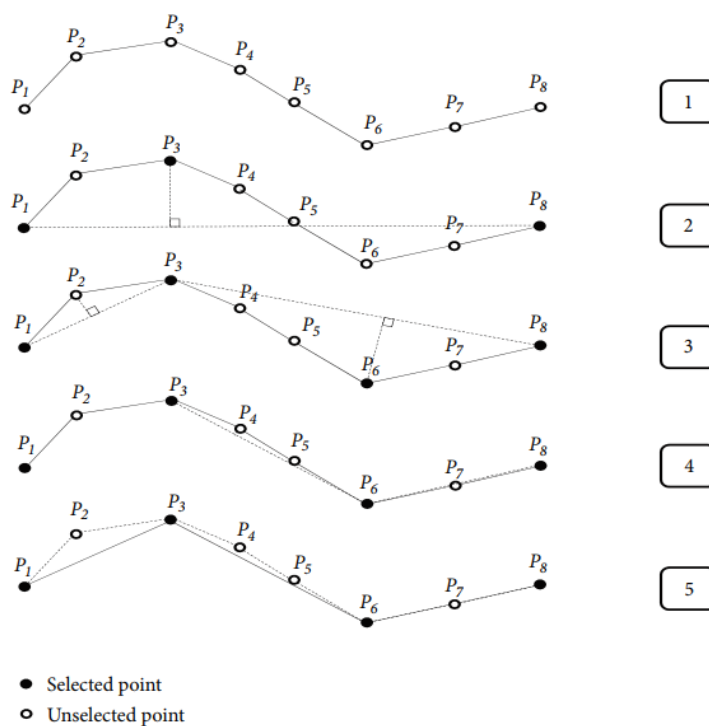
*Rysunek 16. Segmentacja zdjęć w celu trenowania algorytmu*

W procesie rozpoznawania elementów infrastruktury na przykładzie szyn i podkładów zaobserwowano, że rozpoznane podkłady kolejowe opisane są linią z wieloma załamaniami, ponieważ rozpoznawane jest wiele nierówności na krawędzi podkładów (rys.18).

To powoduje, że procesowanie zdjęć trwa długo i wprawdzie uzyskuje się bardzo dobry rezultat co do precyzji opisu podkładu, jednak taka dokładność nie jest wymagana dla oględzin infrastruktury.

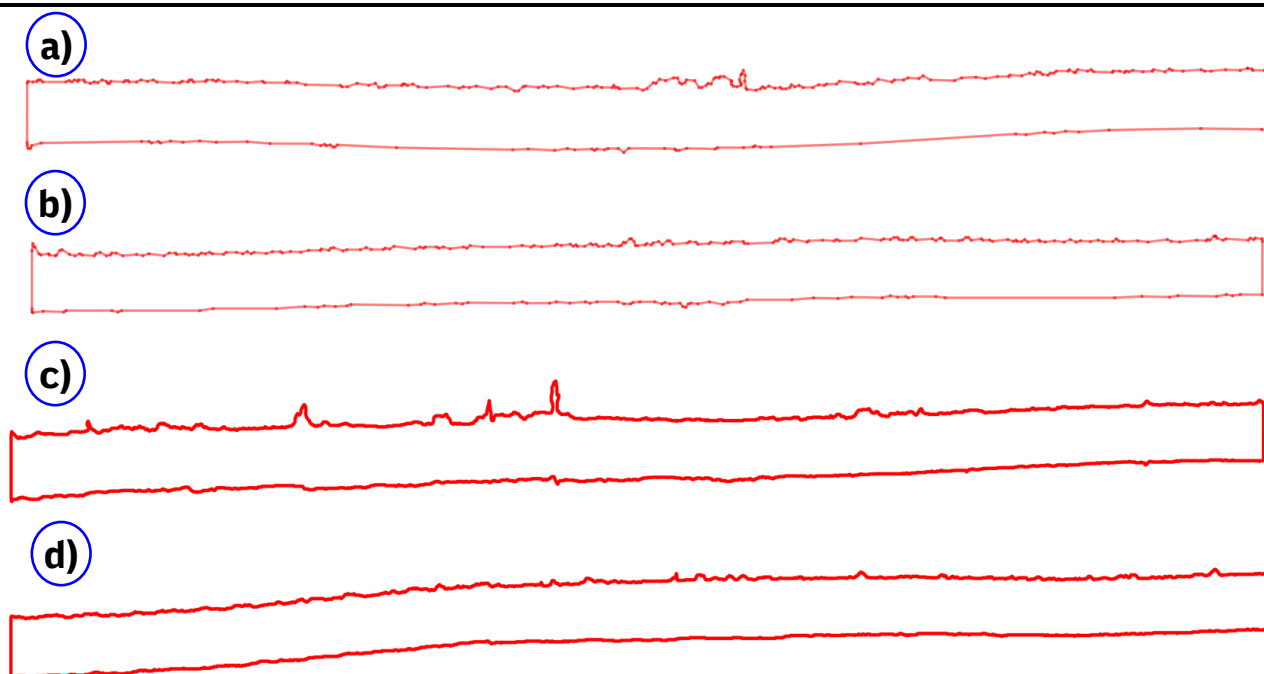
Dlatego zdecydowano uprościć proces obróbki zdjęć poprzez zastosowanie algorytmu, który zmniejsza liczbę punktów na których załamuje się linia. Do tego celu zastosowano algorytm Ramera-Douglasa-Peucker, zwany również algorytmem Douglasa-Peuckera, który jest dość uniwersalnym algorytmem powszechnie używanym w kartografii [100], hydrologii [101], studiach dotyczących zmian klimatu [102], analizy przepływu ruchu lotniczego [103], metod dyskretyzacji dla algorytmów uczenia maszynowego i eksploracji danych [104] czy do zastosowań w medycynie [105].

Algorytm ten został opracowany przez *Urs'a Ramer'a* [106] oraz Davida H. Douglas'a i Thomasa K. Peucker'a [107] w celu redukcji liczby punktów wymaganych do przedstawienia zdigitalizowanej linii. Efektem działania algorytmu jest utworzenie uproszczonej polilinii, która ma mniej punktów niż oryginał, ale nadal zachowuje cechy/kształt oryginału (rys. 17).



Rysunek 17. Przykład działania algorytmu Ramera-Douglasa-Peucker [105].

Algorytm ten został opracowany właśnie w celu uogólnienia kartograficznego i bardzo dobrze sprawdza się przy rozwiązaniu problemu jaki został zidentyfikowany w prowadzonych badaniach. Poniżej znajduje się porównanie zidentyfikowanych podkładów przed i po dokonanych uproszczeniu linii przy zastosowaniu algorytmu Ramera-Douglasa-Peucker.



Rysunek 18. Wykryte przez algorytm krawędzi z wieloma załamaniami linii: a), c) kształt oryginalny, b), d) krawędzie po zastosowaniu algorytmu Ramera-Douglasa-Peucker i uproszczeniu linii.

Kolejnym krokiem badań było rozpoznawanie pozostałych elementów nawierzchni kolejowej. Z uwagi na fakt, że stanowią one m.in. obiekty o małych rozmiarach należało dokonać segmentacji zdjęć i zastosować odpowiedni algorytm, który rozpoznawać przedmioty takie jak śruby stopowe, nakrętki i łapki. Wykrywanie obiektów to technologia komputerowa związana z przetwarzaniem obrazu, która zajmuje się rozpoznawaniem obiektów określonej klasy (takich jak ludzie, budynki lub samochody) na cyfrowych obrazach i filmach [109]. Stosowane do tego są programy, które klasyfikują obraz na podstawie wizji komputerowej na skutek czego algorytm wykrywa i przewiduje obiekt na zdjęciu oraz określa jego pozycję w ramce na fotografii. Jest szeroko stosowany w zadaniach związanych z liczeniem pojazdów, [110] rozpoznawaniem aktywności, [111] wykrywaniem i rozpoznawaniem twarzy.

W praktyce istnieją dwa rodzaje głównych algorytmów wykrywania obiektów. Algorytmy takie jak R-CNN i Fast(er) R-CNN wykorzystują podejście dwuetapowe – najpierw identyfikują regiony, w których oczekuje się znalezienia obiektów, a następnie wykrywają obiekty tylko w tych regionach. Z drugiej strony algorytmy takie jak YOLO (ang. *You Only Look Once*) [112] i SSD (ang. *Single-Shot Detector*) [113] wykorzystują w pełni konwolucyjne podejście, w którym sieć jest w stanie znaleźć wszystkie obiekty na obrazie w jednym przebiegu (stąd użycie w nazwie algorytmu „pojedynczy strzał”

lub „spójrz raz”). Algorytmy dwuetapowe mają zwykle nieco lepszą dokładność, ale działają wolniej, podczas gdy algorytmy pojedynczego strzału są bardziej wydajne i mają równie dobrą dokładność i właśnie ten rodzaj algorytmu zdecydowano wybrać do dalszych badań [114].

YOLO to jedna z najpopularniejszych serii modeli do wykrywania obiektów. Jego zaletą było dostarczanie detekcji w czasie rzeczywistym, przy jednoczesnym zbliżeniu się do dokładności najnowocześniejszych modeli detekcji obiektów. W przypadku badań wykonywanych na zdjęciach, funkcjonalność detekcji w czasie rzeczywisty nie jest wymagana, tym bardziej że wykorzystywane do tego celu metoda „przesuwane okna” nie jest wystarczająco dokładna.

Obok aplikacji YOLO bardzo dobrze funkcjonującym detektorem jest RetinaNet. To jeden z najlepszych, stabilnych jednoetapowych modeli wykrywania obiektów, który sprawdził się dobrze w przypadku często występujących i małych obiektów. Z tego powodu stał się popularnym modelem wykrywania obiektów do wykorzystania przy opracowywaniu zdjęć lotniczych i satelitarnych. Dzięki wprowadzeniem kilku ulepszeń FPN (ang. *Feature Pyramid Network*) oraz FL (ang. *Focal Loss*) [115,116] stał się bardzo dobrym i wygodnym narzędziem do detekcji niewielkich obiektów, spełniającym kryteria wyboru. Z uwagi na fakt, że w prowadzonych badaniach bardzo istotnym jest możliwość detekcji małych obiektów, które zajmują niewielką część całego obszaru zdjęcia lub często obiekty nachodzą na siebie, zdecydowano do dalszych prac wybrać algorytm RetinaNet z wzbogaconą funkcjonalnością o *anchor optimization* poprawiającą dokładność rozpoznawania elementów [117]. Dodatkowym argumentem za przyjęciem takiego rozwiązania było spełnienie kryterium otwartego dostępu do kodu źródłowego i możliwość pracy w sieci Web przez wielu użytkowników.

## 5. Wyniki badań

Całość prac badawczych została podzielona na etapy, w których kolejno zebrano materiały (zdjęcia) stanowiące bazę danych do analizy stanu technicznego infrastruktury. Głównym problemem badawczym do rozwiązania w pierwszym etapie prac było pozyskanie odpowiedniej jakości danych zarejestrowanych przez BSP, na podstawie których możliwe było przeprowadzenie procesu nauki algorytmu do rozpoznawania usterek i klasyfikacji stanu elementów infrastruktury kolejowej. Problem badawczy dotyczył ustalenia takich kwestii jak odpowiednie umieszczenie kamery, które definiuje perspektywę wykonywanych zdjęć, a także konfiguracji parametrów ich pracy. Dodatkowymi czynnikami, które istotnie wpływają na jakość danych są parametry lotu bezzałogowego statku powietrznego takie jak jego prędkość oraz wysokość lotu.

Problem badawczym w następnych etapach projektu stanowiła obróbka danych pozwalająca na wykrycie i rozpoznanie usterek na podstawie zdjęć oraz chmury punktów szyn kolejowych, aby możliwe było stworzenie bazy danych treningowych i testowych. W tym celu zebrane zdjęcia zostały poddane analizie przez wybrany algorytm do detekcji i klasyfikacji przeszkód na torze oraz pęknięć i uszkodzeń infrastruktury, które są krytyczne dla bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego a tym samym dla realizacji projektu.

Ostatnim zagadnieniem było przygotowanie projektu aplikacji prezentującej wykryte usterki w sposób funkcjonalny dla użytkownika.

### 5.1. Opracowanie bazy danych treningowych oraz testowych na potrzeby detekcji i klasyfikacji uszkodzeń

W celu zebrania danych zostały wykorzystane bezzałogowe statki powietrzne wyposażone w aparat cyfrowy wysokiej jakości, który został umieszczony na głowicy (gimbalu). Przed rozpoczęciem lotów, biorąc pod uwagę przepisy i zasady wykonywania lotów szczegółowo przedstawione w rozdziale 7, zostały określone warunki techniczne oraz zasady bezpieczeństwa wejścia w teren oraz przeprowadzania lotów nad czynną infrastrukturą kolejową. Loty odbywały się w ścisłym kontakcie z dyspozytorami oraz dyżurnymi ruchu zarządzającymi ruchem kolejowym na danym terenie.

### 5.1.1. Testy wysokości i jakości zdjęć

Do pierwszych badań wykorzystano BSP Autel EVOII PRO V2 opisany w tabeli 9 w pozycji 1. Dron został wybrany z uwagi na zwartą kompaktową konstrukcję pozwalającą na łatwe dopasowanie garażu, osiągnięty długi czas lotu oraz zasięg. BSP jest wyposażony w kamerę o wysokiej rozdzielczości, co pozwalało osiągnąć wysokiej jakości zdjęcia wykonywane z poziomu ponad 10m od główki szyny.

Głównym celem tego etapu badań było ustalenie maksymalnej wysokości prowadzenia lotów dla uzyskania wymaganej jakości zdjęć oraz zachowania wymogów bezpieczeństwa dla ludzi oraz eksploatowanego taboru kolejowego. Loty odbywały się w tym przypadku nad infrastrukturą kolejową bez sieci trakcyjnej co dawało swobodę ustalenia docelowej wysokości lotu. W trakcie lotów testowano wysokość 10-15 metrów nad torowiskiem, co pozwoliło uzyskać jakość zdjęć dającą od 1,8mm-4,0mm na piksel. Dla wykrywania uszkodzeń infrastruktury wielkości kilku pikseli (< 10mm) należy obniżyć wysokość lotu do poziomu 3-5m nad główką szyny. Testowany BSP Autel EVO II PRO V2 był wyposażony w stałą kamerę z brakiem możliwości wymiany obiektywu, dlatego jakość zdjęć i obszar zajmowany przez piksel można regulować jedynie wysokością prowadzonego lotu. Ten aspekt istotnie utrudnia poruszanie się po terenie kolejowym z uwagi na występowanie różnych budowli (mosty wiadukty). Ponadto pomimo wysokiej jakości zdjęć rozpoznawanie usterek o niewielkich rozmiarach (m.in. pęknięcia szyn, wybuksowania) nie było możliwe. Zebrany materiał bardzo dobrze sprawdzał się do rozpoznawania szyn i podkładów kolejowych (rys. 19) i został wykorzystany na dalszym etapie badań do etykietowania tych elementów infrastruktury.

Podczas pierwszych lotów ustalono kąt ustawienia kamery na 90 stopni przyjmując, że kamera skierowana w dół, prostopadle do linii lotu, BSP wycelowany względem środka torowiska. Natomiast dla wykrywania uszkodzeń łubków łączących szyny takie ustawienie kamery nie pozwala na uzyskanie obrazu stanu łubka i potencjalnych jego uszkodzeń. W tym celu konieczne jest ustawienie kamery pod kątem ok. 35 stopni, skierowanie jej prostopadle do linii szyn i powtórzenie lotu nad torem kolejowym.





*Rysunek 19. Przykładowe zdjęcie wykonane za pomocą Autel EVO II PRO V2.*

W celu uzyskania wysokiej jakości materiału, zdjęcia wykonane zostały w ten sposób, że obraz nakładał się na siebie, dzięki czemu uzyskano pokrycie każdego punktu na linii kolejowej co najmniej dwukrotnie. Aby zapewnić równomierne nakładanie się zdjęć oraz stabilność lotów i pomiarów, każdorazowo została zaplanowana misja lotu nad układem torowym, a zdjęcia wykonywano w równomiernych odstępach czasu bez rozmyć spowodowanych przez ruch BSP wykorzystując jednocześnie stabilizację obrazu kamery. W ten sposób wykonano ponad 1200 zdjęć dla każdej lokalizacji (stacji/bocznicy, linii kolejowej). Zebrany materiał zawierał zarówno zdjęcia infrastruktury o prawidłowym stanie technicznym jak również zdjęcia, na których widoczne były uszkodzenia wraz z adnotacjami co do lokalizacji i typu usterki.

Aby ustalić rozwiązanie dające większą precyzję jakości zdjęć a w szczególności wykrywanie mniejszych elementów (<10 mm) jak połączenia szyn oraz ich mocowań przetestowano BSP DJI S900 z gimbalem DJI Zenmuse zaadoptowanym do aparatu Panasonic Lumix GH5. W tym przypadku przetestowano dwa rodzaje obiektywów o ogniskowych 30 mm i 14 mm. Jednym z najważniejszych parametrów określających jakość opracowań otrzymywanych z bezzałogowych systemów pozyskujących materiał zdjęciowy jest wielkość piksela terenowego GSD (ang. *Ground Sampling Distance*). Jest ona uzależniona od kilku czynników, w tym od rozdzielczość sensora pozyskującego obrazy zainstalowanego na BSP.

Dla przyjętych obiektywów wartości GSD przedstawiają się następująco (tab. 7):

*Tabela 7. Rozmiar piksela dla obiektywu o ogniskowej 30 mm*

Wysokość lotu [m]	Wielkość piksela [mm/px]
10	1,1
9	1,0
8	0,9
7	0,8
6	0,7
5	0,6
4	0,4
3	0,3
2	0,2
1	0,1

Analogicznie dokonano obliczeń GSD dla obiektywu o ogniskowej 14mm, co przedstawia tabela 8 poniżej.

*Tabela 8. Rozmiar piksela dla obiektywu o ogniskowej 14 mm*

Wysokość lotu [m]	Wielkość piksela [mm/px]
10	2,4
9	2,1
8	1,9
7	1,7
6	1,4
5	1,2
4	1,0
3	0,7
2	0,5
1	0,2

W porównaniu z dronem Autel EVO II PRO V2, który wykonywał zdjęcia z jednocalową całą matrycą obecna konfiguracja pozwoliła na zebranie danych wykazujących więcej szczegółów. Użyty w GH5 większy przetwornik oraz zastosowana optyka (obiektywy o ogniskowej 30 i 14 mm), w porównaniu do Autel EVO II PRO V2, która posiada stałą ogniskowa 9 mm pozwoliły uzyskać obraz wyższej jakości. Im dłuższa ogniskowa tym więcej szczegółów uzyskała matryca z mniejszego wycinka. Przez co pomimo, że obie matryce mają zbliżoną ilość megapikseli, materiał zebrany poprzez GH5 daje lepsze rezultaty.

W kolejnych lotach przetestowano drony DJI Air 2 oraz DJI Zenmuse L1 jednak żadne z kamer w jakie były wyposażone te BSP nie posiadały kamer dających większą dokładność aniżeli dron wyposażony w obiektyw o ogniskowej 30 mm.

*Tabela 9. Obliczenia wielkości piksela dla BSP z kamerami DJI AIR 2 i DJI Zenmuse L1.*

Wysokość lotu [m]	Wielkość piksela [mm/px] DJI AIR 2	Wielkość piksela [mm/px] DJI Zenmuse L1
10	0,27	0,29
9	0,25	0,26
8	0,22	0,23
7	0,19	0,20
6	0,16	0,17
5	0,14	0,15
4	0,11	0,12
3	0,08	0,09
2	0,05	0,06
1	0,03	0,03

W trakcie lotów przetestowano BSP wyposażony w kamerę Zenmuse Z30, w celu sprawdzenia czy jest możliwe wykonywanie oczekiwanej jakości zdjęć z wysokości ponad 10 m przybliżenie obrazu. Jednak pomimo 30-krotnego zoom'u optycznego uzyskane zdjęcia nie były wystarczająco wyraźne aby prawidłowo dokonywać na nich testów algorytmu oraz wykrywać usterki infrastruktury. Nawet nieznaczne drgania drona powodowały brak ostrości zdjęć i konieczność powtarzania misji, co zdecydowanie obniża jej efektywność.

Z uwagi na fakt, że część infrastruktury kolejowej znajduje się pod budynkami (systemy nawęglania) lub pod mostami, gdzie występuje zacienienie obiektów, zbadano jakość zdjęć wykonaną w takich okolicznościach oraz przy użyciu doświetlenia własnego drona (rys. 20).



*Rysunek 20. Zdjęcia wykonane w miejscach załadunku węgla przy użyciu oświetlenia drona.*

Niestety pomimo doświetlenia fotografowanego obszaru lampami ledowymi umieszczonymi pod dronem, zdjęcia okazały się nieostre na skutek długiego czasu naświetlania i poruszania się drona. Dodatkowym utrudnieniem podczas lotów w miejscach nawęglania był pył węglowy wzniesany poprzez ruch śmigieł drona, co wpływało również na pogorszenie jakości zdjęć. Otrzymane zdjęcia z obszaru nawęglania nie nadawały się do rozpoznawania elementów infrastruktury. W tym przypadku konieczne będzie kontynuowanie badań i zastosowanie lampy błyskowej, która mocniej doświetli fotografowane

miejsca i skróci czas naświetlania. Alternatywnie konieczne będzie wykonanie w takich lokalizacjach obchodów metodą konwencjonalną.

Podsumowując oba obiektywy (30 mm i 14 mm) dają dobre rezultaty w zakresie jakości zdjęć, jednakże z uwagi na wymaganą wysoką dokładność zdjęć i konieczność wykrywania małych szczegółów rekomenduje się do przeprowadzania lotów nad infrastrukturą obiektywy o ogniskowej nie mniejszej niż 30 mm.

## 6. Przeprowadzenie wykrywalności usterek na podstawie zdjęć

### 6.1. Ustalenie elementów infrastruktury koniecznych do wykrywania na podstawie zdjęć

Zakres elementów wymagających kontroli podczas obchodów infrastruktury jest określony w instrukcjach poszczególnych zarządców infrastruktury [9, 62]. Z uwagi na fakt, że wdrożenie nowego rozwiązania odbywa się na przykładzie i zasadach określonych przez spółkę Infra Silesia S.A. z siedzibą w Rybniku, przyjęto do dalszej analizy dokumentację utrzymania infrastruktury właśnie tej spółki. Należy zaznaczyć, że zapisy dotyczące obchodów infrastruktury są bardzo zbliżone do siebie w spółkach zajmujących się prowadzeniem ruchu kolejowego więc oparcie się na wskazanych przepisach jest uzasadnione, a ich treść można uznać za reprezentatywną.

Zakres przeglądów nawierzchni kolejowej wykonywanych przez dróżnika kolejowego zgodnie z instrukcją zarządcy Infrasillesia S.A. został przedstawiony w rozdziale 4.1 powyżej. Z uwagi na fakt, że w zakres obchodu wchodzi szereg elementów infrastruktury, w niniejszej pracy analiza możliwości wykonywania inspekcji za pomocą BSP zostanie oparta na wybranych, krytycznych elementach nawierzchni kolejowej, ponieważ jej stan jest jednym z podstawowych i najważniejszych elementów stanowiących o bezpiecznym prowadzeniu ruchu kolejowego. Jeśli przyjęty zakres przyniesie pozytywny rezultat w zakresie wykrywalności usterek będzie można przyjąć, że zastosowana metoda monitoringu za pomocą BSP jest skuteczna i będzie mogła zostać wdrożona w przedsiębiorstwie również w szerszym zakresie, w stosunku do innych elementów infrastruktury.

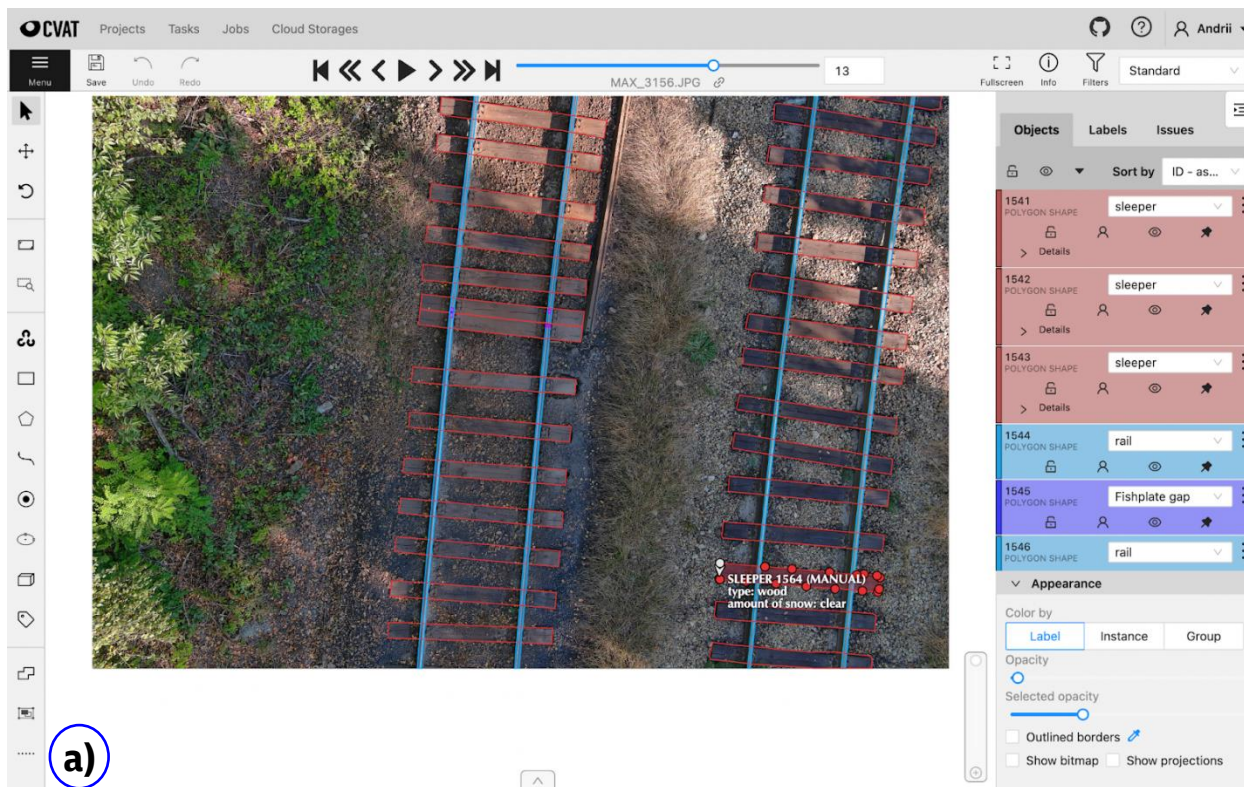
### 6.2. Oznaczenie i rozpoznawanie elementów wymagających detekcji

#### 6.2.1. Oznaczanie i rozpoznawanie szyn i podkładów

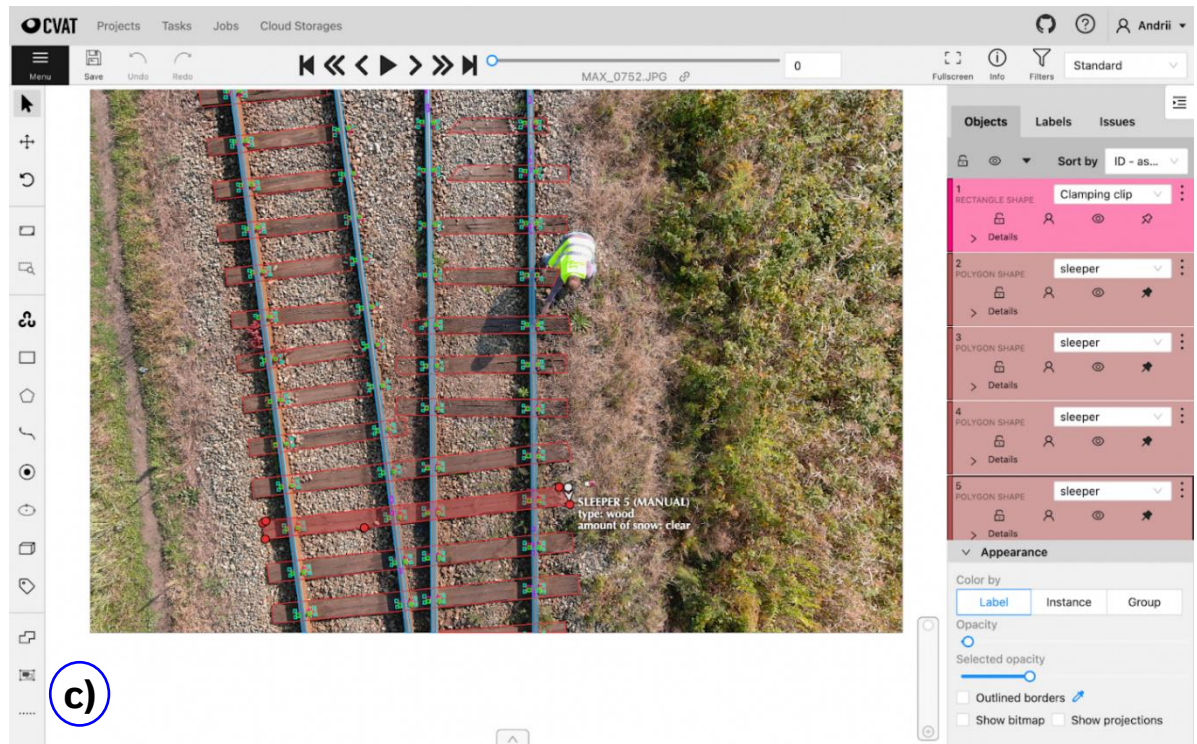
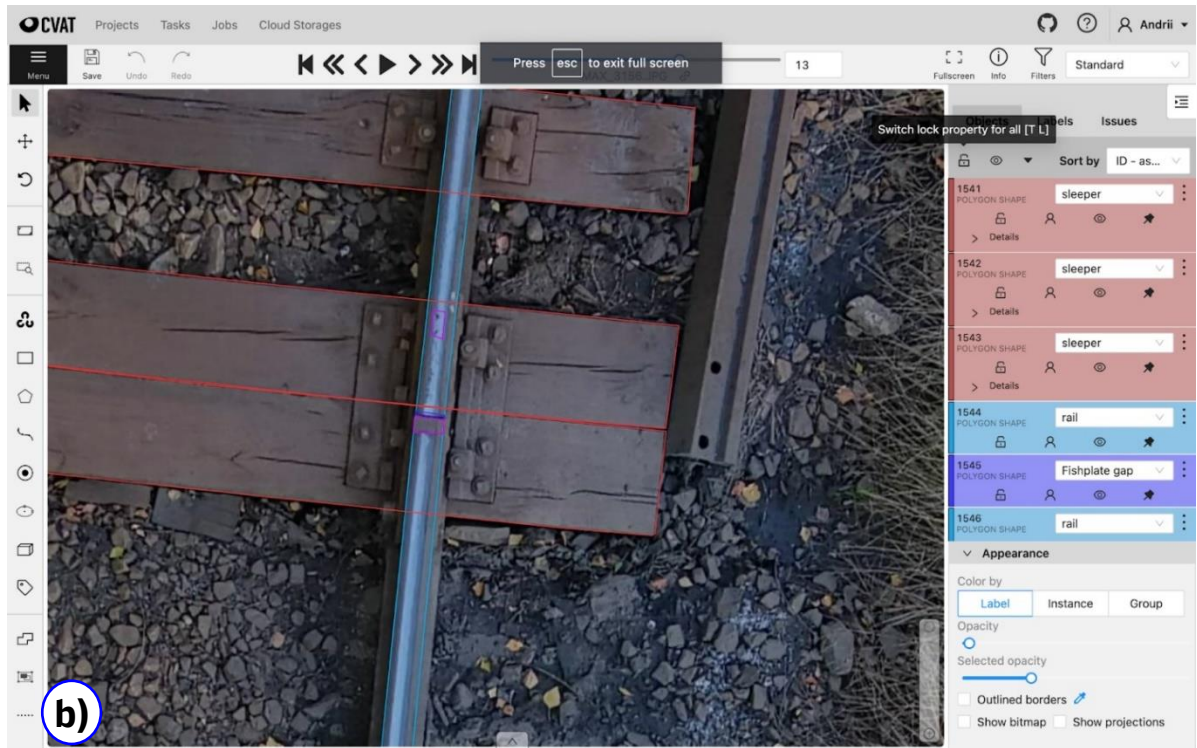
Szyny i podkłady kolejowe są zasadniczą częścią nawierzchni kolejowej i od tego zakresu zdecydowano rozpocząć rozpoznawanie elementów, które mogą zawierać usterki lub anomalie. W tym celu wybrano 665 reprezentatywnych zdjęć, na których oznaczono co jest przedmiotem rozpoznania. Każdy pokład został oznaczony na zdjęciu (ang. labeled, labeling) co stało się wkładem do procesu uczenia maszynowego w dalszym procesie (ang. machine learning), aby algorytmy wiedziały, że to jest właściwy element jaki należy rozpoznać (rys. 21). Im więcej takich elementów jest zdefiniowanych w różnych warunkach, jak są położone, zasypane tłuczniem czy zachwaszczone, tym jednoznaczniej będzie dany element rozpoznawany przez algorytm na etapie automatycznego odnajdywania usterek.

Do oznaczania elementów na zdjęciach (tzw. labelowania, etykietowania, opisywania) użyto narzędzie CVAT (ang. *Computer Vision Annotation Tool*). Jest to ogólnodostępna aplikacja oparta na przeglądarce internetowej do opisywania obiektów wykorzystywanych później w uczeniu maszynowym dla wykrywanie obiektów, klasyfikacji i segmentacji obrazu [87]. Jest to bardzo intuicyjne i wygodne narzędzie dla użytkowników co jest istotną cechą przy etykietowaniu dużych ilości obiektów na zdjęciach.

Etykietowanie polega to na tym, że definiuje się i oznacza obiekty jak szyny, podkłady, śruby i in. elementy jakie będą rozpoznawane w późniejszym etapie. Proces wykrywania podkładów rozpoczyna się od rozpoznania rodzaju podkładu (betonowy czy drewniany). Następnie przecięcie podkładu z szyną daje wskazanie, gdzie powinny znajdować się pozostałe elementy, podlegające identyfikacji i sprawdzeniu. W zależności od rodzaju podkładu będzie w dalszej kolejności rozpoznawane przytwierdzenie szyn oraz to czy jest one właściwe i w odpowiednim miejscu. Zasadą jest, że algorytm będzie poszukiwał miejsc przecięcia się dwóch szyn z podkładem kolejowym, gdzie powinny znajdować się przytwierdzenia szyn. W sytuacji rozjazdów kolejowych konieczne było uwzględnienie sytuacji gdzie jeden podkład może przecinać cztery szyny i jest to sytuacja prawidłowa, nie wymagająca raportowania usterki (rys. 21 c)).



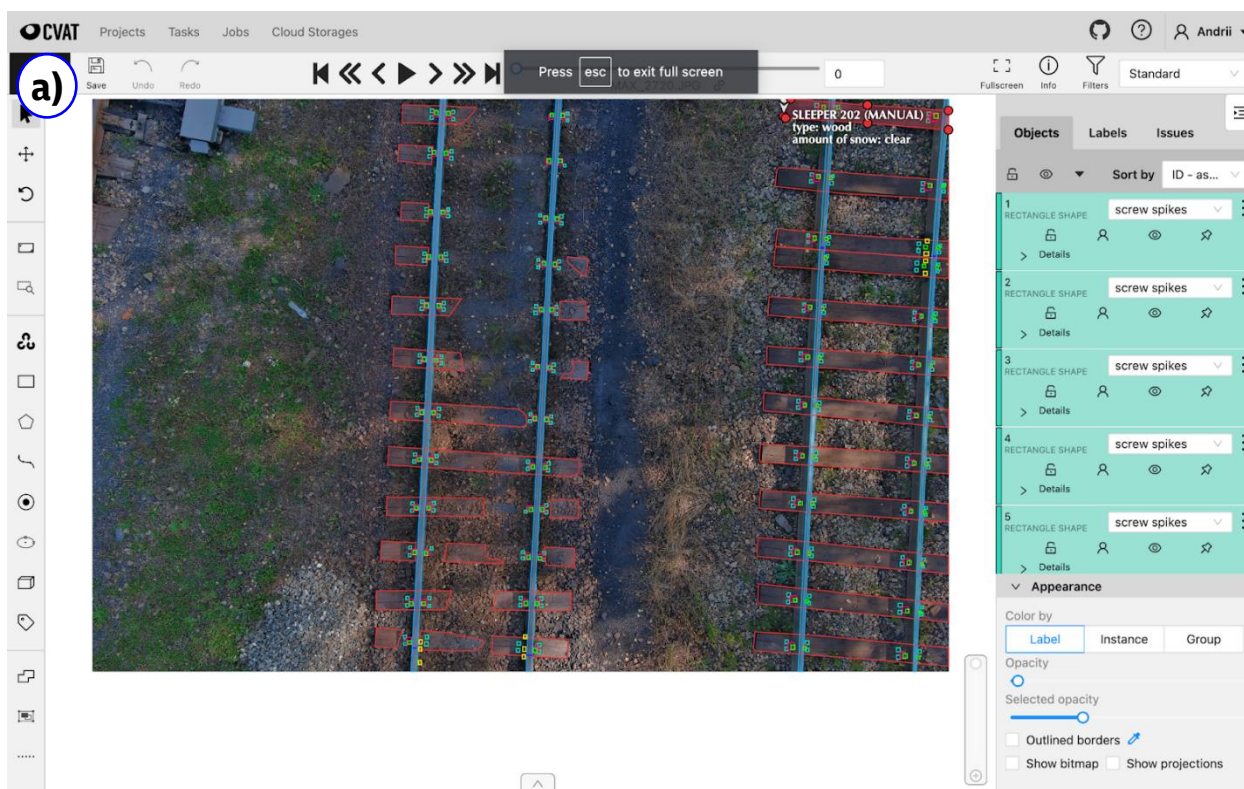
Analiza możliwości przeprowadzania oceny stanu technicznego infrastruktury kolejowej w oparciu o technologię bezzałogowych pojazdów, w tym pojazdów latających, M. Batko.

