



POLITECHNIKA POZNAŃSKA



WYDZIAŁ
INŻYNIERII LĄDOWEJ
I TRANSPORTU

ROZPRAWA DOKTORSKA

Bioróżnorodność a transport kolejowy – klasyfikacja metod ograniczania negatywnego wpływu na dzikie zwierzęta oraz propozycja adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do wdrażania rozwiązań mitygacyjnych jako element strategii zrównoważonego rozwoju

mgr inż. Julia Milewicz

Promotor: dr hab. inż. Grzegorz Szymański, prof. PP

Promotor pomocniczy: dr inż. Tomasz Nowakowski

POZNAŃ 2025

Streszczenie

Rozprawa podejmuje problematykę wpływu transportu kolejowego na ekosystemy i bioróżnorodność, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami. Dotychczasowe badania koncentrowały się głównie na wybranych aspektach oddziaływań środowiskowych, pomijając potrzebę systemowego podejścia do ochrony przyrody w transporcie szynowym. W pracy przyjęto perspektywę strategii zrównoważonego rozwoju oraz przeanalizowano międzynarodowe konwencje, unijne akty prawne i programy, które wyznaczają ramy dla minimalizacji negatywnego wpływu kolei na środowisko.

Celem dysertacji było opracowanie adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do wdrażania rozwiązań mitygujących wpływ transportu kolejowego na dzikie zwierzęta (ang. *Wildlife-Impact Limitation & Decision framework for Rail transport, WILD-RAIL*), umożliwiającej identyfikację krytycznych odcinków linii kolejowych, dobór adekwatnych rozwiązań łagodzących oraz ocenę ich efektywności. Metodologia badań obejmowała analizę statystyczną danych o kolizjach pojazdów szynowych ze zwierzętami w Polsce, przegląd literatury naukowej i branżowej, studia przypadków oraz wywiady eksperckie. Zidentyfikowano linie kolejowe o największej liczbie zdarzeń, gatunki zwierząt szczególnie narażonych na potrącenie oraz najczęstsze uszkodzenia pojazdów wskutek zderzenia, a także określono uwarunkowania środowiskowe i eksploatacyjne sprzyjające kolizjom. Na podstawie analizy dostępnych rozwiązań (infrastrukturalnych, aktywnych i uzupełniających) opracowano katalog metod mitygacyjnych wraz z oceną ich skuteczności i możliwości wdrożenia.

W części empirycznej zastosowano dwa podejścia: studium główne (linia kolejowa nr 356, odcinek Owińska – Bolechowo), które pozwoliło na pełne wdrożenie ramy WILD-RAIL i sformułowanie kompleksowych rekomendacji dla kluczowych stron zainteresowanych, w tym dla zarządcy infrastruktury oraz przewoźnika regionalnego, oraz studium ad hoc (linia kolejowa nr 139, Tychy Żwaków – Piasek), którego najważniejszym efektem była szybka diagnoza problemu i zaproponowanie możliwego do wdrożenia rozwiązania mitygacyjnego przy ograniczonej dostępności danych. Oba przypadki potwierdziły użyteczność ramy zarówno w planowaniu strategicznym, jak i w praktyce operacyjnej.

Dobór i ocenę rozwiązań wsparto m.in. analizą SWOT uzupełnioną elementami PESTEL, a ryzyka wdrożeniowe oszacowano z wykorzystaniem metody FMEA. Efektem pracy jest również prototyp narzędzia informatycznego (interaktywnego formularza w programie Python) umożliwiającego praktyczne zastosowanie ramy WILD-RAIL w procesach decyzyjnych.

Wywiady eksperckie potwierdziły, że skuteczność działań zależy nie tylko od technologii, ale także od czynników instytucjonalnych, finansowych i społecznych. Zwrócono uwagę na potrzebę systemowego podejścia oraz wskazano bariery organizacyjne i możliwości doskonalenia praktyk w zakresie ochrony środowiska w transporcie kolejowym.

Opracowana rama analityczno-decyzyjna integruje wiedzę inżynierską i ekologiczną, a jej innowacyjność polega na adaptacyjności, systemowym ujęciu problemu oraz potencjale implementacyjnym. Dysertacja wnosi tym samym zarówno wkład teoretyczny w rozwój badań nad ochroną przyrody w transporcie, jak i praktyczne podstawy wdrażania skutecznych i zrównoważonych rozwiązań w sektorze kolejowym.

Abstract

“Biodiversity and rail transport – classification of methods for reducing negative impacts on wildlife and proposal for an adaptive analytical and decision-making framework for implementing mitigation measures as part of a sustainable development strategy”

The dissertation addresses the issue of the impact of rail transport on ecosystems and biodiversity, with particular emphasis on train–wildlife collisions. Previous studies have focused mainly on emissions, noise, and selected environmental impacts, while overlooking the need for a systemic approach to nature conservation in the railway sector. This work adopts the perspective of sustainable development strategies and includes an analysis of international conventions, EU legal acts, and programmes that define the framework for minimising the negative environmental impact of railways.