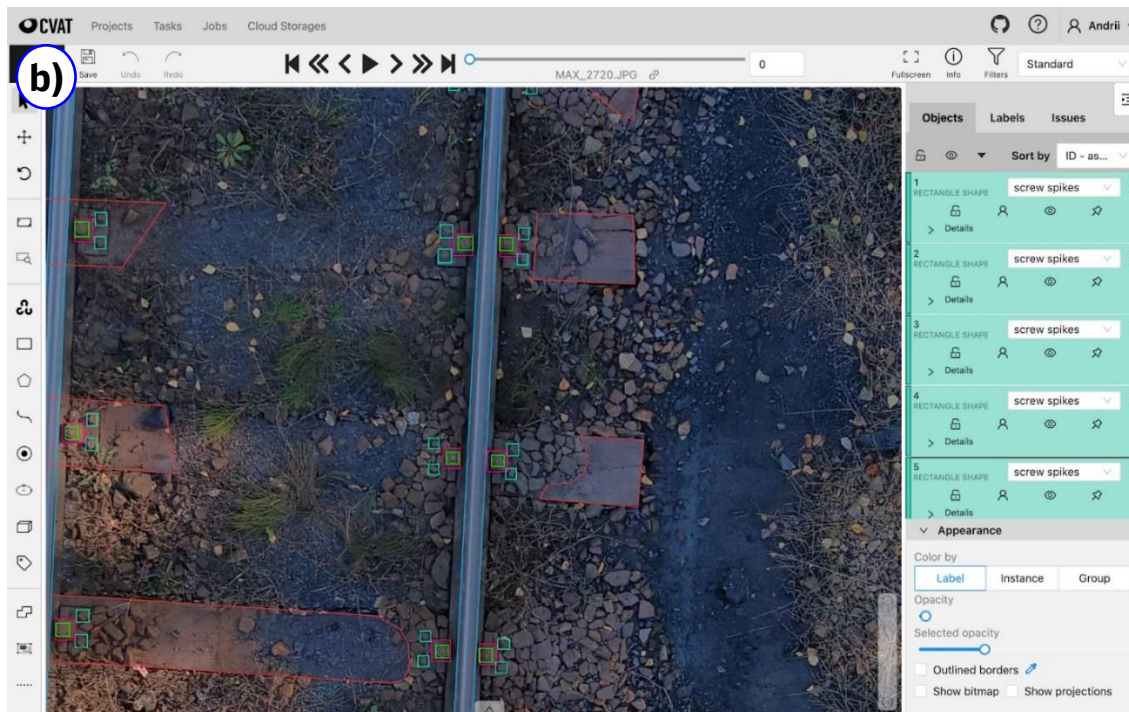


Rysunek 21. a), b), c). Przykłady oznaczania podkładów kolejowych: a) pojedynczych podkładów kolejowych, b) podwójnych podkładów kolejowych, c) podrozdzińnic.



W przypadku gdy nie występuje sytuacja, w której widoczne jest przecięcie podkładów i szyn, algorytm może to rozpoznać jako błędną interpretację obiektu jaki ma przeanalizować. Dlatego też do analizy dodano zdjęcia i sytuacje (rys.22), gdzie podkład nie jest w pełni widoczny pod szyną, aby algorytm rozpoznawał, że to może być również właściwe miejsce gdzie znajduje się szyna i podkład, jednak z zaznaczeniem, że może w tym miejscu występować usterka (podkład nie jest widoczny => potencjalna usterka => brak podkładu lub nieprawidłowe utrzymanie nawierzchni kolejowej wymagające wygenerowania raportu). Będzie to ważne w kolejnych etapach prac, które skupiają się nad automatyzacją procesu lokalizacji i raportowania usterek.



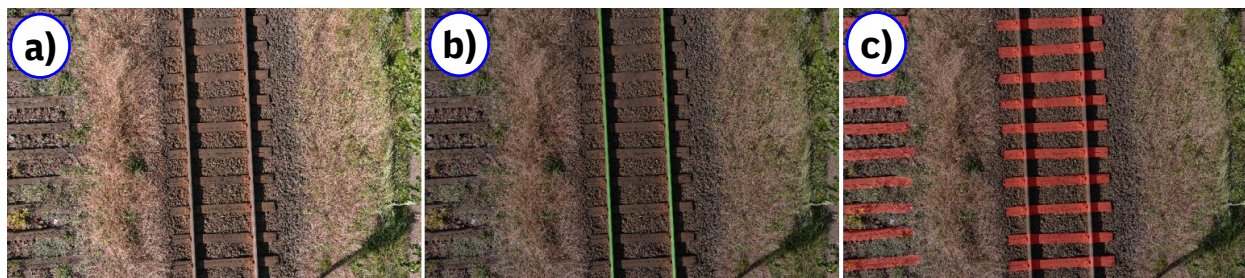


Rysunek 22. Oznaczanie zdjęć, gdzie nie są w pełni widoczne podkłady kolejowe (a), b)).

Przy opracowywaniu zdjęć z podkładami kolejowymi przyjęto zasadę oznaczania elementów infrastruktury również w przypadku częściowej widoczności podkładów, na przykład w sytuacji ich częściowego zasypania lub zachwaszczenia. Pozwalać to będzie na zdefiniowanie wagi danej usterki w sytuacji gdzie infrastruktura kolejowa jest w słabym stanie technicznym, jednak nadającym się do dalszej eksploatacji. W trakcie prowadzonej inspekcji będzie można ustalić czy dany stan techniczny jest akceptowalny, może zostać ujęty w planowanym harmonogramie napraw infrastruktury lub jest na tyle krytyczny, że nadaje się do wyłączenia z eksploatacji w trybie pilnym jako zagrażający bezpiecznemu prowadzeniu ruchu pociągów. Takie informacje mogą być później generowane w postaci raportów i kierowane do dyspozytora lub służb utrzymania infrastruktury zaraz po wykonaniu lotów BSP.

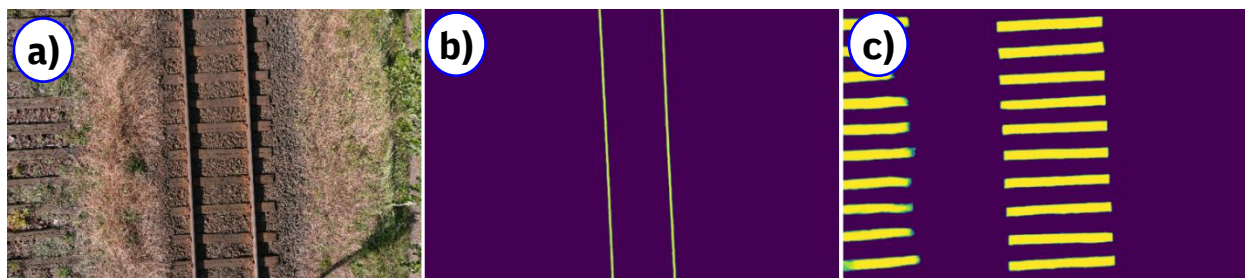
W ten sposób oznaczone zdjęcia posłużyły do nauczania algorytmu rozpoznawania elementów infrastruktury kolejowej. Tą część prac wykonano na podstawie bazy danych zdjęć treningowych. Następnym krokiem w badaniach wykrywalności usterek było sprawdzenie jak algorytm samodzielnie jest w stanie identyfikować oznaczone wcześniej części infrastruktury. Do tego posłużono się innymi zdjęciami stanowiącymi tzw. bazę testową dla algorytmu.

Poniżej przedstawiono materiał zdjęciowy i proces rozpoznawania infrastruktury przez zastosowany algorytm. Pierwsze zdjęcie (rys. 23 a)) przedstawia wykonane przez BSP fotografię części infrastruktury, zdjęcia (rys. 23 b) i c)) wskazują to co zostało rozpoznane, czyli odpowiednio szyny kolejowe oraz podkłady kolejowe.



*Rysunek 23. Rozpoznawanie szyn i podkładów kolejowych.*

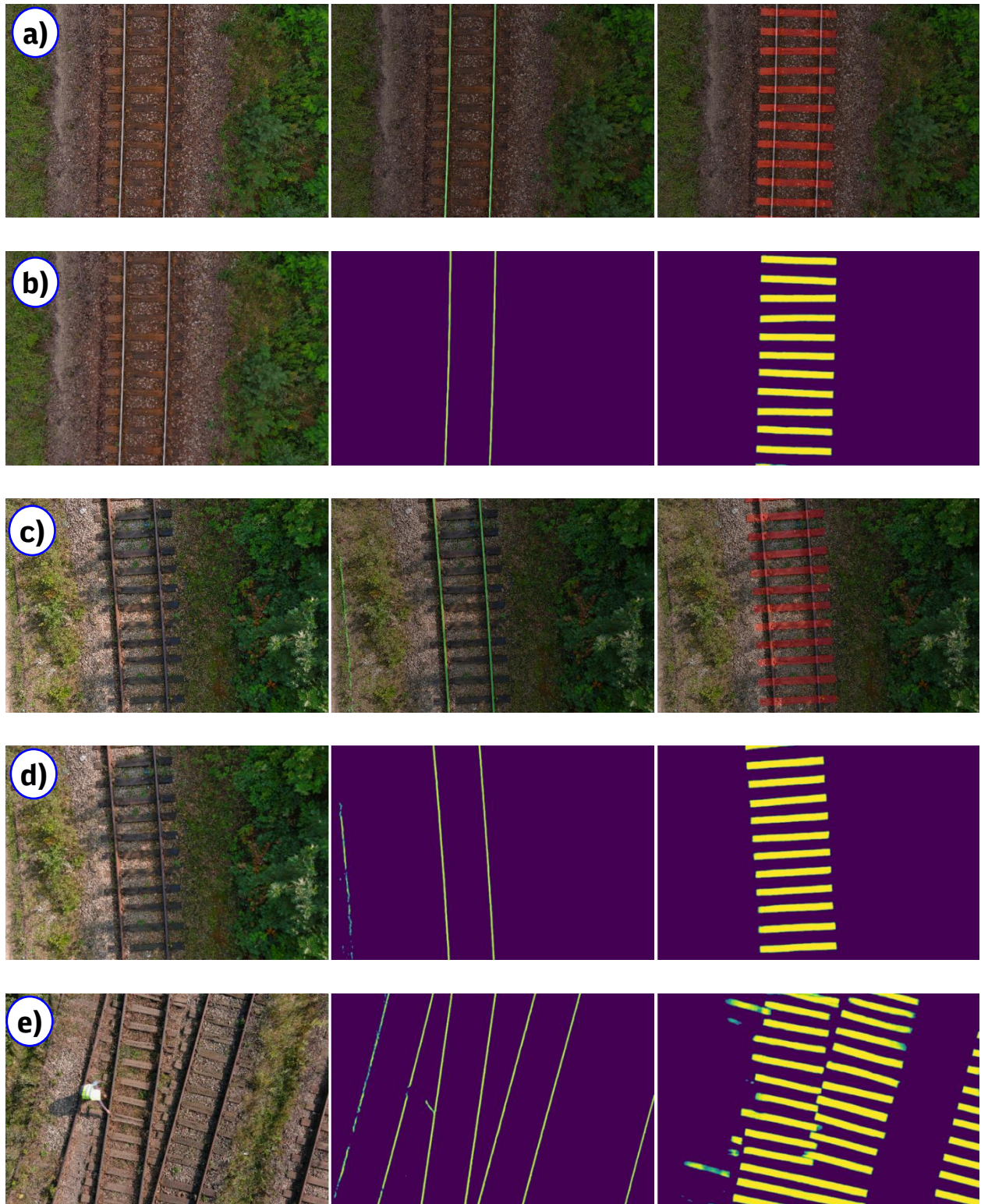
W celu rozpoznania poszukiwanych elementów algorytm tworzy tzw. maski (rys. 24 b) i c), czyli tworzy fizyczną wizualizację elementów jakie są widoczne na zdjęciu. W ten sposób poszczególne elementy infrastruktury są rozpoznawalne przez algorytm.



*Rysunek 24. Rozpoznawanie szyn i podkładów przez algorytm*

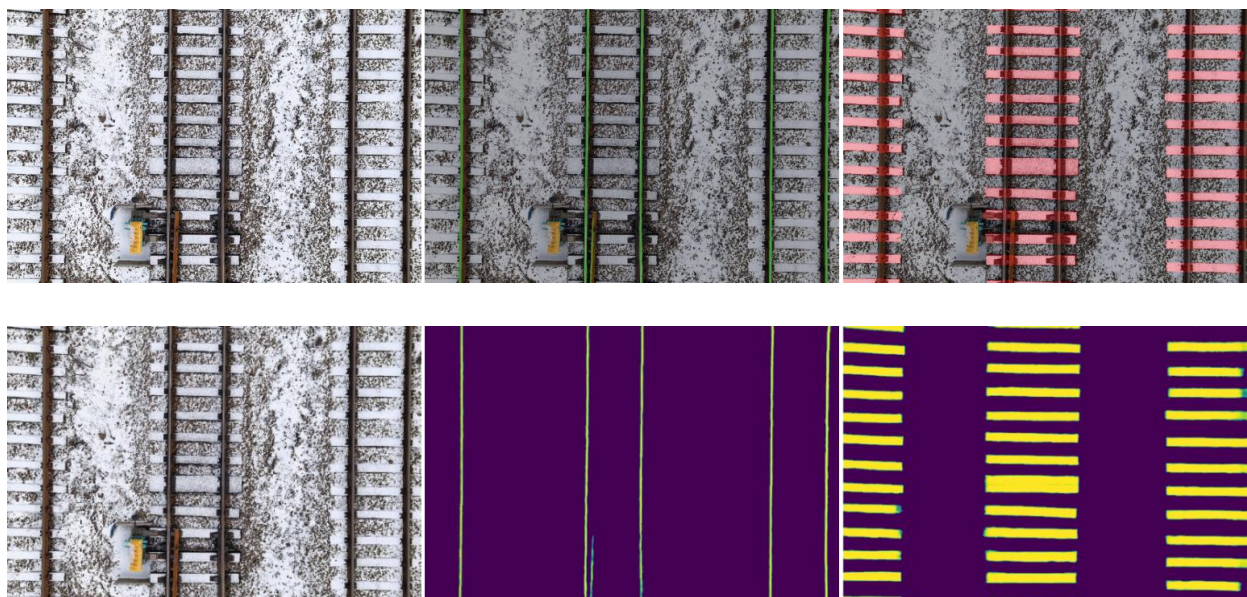
Poniżej przedstawione zostały w analogiczny sposób przykłady z różnego rodzaju części infrastruktury, gdzie można zobaczyć jak algorytm zinterpretował na podstawie wykonanych zdjęć szyny i podkłady kolejowe.

Bardzo ważnym warunkiem do skutecznego rozpoznawania elementów infrastruktury a w późniejszym etapie ich usterek jest sama jakość zdjęcia. Warunki atmosferyczne, występujące cienie, pora dnia mogą wpływać na jakość zdjęcia, co może spowodować nieprawidłowe rozpoznanie a w późniejszym etapie prac mieć wpływ na poprawną diagnozę usterki. Dlatego konieczne jest oznaczenie i poddanie analizie zdjęć pod kątem ich jakości w różnych warunkach atmosferycznych lub różnej porze dnia. Na zdjęciach rys. 25 c) i d) znajdują się przykłady wykonanych zdjęć w rejonie częściowo zacienionym a na zdjęciach przedstawionych na rys. 26 w warunkach zimowych, po opadach śniegu.



Rysunek 25. Rozpoznawanie szyn i podkładów przez algorytm na podstawie wykonanych zdjęć testowych.

Pomimo, iż część szyn i podkładów kolejowych znajduje się w cieniu, a niektóre z nich poza cieniem, nie miało to wpływu na wykrycie podkładów i szyn co widać na powyższych maskach wykonanych przez algorytm. O wysokiej skuteczności i jakości wykrywania szyn może świadczyć to, że nawet słabo widoczne, stare, porzucone w międzytorzu szyny, częściowo zasłonięte roślinnością są również widoczne i interpretowane jako szyny (rys. 25 c) i d)). Daje to podstawy do stwierdzenia, że aplikacja użyta do etykietowania zdjęć jak również zastosowany algorytm został właściwie dobrany do rozpoznawania tego rodzaju elementów, a pora dnia czy nasłonecznienie nie wpływa na skuteczność działania algorytmu.



*Rysunek 26. Zdjęcia i ich rozpoznawanie w warunkach po opadach śniegu.*

Jak zaprezentowano na rys. 26 algorytm bardzo dobrze rozpoznaje zdjęcia nawet w sytuacji wystąpienia zupełnie innych warunków atmosferycznych, jakimi w tym przypadku były zdjęcia wykonane po opadach śniegu. Zarówno rozpoznanie szyn jak i podkładów przebiegło poprawnie, a krawędzie są bardzo dobrze widoczne i rozpoznawalne przez algorytm. Należy zwrócić uwagę, że zdjęcia wykonane zostały po opadach śniegu 2-3 cm grubości pokrywy śnieżnej. W przypadku gdyby pokrywa śnieżna była większa tj. na tyle, że nie byłoby widać krawędzi podkładów czy szyn należy założyć, że wykonane zdjęcia i ich analiza nie przyniosłaby rezultatu z uwagi na brak widoczności elementów infrastruktury. W tym przypadku loty BSP nie przyniosą oczekiwanego rezultatu. Należy jednak pamiętać, że zakres inspekcji za pomocą BSP ma być co najmniej taki jak zakres wykonywany




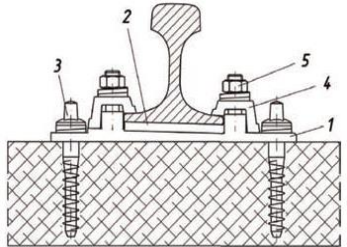
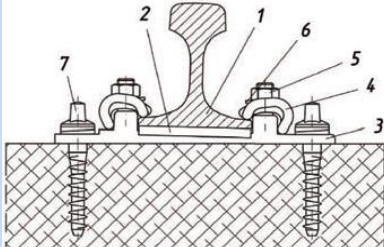
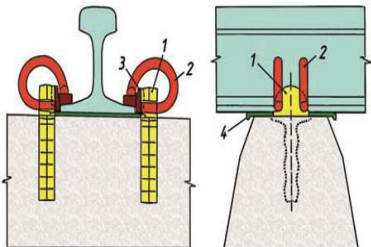
przez pracownika obchodowego. Zatem jeśli infrastruktura kolejowa nie jest widoczna przez pracownika na skutek opadów śniegu to nie jest również wymagane od nowego rozwiązania inspekcji za pomocą BSP, aby te elementy w takich samych warunkach były widoczne i rozpoznawalne. Na podstawie wykonanych badań można stwierdzić, że potencjał rozpoznawania elementów infrastruktury jest bardzo duży, ponieważ poszukiwane elementy takie jak szyny i podkłady są bardzo dobrze rozpoznawalne.

#### 6.2.2. Oznaczanie i rozpoznawanie przytwierdzeń

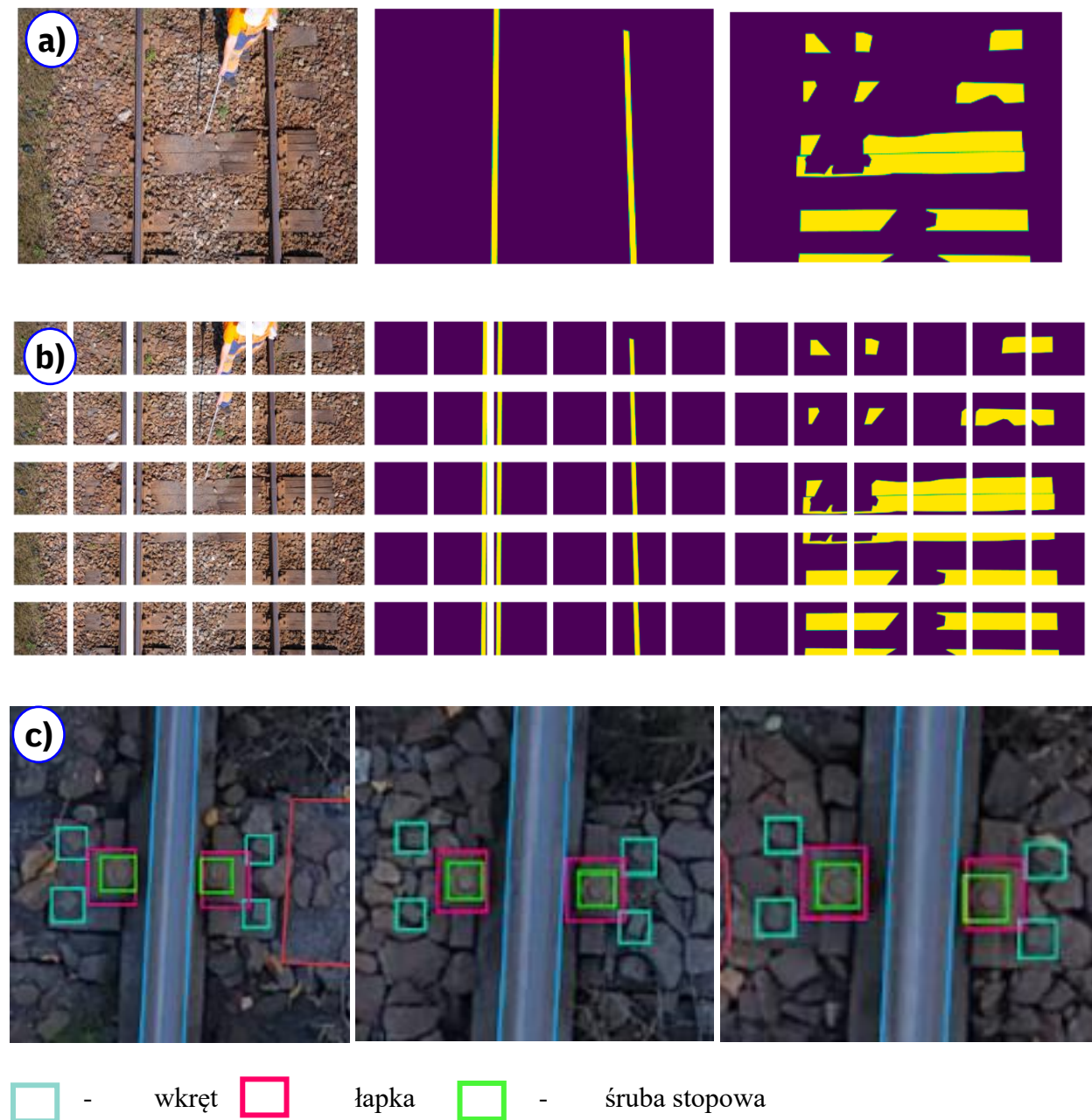
W drugim kroku badań nad możliwością rozpoznawania usterek infrastruktury kolejowej skupiono się na krytycznym z punktu widzenia bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego elemencie jakim są przytwierdzenia (mocowania) szyn do podkładów kolejowych. Te części infrastruktury często bywają niekompletne i ulegają uszkodzeniom. Bardzo często są przedmiotem kradzieży z uwagi na łatwy dostęp do śrub, łubków i wkrętów. To powoduje, że potencjalne usterki związane z uszkodzeniem mocowań mają istotny i bezpośredni wpływ na bezpieczne prowadzenie ruchu kolejowego. Na obszarze zarządzanym przez spółkę Infra Silesia S.A znajdują się dwa rodzaje przytwierdzeń: sztywne oraz sprężyste (rys. 27). Zdecydowaną większość mocowań stanowią przytwierdzenia sztywne typu K na podkładzie drewnianym (ponad 90%). Z tego względu, jak również z uwagi na bardziej skomplikowany charakter przytwierdzenia do jego rozpoznawania przez BSP przyjęto właśnie ten rodzaj przytwierdzeń do dalszych badań (rys. 27 a)).

Oznaczanie przytwierdzeń odbywało się w podobny sposób jak przy etykietowaniu podkładów i szyn. Spośród wykonanych przez BSP zdjęć wybrano te reprezentatywne, które posłużyły jako zdjęcia treningowe. Na tej podstawie dokonano oznaczeń poszczególnych elementów przytwierdzeń jakimi są wkręty, łapki i śruby stopowe. Te elementy powinny być rozpoznawalne przez algorytm tak, aby na późniejszym etapie ich brak mógł być identyfikowany jako usterka.

Rysunek 27. Rodzaje i schematy przytwierdzeń występujących na terenie Infracilesii S.A. [82, 83]

Przytwierdzenie sztywne	Przytwierdzenie pośrednie	Przytwierdzenie sprężyste
		
<p>a) Przytwierdzenie sztywne typu K na podkładzie drewnianym</p>	<p>b) Przytwierdzenie typu KS z łapką Skl 12 (Vossloh) na podkładzie drewnianym</p>	<p>c) Przytwierdzenie sprężyste typu SB na podkładzie betonowym</p>
		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Podkładka żebrowa</li> <li>2. Przekładka podszynowa</li> <li>3. Wkręt z pierścieniem sprężystym</li> <li>4. Łapka</li> <li>5. Śruba stopowa z pierścieniem sprężystym i nakrętką</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Szyna</li> <li>2. Przekładka podszynowa</li> <li>3. Podkładka żebrowa</li> <li>4. Łapka sprężysta Skl 12</li> <li>5. Śruba stopowa z pierścieniem sprężystym i nakrętką</li> <li>6. Podkładka płaska pod nakrętkę śruby stopowej</li> <li>7. Wkręt z pierścieniem sprężystym</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Kotwa</li> <li>2. Łapka sprężysta przytwierdzenia</li> <li>3. Wkładka dociskowa</li> <li>4. Przekładka izolacyjna</li> </ol>

W celu szybkiego odnajdywania miejsc z przytwierdzeniami szyn każde zdjęcie treningowe podzielono na segmenty i do dalszego oznaczania zdjęć przyjęto tylko, te które zawierały poszukiwane fragmenty (rys. 28). Następnie segment zdjęcia, na którym znajdowało się przytwierdzenie zostało poddane procesowi oznaczenia każdego elementu przytwierdzenia (rys. 28 c)).

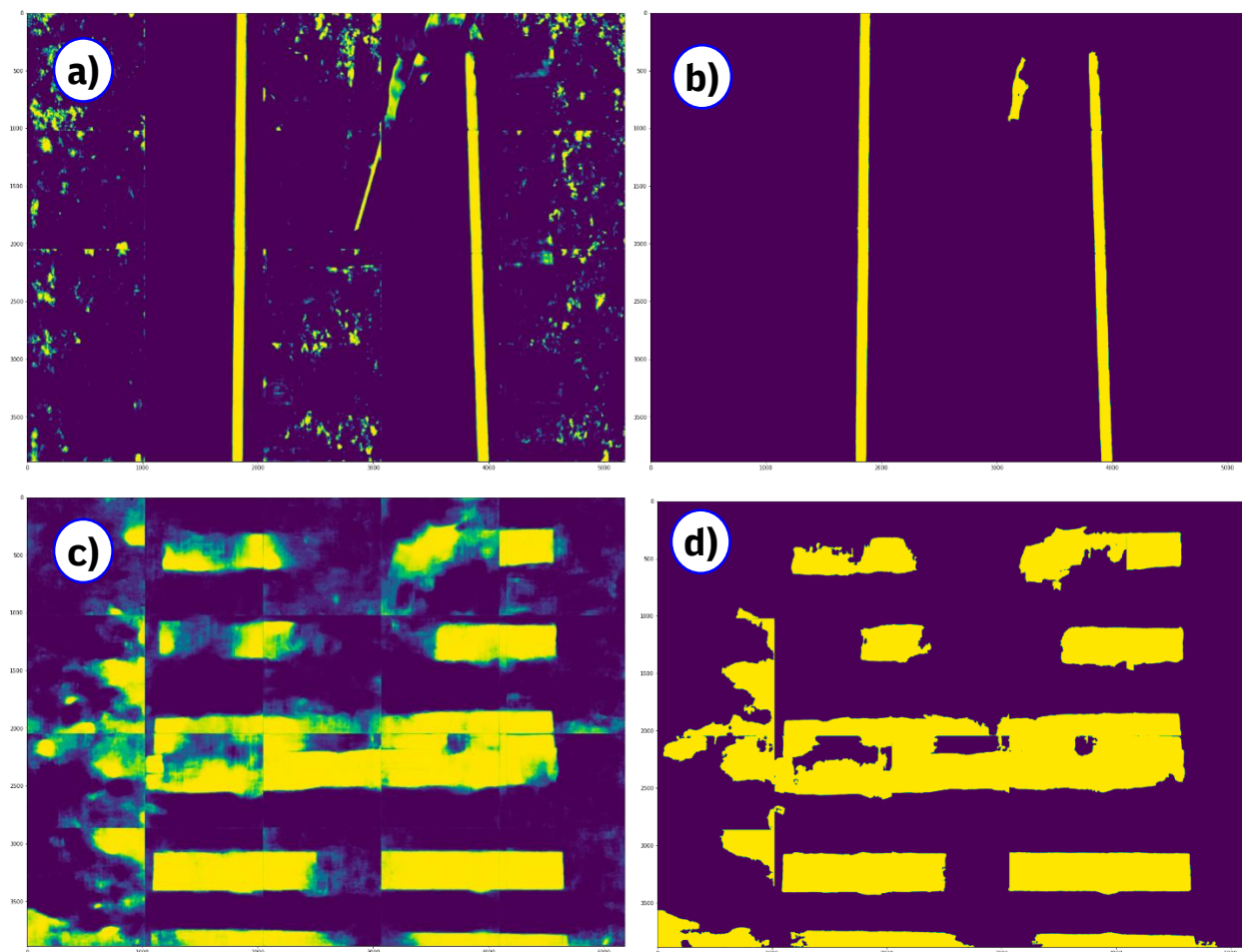


Rysunek 28. Segmentacja zdjęć testowych do oznaczania elementów przytwierdzeń.



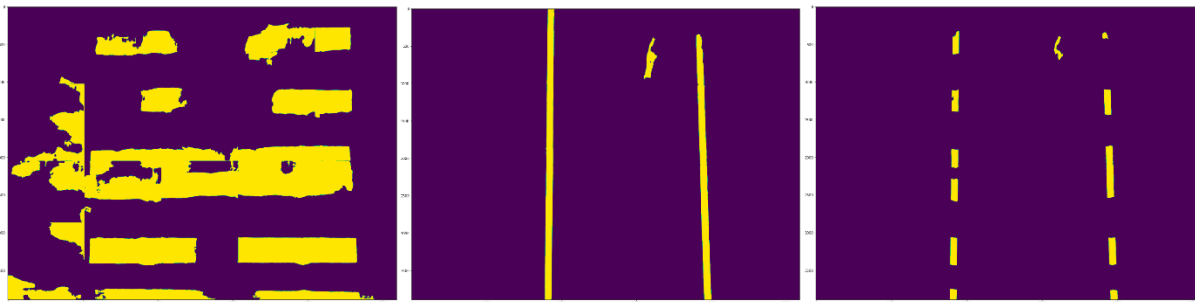
Poszczególnymi kolorami zaznaczono takie same elementy przytwierdzeń tak aby były one do rozróżnienia w późniejszej ich klasyfikacji i rozpoznaniu. Kolor zielony oznacza śrubę stopową z nakrętką, kolor różowy łapkę a kolor seledynowy oznacza etykiety wkretów.

Następnie zbudowano model detekcji elementów przytwierdzeń. Do tego celu ponownie zostały wykonane zdjęcia i opracowane na ich podstawie dwie maski, które powstały przy wykrywaniu podkładów i szyn (rys. 29). Po usunięciu szumów jakie znajdowały się na maskach (rys. 29 a) i c)) powstały ostatecznie maski oczyszczone do dalszego procesowania (rys. 29 b) i d)).



*Rysunek 29. Maski szyn i podkładów kolejowych.*

Mając do dyspozycji dwie maski z szynami i podkładami (rys. 29 b) i d)) można odnaleźć na nich sekcje, które wskazywać będą na miejsce znajdowania się przytwierdzeń: każde przecięcie podkładu z szyną jest miejscem wystąpienia poszukiwanych elementów przytwierdzenia.



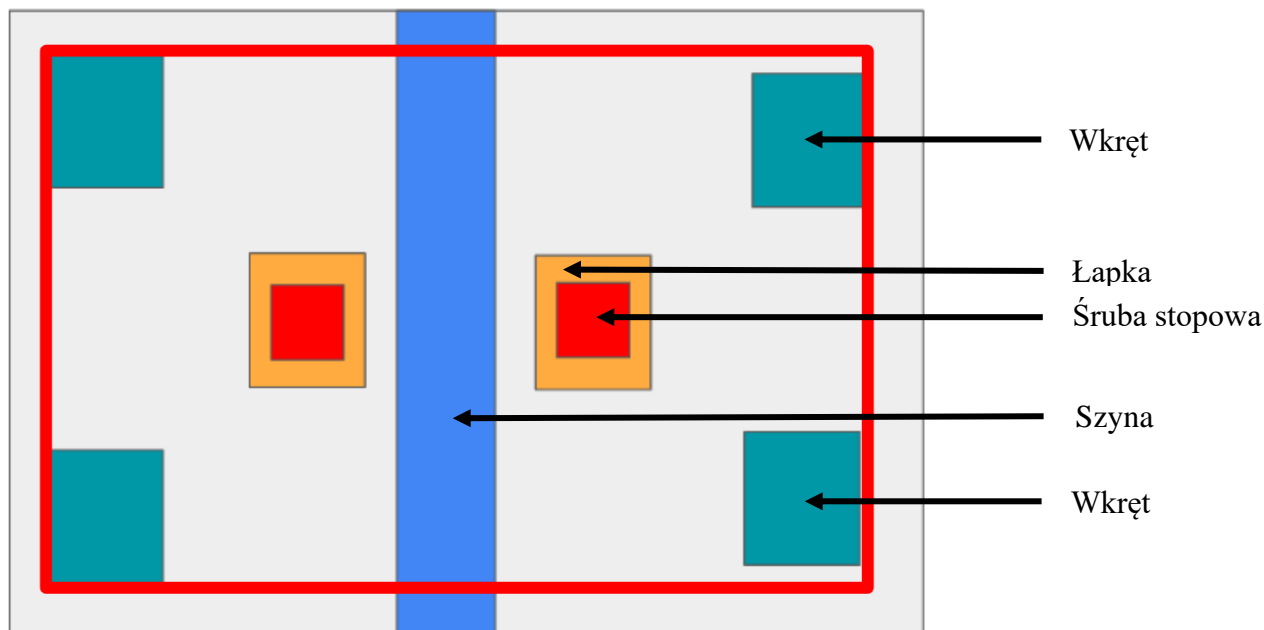
*Rysunek 30. Określenie sekcji i miejsc występowania przytwierdzeń*

Następnie zdefiniowano obszar do zbadania wokół sekcji (miejsce przecięcia się szyny i podkładu (rys. 31)) w celu sprawdzenia czy znajduje się na nim odpowiednia ilość badanych elementów przytwierdzenia.



*Rysunek 31. Wskazanie obszaru do analizy na przecięciu szyn i podkładów (tzw. checking box).*

W dalszej kolejności utworzono listę elementów jakie powinny być sprawdzane w obszarze wskazanym jako miejsce występowania przytwierdzenia. W każdym miejscu przytwierdzeń powinna znajdować się określona liczba elementów. W przypadku przytwierdzeń sztywnych typu K na podkładzie drewnianym, po każdej stronie szyny znajdują się: dwa wkręty, jedna łapka i jedna śruba stopowa z nakrętką (rys. 32).



Rysunek 32. *Checking box – obszar weryfikacji występowania elementów przytwierdzenia*

Jeśli w badanym obszarze będzie znajdowała się prawidłowa liczba poszczególnych elementów wówczas defekt nie będzie wskazany. Każde odstępstwo od tej reguły będzie traktowane przez algorytm jako anomalia i wystąpienie potencjalnej usterki przytwierdzenia, co zostanie zaraportowane w systemie, a obraz zapisany z nazwą danej usterki.

Do procesu wykrywania poszukiwanych elementów zastosowano detektor RetinaNet [84], który bardzo dobrze sprawdza się do rozpoznawania kształtów i przewiduje prawdopodobieństwo obecności danego obiektu w każdej pozycji przestrzennej. Dodatkowo użyto algorytmu *Anchor optimization* [85], aby uzyskać lepsze efekty przy poszukiwaniu małych elementów (śruby, wkręty) które nie zajmują dużej przestrzeni na zdjęciu. Trudność rozpoznawania małych elementów jest o tyle istotna, iż poszukiwane elementy znajdują się jeden na drugim tj. śruba stopowa znajduje się nad łapką. Aby nie usunąć obu elementów w przypadku braku jednego z nich zastosowano właśnie detektor RetinaNet, który dobrze sprawdza się w tego rodzaju detekcji obiektów.

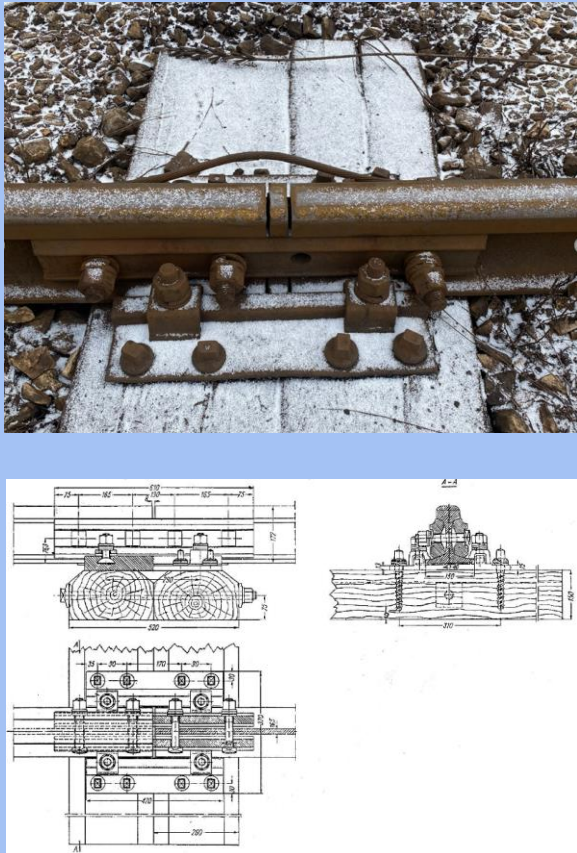
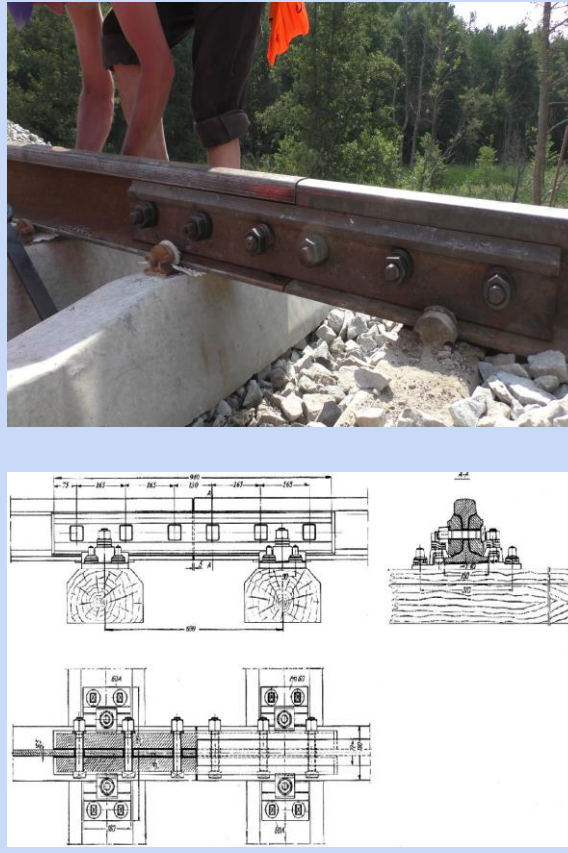
Przeprowadzone badania nad wykrywalnością przytwierdzeń szyn oraz usterek z nimi związanych wskazują, że nową metodę inspekcji przez BSP można uznać za możliwą do zastosowania w stosunku do tych elementów infrastruktury kolejowej. Zarówno wkręty, śruby stopowe oraz łapki są widoczne na zdjęciach i rozpoznawalne przez algorytm. W przypadku ich braku algorytm oznacza taką sytuację jako anomalię wymagającą zaraportowania jako usterki. Podczas badań zaobserwowano sytuacje, w których

algorytm błędnie zinterpretował brak danego elementu (śruby stopowej), pomimo iż w rzeczywistości śruba znajdowała się we właściwym miejscu. Powodami tego były inne nieprawidłowości infrastruktury, które wpłynęły na jakość interpretacji jakimi były zasypane tłuczniem lub zasłonięte roślinnością śruby stopowe. W takim przypadku uznaje się, że działanie algorytmu było prawidłowe a usterka po zweryfikowaniu przez służby techniczne zarządcy mogła zostać anulowana. W pozostałym zakresie nie zidentyfikowano nieprawidłowości w działaniu modelu rozpoznawania przytwierdzeń i wykrywaniu w nich usterek.