The aim of the dissertation was to develop an adaptive analytical and decision-making framework for implementing mitigation measures in rail transport with regard to wildlife (WILD-RAIL – Wildlife-Impact Limitation & Decision framework for Rail transport). The framework enables the identification of critical railway sections, the selection of adequate mitigation solutions, and the assessment of their effectiveness. The research methodology included statistical analysis of train–wildlife collision data in Poland, a review of scientific and industry literature, case studies, and expert interviews. The study identified railway lines with the highest number of incidents, species particularly vulnerable to collisions, and the most frequent types of rolling stock damage caused by accidents, as well as environmental and operational conditions conducive to collisions. On this basis, a catalogue of mitigation methods (infrastructural, active, and complementary) was developed, together with an assessment of their effectiveness and feasibility.

Two approaches were applied in the empirical part: the main case study (railway line no. 356, section Owińska – Bolechowo), which enabled full implementation of the WILD-RAIL framework and the formulation of comprehensive recommendations for key stakeholders, including the infrastructure manager and the regional railway operator; and the ad hoc case study (railway line no. 139, section Tychy Żwaków – Piasek), whose main outcome was the rapid diagnosis of the problem and the proposal of a feasible mitigation measure under conditions of limited data availability. Both cases confirmed the applicability of the framework in both strategic planning and operational practice.

The selection and evaluation of measures were supported by SWOT and PESTEL analyses, while implementation risks were assessed using the FMEA method. Another important outcome of the dissertation is the development of a prototype IT tool (an interactive Python-based form), which allows for the practical application of the WILD-RAIL framework in decision-making processes.

Expert interviews confirmed that the effectiveness of mitigation actions depends not only on technology but also on institutional, financial, and social factors. Respondents emphasised the need for a systemic approach and identified organisational barriers as well as opportunities to improve environmental practices in the railway sector.

The proposed analytical and decision-making framework integrates engineering and ecological knowledge. Its innovativeness lies in its adaptive nature, systemic scope, and implementation potential. The dissertation therefore contributes both a theoretical advancement in biodiversity protection in transport and practical foundations for introducing effective and sustainable mitigation measures in the railway sector.

Spis treści

1. Wstęp.....	6
2. Transport kolejowy a bioróżnorodność w kontekście strategii zrównoważonego rozwoju....	8
2.1. Idea zrównoważonego rozwoju.....	8
2.2. Ochrona bioróżnorodności ekosystemów	11
2.2.1. Powaga problemu i hierarchizacja działań	11
2.2.2. Międzynarodowe ramy i strategie działania.....	13
2.3. Ocena oddziaływania na środowisko jako kluczowy element zapewnienia zrównoważonego rozwoju transportu kolejowego.....	19
2.3.1. Zrównoważony transport kolejowy	19
2.3.2. Rodzaje oddziaływań transportu kolejowego na środowisko naturalne	20
2.4. Rozwój transportu a ochrona bioróżnorodności.....	31
2.4.1. Kontekst zagadnienia.....	31
2.4.2. Programy, projekty i narzędzia wspierające ochronę bioróżnorodności w obszarze transportu.....	31
2.4.3. Metody minimalizacji negatywnego wpływu kolei na ekosystemy	34
3. Cel i teza pracy	36
3.1. Zasadność podjęcia tematu.....	36
3.2. Teza pracy	37
3.3. Cele pracy.....	37
3.4. Zakres pracy	38
4. Metodyka badań.....	40
5. Kolizje pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami w Polsce.....	41
5.1. Analiza danych PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.	41
5.2. Analiza danych przewoźników regionalnych.....	48
5.2.1. Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o.	48
5.2.2. Koleje Dolnośląskie Sp. z o.o.....	50
5.2.3. Koleje Małopolskie Sp. z o.o.....	51
5.2.4. Arriva RP Sp. z o.o.....	53
5.2.5. Koleje Śląskie Sp. z o.o.	54
5.3. Podsumowanie wyników analizy	57
6. Klasyfikacja i ocena dostępnych rozwiązań redukujących negatywny wpływ transportu na ekosystemy	60
6.1. Cele działań i zakres analizy	60
6.2. Różne podejścia – metody infrastrukturalne, aktywne, złożone, uzupełniające	60
6.3. Klasyfikacja i analiza porównawcza metod mitygujących oddziaływanie transportu kolejowego na ekosystemy.....	69
6.4. Kontekst wyboru rozwiązań i wyzwania wdrożeniowe	72
6.5. Przypadek Centralnego Portu Komunikacyjnego – analiza dokumentacji środowiskowej dużej inwestycji	75
7. Adaptacyjna rama analityczno-decyzyjna do wdrażania rozwiązań mitygujących wpływ transportu na dzikie zwierzęta (WILD-RAIL)	78
7.1. Koncepcja i cel opracowania.....	78
7.2. Identyfikacja zjawiska.....	81
7.3. Analiza hotspotów oraz czynników wpływających na ich lokalizację.....	82
7.4. Wybór rozwiązań mitygacyjnych.....	85
7.5. Rekomendacje dla stron zainteresowanych.....	86
7.6. Wdrożenie, monitoring i ewaluacja.....	86