### 6.2.3. Oznaczanie i rozpoznawanie złącz podpartych, styków międzyszynowych, pęknięć szyn.

Ważnym elementem dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego, który jest przedmiotem oględzin podczas obchodów jest rozpoznanie pęknięć szyn i zachowanie odpowiednich odległości między szynami na ich połączeniu. Detekcja takich przypadków jest bardzo trudna przez BSP z uwagi na często słabo widoczne przypadki pęknięć, które są nawet niewidoczne podczas wykonujących obchody. W przypadku styków międzyszynowych konieczność dokonania pomiaru przerwy między szynami stanowi duże wyzwanie, które dodatkowo jest potęgowane zmieniającą się długością przerwy ze względu na zmianę długości szyn wynikającą ze zmiany temperatury. Złącza w torze klasycznym dzielimy na dwa typy [86] (rys. 33).

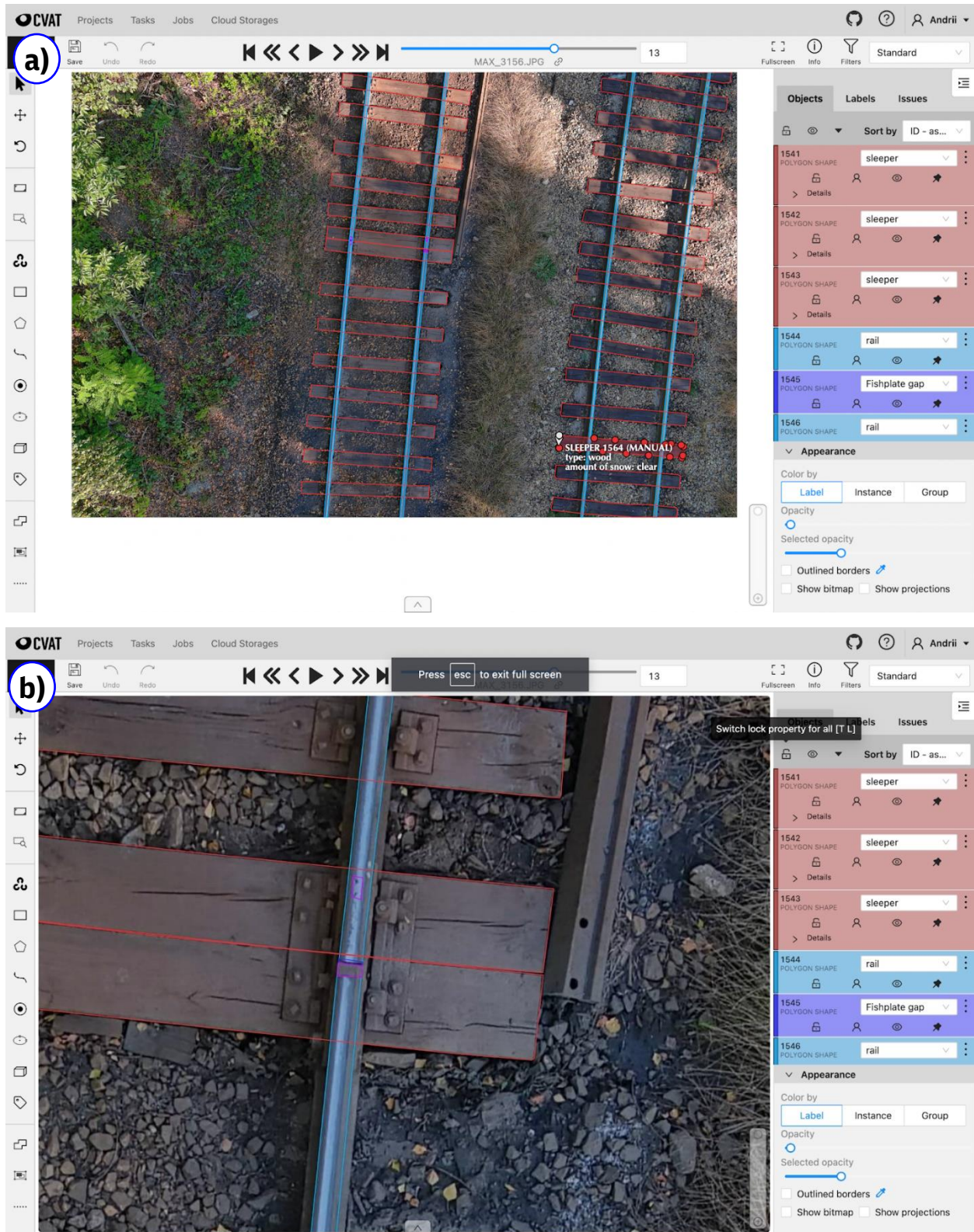
Na terenie Zarządcy infrastruktury występują jedynie złącza podparte, dlatego badania rozpoznawalności śrub łukowych wykonano na tym typie złącza. Kompletność śrub łukowych jest krytycznym elementem prawidłowego działania złącza. W związku z tym przedmiotem badania będzie oznaczanie, a następnie rozpoznanie kompletu śrub łączących. Brak całej śruby lub nakrętki będzie traktowany jako usterka złącza.

Złącza podparte	Złącza wiszące
<p>Złącza podparte na podwójnych podłączonych drewnianych podkładach. Do połączenia szyn użyto łubek oraz czterech śrub łubkowych.</p>	<p>Złącza wiszące przy nominalnym rozstawie podkładów. Do połączenia szyn użyto wzmocnionych łubek oraz sześciu śrub łubkowych.</p>
	

Rysunek 33. Rodzaje i schematy złączy. Fot.: wykonanie własne, Infra Silesia S.A.

Jak w przypadku rozpoznawania przytwierdzeń tak i w przypadku rozpoznawania śrub łubkowych proces rozpoznawania usterki rozpoczął się od wykonania zdjęć treningowych. Przyjęto założenie, że każde złącze znajduje się na podwójnych podkładach, dzięki czemu algorytm w pierwszej kolejności szuka na zdjęciu podwójnych podkładów przecinających się z szyną, a następnie śrub łubkowych (rys. 34 a) i b)).

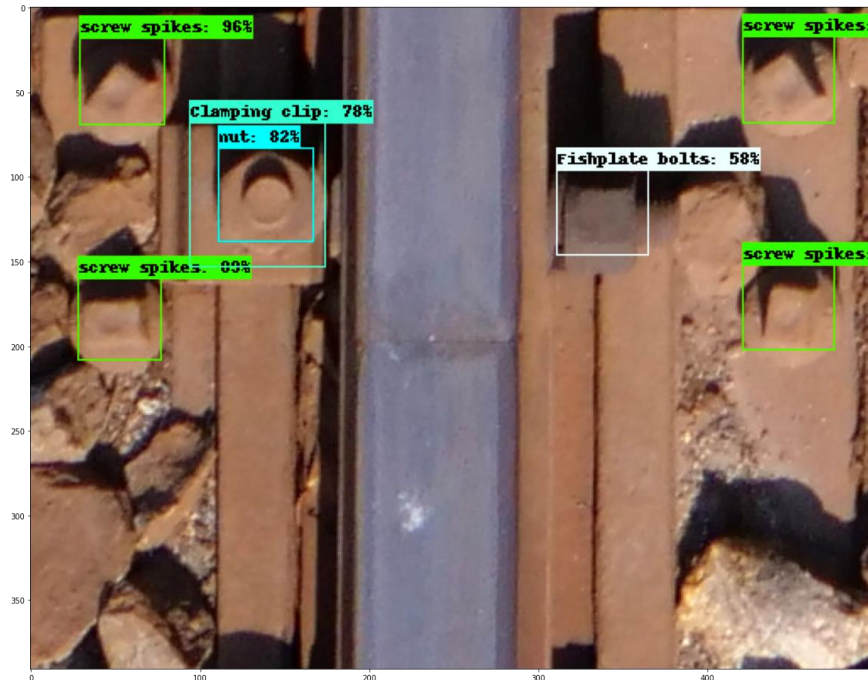
Analiza możliwości przeprowadzania oceny stanu technicznego infrastruktury kolejowej w oparciu o technologię bezzałogowych pojazdów, w tym pojazdów latających, M. Batko.






Rysunek 34. Oznaczenie podwójnych podkładów jako miejsc występowania złączy.

Na tej postawie wytrenowano algorytm do odnajdywania połączeń szyn i złącz podpartych. W związku z tym, że śruby łubkowe są małymi elementami z punktu widzenia ich rozpoznawania przez BSP, użyto do tego celu ten sam algorytm jak w przypadku rozpoznawania przytwierdzeń tj. RetinaNet wspierany przez model *anchor optimization*.

Następnie zdefiniowano jakie elementy znajdują się w prawidłowym złączu szyn i oznaczono je na zdjęciach w celu dalszego trenowania algorytmu do rozpoznawania usterek (rys. 35).



 - łapka (ang. *clamping clip*)  - wkręt (ang. *screw spikes*)  śruba stopowa (ang. *nut*)

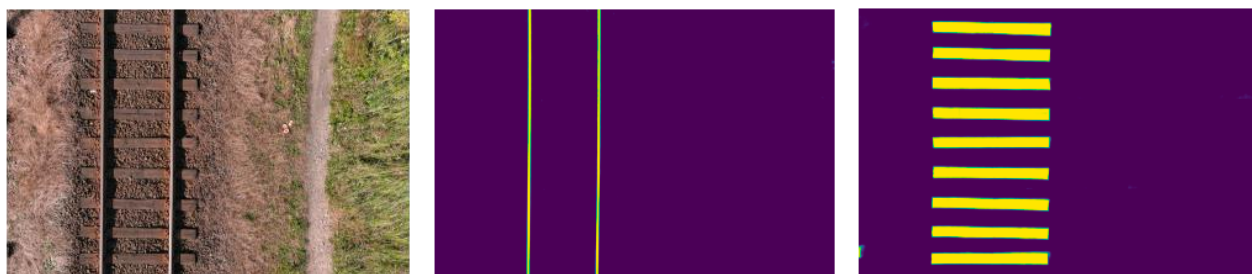
*Rysunek 35. Etykietowanie elementów złącza podpartego.*

Do wytrenowania algorytmu wykorzystano 431 przypadki sfotografowanych złączy, a następnie zweryfikowano ich rozpoznawanie na 46 przypadkach. Algorytm bardzo dobrze rozpoznaje śruby łubkowe na infrastrukturze. W przypadkach gdzie występuje zanieczyszczenie podsypki, roślinność lub zasypanie podkładów kamieniami, wówczas nie są wskazywane wszystkie elementy złącza, pomimo iż mogą one występować pod tłuczniem. Jednak takie wskazanie należy uznać za prawidłowe, ponieważ zgodnie z zasadami utrzymania infrastruktury podkłady powinny być widoczne razem z ich

przytwierdzeniami i złączami. W przeciwnym razie należy taką sytuację traktować jako usterkę wymagającą interwencji służb utrzymania infrastruktury.

Skuteczne rozpoznawanie złączy na infrastrukturze jest bardzo ważne do identyfikacji kolejnych ważnych elementów jakie są poddawane oględzinom podczas obchodów, a tym samym powinny być wykrywane podczas lotów BSP. Są to styki międzyszynowe oraz pęknięcia szyn.

Do wykrywania styków międzyszynowych wykorzystano dotychczasowe badania rozpoznawalności szyn, podkładów oraz elementów złączy podpartych. Wykorzystując model segmentacji szyn i podkładów kolejowych algorytm zwraca odpowiednią maskę tych obiektów (rys. 36).



*Rysunek 36. Segmentacja oraz maski szyn i podkładów kolejowych.*

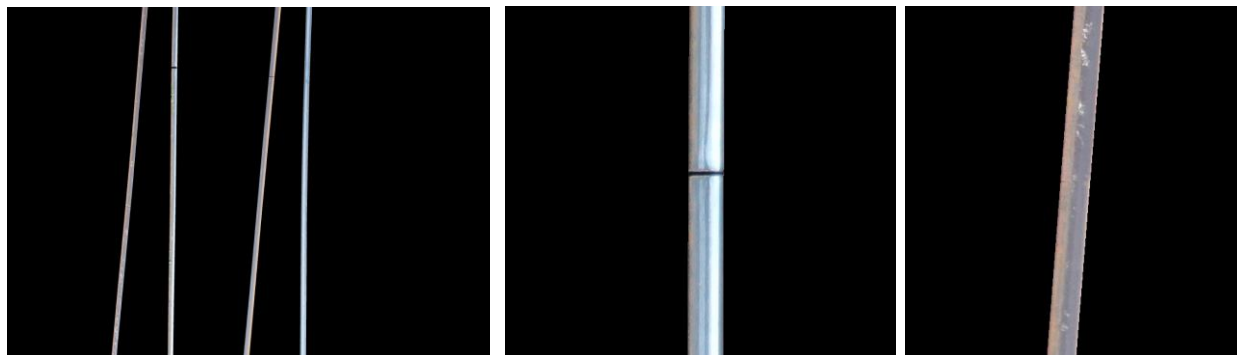
Następnie do wykrycia styków międzyszynowych wykorzystano segmentację wykonaną podczas wykrywania złączy podpartych oraz model detekcji małych obiektów używany przy rozpoznawaniu elementów mocowań szyn. Każde miejsce podparcia zawiera jedno miejsce styku między szynami, które może być zidentyfikowane (rys. 37). Mając już rozpoznane złącza podparte wytrenowano algorytm do poszukiwania styków między szynowych.



*Rysunek 37. Miejsca styków międzyszynowych na podparciu szyn.*

Znając maski szyn i podkładów w celu dobrego rozpoznawania połączeń, zastosowano kolejną maskę usuwając całe tło i wycinając segment zdjęcia wokół połączenia szyn (rys. 38).





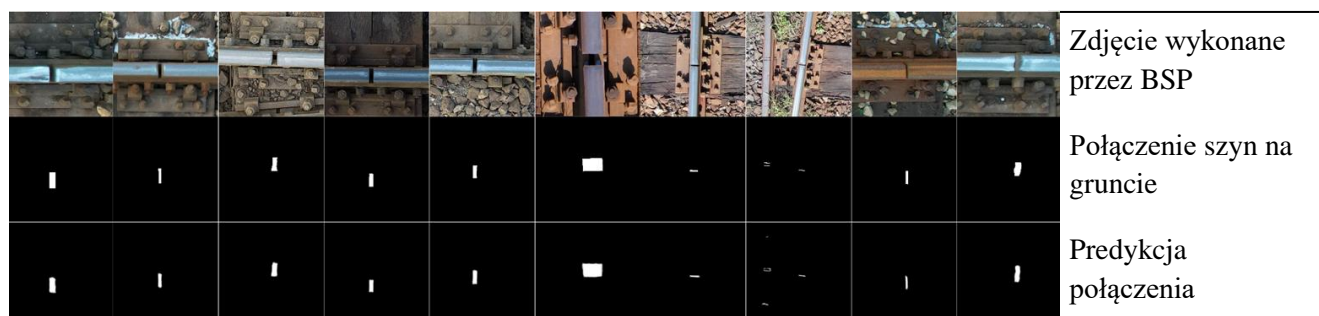
*Rysunek 38. Miejsca styków po zastosowaniu maski usuwającej tło zdjęcia.*

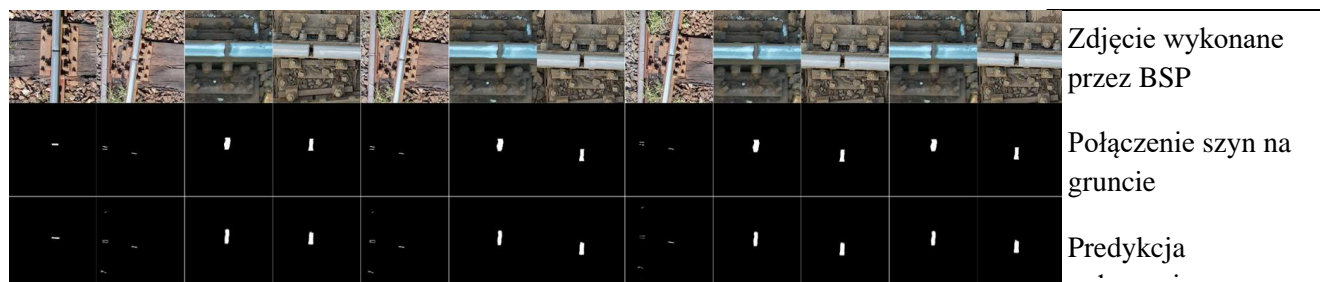
Następnie na podstawie wykonanych zdjęć treningowych oraz po usunięciu tła na tych zdjęciach dokonano oznaczenia miejsc styków szyn, które posłużyły do wytrenowania algorytmu (rys. 39).



*Rysunek 39. Etykietowanie zdjęć do trenowania algorytmu.*

Do wytrenowania algorytmu przyjęto 449 przypadki styków międzyszynowych i poddano weryfikacji rozpoznawanie styków na 36 przypadkach. Uzyskane wyniki rozpoznawalności połączeń szyn są bardzo dobre, czego dowodem jest wysoki poziom skuteczności predykcji miejsc wystąpienia połączeń szyn (rys. 40).





*Rysunek 40. Porównanie zdjęć i faktycznego styku szyn występującego w terenie z predykcją połączenia dokonaną przez algorytm.*

Z uwagi na fakt, że uzyskane wyniki potwierdzają rozpoznawalność szczelin o szerokości 1-2 mm, wykorzystano te badania do identyfikowania pęknięć główki szyny, co jest istotnym elementem sprawdzania stanu infrastruktury podczas obchodów. Sposób identyfikacji miejsc na szynie przez algorytm jest taki sam, jedynie zmianie uległo założenie, którym w przypadku pęknięć szyny jest dowolne miejsce znajdujące się na główce szyny. Przyjęto właśnie takie założenie, ponieważ trudnością w wytrenowaniu algorytmu do rozpoznawania pęknięć główki szyny jest to, że nie mam wiele takich przykładów na infrastrukturze, a algorytm można wytrenować tylko podając przykłady występowania podobnych anomalii jakie ma on w przyszłości automatycznie wykrywać. Dlatego do wytrenowania algorytmu przyjęto przykłady połączeń szyn. Ponadto do trenowania algorytmu można przyjęć utworzone wcześniej maski, na których zasymulowano pęknięcia szyn tworząc ich przykłady. Na obecnym etapie badań takie rozwiązanie jest wystarczające, ponieważ umożliwia wytrenowanie algorytmu. Wadą takiego rozwiązania jest to, że zdarza się że jako pęknięcia są rozpoznawane inne zjawiska, które takimi pęknięciami nie są. Mogą to być obiekty pozostawione przez człowieka, zabrudzenie główki szyny pozostawione przez zwierzęta lub roślinność. Na rysunku 41 przedstawiono przykład pozornego pęknięcia, które zostało tak zinterpretowane przez algorytm. Zdjęcie 41 a) przedstawia obraz uzyskany przez BSP, na zdjęciu 41b) oznaczono faktyczne miejsca szczelin pomiędzy szynami, które w tym przypadku prawidłowo określają miejsce styku szyn (połączenie na podwójnym podkładzie, wszystkie 4 śruby łukowe występują prawidłowo co oznacza, że jest to prawidłowe połączenie dwóch szyn na złączu podpartym). Jednakże na rys 41 c), przedstawiającym predykcję wykonaną przez algorytm widać jeszcze 3 inne miejsca na główce szyny, które rozpoznane zostały jako pęknięcia, ponieważ nie występują na złączu podpartym. W rzeczywistości miejsca te stanowiły źdźbła trawy i jej cienie rzucane na główkę szyny, które na wykonanym zdjęciu poddanym analizie przez

algorytm wyglądają tak jak szczeliny lub pęknięcia szyny. Jest to nieprawidłowa interpretacja algorytmu, która powinna być usunięta podczas kolejnych badań i procesu uczenia algorytmu.



*Rysunek 41. Rozpoznane pozorne pęknięcia główki szyny.*

Mimo tego uzyskany wynik jest potwierdzeniem dużej skuteczności i precyzji w wykrywaniu obiektów przez algorytm. Przy wdrożeniu do stosowania nowej metody inspekcji na obszarze infrastruktury Infra Silesia S.A. przyjmuje się to rozwiązanie za wystarczające na obecnym etapie. Wykrywane są przerwy i pęknięcia na głowce szyny, a nawet jeśli są one pozorne jak przedstawiono na rys. 41 to przedstawiają one defekt, który powinien zostać naprawiony przez służby utrzymania zarządcy. Roślinność występująca w międzytorzu jest zjawiskiem nieprawidłowym i powinna być usunięta. Ponadto raport z wystąpienia takiej usterki może być bardzo szybko zweryfikowany przez toromistrza na gruncie lub poprzez analizę wykonanego przez BSP zdjęcia, co jednoznacznie może potwierdzić lub wyeliminować podaną przez algorytm usterkę.

Podsumowując wykrywanie śrub łubkowych, styków międzyszynowych oraz pęknięć należy uznać za osiągnięte z wysokim stopniem skuteczności, który jest na poziomie wystraszającym do wdrożenia nowego rozwiązania inspekcji infrastruktury. Podczas badań zaobserwowano jednak następujące trudności:

- w przypadku niewielkich szczelin między szynami (<1 piksel) nie można rozpoznać szczeliny. Jeżeli w miejscu występowania złącza podpartego algorytm nie zidentyfikował styku szyn wówczas zostanie to odnotowane jako usterka (brak, zbyt mała szczelina między szynami),
- inne elementy leżące na szynie lub nierówne krawędzie szyn na ich styku – zdarza się, że na skutek zużycia eksploatacyjnego końcówki szyn są ułamane. Wówczas algorytm rozpoznaje

szerszy dystans pomiędzy szynami aniżeli jest w rzeczywistości, a takie zjawisko jest raportowane jako usterka.

Rezultaty przeprowadzonych badań nad identyfikowalnością szczelin między szynami wskazują, że na podstawie wykonanych zdjęć przez BSP można dokonywać pomiarów długości przerwy między dwoma szynami. Jest to ważny element z punktu widzenia bezpiecznego prowadzenia ruchu kolejowego. Pomiar szczeliny może także zostać wykorzystany do raportowania usterki polegającej na zbyt dużej (większej niż określono w instrukcji utrzymania infrastruktury) przerwy między szynami, co może być skutkiem usterki lub kradzieży szyn. Ta funkcjonalność nowego systemu będzie mogła być osiągnięta w dalszych etapach badań.

### 6.2.3. Pomiar rozstawu szyn

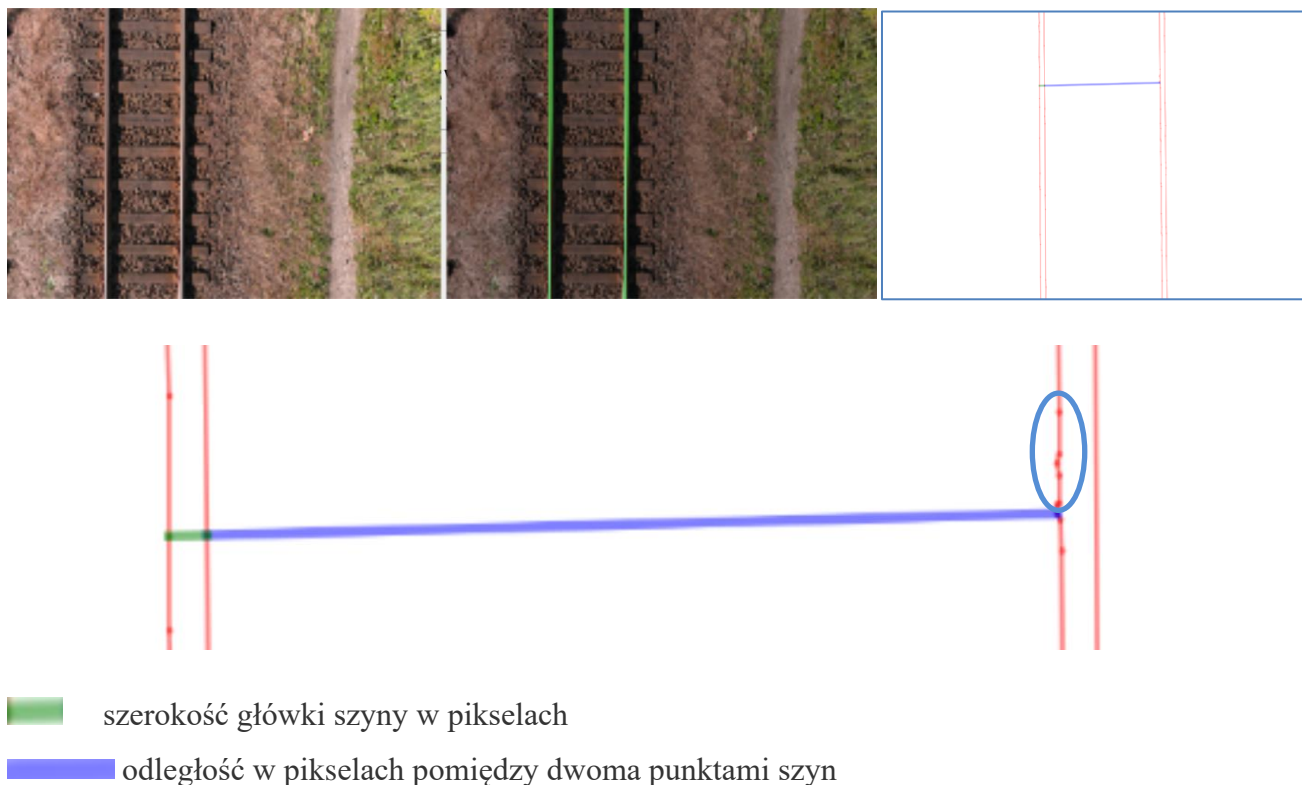
Podczas wykonywania obchodów pracownik jest zobowiązany do oceny czy nie doszło do deformacji lub wybożenia toru. Zjawisko to nasila się szczególnie w warunkach letnich kiedy temperatura otoczenia jest wysoka a styki międzyszynowe nieprawidłowo wyregulowane powodują, że na skutek rozszerzalności cieplnej szyn dochodzi do ich odkształcenia i tzw. wybożenia. Jest to niebezpieczne zjawisko, które może doprowadzić do wykolejenia lokomotywy lub składu pociągu. Linie normalnotorowe na terenie Infra Silesii S.A. (jak również większości zarządców w Polsce) charakteryzują się rozstawem szyn 1435 mm. Wartości dopuszczalnych odchyłek w przypadku pomiaru rozstawu szyn zależą od dopuszczalnej prędkości na danej linii (Tabela 10).

*Tabela 10. Wartości dopuszczalnych odchyłek podstawowych parametrów toru w zależności od maksymalnej prędkości [62].*

Prędkość [km/h]	Różnica w nominalnej szerokości toru [mm]	
40	+20	-9
30	+25	-9
20	+35	-10



Znając szerokość główki szyny (134 mm) oraz obliczając liczbę pikseli na zdjęciu pokrywającą szerokość główki szyny można obliczyć szerokość piksela. Następnie po ustaleniu liczby pikseli pomiędzy szynami i mnożąc ją przez znaną już szerokość piksela obliczono rozstaw szyn występujący na badanym zdjęciu (rys. 43).



*Rysunek 43. Pomiar rozstawu szyn: a) zdjęcie oryginalne, b) oznaczenie szyn na zdjęciu, c) nałożenie maski określającej toki szyn, d) ustalenie liczby pikseli pomiędzy główkami szyn.*

Przeprowadzone badania nie przyniosły akceptowalnych rezultatów z uwagi na dużą niedokładność pomiaru. Na wybranej losowo próbie pomiarów ustalone wartości rozstawu szyn wynosiły od 1369,69 mm do 1611,00 mm, podczas gdy w terenie rozstaw szyn mieścił się w dopuszczalnych wymiarach (tab. 11).

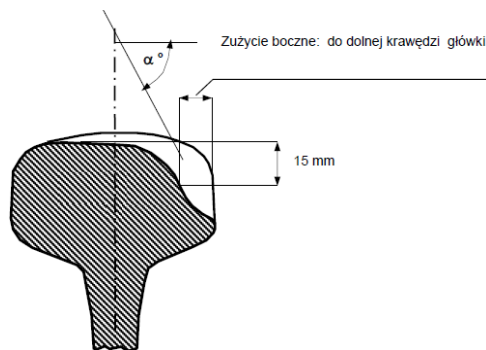
*Tabela 11. Szerokość rozstawu szyn obliczona na podstawie szerokości główki szyny*

Numer pomiaru	Obliczony rozstaw szyn [mm]
1	1611,00
2	1412,56
3	1483,46
4	1398,58
5	1470,70
6	1395,12
7	1466,35
8	1375,72
9	1526,29
10	1369,69

Źródło: opracowanie własne.

Na błąd pomiarowy złożyły się w szczególności następujące przyczyny:

- Krawędzie szyn nie są idealnie równe przez co dystans pomiędzy szynami mógł być zawężony (jeśli punkty pomiarowe były zbliżone do osi toru) lub poszerzony (jeśli punkty pomiarowe były oddalone od osi toru w kierunku osi główki szyny) (rys. 43 zaznaczenie)
- Krawędzie szyny nie posiadają ostrych krawędzi przez co na zdjęciach trudno jest jednoznacznie określić od którego piksela należy liczyć krawędź główki szyny do obliczenia ilości pikseli mieszczących się na główce szyny. Główka szyny może podlegać zużyciu eksploatacyjnemu (rys. 44) przez co zmienia z biegiem czasu swój kształt od wewnętrznej strony toru. Powoduje to, że pomimo iż automatyczny odczyt wartości pikseli stanowiących o szerokości główki szyny jest prawidłowy to jednak zużycie główki szyny powoduje, że nie jest to wartość stała, więc nie może stanowić punktu odniesienia. Z tego powodu powstaje błąd w obliczeniach rozstawu szyn.



Rysunek 44. Dopuszczalne zużycie główki szyny [62].

- Zdarza się, że szyny w miejscu pomiaru są uszkodzone i wówczas pomiar szerokości piksela na podstawie założonej szerokości główki szyny jest nieprawidłowy.

Podsumowując pomiar rozstawu szyn jest możliwy na podstawie odniesienia do szerokości główki szyny, jednakże jest na tyle niedokładny, że nie może stanowić podstawy do jednoznacznego ustalenia czy doszło do poszerzenia lub zwężenia szerokości toru. Wynik nie jest miarodajny. Konieczne jest prowadzenie dalszych badań i poszukiwanie skutecznego i w pełni wiarygodnego sposobu mierzenia rozstawu szyn z powietrza przez BSP. Wykonane zdjęcia przedstawiają bardzo dokładny obraz toru dlatego alternatywnym sposobem sprawdzenia równoległości szyn oraz wystąpienia wyboczeń może być przeglądnięcie przez pracownika zarządcy materiału fotograficznego. Można również rozważyć wykonanie ortofotomapy, która całościowo przedstawi obraz toru na dłuższym odcinku.

#### 6.2.4. Pomiar krótkich wstawek szyn oraz odległości pomiędzy szynami na ich styku

Kolejnym elementem wymagającym weryfikacji przez obchodowego jest sprawdzenie występowania tzw. krótkich wstawek szyn. Zgodnie z instrukcją zarządcy Infra Silesia S.A. [62] występują one wtedy gdy szyna ma mniej niż 6 m długości. Powstaje wówczas m.in. ryzyko wyrwania szyny z mocowania co jest sytuacją potencjalnie niebezpieczną z punktu widzenia prowadzenia ruchu pociągów. Dotychczas badania możliwości inspekcji z powietrza za pomocą BSP opierały się na wykonywaniu wysokiej jakości zdjęć, które były wykonywane „na zakładkę” w celu uzyskania dobrej jakości ciągłego obrazu infrastruktury. Z powodu nakładania się zdjęć trudno jest ustalić długość szyn na kilku odrębnych zdjęciach. Dlatego zdecydowano wykorzystując dostępne narzędzia i utworzyć na podstawie wykonanego materiału ortofotomapę, która pokaże w całości długi odcinek toru. Mając już opracowaną metodę rozpoznawania złącz podpartych, co szczegółowo opisano w rozdziale 6.2.3 niniejszej pracy, należało sprawdzić czy na wykonanej ortofotomapie możliwe jest również rozpoznanie



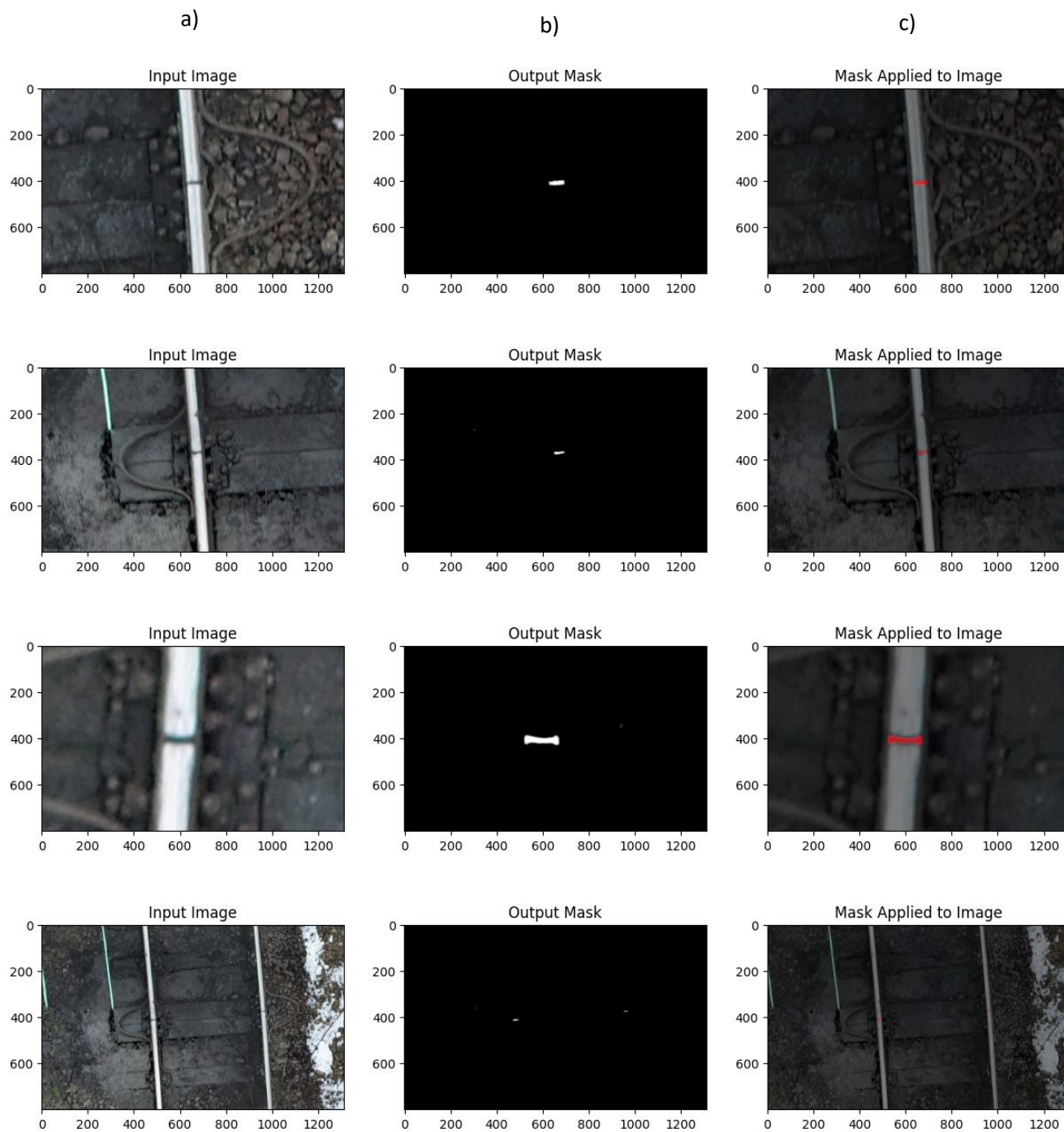
połączenia szyn. W tym celu zebrano materiał zdjęciowy dronem AIR 2S i opracowano ortofotomapy z odcinkami linii kolejowej będącej w zarządzie Infrasislesia S.A. (rys 45).



*Rysunek 45. Ortofotomapa odcinka linii kolejowej Infra Silesia S.A. nr 216  
KWK Marcel-Rybnik Towarowy.*

Podobnie jak przy rozpoznawaniu mocowań i złączy szyn, wykorzystując model segmentacji oraz wytrenowany już algorytm do wyznaczania mocowań szyn i śrub łukowych rozpoznano przerwy między szynami. Po analizie obrazu, algorytm zwracał maskę z zaznaczonym miejscem połączenia (rys. 46 b)). Kolejnym etapem było naniesienie miejsca połączenia szyn na ortofotomapę w miejscu jego rozpoznania (rys. 46 c)).

Następnie wykorzystując metodę do obliczania rozstawu szyn, mając za punkt odniesienia główkę szyny, można dokonać pomiaru długości szyny pomiędzy jej połączeniami z sąsiednimi szynami. Tak jak przy pomiarze prześwitu toru powstanie błąd pomiarowy, jednak przy pomiarze tzw. krótkich wstawek nie ma to tak istotnego znaczenia. Nawet przy błędzie pomiaru tzw. krótkiej wstawki (szyny o długości  $<6$  m) wynoszącym  $\pm 1$  m będzie można ponownie dokonać sprawdzenia materiału zdjęciowego lub w ostateczności upewnić się bezpośrednio w terenie jaka dokładnie jest długość odcinka szyny. Jeśli błąd pomiarowy powstanie przy typowej długości szyny wynoszącej ok. 30 m lub więcej, błąd ten nie będzie brany pod uwagę przy tak długim odcinku szyny, ponieważ nie dotyczy to tzw. krótkiej wstawki szyn.



*Rysunek 46. Rozpoznawanie styków między szynami: zdjęcia a) oryginalne zdjęcie, b) maska z rozpoznaniem stykiem, c) naniesienie miejsca styku szyn na ortofotomapę.*

Drugą możliwością zmierzenia odległości pomiędzy stykami szyn jest policzenie ilości podkładów jakie znajdują się pomiędzy stykami. Jak wykazano w rozdziale 6.2.1. model algorytmu bardzo dobrze

dokonuje oznaczania oraz identyfikacji podkładów kolejowych. Zakładając, że tor położony jest zgodnie z przepisami prawa budowlanego i projektem technicznym, podkłady znajdują się w równych odstępach pomiędzy sobą to możliwe jest obliczenie ilości podkładów jakie znajdują się pomiędzy podparciami szyn (pomiędzy podwójnymi podkładami drewnianymi). Jeżeli zidentyfikowana przerwa między szynami będzie rozpoznana w odległości mniejszej niż 6 m oznacza to usterkę. Ten sposób pomiaru nie był przedmiotem badań, a stanowi proponowane alternatywne rozwiązanie do pomiaru odległości w oparciu o szerokość główki szyny.

Podsumowując, mierzenie długości szyn w celu ustalenia występowania tzw. krótkich wstawek na podstawie indywidualnych zdjęć jest bardzo utrudnione lub nieracjonalne z praktycznego punktu widzenia z powodu bardzo dużego koniecznego nakładu pracy. Możliwym jest mierzenie odcinków szyn na podstawie ortofotomapy, na której są rozpoznane i oznaczone a następnie mierzone odcinki szyny pomiędzy połączeniami.

#### 6.2.5. Rozpoznawanie wybuksowań szyn

Niepożądanym zjawiskiem występującym na szynach są tzw. wybuksowania. Powstają one na skutek niewłaściwej obsługi lokomotywy lub z powodu wystąpienia trudnych warunków atmosferycznych, kiedy główka szyny jest wilgotna lub oblodzona gdy podczas ruszania lokomotywy z ciężkim składem dochodzi do rolowania kół lokomotywy, co powoduje podtopienie główki szyny pozostawiając charakterystyczne wgłębienia (rys. 47).



*Rysunek 47. Przykład wybuksowania główki szyny w stacji Sosnowiec Jęzor JCA.*

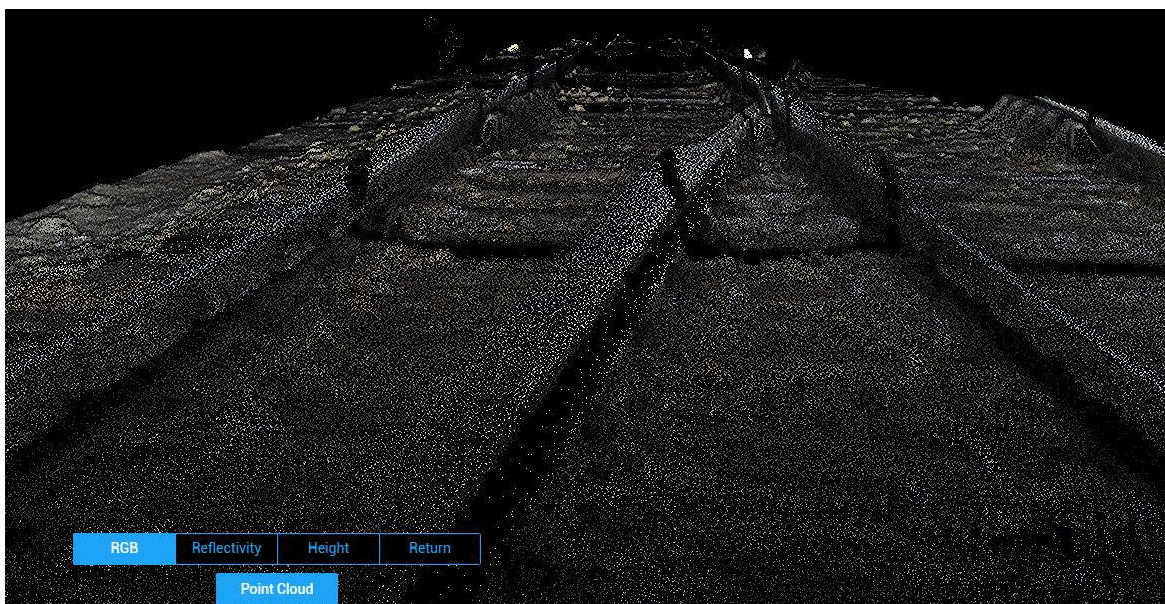
Miejsca wybuksowań są na tyle małe i nieregularnych kształtów, że bardzo trudno je zauważyć i często są mylone zabrudzeniami, kamieniami, liśćmi jakie mogą znajdować się na główce szyny. Trudność etykietowania takich miejsc i w konsekwencji wytrenowania na tej podstawie algorytmu spowodowała brak wymaganej jakości i powtarzalności przy rozpoznawaniu tej usterki na wstępnym etapie badań. Dlatego zdecydowano przetestować inną metodę identyfikacji wybuksowań tj. skanowanie laserowe w technologii LIDAR. Na podstawie zmian długości fal emitowanych przez laser oraz różnic w czasie powrotu wiązki można określić odległości pomiędzy mierzonymi obiektami. To w rezultacie pozwala na stworzenie modelu 3D terenu, (w tym przypadku główki szyny), na którym został przeprowadzony skaningu laserowy wykazując miejsca gdzie doszło do uszkodzeń (wgłębień) szyny. Skanery LIDAR mają możliwość integracji skanera z aparatem fotograficznym, co umożliwia skanowanie laserowe z jednoczesnym wykonywaniem zdjęć, które można późniejszym etapie dodać do chmury punktów w postaci dodatkowego atrybutu, tj. koloru punktu. Dane uzyskane za pomocą LIDAR'A mogą w późniejszym etapie służyć do wielu innych celów niż identyfikacja wybuksowań m.in. do oceny stanu sieci trakcyjnej, prac projektowych dotyczących linii kolejowej [128], analizy stanu roślinności w skrajni toru [127].

Przedmiotem badania z wykorzystaniem skanera LIDAR było wykonanie:

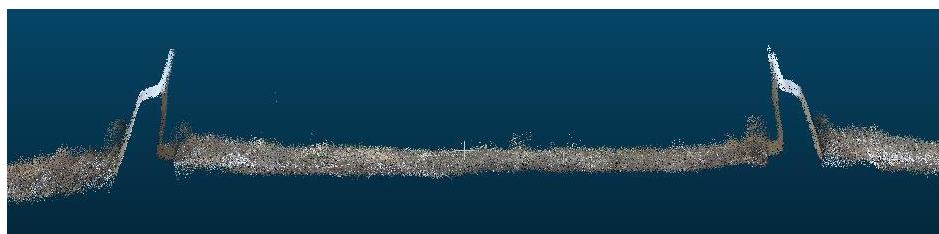
- a) skanu linii kolejowej i przetworzenia surowych danych z nalogów fotogrametrycznych za pomocą bezzałogowego statku powietrznego DGI Martice 300 RTK ze skanerem lotniczym Zenmuse L1,
- b) analizy surowych danych pod kątem poprawności ich pozyskania i przetworzonych do chmur punktów pod kątem ich przydatności do precyzyjnego wyznaczania geometrii szyn kolejowych oraz wykrywania wad technicznych i uszkodzeń szyn w postaci wybuksowania,
- c) filtracji i optymalizacji chmury punktów w celu możliwie najlepszej poprawy jakości i dokładności odwzorowania geometrii szyn oraz uszkodzeń w postaci wybuksowań.

Loty fotogrametryczne zostały wykonane w dwóch lokalizacjach: na terenie stacji Marcel oraz Sosnowiec. Niestety z uwagi na występowanie problemu przerywanej transmisji GNSS RTK, co skutkowało brakiem możliwości wyznaczenia precyzyjnej trajektorii lotu BSP niezbędnej do przetworzenia danych skaningu, dane z lotów nad stacją Marcel są niekompletne i nie ma możliwości ich przetworzenia. W badaniach oparto się na danych ze stacji Sosnowiec Jęzor, które zawierają kompletne i poprawne dane pozwalające na przetworzenie do chmury punktów. Uzyskano następujące wyniki analizy:

- a) chmura punktów nie odwzorowuje poprawnie większości główek szyn. Wierzchołek główki jest silnie zniekształcony (rys. 48, 49). Zamiast obłej powierzchni uzyskano na chmurze kształt przypominający trójkątne „ostrze” o wysokości około 2 razy większej niż faktyczna wysokość szyny. Efekt występuje na większości szyn poza odcinkami nieużywanych szyn z główką pokrytą rdzą. Główną przyczyną tego efektu jest bardzo gładka, metaliczna powierzchnia górnej powierzchni szyn, która odbija promień lasera. To zaburza odczyt punktu odbicia, ponieważ skaner jest przystosowany do pomiaru powierzchni matowych, które słabo odbijają światło jego lasera,
- b) szyny na chmurze punktów są pochylone w kierunku z którego wykonywano skanowanie,
- c) gęstość chmury punktów jest wysoka. Wynosi około 31 500 punktów/m<sup>2</sup> czyli około 1 punkt na 6 mm terenu.

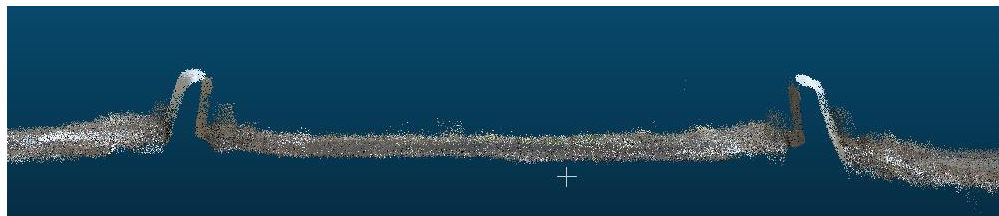


*Rysunek 48. Fragmenty przetworzonej chmury punktów z widocznym błędnym odwzorowaniem główek szyn.*

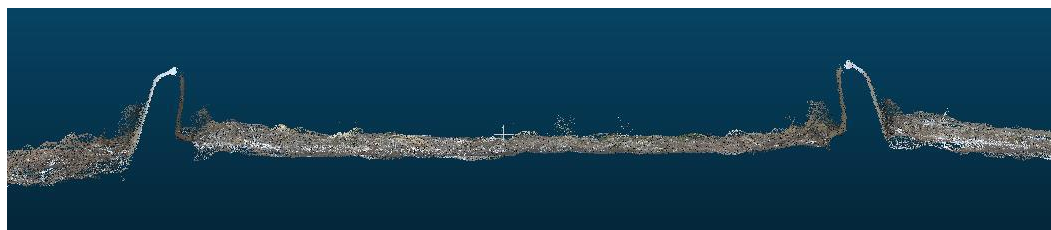


*Rysunek 49. Przekrój poprzeczny przez torowisko z widocznym błędnym odwzorowaniem główek szyn.*

W celu weryfikacji przydatności pozyskanej chmury punktów wykonano jej optymalizację. W pierwszym kroku poprzez segmentację i odfiltrowanie usunięto błędne punkty zniekształcające główki szyn (rys. 50). W kolejnym kroku wykonano wygładzanie chmury punktów w celu zniwelowania szumu danych (rys. 51).



Rysunek 50. Przekrój poprzeczny przez torowisko na odfiltrowanej chmurze punktów.



Rysunek 51. Przekrój poprzeczny przez torowisko na odfiltrowanej i wygładzonej z szumu chmurze punktów.

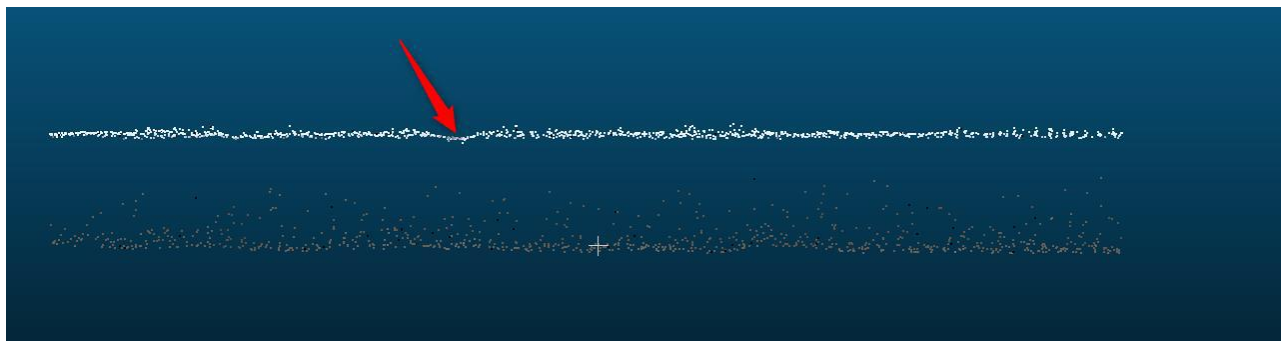
W wyniku wykonanych przetworzeń uzyskano chmurę punktów pozbawioną części błędów w i szumu. Pozostały zniekształcenia i braki danych których nie da się usunąć ze względu na brak danych o kolorze dla części obszaru chmury oraz zniekształcenie szyn związane z kątem, wysokością i sposobem skanowania. Poważnym utrudnieniem w pozyskaniu prawidłowych danych była występująca gładka główka szyny, która na skutek powstawania odbłasku powoduje błędne odczyty skanera.

W analizowanych materiałach zostały wykryte wybuksowania. Zostały one stwierdzone na zdjęciach wykonanych kamerą wizyjną (rys. 52, 54), a następnie potwierdzone po analizie chmury punktów pochodzącej ze skanowania LIDAR'em (rys. 53, 55). Analiza zebranego materiału pozwala stwierdzić, że jest możliwe wykrywanie tego rodzaju anomalii z użyciem urządzenia typu LIDAR, natomiast należy zmienić formę nalotów nad infrastrukturą oraz ich ilość. Naloty powinny być wykonane w więcej niż w jednym szeregu w taki sposób, żeby dron leciał po kilku (minimum dwa) równoległych do siebie liniach po obu stronach toru, aby zasięg poprzeczny skanowania pokrywał się ze sobą na

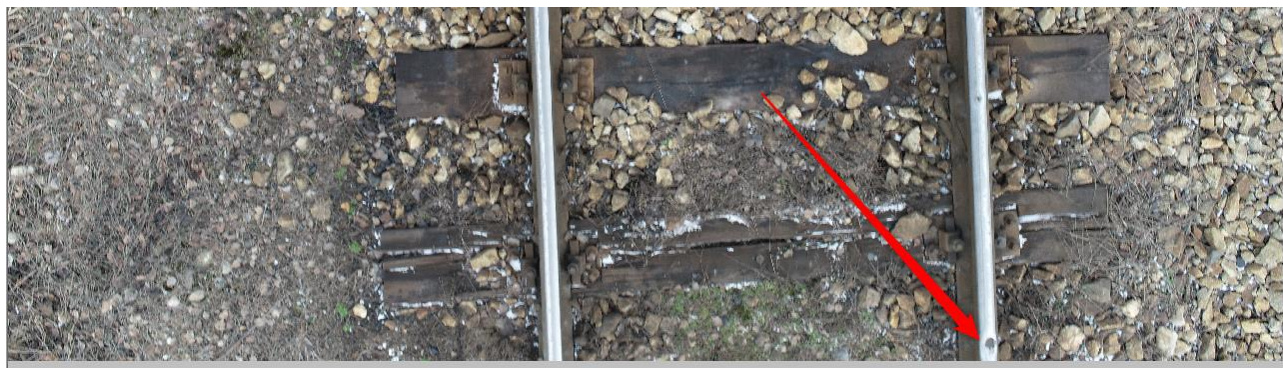
szerokości badanego toru. To pozwoli otrzymać wykonany skan obu szyn z obu stron i zniwelować potencjalne błędy odwzorowania błyszczącej powierzchni szyn. Na skutek tego zaangażowanie czasu pracy BSP do wykrycia tej usterki jest duże co powoduje, że ta metoda rozpoznawania wybuksowań nie jest efektywna i należy poszukiwać nadal innych metod jej identyfikacji.



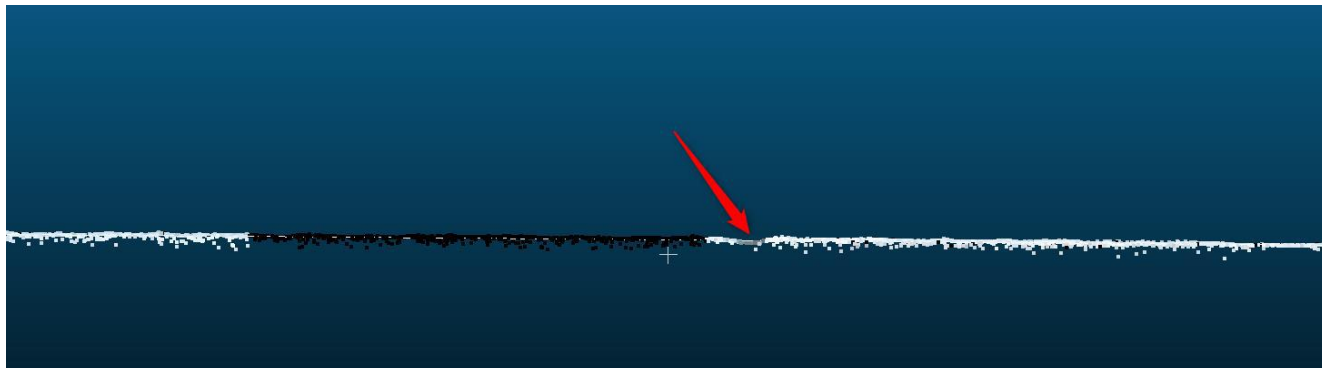
*Rysunek 52. Zdjęcie z nalogu tradycyjnego.*



*Rysunek 53. Chumra punktów z widocznym wybuksowaniem*



*Rysunek 54. Zdjęcie z nalogu tradycyjnego*



*Rysunek 55. Chmura punktów z widocznym wyboksowaniem.*

Podsumowując badania rozpoznawalności szyn i wyboksowań za pomocą skanera LIDAR stwierdzono:

- a) zdjęcia zostały wykonane zgodnie z aktualną wiedzą i standardami technicznymi w dziedzinie fotogrametrii,
- b) część lotów należy poprawić i doskonalić pod względem skanowania obiektów tj. zapewnić ich skanowanie z kilku stron. Konieczne jest zachowanie pokrycia wzajemnego sąsiednich zdjęć,
- c) pozyskanie skany mają wystarczającą gęstość chmury punktów do wykrycia uszkodzeń szyn w postaci wyboksowania jednak ze względu na technologię wykonywania skaningu nie są dobrym materiałem do rozpoznawania tych usterek,
- d) dane ze skanera Zenmuse L1 po przetworzeniu do chmur punktów w dedykowanym programie Terra muszą zostać poddane obróbce mającej na celu filtrację błędnych punktów i usunięcie szumów,
- e) szkodliwa dla jakości danych jest wysoki odbłask skanowanych powierzchni. Należy unikać skanowania, gdy obiekty są wilgotne lub oblodzone (odblask powierzchni),
- f) możliwe jest wykrycie wyboksowań przy zastosowaniu odpowiedniej ilości i formy nalołów. Jest to jednak proces wydłużający istotnie czas inspekcji infrastruktury i należy kontynuować badania nad udoskonaleniem skaningu za pomocą LIDAR'a i jednocześnie trenować algorytm do wyszukiwania faktycznych wyboksowań, co może okazać się metodą bardziej efektywną do detekcji tej usterki.

### 6.3. Wyniki rozpoznawania elementów infrastruktury

W rozdziale 6.2 przedstawiono sposoby wykrywania wybranych, najważniejszych usterek będących przedmiotem oględzin. Zbadano czy jest możliwe rozpoznawanie tych elementów na podstawie wykonanych zdjęć, a następnie sprawdzono czy zastosowane algorytmy wykrywają usterki.



O tym czy uzyskane wyniki są zadowalające świadczy to jak wiele usterek faktycznie występujących na gruncie jest wykrywane przez algorytm. Założeniem do wprowadzenia nowej metody inspekcji było uzyskanie informacji o stanie infrastruktury w ilości i jakości nie mniejszych niż informacje dostarczane przez pracowników obchodowych podczas oględzin tak, aby nie doszło do pogorszenia bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego na infrastrukturze zarządcy.

W celu sprawdzenia poprawności działania systemu (rozpoznawania elementów infrastruktury) spośród wszystkich wykonanych zdjęć wybrano, te które posłużyły jako baza treningowa do uczenia algorytmu (tab. 12).

Tabela 12. Zestawienie obiektów infrastruktury oznaczonych z przeznaczeniem do nauki algorytmu.

Obiekt	Ilość oznaczonych zdjęć z obiektem	Ilość oznaczonych obiektów
Szyna	217	598
Podkład kolejowy	216	2232
Wkręt	217	14273
Śruba stopowa	217	7525
Łapka	217	7365
Śruby łukowe	172	1803
Przerwy między szynami	171	431
Wybuxowania	209	2155
Sekcje pomiędzy podkładami	217	4007
Podwójne podkłady na połączeniu szyn	150	151
<b>RAZEM</b>	<b>2003</b>	<b>40540</b>


Wybrano takie zdjęcia, które w najlepszy sposób prezentowały infrastrukturę oraz środowisko w jakim się obiekt może znajdować. Jedno zdjęcie było wykorzystane do oznaczenia kilku obiektów. Następnie z pozostałego materiału wyodrębniono zbiór innych zdjęć (tab. 13), które posłużyły do sprawdzenia poprawności działania algorytmu (walidacji).

Tabela 13. Zestawienie obiektów infrastruktury przeznaczonych do walidacji algorytmu.

Obiekt	Ilość oznaczonych zdjęć z obiektem	Ilość oznaczonych obiektów
Szyna	25	72
Podkład kolejowy	25	249
Wkręt	25	1562
Śruba stopowa	25	818
Łapka	25	798
Śruby łubkowe	19	204
Przerwy między szynami	20	46
Wybuksowania	24	309
Sekcje pomiędzy podkładami	25	448
Podwójne podkłady na połączeniu szyn	16	16
<b>RAZEM</b>	<b>229</b>	<b>4522</b>

Skuteczność rozpoznawania obiektów sprawdzono w następujący sposób (na przykładzie rozpoznawania styków międzyszynowych):

- na podstawie oznaczonych zdjęć ze stykami międzyszynowymi opracowano maskę do rozpoznawania kształtów wyglądających jak przerwy między szynami,
- algorytm poszukiwał i porównywał oryginalne zdjęcia z maską przerwy międzyszynowej,
- wykorzystując indeks Jaccarta [124], który jest statystyczną metodą do pomiaru podobieństwa i różnic zestawów próbek, algorytm obliczył w jakim stopniu maska obiektu pokrywa się z stanem na gruncie (ang. *IoU – Intersection over Unit*), (rys. 56).

$$IoU = \frac{\text{Area of Overlap}}{\text{Area of Union}}$$


(1)

Rysunek 56. *IoU – obliczanie miejsc wspólnych maski i obiektu*

gdzie:

Area of Overlap – obszar wspólny zawierający elementy należące do obu zbiorów,

Area of Union – obszar zawierający elementy obu zbiorów.

Zgodnie z przyjętymi założeniami osiągnięcie progu IoU na poziomie równym lub większym od 0,5 jest wynikiem, który można uznać za dobry. Przykładowo, dla podkładów i szyn wynik na poziomie 0,9 jest bardzo dobrym, co oznacza, że ponad 90% pikseli obiektu na oznaczonej ramce pokrywa się na zdjęciu oryginalnym (tab. 14).

Tabela 14. Wskaźnik IoU dla szyn i podkładów kolejowych.

Obiekt	IoU
Szyna	0,90
Podkład kolejowy	0,93

- policzono przypadki TP (ang. *True Positives*), FN (ang. *False Negatives*) i FP (ang. *False Positives*), oznaczające odpowiednio TP – przypadki zidentyfikowane i występujące na gruncie, FN – przypadki nieodnalezione pomimo występowania w rzeczywistości, FP – przypadki znalezienia obiektu jakiego nie było lub nie był szukany,
- obliczono z jaką jakością (ang. *Precision*) algorytm zwraca trafne wyniki oraz powtarzalność (ang. *Recall*), która oznacza, że algorytm zwraca większość odpowiednich wyników [125].

$$\text{Precision} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FP}) \quad (2)$$

$$\text{Recall} = \text{TP} / (\text{TP} + \text{FN}) \quad (3)$$

gdzie:

TP - *True Positives*

FN - *False Negatives*

FP - *False Positives*

Średnie wartości wskaźników *Precision* i *Recall* dla małych obiektów przedstawia tabela 15.

Tabela 15. Średnie wartości AP i AR dla obiektów infrastruktury.

Obiekt	Average Precision (AP)	Average Recall (AR)
Wkręt	0,90	0,87
Śruba stopowa	0,89	0,85
Łapka	0,87	0,83
Śruby łubkowe	0,98	0,70

Osiągnięte wyniki AR wskazują na poziom zwracania dobrych wyników tj. odnajdywanie oznaczonych obiektów na oryginalnych zdjęciach. Wskaźnik ten w zależności od rodzaju obiektu wynosi od 0,70 do 0,87 co jest dobrym wynikiem. W przypadku przerw międzyszybowych obliczony wskaźnik *Recall* dla wartości IoU co najmniej 0,5 wyniósł 0,65, co uznano za wynik bardzo dobry.

Powyższe badanie miało na celu ustalenie czy i w jakim stopniu algorytm po wykonanych testach na zdjęciach treningowych rozpoznaje objekty na zdjęciach w procesie walidacji. Równie ważnym jest ustalenie czy w terenie, na podstawie wykonanych kolejno zdjęć rozpoznawane są usterki w stosunku do stanu faktycznego oraz w stosunku do tego co wykazane jest w książkach obchodów zarządcy.

W tym celu wybrano odcinek toru w stacji Sosnowiec Jęzor, na którym wykonano kolejno 113 zdjęć, które poddano analizie przez algorytm pod kątem wykrywania usterek występujących w terenie. Na 113 zdjęciach algorytm odnalazł 300 przypadków jakie zostały wskazane jako usterki (brak elementu infrastruktury). Z 300 przypadków wybrano losowo zbiór 200 obiektów, które poddano weryfikacji czy algorytm prawidłowo zakwalifikował brak elementu infrastruktury. Wyniki badania zestawione w tabeli 16 wskazują, że algorytm w zdecydowanej większości przypadków dobrze lub bardzo dobrze rozpoznawał stany nieprawidłowe elementów infrastruktury. Wszystkie niewidoczne podkłady zostały zidentyfikowane poprawnie jako usterki. W pozostałych przypadkach:

- 91% śrub łubkowych,
- 77% śrub stopowych,
- 75% wkrętów,
- 52% łapek,

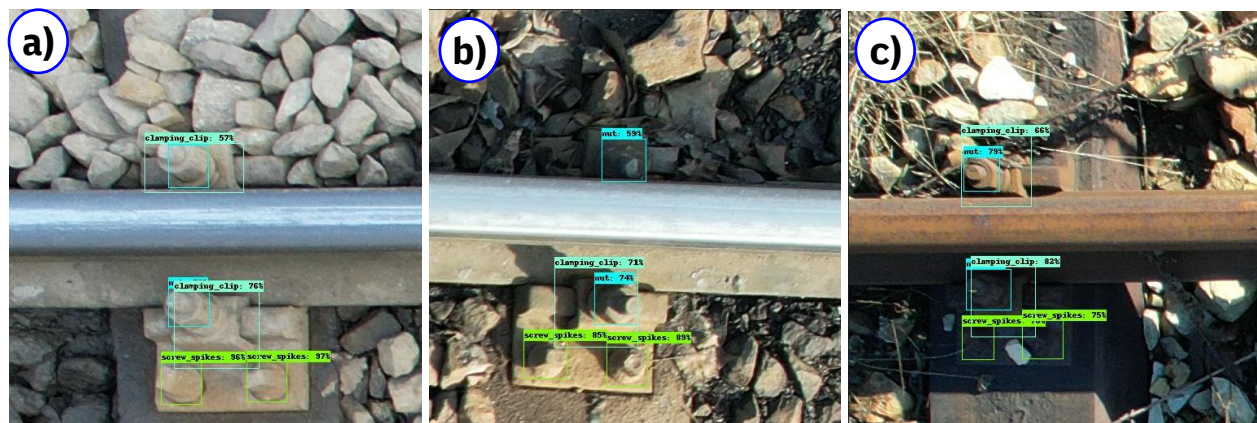
poprawnie została zakwalifikowana jako usterki.

*Tabela 16. Wyniki rozpoznania wybranych defektów infrastruktury.*

	Detekcja obiektów									
	Wkręt		śruba stopowa		Łapka		Śruba Łubkowa		Podkłady	
	Wskazania prawidłowe	Wskazania błędne	Wskazania prawidłowe	Wskazania błędne	Wskazania prawidłowe	Wskazania błędne	Wskazania prawidłowe	Wskazania błędne	Wskazania prawidłowe	Wskazania błędne
<b>Ilość wskazań</b>	116		62		107		11		18	
<b>Rodzaj wskazań</b>	87	29	47	15	56	51	10	1	18	0
<b>Procentowy udział wskazań</b>	75%	25%	76%	24%	52%	48%	91%	9%	100%	0%

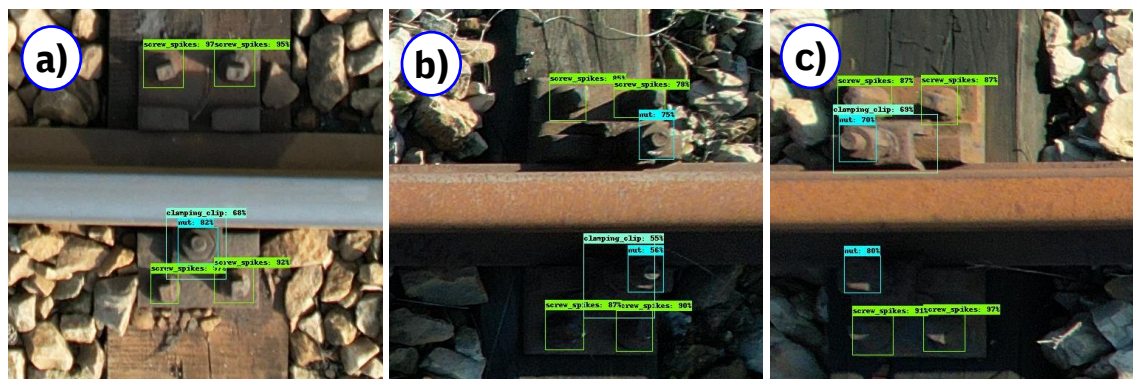
Przypadki błędnej interpretacji wynikały przede wszystkim z zanieczyszczenia tłucznem lub roślinnością poszczególnych obiektów. Pomimo, iż występowały one w rzeczywistości nie były

widoczne z uwagi na zanieczyszczenie. W tych miejscach stan infrastruktury uniemożliwił rozpoznanie obiektu, zatem należy uznać ten odczyt za prawidłowy, ponieważ niezidentyfikowanie obiektu może oznaczać w rzeczywistości jego brak zagrażający bezpiecznemu prowadzeniu ruchu pociągów.



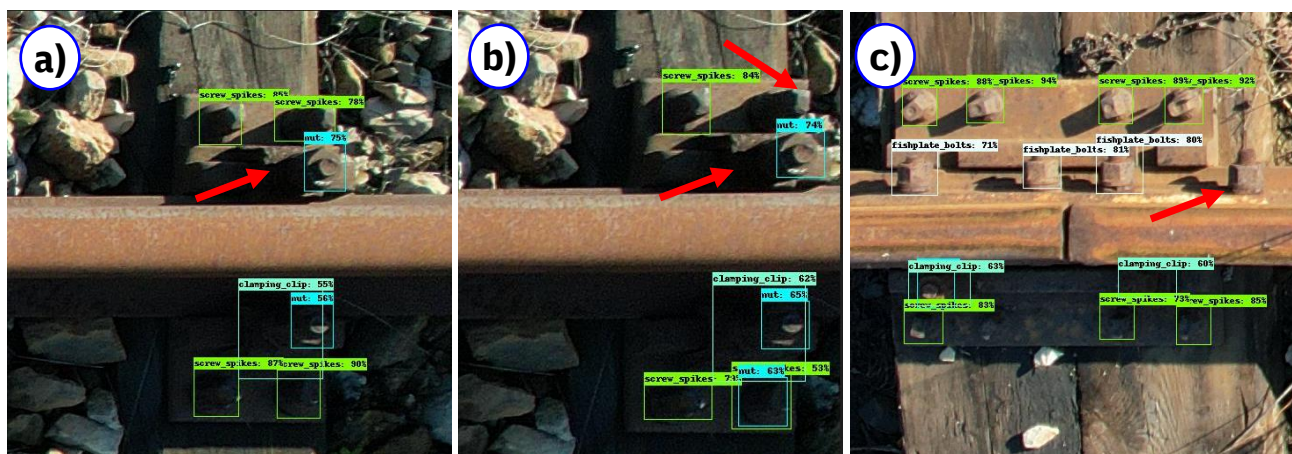
Rysunek 57. Przykłady braku widoczności wkrętów na skutek zanieczyszczenia mocowania.

Algorytm poprawnie interpretuje brak wkrętów (rys. 57 a-c)) oraz śruby stopowej (rys. 58 a)), jednak dużo trudności sprawia rozpoznawanie łapek (rys. 58 b, c)). Na podstawie analizy przypadków stwierdzono, że najczęstszą przyczyną pozornego braku łapki jest położenie jej w cieniu główki szyny i przy niekorzystnym oświetleniu światłem słonecznym łapka nie jest wystarczająco dobrze widoczna (rys. 46 b, c)). W tym przypadku w celu podniesienia prawidłowej ilości wskazań konieczne jest dalsze trenowanie algorytmu na przykładach z zacienionymi łapkami lub w miarę możliwości unikanie wykonywania lotów i zdjęć przy mocnym nasłonecznieniu lub powtórzenie lotu w innych warunkach pogodowych.

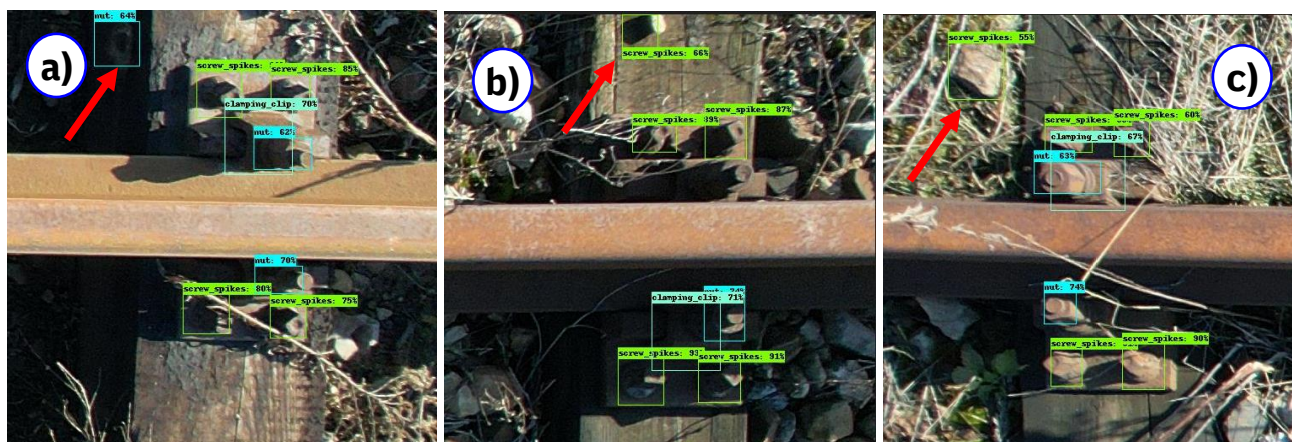


Rysunek 58. Przykłady braku śruby stopowej i łapki (a) oraz braku widoczności łapek z uwagi na cień (b, c)).

Potwierdzeniem uzyskanych wartości wskaźników *Recall* and *Precision* są występujące przypadki interpretacji obiektów jako FN FP i TN. Na wykonanej próbce zdjęć zauważono sytuacje braku elementów faktycznie istniejących (rys. 59) jak również przypadki odnalezienia obiektów, których nie było lub nie były poszukiwane zgodnie z zdefiniowanymi założeniami (rys. 60).



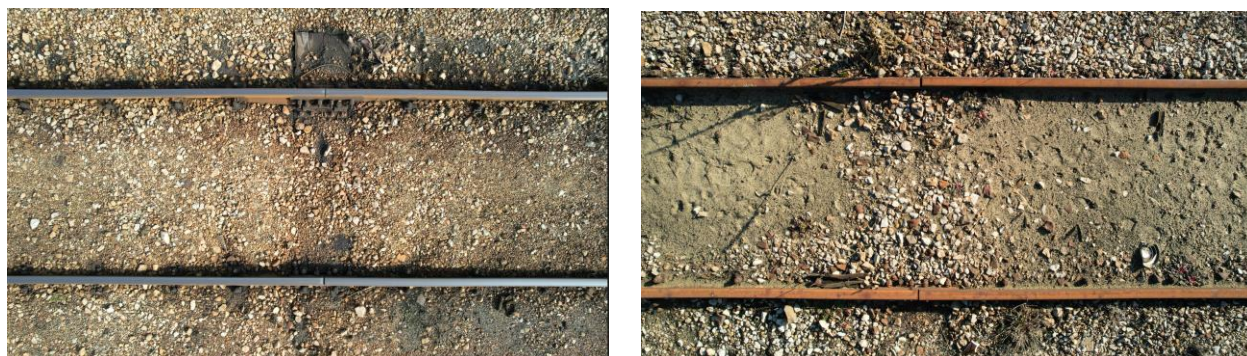
Rysunek 59. Przykład nieodnalezienia poszukiwanych obiektów a), b) łapka, b), wkręt, c) śruba lubkowa) w miejscach gdzie faktycznie występowały (False negative).



Rysunek 60. Przykład odnalezienia poszukiwanych obiektów w miejscach gdzie nie wystąpiły w rzeczywistości: a) śruba stopowa, b), c) wkręt (False positive).

Przeprowadzenie poligonu w rzeczywistych warunkach toru na stacji Sosnowiec Jęzor pokazało w praktyce sprawność działania systemu i pracy algorytmu. Uzyskane wyniki uznaje się za dobre i bardzo dobre, jeśli chodzi o wykrywalność usterek. Potwierdza się wcześniej ustalony wskaźnik AR i AP, ponieważ nie wszystkie przypadki usterek zostały wskazane prawidłowo i jednoznacznie. Odsetek

błędnych interpretacji nie jest znaczący. Najwięcej błędnych wskazań uzyskano w miejscach silnie zacienionych (rys. 58) lub zanieczyszczonych tłucznem lub zarośniętych roślinnością (rys. 57, 61).

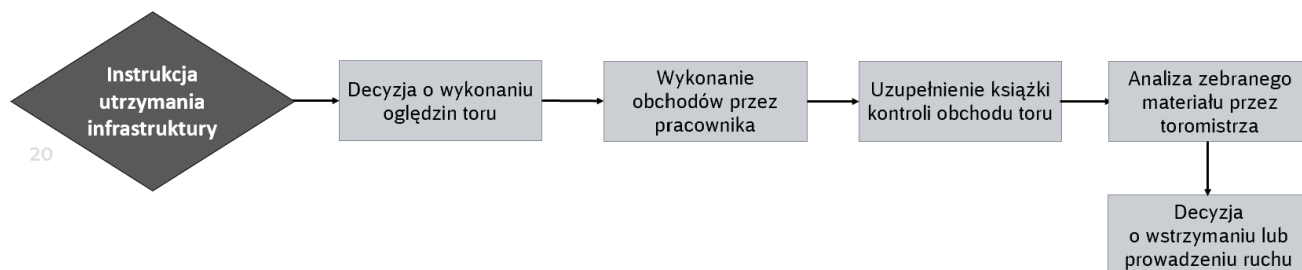


*Rysunek 61. Przykład zanieczyszczonego toru uniemożliwiającego identyfikację elementów infrastruktury.*

W takich przypadkach algorytm nie był w stanie odnaleźć poprawnie elementów pomimo ich występowania w rzeczywistości. Należy jednak podkreślić, że w takich przypadkach, obchodowy podczas wykonywania oględzin nie byłby również w stanie zobaczyć elementów przykrytych roślinnością lub tłuczniem. Jedynie obiekty będące w cieniu byłyby prawdopodobnie dostrzeżone przez obchodowego. To wskazuje na konieczność dalszego rozwoju algorytmu i wytrenowania go w szczególności na przypadkach obiektów położonych w cieniu. Nie rekomenduje się wyposażania BSP w oświetlenie dodatkowe, które okazało się niewystarczająco skuteczne, co potwierdziły testy w tunelach wykonanych przy zastosowanym oświetleniu własnym BSP (rys. 20). Zaleca się zweryfikować zastosowanie lampy błyskowej w celu doświetlenia ciemnych miejsc.

#### 6.4. Model procesu monitoringu infrastruktury dla detekcji usterek za pomocą bezzałogowego statku powietrznego

Nowy sposób oceny stanu infrastruktury determinuje konieczność opracowania modelu działania, który będzie poddany ocenie znaczenia zmiany [87], a następnie zostanie wprowadzony w odpowiednich instrukcjach zarządcy. Obecny proces wykonywania oględzin opiera się na codziennych harmonogramach obchodów, które są uzgodnione każdorazowo pomiędzy obchodowym a torowcą (rys.62). Wykonywanie systematycznych oględzin jest ważne z punktu widzenia bezpiecznego prowadzenia ruchu i nadzorowane przez UTK w trakcie regularnych kontroli.



*Rysunek 62. Model oględzin infrastruktury konwencjonalną metodą.*

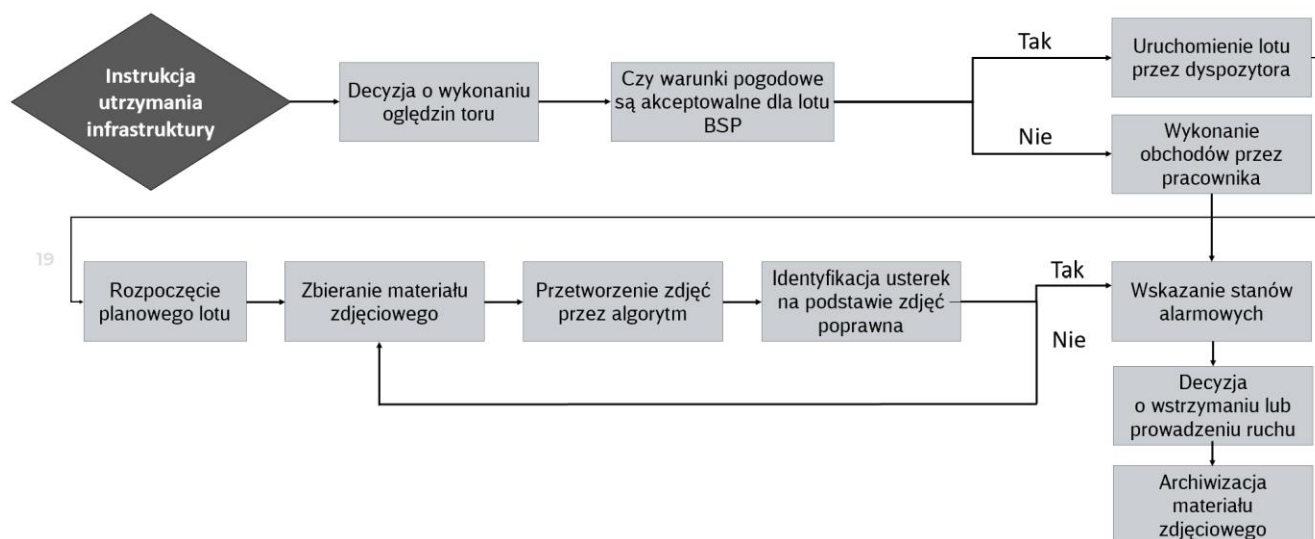
Wykonane kontrole oraz wszelkie spostrzeżenia obchodowy dokumentuje w książce kontroli obchodu zgodnie z obowiązującą u zarządcy instrukcją. Wpisy w książce analizowane są następnie przez toromistrza, który podejmuje decyzję o konieczności ewentualnej naprawy toru lub wstrzymania ruchu, jeśli stan infrastruktury nie pozwala na jej bezpieczną eksploatację. Analiza wpisów pokazała, że ocena stanu infrastruktury jest dokonywana subiektywnie, a ocena jej stanu dokonywana przez poszczególnych pracowników różni się między sobą. Ponadto zdarza się, że opis stanu infrastruktury lub miejsca usterki nie są precyzyjnie określone. Na tej podstawie podejmowane decyzje o naprawie infrastruktury mogą być błędne, przedwczesne lub w najgorszym przypadku nie podjęte i skutkujące zdarzeniem kolejowym. Podkreślić należy, że jeżeli wystąpią szczególne warunki utrudniające lub uniemożliwiające przeprowadzenie obchodów (niebezpieczne zjawiska pogodowe, konieczność udzielenia pomocy osobie rannej lub znalezienia zwłok, konieczność osłonięcia miejsca niebezpiecznego, utrata zdolności wykonywania obchodu z powodu pogarszającego się stan zdrowia pracownika) to należy bezwzględnie przerwać obchód. Dalsze kontynuowanie obchodu możliwe jest po ustąpieniu ww. warunków utrudniających lub uniemożliwiających prowadzenie oględzin.

Wykonywanie oględzin za pomocą drona ma również ograniczenia, jednak są one znacznie mniejsze. Dla BSP, podczas wykonywania misji lotniczej inspekcji infrastruktury powyższe sytuacje nie stanowią przeszkody i nie jest konieczne przerwanie lotu. Może to nastąpić przede wszystkim na skutek: bardzo silnego zamglenia (podczas autonomicznego lotu zbierane są dane poprzez odpowiednie czujniki, sensory). W przypadku konieczności udzielenia pomocy osobie rannej lub znalezienia zwłok z drona przekazane zostaną on-line lub najpóźniej po powrocie do bazy precyzyjne współrzędne oraz zdjęcia z miejsca zdarzenia, pomocne dla zorganizowania akcji ratowniczej jednak bez konieczności przerwania lotu. Jeśli wystąpi utrata zdolności wykonywania obchodu z powodu pogarszającego się stanu zdrowia pracownika obchód zostanie przerwany, natomiast podczas planowanego lotu autonomicznego,



pracownik jest potrzebny jedynie do zaprogramowania misji/zadania i startu BSP, a dalej wszystko odbywa się według planu, włącznie z automatycznym lądowaniem w określonym miejscu.

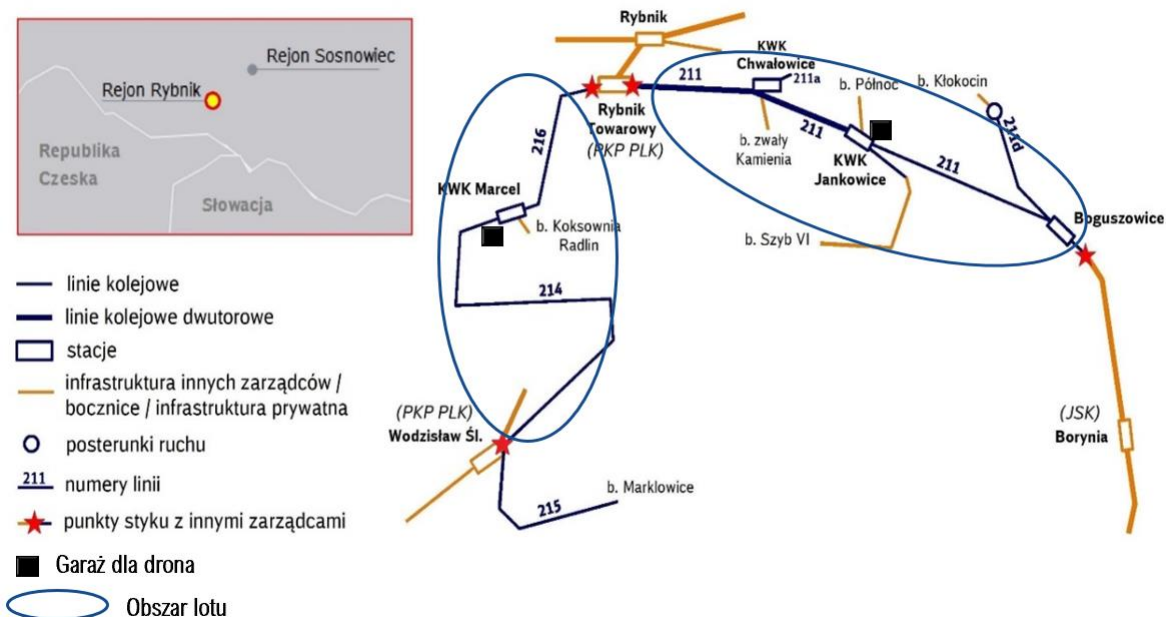
Zaproponowany model inspekcji infrastruktury przez BSP wyposażonego w kamery i czujniki (rys. 63) zakłada, że loty inspekcyjne będą wykonywane automatycznie wg ustalonego harmonogramu lotu. Decyzja o wstrzymaniu lotu będzie zawsze możliwa do wyek onania przez pilota, toromistrza lub dyspozytora, którzy w uzasadnionych przypadkach będą mogli podjąć taką decyzję, w szczególności gdy wg informacji IMGW warunki pogodowe uniemożliwią bezpieczne przeprowadzenie lotu. Wówczas zostanie zaplanowany inny termin mieszczący się w dopuszczalnym przedziale czasowym.



Rysunek 63. Model wykonywania obchodów za pomocą bezzałogowych statków powietrznych.

Po wykonaniu rutynowego lotu i powrocie drona do bazy, zgodnie z wypracowanym modelem segmentacji i detekcji, algorytm przetworzy zdjęcia i wygeneruje raport wskazujący dokładnie ile, jakie oraz w jakim miejscu usterki zidentyfikowano na obszarze wykonania lotów. Na tej podstawie w bardzo szybki sposób toromistrz lub dyspozytor mogą podjąć niezwłocznie działania, zdecydowanie szybciej niż ma to miejsce w sytuacji konwencjonalnych obchodów. W toku prowadzonych badań wykazano, że dron może w trakcie jednego dnia wykonać loty inspekcyjne do 50 km. Aby było to możliwe konieczne jest przygotowanie optymalnego planu lotu [130] oraz zaplanowanie umieszczenia garaży, w których BSP będzie stacjonowało oczekując na misję oraz gdzie będzie dokonywana wymiana baterii. Dla obszaru, na którym przeprowadzono symulację lotów oraz wykonano kalkulację efektywności

inwestycji, przyjęto instalację dwóch garaży: jeden przy nastawni KWK Marcel oraz drugi przy nastawni KWK Jankowice. Przy planowaniu rozmieszczenia garaży ustalono, że obszar dedykowany dla lotów dronem będzie porównywalny i łatwodostępny do miejsc objętych inspekcją [131] (rys. 64).



Rysunek 64. Umiejscowienie garaży dla dronów na terenie infrastruktury Infra Silesia S.A. w rejonie rybnickim.

Jak obliczono w kalkulacji efektywności inwestycji całość infrastruktury oznaczonej jako obszar lotu może zostać poddana jednorazowej inspekcji w ciągu 8 godzin.

Po zebraniu materiału kolejnym etapem jest przygotowanie raportu o stanie infrastruktury wraz z listą zidentyfikowanych usterek. W tym celu opracowano wstępny projekt interfejsu dostępnego w sieci Web, który umożliwia załadowanie wszystkich lub wybranych zdjęć z lotu inspekcyjnego i wygenerowanie raportu. Po wczytaniu zdjęć generowany jest raport ze wskazaniem usterek, które dodatkowo są lokalizowane na mapie. Czerwone oznaczenia wskazują na miejsce, w którym zidentyfikowano usterkę lub usterki, zielone oznaczenia wskazują na zdjęcia, na których nie zidentyfikowano nieprawidłowości (rys. 65). Program generuje raporty i wizualizuje miejsca wystąpienia usterek.



Point [P1377530](#):[result of detection/P1377530/detection\\_of\\_ojbjects.jpg](#)

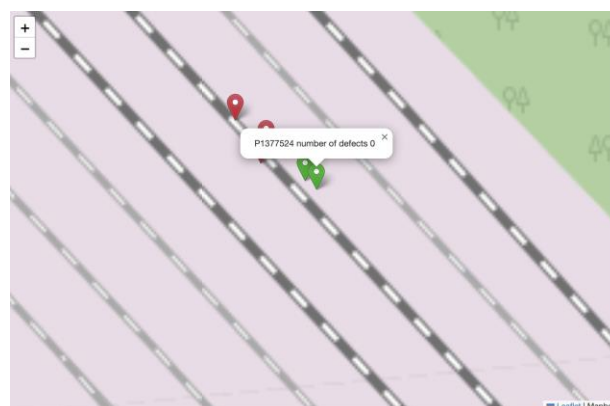
- [result of detection/P1377530/defects/defect2\\_absent\\_1\\_nut\\_and\\_1\\_Clamping\\_clip.jpg](#)
- [result of detection/P1377530/defects/defect1\\_absent\\_2\\_screw\\_spikes.jpg](#)

Point P1377487:[result of detection/P1377487/detection\\_of\\_ojbjects.jpg](#)

Point DJI\_0478:[result of detection/DJI\\_0478/detection\\_of\\_ojbjects.jpg](#)

*Rysunek 65. Przedstawienie graficzne miejsca i rodzaju usterki.*

Aplikacja umożliwia zbliżenie zdjęć dokładnej lokalizacji usterki i przypisanego do niej zdjęcia (rys. 66). Dodatkowo fotografie posiadają koordynaty GPS, które umożliwiają odnalezienie miejsca w terenie, co zdecydowanie ułatwia pracę pracownikom utrzymania, którzy jednoznacznie i sprawnie odnajdują lokalizacje usterki.

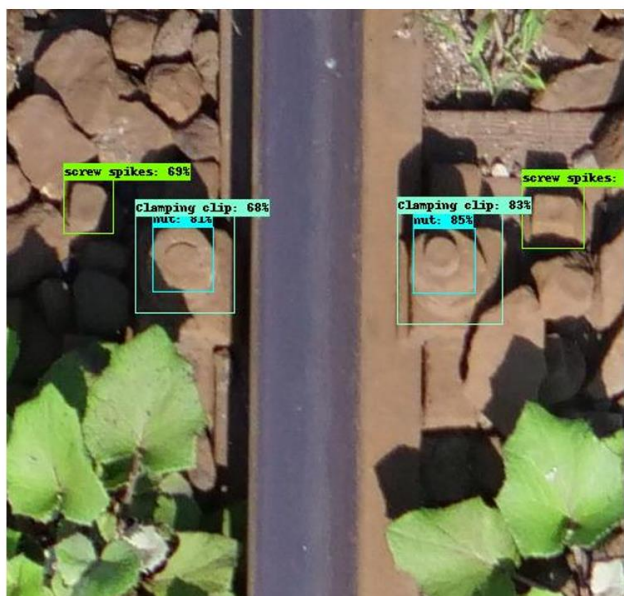


*Rysunek 66. Prezentacja lokalizacji usterki wraz z numerem zdjęcia.*

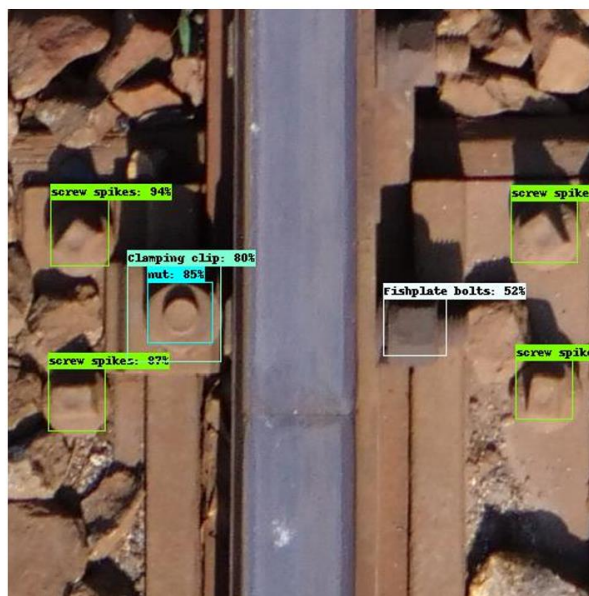
Wskazanie zaznaczonego miejsca (czerwonego lub zielonego wskaźnika) odwołuje do konkretnego zdjęcia, które wizualizuje część toru z defektem (rys. 67). Na zbliżeniu zdjęcia można dokładnie zobaczyć, i upewnić się co do rodzaju i skali usterki (rys. 68), a następnie podjąć decyzję co do dalszego sposobu postępowania.



*Rysunek 67. Zdjęcie wizualizujące usterkę P1377530.*



Usterka 1: brak dwóch wkrętów



Usterka 2: brak śruby stopowej i jednej łapki i jednej nakrętki

Point [P1377530:result\\_of\\_detection/P1377530/detection\\_of\\_objects.jpg](#)

- [result\\_of\\_detection/P1377530/defects/defect2\\_absent\\_1\\_nut\\_and\\_1\\_Clamping\\_clip.jpg](#)
- [result\\_of\\_detection/P1377530/defects/defect1\\_absent\\_2\\_screw\\_spikes.jpg](#)

*Rysunek 68. Zdjęcia w zbliżeniu wskazujące zidentyfikowane usterki w dwóch mocowaniach szyn.*

W toku dalszych prac można w dowolny sposób rozwijać i generować raporty wg potrzeb użytkownika m.in. ustanawiać klasy usterek (np. Usterka 1, Usterka 2, rys. 68), można ignorować niektóre usterki nieznaczące zdaniem oceniającego tak aby w cotygodniowych raportach nie pojawiały się te same usterki z tej samej lokalizacji, można również ustanowić czasokres, po którym użytkownik będzie chciał ocenić czy nie doszło do pogorszenia stanu danego elementu.

Ostatnim elementem koniecznym do pełnego wdrożenia systemu monitoringu infrastruktury opartego o BSP jest zaktualizowanie instrukcji zarządcy w zakresie wykonywania obchodów, o których mowa w rozdziale VI ISd – przepisy wewnętrzne utrzymania infrastruktury kolejowej i bocznic normalnotorowych. W ramach prowadzonych prac badawczych, biorąc pod uwagę wyniki badań, warunki wykonywania lotów, rodzaj rekomendowanego statku powietrznego przygotowano projekt zmian instrukcji ISd [132]. Z uwagi na fakt, że w chwili obecnej nie jest możliwe zastąpienie konwencjonalnych oględzin infrastruktury inspekcjami BSP zaprojektowane regulacje pozostawiają oba sposoby dokonywania oględzin i wskazują co należy przeprowadzić i w jaki sposób postępować w przypadku użycia BSP. Zatem zarządca infrastruktury Infra Silesia S.A. jest formalnoprawnie przygotowany do wdrożenia proponowanego rozwiązania w swojej organizacji nawet w obecnym

ograniczonym zakresie. Należy zastosować opracowane algorytmy i oprogramowanie, nie wykluczając, że w trakcie dalszych badań konieczne stanie się opracowanie nowych, specjalnie dedykowanych dla potrzeb infrastruktury kolejowej algorytmów lub aplikacji. Po zakończeniu wszystkich prac rozwojowych nastąpi zastąpienie tradycyjnych obchodów inspekcjami prowadzonymi przez bezzałogowe systemy latające.

## 7. Uwarunkowania formalnoprawne wykonywanych lotów nad infrastrukturą kolejową

Jednym z podstawowych warunków umożliwiających wdrożenie rozwiązania polegającego na zapewnieniu monitoringu z powietrza jest potwierdzenie możliwości wykonywania lotów nad infrastrukturą kolejową, w tym w szczególności lotów autonomicznych (start, inspekcja przez BSP i lądowanie wg ustalonego scenariusza lotu inicjowanego przez np. dyspozytora zarządcy). W niniejszym rozdziale przedstawiono obecnie obowiązujące przepisy w tym zakresie oraz przeanalizowano występujące ograniczenia oraz planowane zmiany legislacyjne.

### 7.1. Ogólne uwarunkowania dotyczące możliwości i warunków wykonywania lotów dronami

Od 31 grudnia 2020 roku obowiązują wspólne przepisy dotyczące BSP na terenie krajów Unii Europejskiej oraz w Lichtensteinie i Norwegii, które zostały określone przede wszystkim na podstawie Rozporządzenia wykonawczego [88] i Rozporządzenia delegowanego [89].

Podstawowym aktem prawnym określającym możliwości i warunki wykonywania lotów bezzałogowymi statkami powietrznymi, jest Rozporządzenie wykonawcze UE w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych. Istotne szczegółowe warunki i aspekty wykonywania operacji określa załącznik do Rozporządzenia delegowanego, w tym w szczególności jego część A i B określająca warunki dla kategorii otwartej i kategorii szczególnej.

Zgodnie z art. 3 Rozporządzenia wykonawczego operacje z użyciem BSP mogą być wykonywane w jednej z trzech kategorii: otwartej, szczególnej lub certyfikowanej, z zastrzeżeniem następujących warunków:

- a) operacje wykonywane z użyciem bezzałogowego systemu powietrznego w kategorii "otwartej" nie wymagają uzyskania uprzedniego zezwolenia na operację ani złożenia przez operatora bezzałogowego systemu powietrznego oświadczenia o operacji przed jej rozpoczęciem. W tej kategorii można wykonywać operacje w zasięgu widoczności wzrokowej pilota lub z pomocą obserwatora (VLOS – ang. *Visual Line of Sight*), dronami o masie poniżej 25 kg w odległości nie większej niż 120 metrów od najbliższego punktu powierzchni ziemi. Wymagana jest rejestracja w systemie Urzędu Lotnictwa Cywilnego (dalej: ULC) operatorów Systemu Bezzałogowych

Statków Powietrznych (dalej: SBSP), którzy posiadają drony o masie powyżej 250g lub są wyposażone w czujnik do zbierania danych (np. kamerę).

- b) operacje wykonywane z użyciem bezzałogowego systemu powietrznego w kategorii „szczególnej” jest przeznaczona dla operacji o średnim ryzyku, której parametry lotu wychodzą poza kategorię „otwartą” i wymagają uzyskania zezwolenia na operację wydanego przez właściwy organ na podstawie art. 12 lub uzyskania zezwolenia zgodnie z art. 16 bądź - w okolicznościach określonych w art. 5 ust. 5 - złożenia oświadczenia przez operatora bezzałogowego systemu powietrznego. W kategorii „szczególnej” można wykonywać operacje SBSP po spełnieniu wybranego wariantu:
- i) złożenia oświadczenia o operacji zgodnej ze scenariuszem standardowym (STS) lub krajowym scenariuszem standardowym (NSTS);
  - ii) otrzymania zezwolenia na operacje w kategorii szczególnej;
  - iii) uzyskania certyfikatu LUC (ang. *Light UAS operator Certificate*) potwierdzającego, że operator jest w stanie samodzielnie ocenić ryzyko operacji.
- c) operacje wykonywane z użyciem bezzałogowego systemu powietrznego w kategorii „certyfikowanej” jest kategorią o wysokim ryzyku, operacje wymagają certyfikacji BSP na podstawie rozporządzenia delegowanego i wymagają certyfikacji bezzałogowego systemu powietrznego na podstawie rozporządzenia delegowanego (UE) 2019/945 i certyfikacji operatora oraz, w stosownych przypadkach, uzyskania licencji przez pilota bezzałogowego statku powietrznego.

Biorąc pod uwagę zakres inspekcji infrastruktury kolejowej jaka jest planowana do wykonania przez BSP, operacje na terenie kolejowym Infra Silesia S.A. będą głównie wykonywane w kategorii „szczególnej”, rzadko w kategorii „otwartej”.

Istotnym wymogiem wykonywania operacji przez BSP jest Rejestracja Operatorów Systemów Bezzałogowych Statków Powietrznych (art. 14 ust. 5 Rozporządzenia wykonawczego). Rejestracji podlegają:

- i) Operatorzy SBSP, którzy wykonują operacje w kategorii „otwartej” dronami:
  - które mają MTOM (ang. *Maximum Take off Mass*) od 250 g lub które w przypadku uderzenia mogą przekazać człowiekowi energię kinetyczną o wartości powyżej 80 [J],
  - które wyposażono w czujnik zdolny do zbierania danych osobowych (np. kamerę), chyba że dany statek powietrzny spełnia wymogi dyrektywy 2009/48/WE.



- ii) Operatorzy SBSP, jeżeli wykonują operację w kategorii „szczególnej” bez względu na masę drona.

Warunkami rejestracji w systemie ULC jest posiadanie przez pilota ukończonych 16 lat życia i miejsca zamieszkania lub głównego miejsca prowadzenia działalności na terenie Polski. Operatorzy SBSP, którzy są zarejestrowani w innym kraju UE lub EFTA (ang. *European Free Trade Assotiation*) i chcą przejść w Polsce szkolenie mogą założyć konto w systemie rejestracji operatorów podając swój numer operatora z innego kraju UE lub EFTA. Operatorzy SBSP spoza UE i krajów EFTA mogą dokonać rejestracji w systemie ULC, jeżeli zamierzają wykonać pierwszą operację w Polsce.

Podczas wykonywania lotów należy mieć na uwadze ograniczenia wynikające z wyznaczenia tzw. strefy geograficznej i określenia warunków wykonywania lotów w ramach takiej strefy. Zgodnie z art. 15 ust. 1 Rozporządzenia wykonawczego określając strefy geograficzne dla systemów bezzałogowych statków powietrznych ze względów bezpieczeństwa, ochrony, prywatności lub względów środowiskowych, można zakazać niektórych lub wszystkich operacji z użyciem systemów bezzałogowych statków powietrznych, wymagać spełnienia szczególnych warunków w odniesieniu do niektórych lub wszystkich operacji z użyciem systemów bezzałogowych statków powietrznych, bądź wymagać uzyskania uprzedniego zezwolenia na lot w odniesieniu do niektórych lub wszystkich operacji z użyciem systemów bezzałogowych statków powietrznych. ULC może zezwolić na dostęp wyłącznie niektórym klasom systemów bezzałogowych statków powietrznych lub zezwolić na dostęp wyłącznie bezzałogowym systemom powietrznym wyposażonym w określone funkcje techniczne, w szczególności w systemy zdalnej identyfikacji lub systemy świadomości przestrzennej.

Mając na uwadze powyższe zasady operator BSP ma obowiązek dokonania weryfikacji, czy planowana trasa lotu znajduje się w strefie, gdzie można wykonywać loty lub jakie wiążą się z tym ograniczenia. Każdy lot BSP w polskiej przestrzeni powietrznej powinien się odbyć po poinformowaniu Polskiej Agencji Żeglugi Powietrznej (dalej: PAŻP) o zamiarze wykonania lotu za pośrednictwem systemu teleinformatycznego, określonego przez Agencję. Oznacza to, że każdy lot BSP należy poprzedzić zrobieniem check’inu w aplikacji DroneRadar [91].

Na podstawie analizy materiału dotyczącego podstawowych warunkach wykonywania lotów BSP, a także biorąc pod uwagę koncepcję wykonywania lotów inspekcyjnych nad infrastrukturą kolejową stwierdza się, że jeżeli miałyby dojść do operacji, gdzie kontakt wzrokowy pilota nie jest możliwy przez cały czas wykonywania operacji (VLOS), wtedy operacje byłyby klasyfikowane w kategorii szczególnej

(BVLOS – ang. *Beyond Visual Line of Sight*). Również planowane loty autonomiczne (bez pilota sterującego na bieżąco BSP) podlegałyby operacjom w ramach kategorii szczególnej.

#### 7.1.1. Warunki wykonywania lotów na terenie obszaru kolejowego

Zgodnie z art. 4 pkt. 8) ustawy o transporcie kolejowym (dalej: UTK) [93], obszar kolejowy to powierzchnia gruntu określona działkami ewidencyjnymi, na której znajduje się droga kolejowa, budynki, budowle i urządzenia przeznaczone do zarządzania, eksploatacji i utrzymania linii kolejowej oraz przewozu osób i rzeczy;

Z kolei zgodnie z art. 4 ust. 1a) UTK droga kolejowa tor kolejowy albo tory kolejowe wraz z elementami wymienionymi w pkt 2-12 załącznika nr 1 do ustawy, o ile są z nimi funkcjonalnie połączone, niezależnie od tego, czy zarządza nimi ten sam podmiot.

Podkreślić należy, że bocznica kolejowa, zgodnie z definicją z art. 4 ust. 10) UTK to wyznaczona przez zarządcę infrastruktury droga kolejowa, połączona bezpośrednio lub pośrednio z linią kolejową, służąca do wykonywania czynności ładunkowych, utrzymaniowych lub postoju pojazdów kolejowych albo przemieszczania i włączania pojazdów kolejowych do ruchu po sieci kolejowej;

Na podstawie przeprowadzonej weryfikacji przepisów, w prawie europejskim jak i w Wytycznych Prezesa ULC [94] nie zawarto ograniczeń w lotach nad torami kolejowymi czy w ramach obszaru kolejowego. Tym samym na obszarze kolejowym zarządcy możliwe jest wykonywanie lotów BSP na takich samych jak ogólne warunkach (opisane w pkt. 7.1. powyżej).

Wskazać również należy, że obszar kolejowy zarządcy wg dokonanej weryfikacji nie stanowi terenu zamkniętego, na którym nie byłoby możliwe wykonywanie lotów. Zgodnie z art. 2 pkt. 9 Ustawy z dnia 17 maja 1989 r. - Prawo geodezyjne i kartograficzne (t.j. Dz. U. z 2021 r. poz. 1990 z późn. zm.), przez teren zamknięty rozumie się tereny o charakterze zastrzeżonym ze względu na obronność i bezpieczeństwo państwa, określone przez właściwych ministrów i kierowników urzędów centralnych. Jedynym ograniczeniem jakie występuje na obszarze kolejowym jest konieczność uzgodnienia lotów z właścicielem infrastruktury, jeśli ta infrastruktura ma charakter strategiczny. Niektóra infrastruktura kopalń węgla kamiennego jest objęta takim ograniczeniem z uwagi na zapewnienie ciągłości wydobycia dla elektrowni, elektrociepłowni. Dotyczy to w tym przypadku infrastruktury KWK Marcel, na której wykonywane były loty BSP.

Zgodnie Decyzją Nr 14 Ministra Infrastruktury z dnia 18 września 2020 r. w sprawie ustalenia terenów zamkniętych, przez które przebiegają linie kolejowe (Dz. Urz. MI z 2020 r. poz. 38 z późn. zm.)

i treścią załącznika nr 12 wskazanej Decyzji określającą tereny zamknięte dla województwa śląskiego a będące zajęte przez linie kolejowe, nieruchomości składające się na obszar kolejowy zarządcy w Rybniku oraz w Sosnowcu nie zostały wymienione we wskazanym załączniku. Zasadne jest jednak urzędowe potwierdzenie takiej weryfikacji. Niezależnie od powyższego konieczne jest każdorazowe dokonywanie weryfikacji ewentualnych ograniczeń dla lotów poprzez stronę PAŻP lub aplikację DroneRadar, jak wskazano powyżej w pkt. 7.1.

#### 7.1.2. Zgody konieczne do uzyskania przed wykonywaniem lotów

Konieczność uzyskania zgód na wykonywanie lotów zależy od kategorii, w której loty się odbywają. Operacje w kategorii „otwartej” umożliwiają wykonywanie lotów niskiego ryzyka. Nie wymagają one uzyskania uprzedniego zezwolenia na lot z ULC. Operacje w kategorii „otwartej” mogą być jednak wykonywane tylko w zasięgu widoczności wzrokowej pilota lub obserwatora w odległości nie większej niż 120 metrów od najbliższego punktu powierzchni ziemi, dronami o masie nie przekraczającej 25 kg.

Kategoria „otwarta” dzieli się na trzy podkategorie A1, A2 i A3, w oparciu o ograniczenia operacyjne i wymogi, jakim podlegają piloci bezzałogowych statków powietrznych i drony:

- A1 - dopuszcza się przelot nad osobami postronnymi (z pewnymi ograniczeniami), ale nie wolno latać nad zgromadzenia osób („zgromadzenia osób” tj. zgromadzenia, w którym zagęszczenie osób uniemożliwia im przemieszczanie się);
- A2 - nie wolno wlatywać nad osoby i zgromadzenia osób. Minimalna odległość pozioma od osób to 30 m lub 5 m, jeżeli dron posiada funkcję ograniczającą prędkość lotu;
- A3 - nie wolno wlatywać nad osoby i zgromadzenia. Operacje SBSP mogą odbywać się w bezpiecznej odległości co najmniej 150 metrów w poziomie od terenów mieszkaniowych, użytkowych, przemysłowych lub rekreacyjnych.

W kategorii „szczególnej” rejestracja operatora (pilota) jest konieczna zawsze, niezależnie od masy BSP. W tej kategorii wykonywanie lotów jest możliwe po złożeniu oświadczenia, uzyskaniu zezwolenia lub dysponowaniu certyfikatem LUC (art. 5 ust. 5 Rozporządzenia wykonawczego). Oświadczenie o operacji zgodnej ze scenariuszem standardowym należy złożyć w przypadku, kiedy parametry wykonywanych operacji wychodzą poza kategorię „otwartą”. W myśl przepisów

Europejskich scenariusze standardowe opublikowane przez Agencję Unii Europejskiej ds. Bezpieczeństwa Lotniczego (dalej: EASA) zaczną obowiązywać od 1 stycznia 2024 r.

W związku z tym w Dzienniku Urzędowym zostały opublikowane krajowe scenariusze standardowe (tzw. NSTS). Składając do Urzędu oświadczenie zgodne z NSTS operator otrzyma potwierdzenie odbioru i kompletności, dzięki któremu bezzwłocznie może rozpocząć operację zgodnie z ograniczeniami scenariusza standardowego. Przykładowo scenariusz NSTS-06 dotyczy lotów BSP poza zasięgiem wzroku pilota (BVLOS) i w odległości do 2 km od pilota BSP. Scenariusz ten jest zasadny do przeanalizowania jako potencjalnie możliwy do zastosowania do lotów inspekcyjnych infrastruktury kolejowej.

W przypadku gdy operacja nie jest objęta scenariuszem standardowym i nie należy do kategorii „otwartej” należy złożyć wniosek o zezwolenie na operację (art. 12 Rozporządzenia wykonawczego). Przed złożeniem wniosku operator jest zobowiązany do przeprowadzenia oceny ryzyka. W tej kwestii przewidziano dwa alternatywne podejścia [90]:

- a) ocena ryzyka planowanej operacji: przeprowadzenie oceny ryzyka planowanej operacji zgodnie z metodologią SORA (ang. *Specific Operations Risk Assessment*), oraz przedłożenie wraz z wnioskiem oceny ryzyka i opisanie wszystkich środków ograniczających ryzyko i przestrzeganie celów bezpieczeństwa operacyjnego do Urzędu Lotnictwa Cywilnego,
- b) predefiniowana ocena ryzyka (ang. *PDRA-Predefined Risk Assessment*): jest to uproszczona forma przeprowadzenia ryzyka dla operatorów zaproponowana przez EASA. Jeżeli planowana operacja okaże się objęta jednym z opublikowanych PDRA, zamiast przeprowadzać pełną ocenę ryzyka, można postępować z instrukcjami zawartymi w PDRA i odpowiednio przygotować dokumentację do wniosku, który zostanie złożony do Urzędu Lotnictwa Cywilnego.

W zezwoleniu wydanym przez Urząd Lotnictwa Cywilnego zostanie określony dokładny zakres zezwolenia i warunki wykonania operacji.

### 7.1.3. Warunki wykonywania lotów poza zasięgiem wzroku pilota, w tym wykonywanie lotów przez pilota oraz lotów autonomicznych

Wykonywanie lotów poza zasięgiem wzroku pilota (BVLOS) jest możliwe w kategorii „szczególnej”, a także w kategorii „certyfikowanej”. Szczegółowe uwarunkowania wynikają z załącznika do Rozporządzenia wykonawczego oraz Wytycznych nr 7 Prezesa ULC. Opracowany przez Europejską Agencję Żeglugi Powietrznej scenariusz standardowy nr STS02 (będzie obowiązywał od

01.01.2024 r.) odpowiadający warunkom lotów nad infrastrukturą kolejową przewiduje możliwość wykonywania lotów poza zasięgiem wzroku pilota, do 2 km w poziomie od pilota, maksymalna wysokość do 120 m, MTOM BSP do 25 kg (klasa BSP - C6), przy wykorzystaniu operatora. Podstawowym wymogiem jest, aby pilot mógł kontrolować BSP.

Jednym z założeń inspekcji na terenie kolejowym jest ich wykonywanie w ramach lotów autonomicznych. Mając na uwadze poniżej przytoczone definicje BSP i operacji autonomicznej, a także regulacje wskazane w załączniku do Rozporządzenia wykonawczego (pkt. 1 lit. b) UAS.SPEC.050) stwierdzić należy, że obecnie prawo uwzględnia i dopuszcza możliwość wykonywania tzw. lotów autonomicznych tj. takich gdzie operacje są wykonywane bez możliwości podjęcia interwencji przez pilota bezzałogowego statku powietrznego.

Zgodnie z definicją ustawodawcy bezzałogowy statek powietrzny oznacza dowolny statek powietrzny eksploatowany lub przeznaczony do eksploatacji bez pilota na pokładzie, który może działać autonomicznie lub być pilotowany zdalnie. Operacja autonomiczna natomiast oznacza operację, w trakcie której bezzałogowy statek powietrzny wykonuje operacje bez możliwości podjęcia interwencji przez pilota bezzałogowego statku powietrznego. Wykonywanie lotów autonomicznych jest możliwe w ramach kategorii szczególnej i certyfikowanej. Warunki wykonania operacji autonomicznej określone są m.in. Rozporządzeniu wykonawczym w pkt 1 lit. b) UAS.SPEC.050 (Obowiązki operatora systemu bezzałogowego statku powietrznego) części B (Operacje z użyciem systemów bezzałogowych statków powietrznych w kategorii „szczególnej”. Zgodnie z tymi zasadami operator systemu bezzałogowego statku powietrznego dopełnia wszystkich poniższych obowiązków związanych z lotem, a w szczególności do każdego lotu wyznacza pilota bezzałogowego statku powietrznego lub, w przypadku operacji autonomicznych, zapewnia, aby na wszystkich etapach lotu obowiązki i zadania, zwłaszcza te, które określono w sekcji UAS. SPEC.060 pkt 2 i 3, były odpowiednio rozdzielone zgodnie z procedurami ustanowionymi na podstawie pkt 1 lit. a) Rozporządzenia wykonawczego. Zgodnie z przepisem lit. a) pkt. 1 UAS.SPEC.050 Operator BSP:

- a) ustanawia procedury i ograniczenia dostosowane do rodzaju planowanej operacji oraz związanego z nią ryzyka, w tym:
- procedury operacyjne zapewniające bezpieczeństwo operacji;
  - procedury zapewniające przestrzeganie w ramach planowanej operacji wymogów w zakresie ochrony mających zastosowanie do obszaru operacji;
  - środki służące ochronie przed bezprawną ingerencją i nieuprawnionym dostępem;

- procedury zapewniające, aby wszystkie operacje przebiegały zgodnie z przepisami rozporządzenia (UE) 2016/679 w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych (dalej: RODO) [95]. W szczególności przeprowadza on ocenę skutków dla ochrony danych, jeżeli wymaga tego krajowy organ ds. ochrony danych w zastosowaniu art. 35 rozporządzenia RODO;
- wytyczne dla swoich pilotów bezzałogowych statków powietrznych, zgodnie z którymi operacje z użyciem systemów bezzałogowych statków powietrznych należy planować w taki sposób, aby zminimalizować uciążliwości, w tym hałas i inne związane z emisjami, dla ludzi i zwierząt.

Obowiązki i zadania pilota BSP które powinny być spełnione przed rozpoczęciem operacji BSP określone są w sekcji UAS. SPEC.060 pkt 2 i 3 i są nimi:

- a) uzyskanie aktualnych informacji istotnych z punktu widzenia planowanej operacji dotyczące wszelkich stref geograficznych określonych zgodnie z art. 15 Rozporządzenia wykonawczego;
- b) zapewnienie, by środowisko, w którym ma być wykonywana operacja, było zgodne z ograniczeniami i warunkami określonymi w zezwoleniu lub oświadczeniu;
- c) zapewnienie, aby system bezzałogowego statku powietrznego był w stanie gwarantującym bezpieczne wykonanie zaplanowanego lotu oraz, w stosownych przypadkach, sprawdzanie, czy system jednoznacznej zdalnej identyfikacji jest aktywny i aktualny;
- d) zapewnienie, aby informacje o operacji udostępniono odpowiedniej jednostce służb ruchu lotniczego (ATS), innym użytkownikom przestrzeni powietrznej i odpowiednim zainteresowanym stronom zgodnie z wymogami zezwolenia na operację lub warunkami opublikowanymi przez państwo członkowskie w odniesieniu do strefy geograficznej operacji zgodnie z art. 15.

Podczas lotu pilot bezzałogowego statku powietrznego powinien przestrzegać ograniczeń i warunków określonych w zezwoleniu lub oświadczeniu dotyczących operacji. Powinien podejmować działania w kierunku unikania ryzyka kolizji z załogowymi statkami powietrznymi oraz przerywać lot, jeżeli jego kontynuacja może stanowić zagrożenie dla innych statków powietrznych, ludzi, zwierząt, środowiska lub mienia. Pilot jest zobowiązany do przestrzegania ograniczeń operacyjnych w strefach geograficznych i stosowania procedur opracowanych przez operatora.

Należy mieć na uwadze, że inne wykorzystanie drona niż opisane w przepisach, zezwoleniu lub oświadczeniu, w razie spełnienia przesłanek, art. 126a Prawa lotniczego (m.in.. zagrożenie życia lub zdrowia osób, stwarzanie zagrożenia dla chronionych obiektów) może wiązać się z prawem do jego zniszczenia, unieruchomienia lub przejęcia kontroli.

Powyżej powołane przepisy określają podstawowe, ogólne warunki wykonania operacji autonomicznej, które powinny być przestrzegane również podczas wykonywania lotów nad infrastrukturą kolejową. Szczegółowe i dodatkowe wymagania mogą zostać określone w zezwoleniu wydawanym w ramach kategorii „szczególnej”. Wszystkie te zasady razem powinny być ujęte w przepisach wewnętrznych zarządcy infrastruktury, które stanowią wytyczne do wykonywania autonomicznych lotów nad infrastrukturą. Co do zasady przepisy o wykonywaniu lotów BSP, wynikające z aktów prawnych wskazanych w niniejszym rozdziale i aktach prawnych, do których odwołują się powołane akty, a także wytyczne wydawane przez Prezesa ULC, w sposób kompleksowy regulują zasady wykonywania lotów BSP, nawiązując także do innych regulacji jakie należy mieć na uwadze i których należy przestrzegać wykonując loty dronami.

#### 7.1.4. Ochrona danych osobowych, odpowiedzialność cywilna i karna

Z ważnych aspektów prawnych dotyczących lotów dronami, należy przede wszystkim zwrócić uwagę i przestrzegać przepisów dotyczących ochrony danych osobowych (RODO), jeśli BSP wykonujący operację posiada kamerę i może zbierać dane osobowe (np. utrwalac wizerunek osób). Ze względu na ryzyko nawet niezamierzonego zebrania danych osobowych przy wykonywaniu lotów, a także ryzyko powstania szkody, dane takie muszą być odpowiednio zabezpieczone. Bez zgody danej osoby nie wolno takich danych przetwarzać.

Należy mieć też na uwadze ogólne przepisy prawa cywilnego (kodeks cywilny) – wyrządzenie szkody w wyniku wykonywania operacji dronem, będzie wiązało się z odpowiedzialnością odszkodowawczą po stronie operatora BSP (lub także innych osób w razie spełnienia przesłanek odpowiedzialności) [96]. Loty dronem nad czynną infrastrukturą kolejową niosą za sobą ryzyko kolizji z jeżdżącymi pociągami. Dlatego, że eksploatowany tabor kolejowy jest wysokiej wartości potencjalne kolizje BSP z lokomotywą i w konsekwencji doprowadzenie do wypadku kolejowego mogą skutkować wysokimi stratami materialnymi zarówno po stronie zarządcy infrastruktury jak i przewoźnika kolejowego. Z uwagi na fakt, że głównym aspektem regulacji prawa BSP jest zapewnienie bezpieczeństwa wykonywanych operacji, należy mieć na względzie ryzyko odpowiedzialności karnej lub wykroczeniowej w razie wypełnienia znamion danego przestępstwa lub wykroczenia. Oprócz ogólnych regulacji kodeksu karnego i kodeksu wykroczeń, należy przestrzegać regulacji Prawa lotniczego w szczególności art. 210-212 [92].

Podsumowując, obszar kolejowy, na jakim operuje zarządca InfraSilesia S.A., nie stanowi sam w sobie obszaru objętego szczególnymi warunkami wykonywania operacji dronami. W szczególności nie jest to obszar stanowiący teren zamknięty, na którym wykonywanie operacji dronami nie byłoby możliwe. Konieczne jest każdorazowo ustalenie aktualnych uwarunkowań dotyczących lotu tak na obszarze kolejowym jak na jakimkolwiek innym terenie. W szczególności należy ustalić, czy teren jest objęty tzw. strefą geograficzną a jeśli tak, to jakie występują w jej ramach warunki wykonywania lotu. Ustalenie takie jest możliwe poprzez aplikację DroneRadar. W przypadku gdy infrastruktura kolejowa w części lub w całości ma charakter infrastruktury strategicznej, konieczne jest uzyskanie dodatkowej zgody na wykonywanie lotów od właściciela infrastruktury.

Co do zasady wykonywanie lotów dronami będzie się odbywać w ramach kategorii „szczególnej”, co oznacza że konieczne jest przed wykonaniem lotu:

- (i) złożenie oświadczenia o wykonywaniu lotu w ramach scenariusza standardowego lub,
- (ii) uzyskanie zezwolenia lub
- (iii) dysponowanie certyfikatem LUC potwierdzającym, że operator jest w stanie samodzielnie ocenić ryzyko operacji.

Wszelkie loty dronem wymagają natomiast zgłoszenia takiego lotu (check-in) poprzez aplikację DroneRadar lub poprzez Państwową Agencję Żeglugi Powietrznej, co powinno być zadaniem toromistrza lub dyspozytora. Wykonywanie lotów poza zasięgiem wzroku pilota (BVLOS), a także lotów autonomicznych jest możliwe. Loty BVLOS można wykonywać w ramach kategorii „szczególnej”, w tym w ramach scenariuszy standardowych (obecnie krajowych). Loty autonomiczne wymagać będą uzyskania zezwolenia w ramach kategorii „szczególnej” lub ewentualnego dysponowania certyfikatem LUC.

Przepisy ds. dronów (przepisy prawa europejskiego i krajowego – polskiego) bardzo kompleksowo regulują aspekty związane z wykonywaniem lotów (operacji) dronami. Ze względu na ryzyko zebrania danych osobowych przy wykonywaniu lotów, a także ryzyko powstania szkody oraz kluczową kwestię wynikającą z regulacji prawa dotyczącego dronów – zapewnienie bezpieczeństwa przy wykonywaniu lotów dronami, należy mieć na względzie oprócz przepisów o ochronie danych osobowych (RODO), także przepisy o odpowiedzialności cywilnej (Prawo lotnicze i przepisy kodeksu cywilnego), a także przepisy prawa karnego i prawa wykroczeniowego, w tym te przewidziane w ramach Prawa lotniczego.



W najbliższym czasie nie są planowane istotne zmiany prawa dotyczącego dronów zarówno polskiego jak i europejskiego w zakresie wyżej opisanym tj. warunków wykonywania operacji dronami. Wskazać należy, że od 26 stycznia 2023 r. zaczęły obowiązywać rozporządzenia Komisji Europejskiej dotyczące U-Space – mające na celu stworzenie ram dla integracji lotnictwa załogowego i bezzałogowego w ramach Unii Europejskiej, w tym wydzielenia przestrzeni powietrznej U-SPACE i zapewnienia w niej możliwości wykonywania usług z wykorzystaniem BSP.

## 8. Kalkulacja kosztów i nakładów inwestycyjnych inspekcji nową metodą

Dokonywanie nakładów inwestycyjnych powinno zostać poprzedzone oceną efektywności inwestycji, która zweryfikuje jej opłacalność. W sytuacji kiedy planowana inwestycja zastępuje aktualnie obowiązujące rozwiązanie naturalnym podejściem jest porównanie kilku scenariuszy i sprawdzenie, który z nich charakteryzuje się najlepszą efektywnością ekonomiczną. Wymóg badania efektywności inwestycji wynika również z wewnętrznych przepisów zarządcy Infra Silesia S.A., która przed wdrożeniem tej skali inwestycji musi stworzyć jej gruntowne uzasadnienie i uzyskać zgodę organów korporacyjnych. W sytuacji gdy inwestycja jest współfinansowana ze środków unijnych, co jest możliwe do zastosowania w tym przypadku, należy wziąć pod uwagę również wymagania i wytyczne wskazane w poszczególnych programach badawczo-rozwojowych współfinansujących inwestycje. Szczególnie w nowatorskich rozwiązaniach, które nie mają swojego odniesienia w poprzednich inwestycjach bardzo ważnym elementem jest prawidłowe przeprowadzenie kalkulacji, ujęcie wszystkich elementów związanych z nakładami inwestycyjnymi, kosztami bieżącego utrzymania, naprawy sprzętu oraz ryzyk jakie mogą się pojawić na etapie wdrożenia prototypu jak również wdrożenia w produkcji seryjnego rozwiązania w całej organizacji. Przeprowadzenie takiej kalkulacji jest istotnym uzasadnieniem w procesie podejmowania decyzji i wspiera bezpieczne zarządzanie finansami spółki [119].

W celu oceny efektywności zastosowania nowego rozwiązania pod względem ekonomicznym przeprowadzono analizę kosztów oraz nakładów inwestycyjnych w porównaniu do aktualnie ponoszonych kosztów przez zarządcę infrastruktury Infra Silesia S.A. Skalkulowano również NPV (ang. *Net Present Value*) uwzględniający zmianę wartości pieniądza w czasie oraz przepływy pieniężne dla obu scenariuszy. Analiza została przeprowadzona na podstawie rzeczywistych wymagań i czasochłonności dotychczasowych przeglądów infrastruktury kolejowej zgodnie z instrukcją tego zarządcy [62]. Przedmiotem porównania wskazującym na opłacalność nowego rozwiązania był jednorazowy koszt wykonania przeglądu infrastruktury oraz łączne roczne koszty wymaganych przeglądów w obu wariantach wykonywania przeglądów.

Do analizy przyjęto następujące założenia:

- obszar objęty monitoringiem (tabela 17) - infrastruktura kolejowa stacji kolejowych i bocznic: KWK Jankowice, KWK Chwałowice, KWK Marcel i Bocznic Kłokocin (Boguszowice) zarządzane przez Infra Silesia S.A.;

- minimalna częstotliwość wykonywania obchodów normalnych (ogłędzin) wynosi jeden raz w tygodniu.

Tabela 17. Długości torów do inspekcji przez obchodowych na wybranym terenie.

Nazwa bocznicy	Długość torów (km)	Łączna długość torów do przeglądu rocznie (km)
KWK Jankowice	28,49	1481,48
KWK Chwałowice	9,26	481,52
KWK Marcel	7,97	414,44
Bocznica Kłokocin (Boguszowice)	10,00	520,00
<b>Razem</b>	<b>55,72</b>	<b>2897,44</b>

Źródło: opracowanie własne.

### 6.3. Kalkulacja kosztów ogłędzin metodą konwencjonalną.

Model kalkulacji inspekcji infrastruktury kolejowej wykonywanej przez pracowników obchodowych uwzględnia wszystkie istotne składniki kosztowe jakie są niezbędne do wykonania inspekcji.

$$\text{Całkowity koszt inspekcji} = \text{koszt pracy} + \text{koszty dodatkowe} \quad (4)$$

gdzie:

koszt pracy = koszt pracowników obchodowych z pracownikiem dozoru;

koszty dodatkowe = koszt dojazdu do miejsc inspekcji, koszty posiadania pojazdu, odzieży roboczej itp.

Na koszty pracy składają koszty zatrudnienia czterech pracowników zatrudnionych na umowę o pracę na stanowisku obchodowego oraz jeden pracownik dozoru. Średniomiesięczna płaca brutto pracownika obchodowego to 4,6 tys. złotych, a pracownika dozoru 5,8 tys. złotych brutto. Przyjmuje się, że pracownik obchodowy dokonuje ogłędzin z prędkością 2 km/h, jednak w sytuacji wykonywania drobnych prac, dokręcania śrub etc. prędkość wykonywania obchodów spada do 0,5 km/h. Na podstawie rozmów z pracownikami dozoru do dalszych kalkulacji przyjęto, że obchodowy na terenie Infra Silesii S.A. porusza się ze średnią prędkością 1,2 km/h. Związane jest to z rozległością infrastruktury, często

niewielkimi dystansami w lokalizacjach i koniecznością przemieszczania się pomiędzy lokalizacjami, naprawą drobnych usterek infrastruktury podczas obchodów, co powoduje spadek ilości godzin związanych tylko i wyłącznie z przemieszczaniem się obchodowego podczas zmiany roboczej i powoduje spadek średniej prędkości przeglądów pracownika na jego zmianie.

Cotygodniowe obchody lokalizacji wymagają przejścia ok. 55 kilometrowego odcinka infrastruktury i kilkukrotnego przemieszczania się pracowników samochodem osobowym. Analizując poszczególne lokalizacje zarządcy przyjęto, że w ramach jednego tygodnia pracownicy pokonają dystans 200 km. Do kosztów dojazdu zaliczono koszty paliwa, amortyzację samochodu oraz ubezpieczenie pojazdu. Średnie zużycie paliwa na 100 km to 7 litrów oleju napędowego po cenie 7 zł/litr. Ubezpieczenie od odpowiedzialności cywilnej (OC) zostało oszacowane na poziomie 700 zł na rok. Założono zakup samochodu w cenie 70 000 złotych objęty rozliczny amortyzacją na poziomie 20%.

Na wyposażenie pracownika obchodowego i toromistrza składa się kask, odzież robocza w tym buty, kamizelka odblaskowa, rękawice ochronne. Całość została oszacowana na poziomie 1 000 złotych rocznie.

#### 6.4. Kalkulacja kosztów wykonywania oględzin infrastruktury za pomocą BSP

Do modelu kalkulacji inspekcji infrastruktury kolejowej wykonywanej przy użyciu BSP przyjęto te same założenia co do lokalizacji i częstotliwości wykonywania oględzin. Jednak w tym przypadku oprócz kosztów pracy i kosztów dodatkowych pojawił się koszt kapitału wynikający z konieczności wykonania nakładów inwestycyjnych:

$$\text{Całkowity koszt inspekcji} = \text{koszt kapitału} + \text{koszty pracy} + \text{koszty dodatkowe} \quad (5)$$

gdzie:

koszt kapitału = koszt zakupu urządzenia;

koszt pracy = koszt pracowników obchodowych z pracownikiem dozoru;

koszty dodatkowe – serwisowanie, oprogramowanie, stacje dokujące, energia elektryczna.

Na koszty pracy składają się wydatki na dwóch pracowników zatrudnionych na zasadach jak opisanych powyżej w przypadku obchodów metodą konwencjonalną. Zakłada się, że na obecnym etapie wdrożenia i rozwoju produktu konieczne będzie utrzymanie dwóch pracowników, w tym pracownika dozoru w celu wykonywania zadań jakie nie będą jeszcze możliwe do inspekcji przez BSP.

W docelowym rozwiązaniu zakłada się dalszą redukcję czasu pracy obchodowych ograniczając się do jednego pracownika obchodowego i jednego pracownika nadzorującego prowadzenie oględzin za pomocą BSP na cały obszar zarządcy infrastruktury tj. 108,42 km torów, co jest dwukrotnie większą ilością torów od przyjętej do porównania w kalkulacji zgodnie z tabelą 13 (55,72 km).

W kalkulacji nie uwzględniono kosztów przechowywania danych i utrzymywania serwerów, ponieważ Infra Silesia S.A dysponuje dostępem to takiej infrastruktury i nie spowoduje to powstania dodatkowych kosztów po stronie spółki.

Kalkulacja została oparta na zakupie dwóch urządzeń BSP DJI Matrice 300 posiadających zintegrowaną kamerę szerokokątną, zmiennoogniskową i termowizyjną z dalmierzem laserowym. Założono cenę zakupu drona na poziomie 40.999 zł/sztukę [120] i jego roczną amortyzacją na poziomie 20%.

Spółka Infra Silesia S.A. nie zatrudnia aktualnie pracowników z uprawnieniami do prowadzenia lotów BSP. Do pozyskania uprawnień w tym zakresie wymagane jest zdanie egzaminu pozwalającego otrzymać certyfikat kompetencji pilota drona w kategorii szczególnej. W kalkulacji przyjęto koszt szkolenia pilota drona - poza zasięgiem wzroku BVLOS pozwala na loty w scenariuszu narodowym NSTS-05 do 4kg lub NSTS-06 do 25kg [122], który jest wystarczający do wykonywania założonych lotów.

Do obsługi zebranego materiału zdjęciowego z inspekcji konieczna jest aplikacja, w której odpowiedni algorytm analizuje zdjęcia wyszukując anomalie, które są traktowane jako usterki infrastruktury i prezentowane w formie graficznej na mapie lub w formie raportu. Na podstawie zbioru zdjęć wykonanych po każdorazowej inspekcji przy użyciu drona zostanie stworzona baza danych, która będzie na bieżąco rozszerzana i aktualizowana.

W związku z tym, że głównym założeniem wykonywania oględzin przez BSP jest wykonywanie ich w sposób autonomiczny założono zakup i montaż dwóch garaży dla dronów (hub'ów), w których drony oczekują na kolejne misje, lub w których jest dokonywana wymiana baterii przed kolejnym lotem [121]. Zainstalowane w hub'ie urządzenia wymieniają baterię drona w zaledwie 2 minuty, dzięki czemu BSP jest gotowy do kolejnej misji po kilku minutach, umożliwiając nieprzerwaną obsługę drona 24/7. Cena zakupu garażu została ustalona na poziomie 388 tys. PLN za sztukę. Zaplanowano rozliczenie kosztów amortyzacją na poziomie 20%.

Na koszty dodatkowe ujęte w kalkulacji składają się energia elektryczna zużyta na ładowanie dronów oraz garaży ładujących a także koszty serwisowania urządzeń BSP oraz ich przeglądów. Roczne koszty z tego tytułu przyjęto na poziomie 7 200 złotych.

#### 6.5. Wyniki analizy ekonomicznej

W celu ustalenia czy proponowany model inspekcji infrastruktury za pomocą BSP jest bardziej opłacalny z ekonomicznego punktu widzenia od konwencjonalnej metody wykonywania obchodów należy porównać oba scenariusze. Mając na uwadze założenia opisane powyżej dokonano kalkulacji kosztów roboczogodziny w obu modelach tj. dla konwencjonalnej metody wykonywania obchodów (tab. 18) i oględzin infrastruktury za pomocą BSP (tab. 19).

*Tabela 18. Koszty oględzin metodą konwencjonalną.*

<b>Koszty pracy</b>	<b>na m-c</b>
koszt zatrudnienia obchodowego (4 osoby)	18 400,00
koszt zatrudnienia toromistrza (1 osoba)	5 800,00
<b>razem koszty pracy</b>	<b>24 200,00</b>
<b>Koszty dodatkowe</b>	<b>na m-c</b>
koszty transportu do miejsc przeglądu	1 617,00
paliwo	392,00
ubezpieczenie	58,33
amortyzacja	1 166,67
koszt odzieży roboczej	416,67
<b>razem koszty dodatkowe</b>	<b>2 033,67</b>
<b>RAZEM koszty</b>	<b>26 233,67</b>

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 19. Koszty inspekcji za pomocą BSP.

<b>Koszty pracy</b>	<b>na m-c</b>
koszt zatrudnienia obchodowego (1 osoba)	4 600,00
koszt zatrudnienia toromistrza (1 osoba)	5 800,00
<b>razem koszty pracy</b>	<b>10 400,00</b>
<b>Koszty dodatkowe</b>	<b>na m-c</b>
koszty transportu do miejsc przeglądu	1 470,00
paliwo	245,00
ubezpieczenie	58,33
amortyzacja	1 166,67
koszty amortyzacji zakupu urządzeń i oprogramowania	18 666,67
zakup dwóch urządzeń BSP	1 366,63
oprogramowanie + baza danych	3 000,00
garaże dla dronów	14 300,03
szkolenie pilota drona	125,00
koszt odzieży roboczej	166,67
energia elektryczna na ładowanie BSP	300,00
serwis i przeglądy BSP	300,00
<b>razem koszty dodatkowe</b>	<b>21 028,33</b>
<b>RAZEM koszty</b>	<b>31 428,33</b>

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z procedurą kalkulacji inwestycji obowiązującą w Infra Silesia S.A. należało uwzględnić szacowany poziom inflacji oraz wzrost wynagrodzeń w średnim okresie czasu tj. 5 lat inwestycji (tzw. *MTP – Mid Term Period*) i przedstawić oba scenariusze (tabela 20).

Tabela 20. Kalkulacja kosztów obu scenariuszy wykonywania oględzin infrastruktury

**SCENARIUSZ 1: Inspekcje za pomocą BSP**

	0	1	2	3	4	5
Okres analizy	2023	2024	2025	2026	2027	2028
Zakup BSP, oprogramowania i garaży	1 120 000					
<b>Inwestycja</b>	<b>1 120 000</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Amortyzacja</b>		224 000	224 000	224 000	224 000	224 000
Koszty utrzymania i inne		29 219	28 447	29 215	30 004	30 814
Koszty pracy: Operator drona + obchodowy		129 792	134 984	140 383	145 998	151 838
<b>Koszty całkowite</b>	<b>0</b>	<b>383 011</b>	<b>387 431</b>	<b>393 598</b>	<b>400 002</b>	<b>406 652</b>
Wartość rezydualna						600 000
<b>Całkowite przychody</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>600 000</b>
<b>WYNIK</b>	<b>0</b>	<b>-383 011</b>	<b>-387 431</b>	<b>-393 598</b>	<b>-400 002</b>	<b>193 348</b>
<b>Cash-flow</b>	<b>-1 120 000</b>	<b>-159 011</b>	<b>-163 431</b>	<b>-169 598</b>	<b>-176 002</b>	<b>417 348</b>
<b>Disc factor (13%)</b>	<b>1,00</b>	<b>0,88</b>	<b>0,78</b>	<b>0,69</b>	<b>0,61</b>	<b>0,54</b>
<b>NPV</b>	<b>-1 120 000</b>	<b>-140 717</b>	<b>-127 990</b>	<b>-117 540</b>	<b>-107 945</b>	<b>226 520</b>
<b>NPV cum.</b>	<b>-1 120 000</b>	<b>-1 260 717</b>	<b>-1 388 707</b>	<b>-1 506 247</b>	<b>-1 614 193</b>	<b>-1 387 673</b>
<b>Total NPV cum.</b>	<b>-1 387 673</b>					
<b>Wynik całkowity</b>	<b>-1 370 693</b>					
<b>IRR</b>	<b>-33%</b>					

**SCENARIUSZ 2: Obchody metodą konwencjonalną**

	2023	2024	2025	2026	2027	2028
<b>Inwestycja</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>Amortyzacja</b>						
koszty pracy		302 016	314 097	326 661	339 727	353 316
koszty dodatkowe		25 161	25 865	26 563	27 281	28 017
<b>Koszty całkowite</b>	<b>0</b>	<b>327 177</b>	<b>339 962</b>	<b>353 224</b>	<b>367 008</b>	<b>381 333</b>
<b>Całkowite przychody</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>
<b>WYNIK</b>	<b>0</b>	<b>-327 177</b>	<b>-339 962</b>	<b>-353 224</b>	<b>-367 008</b>	<b>-381 333</b>
<b>Cash-flow</b>	<b>0</b>	<b>-327 177</b>	<b>-339 962</b>	<b>-353 224</b>	<b>-367 008</b>	<b>-381 333</b>
<b>Disc factor (13%)</b>	<b>1,00</b>	<b>0,88</b>	<b>0,78</b>	<b>0,69</b>	<b>0,61</b>	<b>0,54</b>
<b>NPV</b>	<b>0</b>	<b>-289 537</b>	<b>-266 240</b>	<b>-244 802</b>	<b>-225 093</b>	<b>-206 972</b>
<b>NPV cum.</b>	<b>0</b>	<b>-289 537</b>	<b>-555 777</b>	<b>-800 578</b>	<b>-1 025 671</b>	<b>-1 232 643</b>
<b>Total NPV cum.</b>	<b>-1 232 643</b>					
<b>Wynik całkowity</b>	<b>-1 768 703</b>					
<b>IRR</b>	<b>n/a</b>					

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie wykonanych obliczeń, średnioroczny koszt roboczogodziny netto w okresie MTP wyniósł:

- 219,33 zł – dla inspekcji metodą konwencjonalną,
- 169,98 zł – dla inspekcji za pomocą BSP.

Niższy koszt roboczogodziny w przypadku inspekcji za pomocą BSP wynika m.in. z konieczności zatrudnienia mniejszej ilości pracowników (niższe koszty płac) oraz założenia wartości rezydualnej



w wysokości 600 tys. złotych na koniec okresu MTP pochodzącej od wartości sprzętu, oprogramowania i bazy danych.

Znając koszt roboczogodziny w obu scenariuszach konieczne było ustalenie czasu wykonywania obchodów w obu modelach. Przy założeniu prędkości wykonywanych obchodów metodą konwencjonalną na poziomie 1,2 km/h całkowity koszt jednorazowego przeglądu we wszystkich lokalizacjach wyniósł 11 237,17 zł (Tabela 21).

*Tabela 21. Kalkulacja kosztów wykonania jednorazowego przeglądu całej infrastruktury metodą konwencjonalną*

Nazwa bocznicy	Długość torów (km)	Ilość osób	Ilość km na osobę	Czas pracy pracownik obchodowego (rbh/os)	Czas pracy pracowników łącznie (rbh)	Średni koszt rbh w MTP (PLN)	Całkowity koszt przeglądu
KWK Jankowice	28,49	4	7,12	6,24	24,94	219,33	5 470,53
KWK Chwałowice	9,26	4	2,32	2,23	8,92	219,33	1 955,72
Bocznica Kłokocin	8,67	4	2,17	2,11	8,43	219,33	1 847,88
KWK Marcel	9,30	4	2,33	2,24	8,95	219,33	1 963,03
<b>SUMA</b>	<b>55,72</b>		<b>13,93</b>	<b>12,81</b>	<b>51,23</b>		<b>11 237,17</b>

Źródło: opracowanie własne.

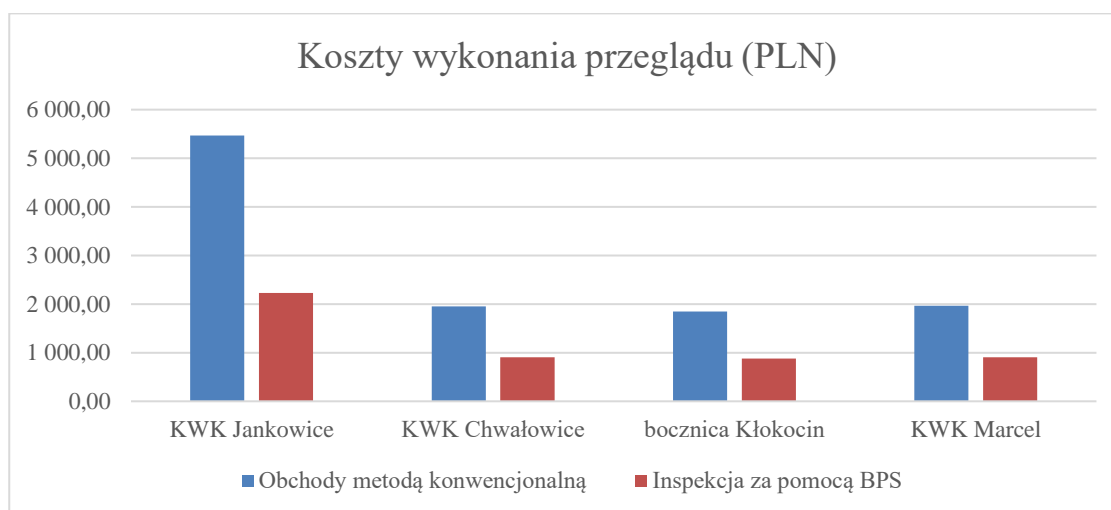
Dla obliczenia kosztów jednorazowego przeglądu za pomocą BSP przyjęto prędkość wykonywania lotów inspekcyjnych 7km/h oraz 1,2km/h dla pracowników obchodowych uzupełniających oględziny niewykonane przez BSP. Analizując zakres inspekcji BSP możliwych do wykonania na obecnym etapie rozwoju produktu, założono że 30% czasu konwencjonalnych obchodów musi również zostać wykonanych podczas inspekcji BSP tj. tych miejsc gdzie dron nie dostarczył informacji o stanie infrastruktury. W ten sposób ustalony koszt wykonania przeglądów wyniósł 4 917,43 złotych przedstawia tabela 22.

Tabela 22. Kalkulacja kosztów wykonania jednorazowego przeglądu całej infrastruktury za pomocą BSP.

Nazwa bocznicy	Długość torów (km)	Ilość osób	Czas inspekcji BSP (h)	Czas pracy pracowników (rbh/os)	Czas pracy pracowników łącznie (rbh)	Średni koszt rbh w MTP (PLN)	Całkowity koszt przeglądu
KWK Jankowice	28,49	2	4,07	6,56	13,12	169,98	2 230,52
KWK Chwałowice	9,26	2	1,32	2,66	5,32	169,98	903,43
Bocznica Kłokocin	8,67	2	1,24	2,58	5,17	169,98	878,36
KWK Marcel	9,30	2	1,33	2,66	5,33	169,98	905,13
<b>SUMA</b>	<b>55,72</b>		<b>7,96</b>	<b>14,47</b>	<b>28,93</b>		<b>4 917,43</b>

Źródło: opracowanie własne.

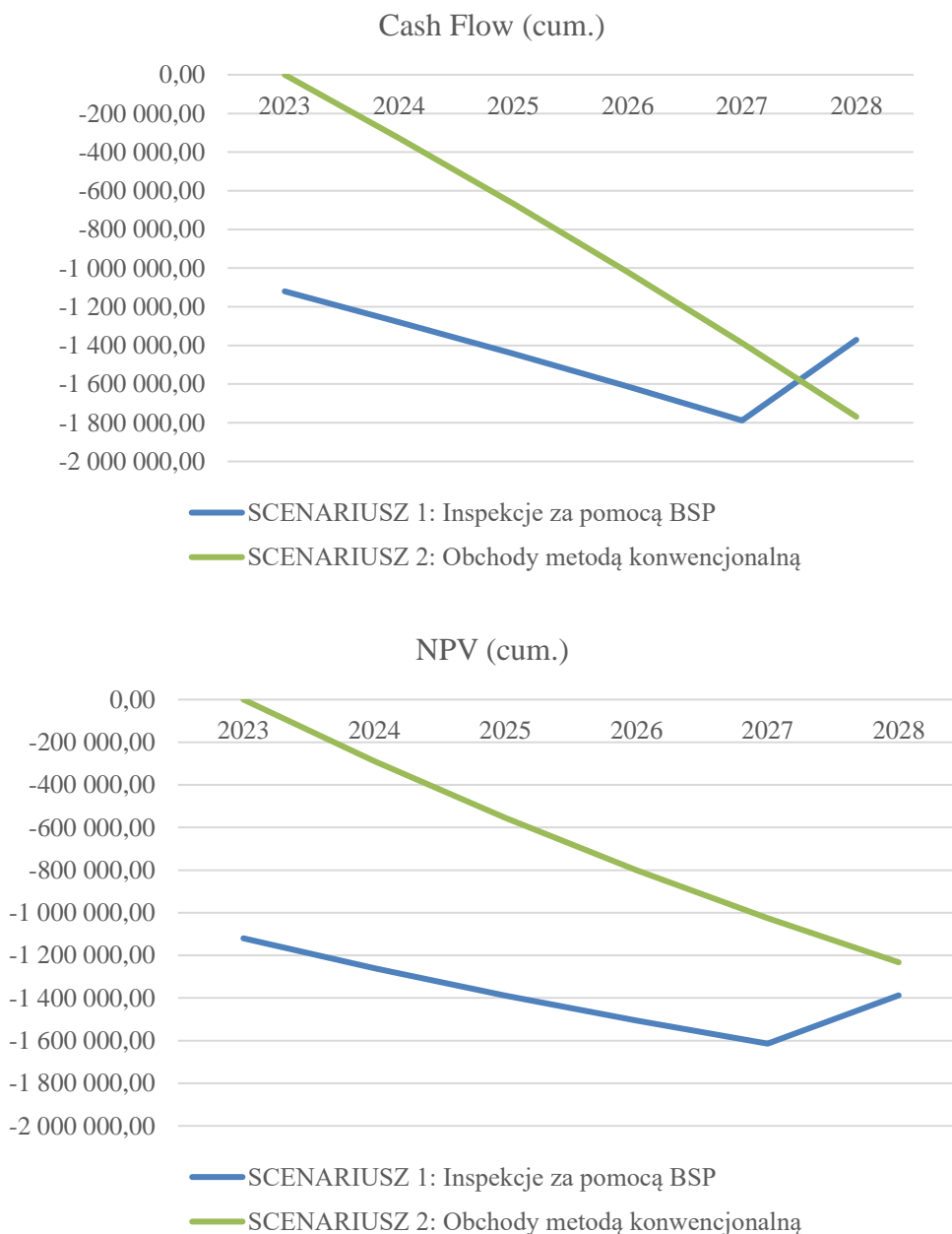
Na podstawie wykonanych obliczeń można wskazać, że koszty jednorazowego przeglądu za pomocą BSP są istotnie niższe niż metodą konwencjonalną (rys. 69).



Rysunek 69. Porównanie jednostkowego kosztu wykonania przeglądów metodą konwencjonalną oraz za pomocą BSP.

Do analizy efektywności nowego przedsięwzięcia w porównaniu do konwencjonalnego wykonywania oględzin obliczono również przepływy pieniężne (*cash flow*) oraz NPV dla inwestycji (rys. 70). Wskaźnik NPV stanowi różnicę pomiędzy zdyskontowanymi przepływami pieniężnymi

a nakładami. Wskaźnik NPV uwzględnia zmianę wartości pieniądza w czasie, uwzględnia całość przepływów pieniężnych związanych z inwestycją, a także zapewnia porównywalność inwestycji i umożliwia ocenę danej inwestycji na tle innych, co jest istotną kwestią, gdy Infa Silesia S.A., podejmuje decyzję o wdrażaniu wielu inwestycji w tym samym czasie.



Rysunek 70. Porównanie wskaźników cash flow NPV dla obu scenariuszy.

Zarówno wynik EBIT (tabela 20) jak NPV (uwzględniając utratę wartości pieniądza w czasie) (rys. 70) wychodzą pozytywnie dla scenariusza inwestycji dla inspekcji za pomocą BSP, co całkiem intuicyjnie przedstawiają powyższe wykresy. Wynik EBIT należy interpretować w ten sposób, że mniejsza strata oznacza lepszy wynik, ponieważ w scenariuszu nie uwzględnia się przychodów z inwestycji. Kalkulacja uwzględnia pięcioletnią amortyzację od nakładów inwestycyjnych (20% - 5 lat) co oznacza, że po tym okresie jedynym kosztem w przypadku modelu opartego na BSP jest koszt pracy i koszty dodatkowe.

Podsumowując badanie efektywności inwestycji w porównaniu do dzisiaj wykonywanych oględzin metodą konwencjonalną stwierdza się, że wykonywanie inspekcji za pomocą BSP jest istotnie bardziej efektywne niż rozwiązanie polegające na konwencjonalnym wykonywaniu obchodów. Pomimo konieczności dokonania nakładów na drony oraz ich garaże rozłożenie wydatku w postaci amortyzacji w całym okresie używalności produktu jest tańsze niż ponoszenie kosztów pracy. W przypadku inwestycji w BSP główny koszt jaki pozostaje to amortyzacja, która jest odporna na inflację. Z kolei alternatywny scenariusz z pracą obchodowych bazuje głównie na koszcie wynagrodzeń, które rosną szybciej. W konsekwencji można stwierdzić, że jest to wariant bardziej stabilny pod względem przewidywalności kosztów w przyszłości, a ewentualny wzrost kosztów pracy wyższy niż założone w planie (4% rok do roku) tylko przyspieszy okres zwrotu dla tej inwestycji.

Całkowita różnica w kosztach oględzin infrastruktury pomiędzy obiema metodami w okresie pięciu lat wyniosła 398 009,53 złotych co oznacza, że o tyle koszty inspekcji z użyciem BSP w okresie 5 lat są mniejsze niż koszty inspekcji wykonywanych metodą konwencjonalną, w tym samym okresie.

Przeprowadzona analiza wskazuje również że przy wariacie wykonywania przeglądów za pomocą BSP, całość badanej infrastruktury (55,72 km) może zostać wykonana podczas jednej zmiany roboczej (7,96 godz.). Uwzględniając konieczne prace serwisowe BSP, analizę materiału zdjęciowego, raportów, przemieszczanie się pracowników itp. pozostaje do wykorzystania trzy dni w tygodniu do wykonywania oględzin w innych lokalizacjach. Otwiera się również możliwość sprzedaży usługi na zewnątrz w pozostałym dostępnym czasie. Z uwagi na fakt, że całkowita długość zarządzanych linii kolejowych wynosi 108,42 km inspekcje pozostałej części infrastruktury (52,70 km) mogą być wykonane maksymalnie w kolejnych dwóch dniach (uwzględniając konieczność przemieszczania się pracowników pomiędzy lokalizacjami, ewentualne powtórzenie części lotów, oczekiwanie na wymagane warunki pogodowe itp.). Te dodatkowe możliwości jeszcze bardziej poprawią efektywność inwestycji, ponieważ ograniczą konieczność zatrudniania pracowników obchodowych w pozostałych lokalizacjach jak

również mogą zwiększyć przychody z prowadzonej działalności inspekcji BSP przez Infa Silesia S.A., które nie są uwzględnione w obecnej kalkulacji i stanowią szansę biznesową dla spółki po wdrożeniu tego rozwiązania.

## 7. Podsumowanie

Praca wykazała, że zastąpienie konwencjonalnego wykonywania oględzin przez pracowników monitoringiem z powietrza wykonywanym przez BSP wyposażone w odpowiednie czujniki i kamery jest zagadnieniem bardzo złożonym. Przedstawiono aktualnie funkcjonujące rozwiązania monitoringu infrastruktury za pomocą specjalistycznych pojazdów załogowych oraz bezzałogowych, wskazując na wady i zalety takich rozwiązań. Pomimo, że analiza literatury wykazała, że w wielu gałęziach przemysłu wykorzystanie BSP do przeglądu infrastruktury ma zastosowanie, to jednak na obszarze kolejowym nie znaleziono rozwiązań, które w sposób kompleksowy, systemowy, autonomiczny i zapewniający wymagany poziom bezpieczeństwa ujmują wykonywanie przeglądów lub inspekcji za pomocą BSP, co świadczy o tym że należało podjąć prace naukowe i badawcze, aby odnaleźć odpowiednie rozwiązania i narzędzia do tej działalności. W celu prawidłowego zbadania możliwości inspekcji z powietrza przyjęto w pracy ściśle określoną kompozycję w wyniku czego wyodrębniono zasadnicze części: analizę dotychczas stosowanego systemu monitorowania infrastruktury kolejowej, analizę i możliwości bezzałogowych statków latających w aspekcie automatycznego patrolowania i monitorowania infrastruktury oraz charakterystykę wykonanych badań związanych z realizacją przedmiotu pracy oraz prezentację uzyskanych rezultatów.

Rola bezzałogowych statków powietrznych, stanowiących element bezemisyjnej i zrównoważonej mobilności w miastach (Urban Air Mobility) nieustannie rośnie i przewidziano dalszy rozwój ram regulacyjnych w zakresie dronów, przyjmując strategię działań w tym obszarze (*Drone Strategy 2.0*) [127]. Wskutek rozwijającej się automatyzacji procesów i autonomii, drony wzbogacone o technologię sztucznej inteligencji stają się coraz bardziej precyzyjne i użyteczne w zastosowaniach komercyjnych. Tym bardziej, że rosnące środowisko U-Space, zgodnie z rozwojem technologii umożliwia coraz większą digitalizację i automatyzację procesów oraz wykonywanie operacji przez autonomiczne bezzałogowe statki (systemy) latające [126]. Szerokie możliwości stosowania bezzałogowych statków latających oraz ich znaczący potencjał ekonomiczny wykazano na przykładzie obliczeń przeprowadzonych przez Polski Instytut Ekonomiczny [24] wskazując, że planowana wartość rynku dronów wyniesie do 2026 r. 3,26 mld złotych, a efekt dla całej gospodarki w Polsce może wynieść nawet 576 mld złotych. W dokumencie wskazano także na tendencje rozwojowe lotnictwa bezzałogowego, które podlega szybkiej automatyzacji, kreując nowy wymiar rynku usług w przestrzeni powietrznej. Ten kontekst jest o tyle ważny, że digitalizacja, upraszczanie i automatyzacja procesów jest jednym

z podstawowych filarów strategii rozwoju DB Cargo Polska S.A. oraz Infra Silesia S.A. co wzmacnia dążenie spółek do wdrożenia i komercjalizacji proponowanego innowacyjnego rozwiązania.

Na podstawie analizy przepisów wewnętrznych autoryzowanych zarządców infrastruktury wykazano [9, 62], że obowiązkowe jest cykliczne wykonywanie obchodów, gdyż są one elementem systemu zarządzania bezpieczeństwem zapewniającym bezpieczne prowadzenie ruchu kolejowego. Z tego wynika, że wykonywanie przeglądów i przeprowadzanie obchodów w wyznaczonym czasie, przy stale rozwijającej się infrastrukturze kolejowej i zmniejszaniu przepustowości linii staje się bardzo pracochłonne, kosztowne a jednocześnie może nie zapewniać wymaganego poziomu bezpieczeństwa.

W związku z tym nastąpiła wręcz konieczność uwzględnienia osiągnięć naukowo – technicznych i wprowadzenia innowacyjnych rozwiązań na kolei oraz zaimplementowania bezzałogowych statków latających, co znalazło swój wyraz w przedstawionych wynikach dotychczas zrealizowanych prac.

W celu wdrożenia w przedsiębiorstwie rozwiązania monitoringu przez BSP wykonano loty nad infrastrukturą posiadaną przez DB Cargo Polska S.A. będącą w zarządzie Infra Silesia S.A. W tym celu kilkakrotnie monitorowano infrastrukturę w rejonie Sosnowca oraz Rybnika i zebrano materiał zdjęciowy, który następnie poddano procesowi etykietowania obiektów i trenowania algorytmów. W trakcie tego procesu ustalono, że zdjęcia wykonywane z wysokości 10-15 m nad główką szyny nie dają oczekiwanych rezultatów tj. są niewyraźne, nie dają możliwości precyzyjnego identyfikowania obiektów i tym samym nie jest możliwe prawidłowe nauczanie algorytmu automatycznego rozpoznawania obiektów. Wielkość piksela w terenie otrzymana na podstawie wykonanych w ten sposób zdjęć jest na tyle duża (tabela 7-9), że nie pozwoliła na identyfikację obiektów i ich usterek w sposób jaki jest wymagany przy wykonywaniu oględzin infrastruktury. Z uwagi na występującą w niektórych lokalizacjach zarządcy sieć trakcyjną oprócz standardowych nalotów BSP wykonano loty na stacji KWK Marcel gdzie znajduje się sieć trakcyjna celowo wykonując loty nad i pod siecią trakcyjną, aby przekonać się jakie mogą wystąpić zakłócenia. Podczas lotów testowych nie stwierdzono interferencji pomiędzy BSP a siecią trakcyjną. Jednocześnie ustalono, że optymalna wysokość loty będzie wynosiła 3,0-3,5 m. Dzięki temu możliwe będzie wykonywanie lotów w każdych warunkach tj. w miejscach występowania sieci trakcyjnej oraz poza jej obszarem.

Również wykonano loty pod mostami, aby sprawdzić możliwość wykrywania usterek w ciemnym środowisku oraz po włączeniu oświetlenia. Zauważono, że należy zwrócić się uwagę na rozpoznawalność linii szyn w zależności oświetlenia (kompensować refleks światła na główce szyny, który powoduje niedopuszczalny błąd pomiarowy rozstawu szyn). W dyskusji zaproponowano

zastosowanie filtra polaryzacyjnego na kamerę, który powinien wyeliminować niepożądane zjawisko, jednak należy to sprawdzić w kolejnych testach lotniczych.

Ważnym czynnikiem wpływającym na jakość zdjęć był zastosowany obiektyw. Spośród testowanych rekomendowano obiektyw o ogniskowej 30 mm, pozwalający uzyskać wymaganej, wysokiej jakości zdjęcia wykonywane na rekomendowanej wysokości. Dodatkową zaletą jest uzyskanie na zdjęciu obszaru obejmującego 7-10 podkładów kolejowych co jest wielkością optymalną z punktu widzenia obróbki i analizy zdjęć.

Dzięki uzyskaniu odpowiedniej jakości danych zarejestrowanych z powietrza, możliwe stało się przeprowadzenie badań nad algorytmami uczenia maszynowego dla potrzeb klasyfikacji stanu elementów infrastruktury kolejowej. Rozwiązano problem badawczy jakim była obróbka danych pozwalająca na oznaczenie i rozpoznanie w oparciu o pozyskane zdjęcia elementów infrastruktury kolejowej, aby było możliwe opracowanie bazy danych treningowych i testowych na potrzeby badań algorytmów uczenia maszynowego. Po przeanalizowaniu wybranej literatury jak również wspierając się wiedzą ekspercką na temat dostępnych aplikacji do detekcji i klasyfikacji obiektów ustalono, że dobrym rozwiązaniem do celów pracy jest zastosowanie praktycznego i wygodnego narzędzia CVAT do etykietowania obiektów. Następnie dobrano odpowiednie modele segmentacji do szyn i podkładów, model detekcji oparty na algorytmie RetinaNet do detekcji małych elementów infrastruktury takich jak wkręty, śruby stopowe i łapki. Łącząc oba modele doprowadzono do skutecznego wykrywania i przerw między szynami. W trakcie badań przeprowadzono analizę identyfikacji podkładów i szyn uzyskując wysoki poziom wskaźnika IoU odpowiednio 0,93 i 0,90 [będzie odwołanie do tabeli], co należy uznać za bardzo wysoki wynik. Następnie zbadano możliwość i jakość detekcji małych obiektów składających się na mocowanie szyn. Na przykładzie ponad 30 000 takich obiektów nauczono algorytm ich rozpoznawania uzyskując średni wskaźnik *Recall* w przedziale 0,7-0,87, co należy uznać za wynik bardzo dobry. Dodatkowo wykonano analizę na wydzielonym torze stacji Sosnowiec Jęzor, która potwierdziła skuteczność rozpoznawania nieprawidłowości na infrastrukturze. Należy zaznaczyć, że stwierdzono kilka stanów *False Negative* i *False Positive*, jednak były to nieliczne przypadki i należy je zweryfikować, a następnie skorygować odpowiednio algorytm. Dzięki temu, że algorytm wskazuje usterkę (nawet czasem pozorną), może ona być w krótkim czasie zweryfikowana przez toromistrza na podstawie dostarczonych zdjęć, który może podjąć decyzję o przyjęciu lub odrzuceniu usterki, a nawet o wstrzymaniu ruchu kolejowego jeśli uzna to za zasadne. W systemie konwencjonalnych obchodów nie jest to możliwe w tak krótkim czasie. Proponowane rozwiązanie zdecydowanie poprawia pod tym



względem bezpieczeństwa prowadzenia ruchu kolejowego, ponieważ informacja o stanie infrastruktury jest dostępna zaraz po zakończeniu misji (uwzględniając czas transferu i obróbki danych). Weryfikacja w terenie skuteczności działania nowego rozwiązania wykazała również pomyłki w postaci braku rozpoznania elementu jaki znajdował się w cieniu, co wskazuje na konieczność doskonalenia algorytmu lub powtarzanie lotów w różnych porach dnia lub przy innym zachmurzeniu. Nie stanowi to dużego wyzwania, ponieważ z każdym lotem jest zbierany kolejny materiał zdjęciowy, który przy wykorzystaniu rekomendowanych algorytmów stanowi doskonałą bazę treningową na podstawie, której algorytm uczy się na kolejnych przykładach, co przyczyni się w krótkim czasie do lepszej i prawidłowej interpretacji sytuacji występujących na gruncie.

W pracy wskazano minimalne warunki pogodowe jakie powinny być spełnione do bezpiecznego wykonywania lotów. Dron posiada ograniczenia, które wynikają z silnych i porywistych wiatrów, burz i zamieci, które są zawarte w instrukcjach eksploatacyjnych BSP. Konieczne jest korzystanie i sprawdzanie przed każdym lotem danych meteorologicznych (certyfikowanych - lotniczych), podawanych na stronie Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Z racji lotów na niskim pułapie widoczność nie odgrywa tak istotnej roli i nie odnotowano trudności w pozyskaniu wymaganej jakości zdjęć z powodu, jednakże zdjęcia mogą być wykonywane jedynie w porze dziennej.

W celu kompleksowego sprawdzenia możliwości zastąpienia obchodów infrastruktury monitoringiem z powietrza przez BSP przeanalizowano aktualnie obowiązujące przepisy dotyczące wykonywania lotów, w tym w szczególności lotów nad infrastrukturą kolejową. Nie znaleziono szczególnych ograniczeń formalnoprawnych poza koniecznością uzgadniania lotów z zarządcami infrastruktury oraz w przypadku lotów nad infrastrukturą kolejową zakwalifikowaną jako strategiczna.

Z uwagi na specyfikę lotów oraz rodzaj BSP ustalono, że loty będą wykonywane w kategorii „specjalnej”. W związku z tym, że wprowadzana zmiana sposobu wykonywania oględzin ma charakter zmiany znaczącej i mającej wpływ na bezpieczeństwo [będzie odwołanie], konieczne będzie wykonanie oceny znaczenia zmiany przez zarządcy infrastruktury.

Ważną częścią pracy było dokonanie właściwego wyboru BSP i jego wyposażenia. W tym celu zdefiniowano kryteria wyboru oraz przetestowano różne rozwiązania i kamery wizyjne rekomendując przyjęcie do seryjnego wdrożenia obiektywu o ogniskowej nie mniejszej niż 30 mm oraz dron klasy DJI Matrice 300 lub dron o podobnej charakterystyce dedykowany opracowany przez producenta hub'a (garażu). Wykonano testy autonomicznego startu i lądowania drona w garażu, które przebiegły

pomyślnie potwierdzając, że wykonywanie autonomicznych misji w celu inspekcji infrastruktury kolejowej jest możliwe przy zastosowaniu proponowanych rozwiązań.

Z uwagi na fakt trudnego rozpoznawania wybuksowań, zdecydowano użyć do badań urządzenie LIDAR, którego zadaniem było dokładne zeskanowanie szyn a na podstawie uzyskanej chmury punktów odnaleźć miejsca zagłębień charakterystyczne dla wybuksowań. Wykonane badania wskazały, że wybuksowania są widoczne przez LIDAR jednak z uwagi na małą liczbę sfotografowanych miejsc z taką usterką materiał nie jest wystarczający do wdrożenia tego rozwiązania detekcji usterki i należy kontynuować testy LIDAR'em zbierając dane oraz rozbudować algorytm. Sformułowano rekomendacje co do sposobu pozyskiwania skanów, lotu i gęstości punktów. Zauważono, że w przypadku mokrej główki szyny występuje szkodliwa dla jakości danych wysoki odbłask skanowanych powierzchni powodująca nieprawidłowe odczyty główki szyny. Zastosowanie LIDARA'a do wykrywania wybuksowań przez BSP wymaga dalszych badań i testów. W wyniku lotów z LIDAR'em uzyskano dodatkowy, bardzo bogaty materiał o infrastrukturze kolejowej, jej otoczeniu i skrajni toru, co otwiera kolejne szerokie możliwości do wykorzystania w przeglądach i ocenie stanu infrastruktury.

W dalszej części pracy przeprowadzono analizę ekonomiczną rekomendowanego rozwiązania i porównano scenariusz konwencjonalnego wykonywania oględzin z proponowanym, nowym rozwiązaniem. Porównano koszty wykonania inspekcji obu wariantów i wykazano że w okresie pięcioletnim uzyska się oszczędność kosztów w wysokości 398 tys. złotych, co zdecydowanie potwierdza, że nowe rozwiązanie jest bardziej korzystne od obecnego. Ponadto, z uwagi na fakt, że monitoring BSP jest zdecydowanie szybszą technologią sprawdzania stanu infrastruktury, w tym samym czasie można dokonać oględzin co najmniej dwukrotnie większego obszaru niż za pomocą konwencjonalnych oględzin. Zarówno wskaźnik NPV oaz obliczone przepływy pieniężne są korzystne dla nowego wariantu inspekcji.

Zwieńczeniem prac nad wdrożeniem w przedsiębiorstwie nowego rozwiązania monitoringu przez BSP było przygotowanie modelu procesu wykonywania oględzin infrastruktury wraz pierwszą wersją interfejsu do przeglądania i wizualizacji usterek wskazanych podczas lotów BSP oraz sformułowanie projektu zmian instrukcji utrzymania infrastruktury zarządcy przygotowując organizację do wdrożenia nowego rozwiązania. Jest to warunek konieczny w przypadku komercjalizacji proponowanego rozwiązania. Zaproponowana wizualizacja usterek jest propozycją, która powinna być sukcesywnie doskonalona z udziałem użytkowników zarządcy infrastruktury. Zgodnie z koncepcją wdrożenia produktu aplikacja będzie dostępna w sieci poprzez aplikację gdzie po każdym locie będzie zgrany

materiał zdjęciowy, który po analizie algorytmu do detekcji usterek wskaże ich rodzaj i miejsce na mapie. Zakłada się rozwój dalszych funkcjonalności takich jak grupowanie usterek, nadawanie im priorytetów i ważności oraz powiązanie z systemem prewencyjnego utrzymania infrastruktury a nawet systemu utrzymania opartego nastanie komponentu tzw. CBM (ang. *Condition Based Maintenance*), co jest jednym z najnowocześniejszych systemów utrzymania urządzeń zwiększających ich dostępność (usuwanie usterek zanim wystąpią niespodziewanie) i generującym istotne oszczędności (wykonywanie napraw kiedy to konieczne, a nie w z góry określonych cyklach). Analizując ilość i rodzaj usterek możliwe będzie także szacowanie kosztów ich usuwania na podstawie dostarczonego materiału o stanie infrastruktury.

Uzupełniane i aktualizowane w cyklu tygodniowym dane zdjęciowe stanowią ogromną i wartościową informację o stanie infrastruktury. Dostęp do archiwalnych zdjęć wskazuje na m.in. na postęp degradacji infrastruktury i postępujące zużycie eksploatacyjne. Materiał zdjęciowy jest obiektywnym, niepodważalnym i jednoznacznym dowodem na wystąpienie wypadków kolejowych co przyczyni się do przyspieszenia postępowań w sprawie prowadzonych przez komisje kolejowe. Niejednokrotnie zdjęcia będą mogły być wykorzystane przez policję lub prokuratora w toku dochodzeń i śledztw prowadzonych w celu wykrycia przyczyn lub sprawców wykroczeń i przestępstw dokonywanych na obszarze kolejowym.

Należy zaznaczyć, że w przeprowadzonych badaniach nie zdołano przeanalizować wszystkich elementów infrastruktury jakie są przedmiotem oględzin przez obchodowego. Skupiono się jednak na podstawowych i krytycznych z punktu bezpieczeństwa kolejowego elementach związanych z nawierzchnią kolejową jak mocowania, pęknięcia szyn czy występowania krótkich wstawek. Wykazano, że przyjęte modele detekcji obiektów sprawdzają się dlatego zgodnie z przedstawioną procedurą badawczą należy dalej kontynuować badania przemysłowe i dokonać weryfikacji pozostałych elementów infrastruktury, dokonać ich oznaczenia, a następnie nauczyć algorytm ich rozpoznawania. W kolejnym kroku należy dokonać zintegrowania wszystkich komponentów systemu i po sprawdzeniu działania prototypu dokonać jego całościowej implementacji.

Podsumowując uzyskane wyniki i ich analizę można stwierdzić, że udowodniono postawioną w pracy tezę oraz osiągnięto wyznaczone cele. Najważniejszym wnioskiem na podstawie wykonanych badań jest stwierdzenie, że jest możliwe zastąpienie wizualnej metody inspekcji infrastruktury kolejowej wykonywanej przez pracowników obchodowych poprzez monitoring z zastosowaniem BSP wyposażonych w odpowiednie kamery i czujniki. Potwierdzono, że nowa metoda zwiększa efektywność

procesu obchodów zarówno pod względem optymalizacji procesu jak również oszczędności kosztów wykonania inspekcji, a w przyszłości również redukcję kosztów utrzymania poprzez wdrożenie rozwiązań opartych o prewencyjne utrzymanie oparte o faktyczne zużycie elementów. Co bardzo ważne, wykazano, że nowa metoda oględzin istotnie poprawia bezpieczeństwo osób zaangażowanych w wykonywanie obchodów poprzez minimalizację, a docelowo eliminację udziału osób w obchodach torów, co zdecydowanie ogranicza ryzyko wypadków z udziałem tych osób. Osiągnięto cel pracy polegający na zwiększeniu bezpieczeństwa kolejowego, ponieważ wykazano, że monitoring za pomocą BSP dostarczył szybciej, dużo bardziej jednoznaczną, obiektywną i niepodważalną informację o stanie technicznym infrastruktury, co w połączeniu z dynamicznie rosnącą bazą danych materiału zdjęciowego pozwala na bezpieczne i bardziej planowe zarządzanie infrastrukturą kolejową. Tezę pracy udowodniono wykazując wysokie wskaźniki detekcji zarówno dużych (szyny, podkłady kolejowe) jak i małych obiektów infrastruktury (śruby stopowe, łukowe, wkręty), co uprawniło do stwierdzenia, że sukcesywnie można zwiększać ilość rozpoznawanych elementów infrastruktury i trenować prawidłowo dobrany model algorytmów.

Z uwagi na to, że dotychczas nie opracowano kompleksowego systemu do przeglądu infrastruktury kolejowej za pomocą BSP, należy zastosować opracowane rozwiązanie do detekcji obiektów infrastruktury za pomocą BSP i doskonalić to rozwiązanie m.in. poprzez dalsze trenowanie algorytmu do jeszcze lepszego rozpoznawania obiektów. Nie należy wykluczać, że potrzeba będzie zastosować inne rozwiązania (kamery) lub dodatkowe loty z uwagi na fakt, że pozostają do detekcji inne specyficzne elementy infrastruktury (semafory, obiekty budowlane, przepusty, znaki itp.). Spółka nadal prowadzi działania związane z rozszerzeniem wdrożenia u zarządcy Infra Silesia S.A., w dalszym ciągu rozwija nowe i modyfikuje już działające metody opisane w niniejszym pracy. Infra Silesia S.A. jako zarządca infrastruktury oraz DB Cargo Polska S.A. jako jej posiadacz są zainteresowane dalszym rozwojem produktu, jego wdrożeniem i komercjalizacją. Działania zmierzające do automatyzacji procesów i ich digitalizacja jest jednym z ważniejszych celów spółek. Również pozostali interesariusze, jak dostawcy dronów i innowacyjnych garaży do przechowywania dronów, są zainteresowani współpracą w zakresie rozwoju produktu dostrzegając potencjał zastosowania proponowanego rozwiązania na pozostałej części sieci infrastruktury kolejowej w Polsce i poza jej granicami.

## 8. Wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników badań oraz ich analizy sformułowano następujące wnioski:

1. Opracowany model inspekcji infrastruktury za pomocą BSP wyposażonego w czujniki i kamery zastąpił w częściowym zakresie oględziny wykonywane przez pracowników obchodowych:
  - a) potwierdzono, że detekcja dużych obiektów takich jak szyny i podkłady kolejowe dokonywana jest z wysoką jakością;
  - b) wykazano, że detekcja małych elementów infrastruktury takich jak wkręty, śruby stopowe łapki, śruby łukowe odbywa się z dobrą i bardzo dobrą jakością i powtarzalnością;
  - c) dowiedziono, że rozpoznawanie styków szyn jest możliwe i w konsekwencji na tej podstawie możliwa jest również identyfikacja potencjalnych pęknięć główki szyny;
  - d) stwierdzono, że rozpoznawanie wybuksowań jest możliwe przy zastosowaniu innych narzędzi niż kamery wizyjne tj. LIDAR'a. Jednak pozyskanie danych było czasochłonne, wymagać będzie wykonania kilku lotów w celu uzyskania powtarzalności pomiarów dobrej jakości materiału (chmury punktów). W tym przypadku konieczne jest poszukiwanie innych metod detekcji wybuksowań, w tym pozyskanie większej ilości zdjęć z kamer wizyjnych i wytrenowanie na ich podstawie algorytmu;
  - e) wykazano, że badanie rozstawu szyn w celu sprawdzenia wyboczeń jest możliwe jednak osiągnięta dokładność pomiarów nie jest akceptowalna. Konieczne jest zastosowanie innego punktu odniesienia do pomiaru niż główka szyny lub zastosowanie innych narzędzi i metod do pomiaru szerokości (np. LIDAR);
  - f) udowodniono, że detekcja tzw. krótkich wstawek jest możliwa przy zastosowaniu ortofotomapy wykonanej na podstawie wykonanych zdjęć;
  - g) opracowane algorytmy uznano za skuteczne i adekwatne do detekcji elementów infrastruktury i tym samym do uzyskania celu projektu.
2. Spośród przetestowanych dronów uznano, że dron klasy DJI Matrice 300 ma największą przydatność do zdalnych inspekcji. Jego zaletą jest zwrotność i możliwość zawisu nad punktem co zwiększa dokładność pomiarów, duża odporność na wiatr (do 15 m/s), a także możliwość pionowego startu i lądowania w dedykowanym garażu. Dron wykonał bezpieczne loty na małej wysokości (3-4 m nad główką szyny), co było bardzo ważnym parametrem w związku z wykonywaniem lotów poniżej sieci trakcyjnej.

3. Na podstawie wykonanych lotów na różnej wysokości (od 3 m do 15 m) ustalono, że najlepszą jakością zdjęć dla celów pracy prezentowały te wykonane na wysokości 3-4 m. Loty wykonane pod i nad trakcją nie wykazały zakłóceń i interferencji z siecią trakcyjną. Ustalono, że wykonany lot na rekomendowanej wysokości, przy zastosowaniu obiektywu o ogniskowej 30 mm, doprowadził do uzyskania wielkości piksela o szerokości 0,3-0,4 mm, co pozwoliło wykryć niewielkie obiekty, styki międzyszynowe i miejsca pęknięć szyn (rozpoznane były nawet źdźbła trawy na główce szyny, które przypominały potencjalne pęknięcia szyn). Do lotów w celu wykonania ortofotomapy wystarczającym były loty na wysokości 10m. Zdjęcia wykonane przy słabym oświetleniu (pod budynkami lub mostami) wymagały doświetlenia. Przeprowadzone testy wykazały, że zastosowane oświetlenie led nie było wystarczające i należy rozważyć w dalszych badaniach użycie lampy błyskowej. Takie rozwiązanie może poprawić precyzję detekcji łapek, które przy nasłonecznieniu znajdowały się w cieniu główki szyny powodując błędną interpretację algorytmu (FN).
4. Podczas lotów fotogrametrycznych monitorujących infrastrukturę ustalono kąt ustawienia kamery na 90 stopni (prostopadle w dół w stosunku do linii lotu). Dla detekcji elementów nawierzchni kolejowej lot wykonano w osi toru. W celu detekcji innych elementów infrastruktury takich jak łubki na połączeniu szyn koniecznym była zmiana kąta ustawienia kamery i wykonanie zdjęć prostopadle do szyny. W docelowym rozwiązaniu jest to możliwe do wykonania we wskazanych miejscach podczas powrotnego lotu drona do miejsca postojowego (garażu).
5. Podczas wykonywania lotu nie przetestowano wykonywania zdjęć we wszystkich warunkach pogodowych. Dlatego na podstawie charakterystyki drona oraz doświadczeń pilotów ustalono warunki w jakich lot nie powinien się odbywać ze względów bezpieczeństwa oraz wymaganej jakości zdjęć takich jak: silne i porywiste wiatry, burze i zamiecie oraz sytuacje wymienione szczegółowo w instrukcjach eksploatacyjnych dronów. Konieczne było korzystanie z danych meteorologicznych (certyfikowanych - lotniczych), podawanych na stronie IMGW przed rozpoczęciem każdej misji.
6. Przeanalizowano uwarunkowania prawne wykonywania lotów nad infrastrukturą kolejową. Biorąc pod uwagę cel i zakres lotów ustalono, że loty będą wykonywane w kategorii „specjalnej”. Należy zwrócić szczególną uwagę, jeśli teren kolejowy obejmuje linie o charakterze strategicznym, ponieważ konieczne jest uzyskanie dodatkowych zgód, w tym zgody właściciela infrastruktury.
7. Zastosowanie BSP do wykonywania inspekcji infrastruktury zdecydowanie zwiększyło jakość detekcji usterek i podniosło bezpieczeństwo prowadzeniu ruchu kolejowego. W sposób

jednoznaczny, obiektywny i udokumentowany przedstawiło faktyczny stan infrastruktury kolejowej w danym czasie. Informacja o stanie infrastruktury jest przekazywana do dyspozytora i służb utrzymania znacznie szybciej niż przy konwencjonalnych oględzinach infrastruktury. Materiał zdjęciowy powstały dzięki systematycznemu dokumentowaniu stanu infrastruktury kolejowej stanowi bogate archiwum mogące być wykorzystane do optymalizacji utrzymania infrastruktury lub do ustalania przyczyn wypadków kolejowych.

8. Wdrożenie nowego systemu monitoringu za pomocą BSP jest innowacją u zarządcy infrastruktury Infra Silesia S.A. stanowiącą zmianę znaczącą mającą wpływ na bezpieczeństwo. Dlatego konieczne było wykonanie przed wdrożeniem rozwiązania oceny ryzyka i znaczenia tej zmiany. Do wykonania pozostało zweryfikowanie oceny znaczenia zmiany przez niezależną, notyfikowaną jednostkę oceniającą.
9. Na podstawie obliczeń efektywności ekonomicznej wdrożenia nowej metody inspekcji infrastruktury wykazano, że na przestrzeni 5 lat licząc od czwartego kwartału 2023 roku uzyska się oszczędność w wysokości 398 tys. złotych w porównaniu do konwencjonalnego wykonywania oględzin w tym samym okresie. Stwierdzono, że wykonywanie oględzin infrastruktury za pomocą BSP jest możliwe do wykonania w nieomal dwukrotnie krótszym czasie w porównaniu do oględzin wykonywanych przez obchodowego.

## **Spis załączników**

Załącznik nr 1 – Plan schematyczny bocznic kolejowej KWK Chwałowice.

Załącznik nr 2 – Plan schematyczny bocznic kolejowej KWK Jankowice.

Załącznik nr 3 – Plan schematyczny bocznic kolejowej Rybnik Kłokocin.

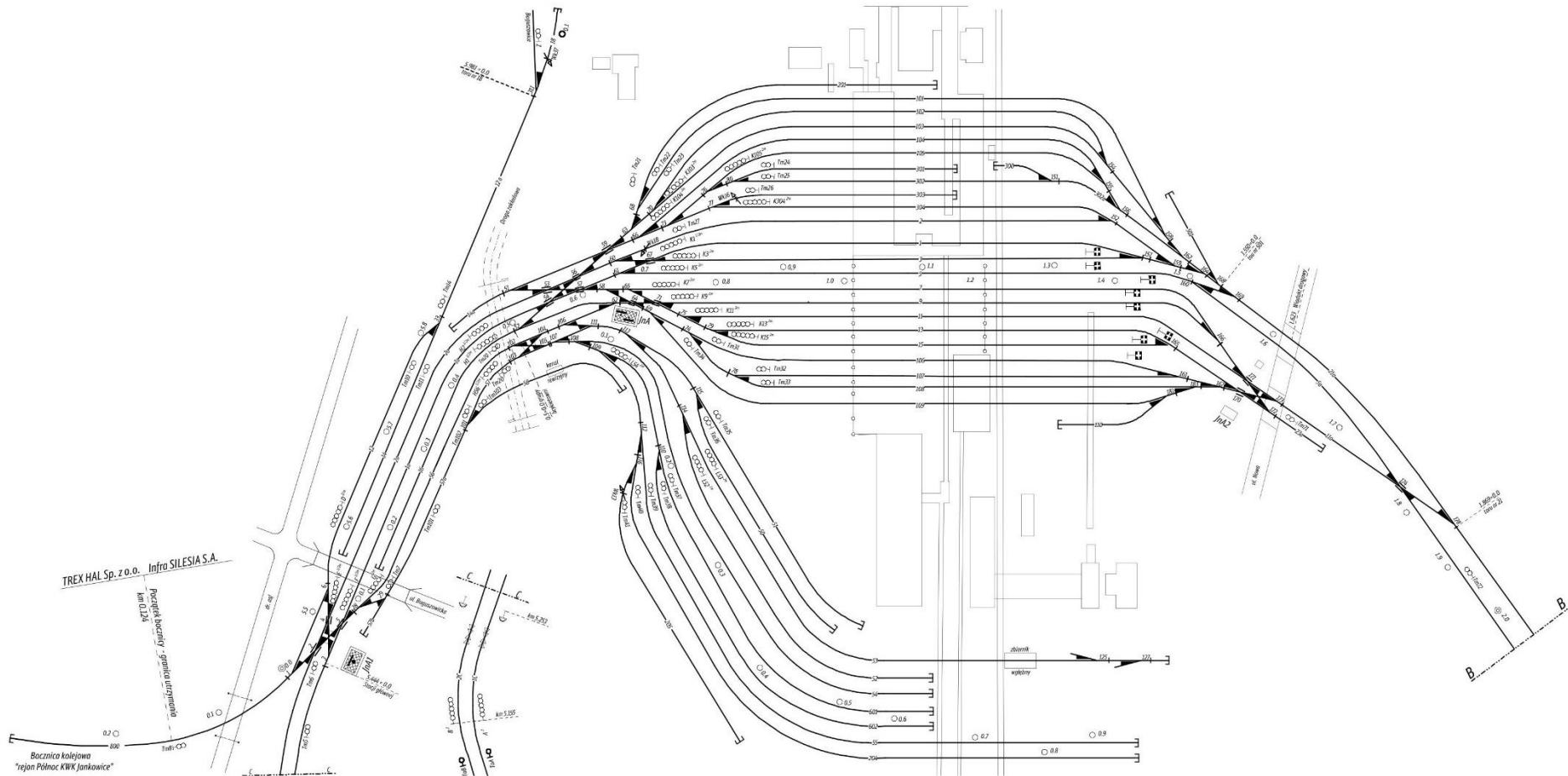
Załącznik nr 4 – Plan schematyczny linii i bocznic kolejowej Jęzor Centralny – okręg nastawczy JCA i JCC.

Załącznik nr 5 – Plan schematyczny bocznic KWK Marcel.



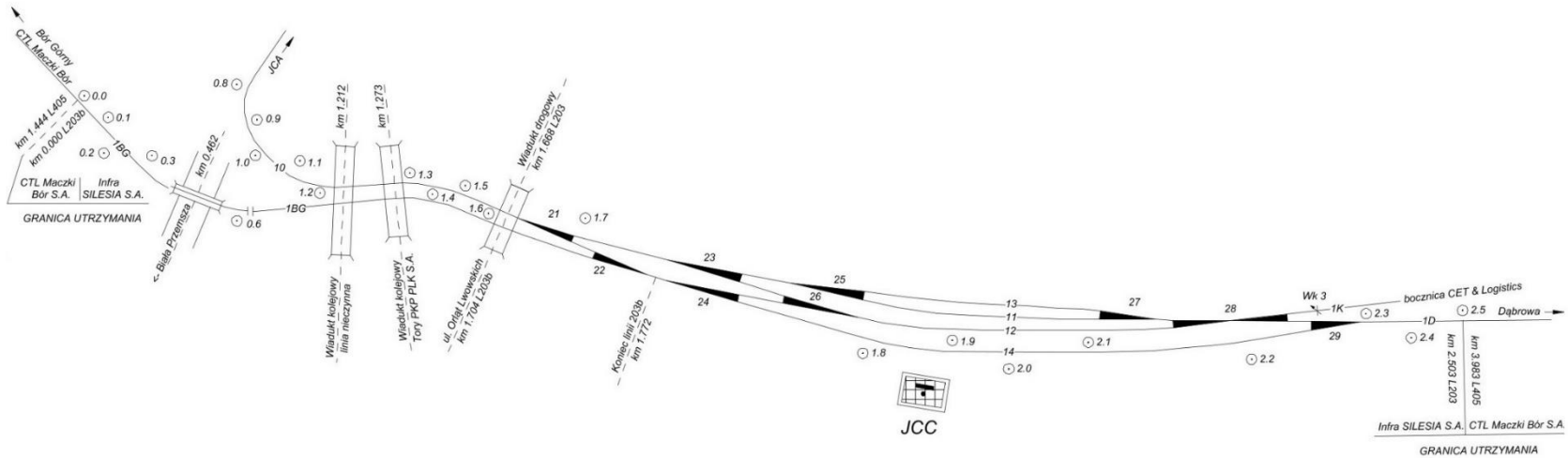


Plan schematyczny bocznicy kolejowej KWK Jankowice

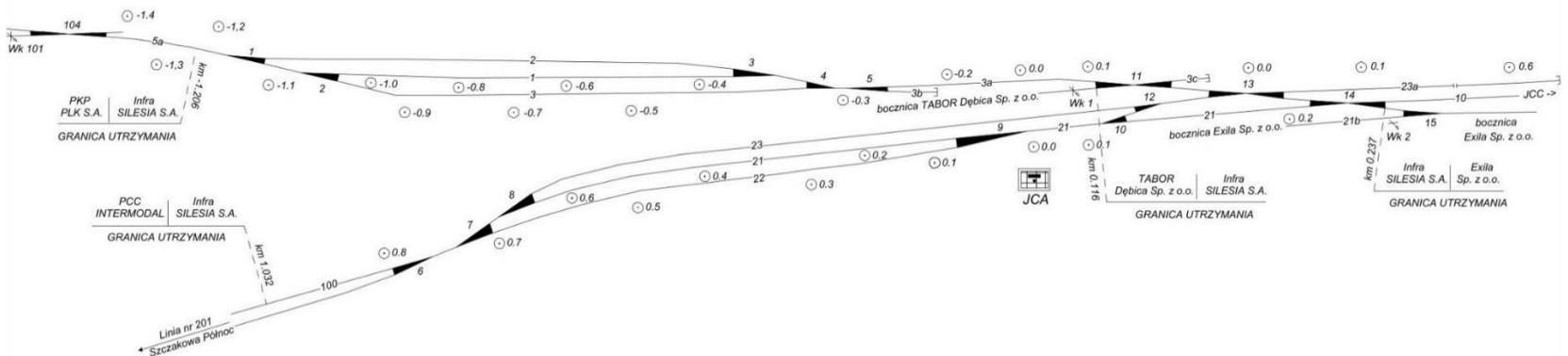




Plan schematyczny bocznicy kolejowej Jęzor Centralny - okręg nastawczy JCC



Plan schematyczny bocznicy kolejowej Jęzor Centralny - okręg nastawczy JCA





## Bibliografia

1. Czapaj-Atlas R., Dudek B., Rozwój dronów i ich zastosowanie w energetyce, Energetyka, 2016, s. 2.
2. Czapaj-Atlas R., Dudek B., Drony, mini- i mikrodrony – przegląd obszarów zastosowań bezzałogowych statków powietrznych dla potrzeb monitoringu i inspekcji, w szczególności w obszarze energetyki. Energetyka, nr 8/2014, s. 485-492.
3. <https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:f20102b0-39cd-41a8-80a6-a639bb07ca96/version:1594205899/siaero-v5.pdf>, [dostęp: 19.07.2020].
4. <http://www.skylineuav.com.au/services/uav-power-line-inspections/>, [dostęp: 19.07.2020].
5. <https://www.darpa.mil/about-us/timeline/predator>, [dostęp: 19.07.2020].
6. <https://biznesalert.pl/us-navy-testuje-podwodne-drony/>, [dostęp: 19.07.2020].
7. Arjomandi M., Classification of unmanned aerial vehicles, Mechanical Engineering, 2006.
8. Świerczyński S., Zwolan P., Wykorzystanie UAV w nawigacji, Autobusy12/2019.
9. PKP Polskie Linie Kolejowe SA., Instrukcja o dozorowaniu linii kolejowych Id-7. Załącznik do uchwały Nr 1222/2015 Zarządu PKP Polskie Linie Kolejowe. SA., Z dnia 22.12.20215r., Warszawa 2015. Dokument niepublikowany.
10. Ustawa o transporcie kolejowym z dnia 28 marca 2003 z późn. zm., Dz.U. 2003, nr 87, poz. 789 z późn. zm.).
11. Rozporządzenie Komisji (UE) Nr 402/2013 z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie przyjęcia wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w zakresie wyceny i oceny ryzyka i uchylające rozporządzenie (WE) nr 352/2009 oraz art. 6 dyrektywy 2004/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych, Dz. U. L121, 03.5.2013 p. 8.
12. Olecki, T., Kjelsaas, C., The drone squad for ship surveys, <https://www.dnvgl.com/expert-story/maritime-impact/the-drone-squad-for-ship-surveys.html>, [dostęp: 28.07.2020].
13. Drass, D., Wilk, T., Biernikowicz, W., Możliwości wykorzystania bezpilotowych statków powietrznych (BSP) w środowisku cywilnym i wojskowym, Zeszyty Naukowe Ruchu Studenckiego, nr 2, 2016, s. 62.
14. <http://www.swiatdronow.pl/drony-diagnostyki-farm-fotowoltanicznych-wiatrowych-sieci-energetycznych>, [dostęp: 11.04.2021].
15. <https://www.flightglobal.com/helicopters/darpa-cancels-ares-cargo-drone-project-with-lockheed-martin-/132645.article>, [dostęp: 11.04.2021].

16. Wójcik, M., Badanie stanu technicznego infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem bezzałogowych statków powietrznych, Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna, Transport Kolejowy 2017, Przeszłość – Teraźniejszość - Przyszłość, UTK, s. 148-164.
17. <https://www.railjournal.com/infrastructure/bane-nor-to-develop-ai-based-track-inspection-system/>, [dostęp: 18.04.2021].
18. [https://www.railjournal.com/in\\_depth/bane-nor](https://www.railjournal.com/in_depth/bane-nor), [dostęp: 18.04.2021].
19. <https://infrastructuremagazine.com.au/2019/06/14/remote-track-inspections-using-drones/>, [dostęp: 19.04.2021].
20. Lesiak, P., Inspekcja i utrzymanie infrastruktury kolejowej z wykorzystaniem dronów, Problemy Kolejnictwa, zeszyt 188/2020, s. 31-43.
21. Lesiak, P., Drony w diagnostyce wizyjnej uszkodzeń szyn, Przegląd komunikacyjny 9/2020, s. 15-20.
22. Commercial Drone Market Size, Share & Trends Analysis Report by Product, by Application, by End-use, by Region, and Segment Forecasts, 2021-2028, <https://www.researchandmarkets.com/reports/4827913/commercial-drone-market-size-share-and-trends>, [dostęp: 3.07.2022].
23. <https://www.dronethusiast.com/best-professional-drones/> [dostęp: 27.07.2020].
24. Biała Księga Rynku Bezzałogowych Statków Powietrznych, Polski Instytut Ekonomiczny, Ministerstwo Infrastruktury, 2019, s.34-36.
25. Teal Group Predicts Worldwide Military UAS Spending of \$187.6 Billion Over the Next Decade in its 2021/2022 UAV Market Profile and Forecast, 1.12.2021, <https://www.tealgroup.com/index.php/pages/press-releases/68-teal-group-predicts-worldwide-military-uas-spending-of-187-6-billion-over-the-next-decade-in-its-2021-2022-uav-market-profile-and-forecast>, [dostęp: 11.07.2022].
26. <https://forcetechnology.com/en/services/inspection/drone-inspection-of-wind-turbines-onshore-and-offshore>, [dostęp: 19.07.2022].
27. <http://www.blogotech.eu/index.php/1805-darpa-szykuje-drony-polujace-na-okrety-podwodne>, [dostęp: 22.07.2022].

28. <https://www.unmannedairspace.info/latest-news-and-information/drones-start-to-make-headway-in-uk-maritime-search-and-rescue-operations/>, [dostęp: 22.07.2022].
29. [https://www.researchgate.net/publication/310474300\\_Drone\\_transportation\\_of\\_blood\\_products](https://www.researchgate.net/publication/310474300_Drone_transportation_of_blood_products), [dostęp 22.07.2022].
30. <https://www.mdpi.com/2504-446X/4/1/4/htm>, [dostęp: 22.07.2022].
31. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/27861967/>, [dostęp: 22.07.2022].
32. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1067991X14003332>, [dostęp: 22.07.2022].
33. Osman, M. H., Kaewunruen, S., Jack, A., Optimization of schedules for the inspection of railway tracks, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2018, nr 232(6), str. 1577-1587.
34. <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/intelligent-infrastructure/>, [dostęp, 23.07.2022].
35. <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/intelligent-infrastructure/>, [dostęp: 23.07.2022].
36. <https://www.networkrail.co.uk/running-the-railway/looking-after-the-railway/asset-management/>, [dostęp: 23.07.2022].
37. Groblewski, K., Infrastruktura kolejowa – stan obecny oraz zagrożenia dla jej rozwoju, TTS Technika Transportu Szynowego, nr 7-8, 2009, s. 8-10.
38. Komisja Europejska, Biała Księga, Plan utworzenia jednolitego europejskiego obszaru transportu – dążenie do osiągnięcia konkurencyjnego i zasobooszczędnego systemu transportu, s. 16, 2011, <http://ww2.senat.pl/k7/ue/inne/2011/026a.pdf>, [dostęp: 23.07.2022].
39. <http://www.graw.com/pomiary-toru/system-pomiaru-rozjazdow-tms.html>, [dostęp: 23.07.2022].
40. <https://www.mtrzps.com.pl/pl/oferta/drezyny/12-drezyna-pomiarowa-dp-523-10>, [dostęp: 23.07.2022].
41. <https://www.wnp.pl/transport-kolejowy/40-tys-km-torow-rocznie-zbada-specjalny-pojazd,350724.html>, [dostęp: 4.09.2019].



42. <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/stala-diagnostyka-torow-dla-bezpieczenstwa-ruchu-pociagow-6641>, [dostęp: 23.07.2022].
43. <https://rail-pod.com/>, [dostęp: 23.07.2022].
44. <https://www.skydio.com/3d-scan>, [dostęp: 26.07.2022].
45. Arivazhagan, S. Shebiah, R.N. Magdalene, J.S. Sushmitha, G. Railway track derailment inspection system using segmentation based fractal texture analysis. *ICTACT Journal on Image Video Processing*, 2015, s. 1060–1061.
46. <https://www.power-eng.com/om/8-ways-drones-are-lowering-the-cost-of-infrastructure-inspection/#gref>, [dostęp:28.07.2022].
47. Bendea, H., et al. Low cost UAV for post-disaster assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, 2008, s. 1373-1379.
48. Koutalakis, P.; Tzoraki, O.; Zaimes, G. UAVs for Hydrologic Scopes: Application of a Low-Cost UAV to Estimate Surface Water Velocity by Using Three Different Image-Based Methods. *Drones*, 2019, s. 3, <https://doi.org/10.3390/drones3010014>, [dostęp:28.07.2022].
49. Bendea, H., Low cost UAV for post-disaster assessment. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37, 2008, s. 1373-1379.
50. Granados-Bolaños, S., Quesada-Román, A., Alvarado, G. E., Low-cost UAV applications in dynamic tropical volcanic landforms, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, Volume 410, 2021. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0377027320305795>, [dostęp: 30.07.2022].
51. Jenkins, D., Vasigh, B., The economic impact of unmanned aircraft systems integration in the United States, *AUVSI Economic Report*, [https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/958c920a-7f9b-4ad2-9807-f9a4e95d1ef1/UploadedImages/New\\_Economic%20Report%202013%20Full.pdf](https://higherlogicdownload.s3.amazonaws.com/AUVSI/958c920a-7f9b-4ad2-9807-f9a4e95d1ef1/UploadedImages/New_Economic%20Report%202013%20Full.pdf), [dostęp: 30.07.2022].
52. Kim, N. W., Chervonenkis, M, A., Situation control of unmanned aerial vehicles for road traffic monitoring. *Modern Applied Science*, 9.5:1, 2015.

53. Outay, F., Abdullah Mengash, H., Adnan, M., Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 141, 2020, s. 116-129.
54. Procedura U2.3, Inwestycje, DB Cargo Polska S.A., Dokument niepublikowany, 2022, s. 6.
55. Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) nr 402/2013 z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w zakresie wyceny i oceny ryzyka i uchylające rozporządzenie (WE) nr 352/2009, Dz.U. L 121 z 3.5.2013, s. 8,
56. Dyrektywa 2004/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004r. w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych oraz zmieniająca dyrektywę Rady 95/18/WE w sprawie przyznawania licencji przedsiębiorstwom kolejowym oraz dyrektywę 2001/14/WE w sprawie alokacji zdolności przepustowej infrastruktury kolejowej i pobierania opłat za użytkowanie infrastruktury kolejowej oraz certyfikację w zakresie bezpieczeństwa (Dyrektywa w sprawie bezpieczeństwa kolei), Dz. U. L164, 30.4.2004, s. 44.
57. Batko, M., Konieczny, J., Ocena ryzyka zastosowania bezdotykowej metody sprawdzania stanu nawierzchni kolejowej jako alternatywa do wykonywania obchodów infrastruktury, Politechnika Śląska, artykuł niepublikowany.
58. Procedura M6.3, Analiza ryzyka, 2022. DB Cargo Polska S.A. Dokument niepublikowany.
59. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925753521003167>, [dostęp: 6.08.2022].
60. Unmanned Aircraft Systems (UAS) Risk Management: Thriving Amid Emerging Threats and Opportunities, Deloitte, 2018.
61. Jebelli H., Habibnezhad M., Shayesteh, S., Asadi, S., Lee, S. Automation and Robotics in the Architecture, Engineering, and Construction Industry. Springer, Cham 2022. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-77163-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-77163-8_7) [dostęp: 6.08.2022].
62. ISd - Przepisy wewnątrz utrzymania infrastruktury kolejowej i bocznic normalnotorowych, Infrasillesia S.A., Załącznik do Zarządzenia Nr 2/2015 Prezesa Zarządu Spółki z dnia 8.04.2015 z późniejszymi zmianami. Dokument niepublikowany.

63. Chruzik, K., Sitarz, M., Zintegrowany System Zarządzania Bezpieczeństwem Transportu Kolejowego w Polsce, Tom III, Czynniki ludzkie w profilaktyce na rzecz bezpieczeństwa transportu kolejowego, 2010.
64. Abdelkhalik, S., Role of an Unmanned Aircraft System for Search and Rescue (AUS - SAR) Operations, The International Maritime Rescue Federation World Maritime Rescue Congress Conference Bremerhaven, Germany, 2015, s. 20.  
[https://www.academia.edu/38729293/Role\\_of\\_an\\_Unmanned\\_Aircraft\\_System\\_for\\_search\\_and\\_rescue\\_AUS\\_SAR\\_operations?email\\_work\\_card=view-paper](https://www.academia.edu/38729293/Role_of_an_Unmanned_Aircraft_System_for_search_and_rescue_AUS_SAR_operations?email_work_card=view-paper) [dostęp: 12.08.2022].
65. Drony z termowizją chronią pociągi PKP Cargo przed kradzieżami, <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/drony-z-termowizja-chronia-pociagi-ppk-cargo-przed-kradziejami-85224.html>, [dostęp: 14.08.2022].
66. Deepanshu Srivastava, S., Rakesh Kumar, N., Fadi Al-Turjman, G., In Intelligent Data-Centric Systems, Security in IoT Social Networks, Academic Press, 2021, s. 229-245.
67. Wideokonferencja pt. Drony po 31 grudnia 2020r, Konferencja online, 16.12.2020r.
68. Yang, X., Pei, X., Hybrid Technologies for Power Generation, 2022,  
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/unmanned-aerial-vehicle>, [dostęp: 18.08.2022].
69. Szymocha, S., Osuchowski, J., Pomiary przy pomocy bezzałogowych statków powietrznych/diagnostyka linii wysokiego powietrza, 2019.
70. Chen, H., Ulianov, C., Shaltout, R., 3D Laser Scanning techniques for the inspection and monitoring of railway tunnels, Transport problems, 2015, vol. 10.
71. Kumar Singh, A., Swarup, A., Agarwal, A., Singh, D., Vision based rail track extraction and monitoring through drone imagery, ICT Express, vol. 5, issue 4, 2019.
72. Bojarczek, P., Lesiak, P., Zastosowanie hybrydowej sieci neuronowej do klasyfikacji uszkodzeń drewnianych podkładów kolejowych, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, Transport, z. 78, 2011.
73. <https://www.rynek-kolejowy.pl/mobile/nowy-pojazd-diagnostyczny-dla-plk-juz-na-testach-76276.html>, [dostęp: 03.01.2023].

74. Ustawa z dnia 7.07.1994r. Prawo budowlane, Dz. U. 1994, Nr 89, poz. 414 z późn. zm., Roz. 6, Art 62, Pkt. 1.
75. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 28 maja 1996 r. w sprawie profilaktycznych posiłków i napojów, Dz. U. 1996 nr 60 poz. 279.
76. <https://www.infrasilesia.pl/firma.html>, [dostęp: 14.01.2023].
77. <https://dji-polska.pl/drony/dji-air-2s/>, [dostęp: 17.02.2023].
78. <https://www.drony.net/matrice-300-rtk-dji.html>, [dostęp: 17.02.2023].
79. <https://www.drony.net/zenmuse-z30-dji.html>, [dostęp: 17.02.2023].
80. <https://www.drony.net/matrice-200-v2-dji.html>, [dostęp: 17.02.2023].
81. <https://www.drony.net/dji-zenmuse-11.html>, [dostęp: 17.02.2023].
82. Grulkowski, S., Kędra, Z., Koc, W., Nowakowski, M., Drogi Szynowe, 2013, s. 39-42.
83. <https://drogizelazne.org/nawierzchnia.html>, [dostęp: 18.02.2023].
84. Lin, T-Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., Dollar, P., Focal Loss for Dense Object Detection, Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), 2017, s. 2980-2988, <https://arxiv.org/pdf/1708.02002v2.pdf>, [dostęp: 05.03.2023].
85. Zhong, Y., Wang, J., Peng, J., Zhang, L., Anchor box optimization for object detection, University of Illinois at Urbana-Champaign, Microsoft; <https://arxiv.org/pdf/1812.00469.pdf>, [dostęp: 10.03.2023].
86. Instrukcja Id-1, Załącznik 8, PKP PLK, s. 151-152.
87. <https://www.intel.com/content/www/us/en/developer/articles/technical/computer-vision-annotation-tool-a-universal-approach-to-data-annotation.html>, [dostęp: 13.03.2023].
88. Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych (Dz. U. UE. L. z 2019 r. Nr 152, str. 45 z późn. zm.) (dalej także jako: Rozporządzenie wykonawcze).
89. Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2019/945 z dnia 12 marca 2019 r. w sprawie bezzałogowych systemów powietrznych oraz operatorów bezzałogowych systemów powietrznych z państw trzecich (Dz. U. UE. L. z 2019 r. Nr 152, str. 1 z późn. zm.) (dalej także

jako: Rozporządzenie delegowane), [https://eur-lex.europa.eu/eli/reg\\_del/2019/945/oj/pol](https://eur-lex.europa.eu/eli/reg_del/2019/945/oj/pol); [dostęp 17.03.2023].

90. <https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu>, [dostęp 17.03.2023].
91. <https://droneradar.eu/>, [dostęp 17.03.2023].
92. Ustawa z dnia 3 lipca 2002 r. - Prawo lotnicze (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 1235).
93. Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym (t.j. Dz. U. z 2021 r. poz. 1984 z późn. zm.)
94. Wytyczne nr 7 Prezesa Urzędu Lotnictwa Cywilnego z dnia 9 czerwca 2021 r. w sprawie sposobów wykonywania operacji przy użyciu systemów bezzałogowych statków powietrznych w związku z wejściem w życie przepisów rozporządzenia wykonawczego Komisji (UE) nr 2019/947 z dnia 24 maja 2019 r. w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych <https://edziennik.ulc.gov.pl/legalact/2021/35/>, [dostęp 17.03.2023].
95. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/679 z dnia 27 kwietnia 2016 r. w sprawie ochrony osób fizycznych w związku z przetwarzaniem danych osobowych i w sprawie swobodnego przepływu takich danych oraz uchylenia dyrektywy 95/46/WE (ogólne rozporządzenie o ochronie danych) (Dz. U. UE. L. z 2016 r. Nr 119, str. 1 z późn. zm.).
96. Ustawa z dnia 23 kwietnia 1964 r. Kodeks cywilny (t.j. Dz. U. z 2022 r. poz. 1360 z późn. zm.).
97. Preston, S., University-Made SUASs May Make Infrastructure Safer, Less Costly, <https://news.fit.edu/academics-research/drones-for-inspections/>, [dostęp 17.03.2023].
98. Claesson, A., Fredman, D., Svensson, L., Unmanned aerial vehicles (drones) in out-of-hospital-cardiac-arrest. Scand J Trauma Resusc Emerg Med 24, 124, 2016, <https://sjtrem.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13049-016-0313-5>, [dostęp 17.03.2023].
99. <https://www.v7labs.com/blog/best-image-annotation-tools>, [dostęp 19.03.2023].

100. Hershberger, J., Snoeyink, J. An  $O(n \log n)$  implementation of the Douglas-Peucker algorithm for line simplification. Algorithms and Data Structures 5th International Workshop, WADS '97, Halifax, Nova Scotia, Canada, August 6-8, 1997, s. 93-103.
101. Ehret, U., Neuper, M. Applying the Ramer-Douglas-Peucker algorithm to compress and characterize time-series and spatial fields of precipitation. Geophysical Research Abstracts Vol. 16, EGU2014-13537, 2014.
102. Farjad, B., Gupta, A., Sartipizadeh, H., Cannon, A.J., A novel approach for selecting extreme climate change scenarios for climate change impact studies, Science of the Total Environment 678, 2019, s. 476–485.
103. Basora, L., Morio, J., Mailhot, C. A Trajectory Clustering Framework to Analyse Air Traffic Flows. Conference: Sesar Innovation Day 2017 At: University of Belgrade, Serbia, 2017.
104. Goz, F., Mutlu, A., Akbulut, O., Analysis of Ramer-Douglas-Peucker algorithm as a discretization method, 26th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), 2018, s. 1-4, doi: [10.1109/SIU.2018.8404748](https://doi.org/10.1109/SIU.2018.8404748), [dostęp: 20.03.2023].
105. Roozbeh Zarei, Jing He, Siuly Siuly, Guangyan Huang, Yanchun Zhang, Exploring Douglas-Peucker Algorithm in the Detection of Epileptic Seizure from Multicategory EEG Signals. BioMed Research International, Article ID 5173589, 2019, s. 19.
106. Ramer, U. An Iterative Procedure for the Polygonal Approximation of Plane Curves. Computer Graphics and Image Processing, Vol. 1. Iss. 3., 1972, s. 244-256.
107. David H. Douglas, Thomas K. Peucker, Algorithms for the reduction of the number of points required to represent a digitized line or its caricature, The International Journal for Geographic Information and Geovisualization. vol. 10, no. 2, 1973, s. 112-122.
108. <https://github.com/opencv/cvat>, [dostęp: 20.03.2023].
109. Dasiopoulou S. Mezaris V., Knowledge-assisted semantic video object detection, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology 15.10, 2005, s. 1210–1224.
110. Alsanabani A., Ahmed M., AL Smadi A., Vehicle Counting Using Detecting-Tracking Combinations: A Comparative Analysis, 2020 the 4th International Conference on Video and Image Processing. s. 48–54. doi: [10.1145/3447450.3447458](https://doi.org/10.1145/3447450.3447458), [dostęp: 20.03.2023].

111. Wu, J. Osuntogun A., Choudhury T., Philipose M., and Rehg J., A scalable approach to activity recognition based on object use, College of Computing, Georgia Institute of Technology, IEEE 11th international conference on computer vision, 2007.
112. Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R., Farhadi, A., You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, 2015; [arXiv:1506.02640](https://arxiv.org/abs/1506.02640), [dostęp: 20.03.2023].
113. Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, Ch., Reed, S., Fu, Ch.-Y., Single Shot MultiBox Detector, 2016; [arXiv:1512.02325](https://arxiv.org/abs/1512.02325), [dostęp: 20.03.2023].
114. Bochkovskiy, A., Wang, P., H.-Y., Liao, M., Optimal Speed and Accuracy of Object Detection, 2020, <https://arxiv.org/pdf/2004.10934.pdf>, [dostęp: 20.03.2023].
115. Lin, T.-Y., Dollár, P., Girshick, K. He, B. Hariharan, Feature Pyramid Networks for Object Detection, 2016, <https://arxiv.org/pdf/1612.03144.pdf>, [dostęp: 20.03.2023].
116. Lin, T.-Y., Goyal, P., Girshick, K., He, B., Focal Loss for Dense Object Detection, 2017; <https://arxiv.org/pdf/1708.02002.pdf>, [dostęp: 20.03.2023].
117. Zhong, Y., Wang, J., Peng, J., Zhang, L., Anchor Box Optimization for Object Detection University of Illinois at Urbana-Champaign, 2020, <https://arxiv.org/pdf/1812.00469.pdf>, [dostęp: 20.03.2023].
118. Basiewicz, T., Rudziński, L., Jacyna, M., Linie Kolejowe, Oficyna Wydawnicza PW, 2002, s. 44.
119. Kozubek, P., Efektywność inwestycji infrastrukturalnych w transporcie kolejowym, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, 2021, s. 11-20.
120. <https://megadron.pl/pl/products/dron-dji-matrice-300-26336.html>, [dostęp: 20.03.2023].
121. <https://dronehub.ai/solutions/>, [dostęp: 21.03.2023].
122. <https://dron.edu.pl/product/nsts-05-1/>, [dostęp: 21.03.2023].
123. <https://nordicunmanned.com/services/rail/rail-maintenance-and-inspection/>, [dostęp: 21.03.2023].
124. Costa, L. da F., Further generalizations of the Jaccard index, Sao Carlos Institute of Physics, 2021, <https://arxiv.org/pdf/2110.09619.pdf>, [dostęp: 25.03.2023].

125. Tharwat, A., Classification assessment methods, Frankfurt University of Applied Sciences, 2018, <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1016/j.aci.2018.08.003/full/pdf?title=classification-assessment-methods>, [dostęp: 25.03.2023].
126. Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Strategia na rzecz zrównoważonej i inteligentnej mobilności – europejski transport na drodze ku przyszłości, COM/2020/789, 2020.
127. A Drone strategy 2.0 for Europe to foster sustainable and smart mobility, Komisja Europejska, 2022, [https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13046-A-Drone-strategy-20-for-Europe-to-foster-sustainable-and-smart-mobility\\_en](https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13046-A-Drone-strategy-20-for-Europe-to-foster-sustainable-and-smart-mobility_en), [dostęp: 25.03.2023].
128. Bazarnik, M., Możliwości aplikacyjne techniki skanowania laserowego 3Dw kontekście modernizacji linii kolejowych, Zeszyty Naukowo-Techniczne SITK RP, nr 1 (112), 2017, s. 17-26.
129. Godyń, A., Hołownicki, R., Doruchowski, G., Świechowski, W., Zastosowanie skanera laserowego LIDAR w technice ochrony roślin, Wydawnictwo Inżynieria Rolnicza, Z. 2 (136) T.1, 2012, s. 63-71.
130. Shao, Q., Li, J., Li, R., Zhang, J., Gao, X., Study of Urban Logistics Drone Path Planning Model Incorporating Service Benefit and Risk Cost, Drones, 2022, <https://doi.org/10.3390/drones6120418>, [dostęp: 20.03.2023].
131. Regulamin udostępniania infrastruktury kolejowej w ramach Roczego Rozkładu Jazdy Pociągów, [https://www.infrasilesia.pl/pdf/Regulamin\\_2022-2023\\_Infra-SILESIA.pdf](https://www.infrasilesia.pl/pdf/Regulamin_2022-2023_Infra-SILESIA.pdf), [dostęp: 20.03.2023].
132. Aneks do Instrukcji ISd – przepisy wewnętrzne utrzymania infrastruktury kolejowej i bocznic normalnotorowych, InfraSilesia S.A., dokument niepublikowany.



## Spis rysunków

Rysunek 1. Nowoczesny pojazd diagnostyczny PKP PLK. S.A. [42].	11
Rysunek 2. Drezyna z systemem TMS do pomiarów rozjazdów kolejowych [39].	11
Rysunek 3. Drezyna pomiarowa typu DP-523.10 [40].	11
Rysunek 4. Pojazd Railpod do wykonywania inspekcji infrastruktury kolejowej [43].	12
Rysunek 5. Przykład profesjonalnego ośmiowirnikowego drona Ebee SQ – SenseFly [23].	13
Rysunek 6. Dron z możliwością przemieszczania się po torze [123].	14
Rysunek 7. Zdjęcia elektrowni wiatrowych wykonane BSP [26].	17
Rysunek 8. Inspekcja platformy wiertniczej [12].	18
Rysunek 9. Inspekcje mostów z użyciem sprzętu alpinistycznego lub specjalnych platform [97].	19
Rysunek 10. Inspekcje mostów powodujące ograniczenia w ruchu drogowym [97].	19
Rysunek 11. Użycie drona w akcji ratunkowej (zrzućenie kola ratunkowego) [28].	21
Rysunek 12. Schemat komponentów systemu do monitoringu infrastruktury. Opracowanie własne.	40
Rysunek 13. Garaż dla drona z wysuwaną platformą boczną testowany na stacji Sosnowiec Jęzor JCA, zdjęcia 1 - przygotowanie platformy do lądowania, 2 – lądowanie, 3,4 - automatyczna wymiana baterii wewnątrz garażu.	46
Rysunek 14. Garaż dla drona z lądowiskiem na dachu (rekomendowany).	46
Rysunek 15. Oznaczenie na oryginalnych zdjęciach szyn i podkładów.	51
Rysunek 16. Segmentacja zdjęć w celu trenowania algorytmu	51
Rysunek 17. Przykład działania algorytmu Ramera-Douglassa-Peucker [105].	52
Rysunek 18. Wykryte przez algorytm krawędzi z wieloma załamaniem linii: a), c) kształt oryginalny, b), d) krawędzie po zastosowaniu algorytmu Ramera-Douglassa-Peucker i uproszczeniu linii.	53
Rysunek 19. Przykładowe zdjęcie wykonane za pomocą Autel EVO II PRO V2.	57
Rysunek 20. Zdjęcia wykonane w miejscach załadunku węgla przy użyciu oświetlenia drona.	60
Rysunek 21. a), b), c). Przykłady oznaczania podkładów kolejowych: a) pojedynczych podkładów kolejowych, b) podwójnych podkładów kolejowych, c) podrozdzielnic.	64
Rysunek 22. Oznaczanie zdjęć, gdzie nie są w pełni widoczne podkłady kolejowe (a), b)).	66
Rysunek 23. Rozpoznawanie szyn i podkładów kolejowych.	67
Rysunek 24. Rozpoznawanie szyn i podkładów przez algorytm	67
Rysunek 25. Rozpoznawanie szyn i podkładów przez algorytm na podstawie wykonanych zdjęć testowych.	68
Rysunek 26. Zdjęcia i ich rozpoznawanie w warunkach po opadach śniegu.	69
Rysunek 27. Rodzaje i schematy przytwierdzeń występujących na terenie Infrasilis S.A. [82, 83]	71
Rysunek 28. Segmentacja zdjęć testowych do oznaczania elementów przytwierdzeń.	72
Rysunek 29. Maski szyn i podkładów kolejowych.	73
Rysunek 30. Określenie sekcji i miejsc występowania przytwierdzeń	74
Rysunek 31. Wskazanie obszaru do analizy na przecięciu szyn i podkładów (tzw. checking box).	74

Rysunek 32. Checking box – obszar weryfikacji występowania elementów przytwierdzenia	75
Rysunek 33. Rodzaje i schematy złączy. Fot.: wykonanie własne, Infra Silesia S.A.	77
Rysunek 34. Oznaczenie podwójnych podkładów jako miejsc występowania złączy.	78
Rysunek 35. Etykietowanie elementów złącza podpartego.	79
Rysunek 36. Segmentacja oraz maski szyn i podkładów kolejowych.	80
Rysunek 37. Miejsca styków międzyszynowych na podparciu szyn.	80
Rysunek 38. Miejsca styków po zastosowaniu maski usuwającej tło zdjęcia.	81
Rysunek 39. Etykietowanie zdjęć do trenowania algorytmu.	81
Rysunek 40. Porównanie zdjęć i faktycznego styku szyn występującego w terenie z predykcją połączenia dokonaną przez algorytm.	82
Rysunek 41. Rozpoznane pozorne pęknięcia główki szyny.	83
Rysunek 42. Przekrój szyny S 49 [118].	85
Rysunek 43. Pomiar rozstawu szyn: a) zdjęcie oryginalne, b) oznaczenie szyn na zdjęciu, c) nałożenie maski określającej toki szyn, d) ustalenie liczby pikseli pomiędzy główkami szyn.	86
Rysunek 44. Dopuszczalne zużycie główki szyny [62].	88
Rysunek 45. Ortofotomapa odcinka linii kolejowej Infra Silesia S.A. nr 216 KWK Marcel-Rybnik Towarowy.	89
Rysunek 46. Rozpoznawanie styków między szynami: zdjęcia a) oryginalne zdjęcie, b) maska z rozpoznanym stykiem, c) naniesienie miejsca styku szyn na ortofotomapę.	90
Rysunek 47. Przykład wybuksowania główki szyny w stacji Sosnowiec Jęzor JCA.	91
Rysunek 48. Fragmenty przetworzonej chmury punktów z widocznym błędnym odwzorowaniem główek szyn.	93
Rysunek 49. Przekrój poprzeczny przez torowisko z widocznym błędnym odwzorowaniem główek szyn.	93
Rysunek 50. Przekrój poprzeczny przez torowisko na odfiltrowanej chmurze punktów.	94
Rysunek 51. Przekrój poprzeczny przez torowisko na odfiltrowanej i wygładzonej z szumu chmurze punktów.	94
Rysunek 52. Zdjęcie z nalotu tradycyjnego.	95
Rysunek 53. Chmura punktów z widocznym wybuksowaniem	95
Rysunek 54. Zdjęcie z nalotu tradycyjnego	95
Rysunek 55. Chmura punktów z widocznym wybuksowaniem.	96
Rysunek 56. IoU – obliczanie miejsc wspólnych maski i obiektu	98
Rysunek 57. Przykłady braku widoczności wkrętów na skutek zanieczyszczenia mocowania.	101
Rysunek 58. Przykłady braku śruby stopowej i łapki (a) oraz braku widoczności łapek z uwagi na cień (b), c)).	101
Rysunek 59. Przykład nieodnalezienia poszukiwanych obiektów a), b) łapka, b), wkręt, c) śruba łubkowa) w miejscach gdzie faktycznie występowały (False negative).	102

Rysunek 60. Przykład odnalezienia poszukiwanych obiektów w miejscach gdzie nie wystąpiły w rzeczywistości: a) śruba stopowa, b), c) wkręt) (False positive).	102
Rysunek 61. Przykład zanieczyszczonego toru uniemożliwiającego identyfikację elementów infrastruktury.	103
Rysunek 62. Model oględzin infrastruktury konwencjonalną metodą.	104
Rysunek 63. Model wykonywania obchodów za pomocą bezzałogowych statków powietrznych.	105
Rysunek 64. Umieszczenie garaży dla dronów na terenie infrastruktury Infra Silesia S.A. w rejonie rybnickim.	106
Rysunek 65. Przedstawienie graficzne miejsca i rodzaju usterki.	107
Rysunek 66. Prezentacja lokalizacji usterki wraz z numerem zdjęcia.	107
Rysunek 67. Zdjęcie wizualizujące usterkę P1377530.	108
Rysunek 68. Zdjęcia w zbliżeniu wskazujące zidentyfikowane usterki w dwóch mocowaniach szyn.	109
Rysunek 69. Porównanie jednostkowego kosztu wykonania przeglądów metodą konwencjonalną oraz za pomocą BSP.	130
Rysunek 70. Porównanie wskaźników cash flow NPV dla obu scenariuszy.	131

## Spis tabel

Tabela 1. Podział ze względu na czas i zasięg lotu przedstawia poniższa tabela [68]	15
Tabela 2. Częstotliwość wykonywania normalnych obchodów [9, 62]	30
Tabela 3. Rozkład wag dla kryteriów wyboru BSP.	42
Tabela 4. Rozkład wag dla kryteriów wyboru aparatu/kamery.	44
Tabela 5. Rozkład wag dla kryteriów wyboru garażu (huba).	45
Tabela 6. Lista alternatywnych BSP i kamer przyjęta do badań.	48
Tabela 7. Rozmiar piksela dla obiektywu o ogniskowej 30 mm	58
Tabela 8. Rozmiar piksela dla obiektywu o ogniskowej 14 mm	58
Tabela 9. Obliczenia wielkości piksela dla BSP z kamerami DJI AIR 2 i DJI Zenmuse L1.	59
Tabela 10. Wartości dopuszczalnych odchyłek podstawowych parametrów toru w zależności od maksymalnej prędkości [62].	84
Tabela 11. Szerokość rozstawu szyn obliczona na podstawie szerokości główki szyny	87
Tabela 12. Zestawienie obiektów infrastruktury oznaczonych z przeznaczeniem do nauki algorytmu.	97
Tabela 13. Zestawienie obiektów infrastruktury przeznaczonych do walidacji algorytmu.	98
Tabela 14. Wskaźnik IoU dla szyn i podkładów kolejowych.	99
Tabela 15. Średnie wartości AP i AR dla obiektów infrastruktury.	99
Tabela 16. Wyniki rozpoznania wybranych defektów infrastruktury.	100
Tabela 17. Długości torów do inspekcji przez obchodowych na wybranym terenie.	123
Tabela 18. Koszty oględzin metodą konwencjonalną.	126
Tabela 19. Koszty inspekcji za pomocą BSP.	127
Tabela 20. Kalkulacja kosztów obu scenariuszy wykonywania oględzin infrastruktury	128
Tabela 21. Kalkulacja kosztów wykonania jednorazowego przeglądu całej infrastruktury metodą konwencjonalną	129
Tabela 22. Kalkulacja kosztów wykonania jednorazowego przeglądu całej infrastruktury za pomocą BSP.	130