7.7. Możliwość implementacji w formie narzędzia	87
7.8. Podsumowanie	89
8. Studium przypadku: linia kolejowa nr 356, Owińska – Bolechowo.....	91
8.1. Wprowadzenie i przyczyny wyboru.....	91
8.2. Charakterystyka linii	92
8.3. Przykład zastosowania adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej	95
8.3.1. Identyfikacja zjawiska	95
8.3.2. Analiza czynników, ich źródeł i możliwości zarządzania	101
8.3.3. Dobór metod mitygacyjnych	104
8.3.4. Rekomendacje dla stron zainteresowanych	107
8.3.5. Możliwość wdrożenia, metody monitoringu i ewaluacji efektywności proponowanych rozwiązań.....	109
8.4. Podsumowanie rozdziału.....	111
9. Studium przypadku II: przykład ad hoc	113
9.1. Cel włączenia przypadku	113
9.2. Charakterystyka lokalizacji i identyfikacja zjawiska	113
9.3. Analiza terenowa.....	115
9.4. Propozycja działania mitygacyjnego.....	116
9.5. Podsumowanie rozdziału.....	117
10. Szanse i wyzwania – rekomendacje środowiskowe w ramach panelu eksperckiego.....	118
10.1. Planowanie i procedury	118
10.2. Współpraca między instytucjami i odpowiedzialność	119
10.3. Dane, monitoring i zarządzanie wiedzą	120
10.4. Wyzwania wdrożeniowe i bariery systemowe	121
11. Podsumowanie i wnioski.....	123
Oświadczenia	129
Bibliografia	130
Spis rysunków.....	146
Spis tabel.....	148

1. Wstęp

Transport szynowy jest jednym z filarów nowoczesnych systemów mobilności – umożliwia sprawny przewóz ludzi i towarów oraz stanowi zrównoważoną alternatywę dla transportu drogowego. Jednakże budowa i rozwój sieci transportowych, a także eksploatacja pojazdów może znacząco wpływać na środowisko, w tym bezpośrednio na ekosystemy w otoczeniu linii kolejowych, zaburzając naturalne procesy ekologiczne. Infrastruktura kolejowa wiąże się z zajmowaniem terenów zielonych i fragmentacją krajobrazu, efektem bariery dla migrujących gatunków, emisji toksycznych substancji do atmosfery, zanieczyszczeniem gleb i wód, a także zwiększeniem śmiertelności zwierząt w wyniku kolizji z pojazdami szynowymi. Oddziaływania mają wielowymiarowy charakter postępującej utraty bioróżnorodności – jednego z kluczowych obszarów działań w ramach strategii zrównoważonego rozwoju. Idea ta opiera się na holistycznym podejściu do rozwoju społeczeństwa, równoważącym wzrost gospodarczy i industrializację z ochroną środowiska i dobrostanem społecznym. W kontekście ochrony bioróżnorodności strategia zrównoważonego rozwoju dąży do identyfikowania i szanowania wzajemnych powiązań między działalnością człowieka a systemami ekologicznymi, tak aby zapewnić utrzymanie zasobów przyrodniczych zarówno dla obecnych, jak i przyszłych pokoleń. Konieczność ochrony środowiska naturalnego przy jednoczesnym rozwoju społeczno-gospodarczym znajduje odzwierciedlenie w licznych strategiach, konwencjach i projektach międzynarodowych. Choć w krajach Unii Europejskiej funkcjonują formalne narzędzia oceny oddziaływania inwestycji infrastrukturalnych na środowisko, w praktyce nadal trudnościami pozostaje skuteczna identyfikacja i reagowanie na niektóre negatywne zjawiska – zwłaszcza w zakresie wyboru i wdrażania odpowiednich rozwiązań mitygacyjnych.

Dotychczasowe badania związane z tematyką oddziaływania transportu na środowisko w głównej mierze odnoszą się do zanieczyszczenia powietrza oraz hałasu i drgań związanych z eksploatacją pojazdów. Pomimo dostępnych analiz dotyczących skali, przyczyn i skutków kolizji z dzikimi zwierzętami, zarówno na drogach, jak i liniach kolejowych, publikacje naukowe koncentrują się na pojedynczych rozwiązaniach i ocenie skuteczności, a nie stanowią analizy porównawczej oraz całościowej, która mogłaby posłużyć jako katalog potencjalnych strategii mitygacyjnych. Ponadto niedostatecznie zbadane są także aspekty związane z utratą bioróżnorodności i fragmentacją siedlisk. Obecne koncepcje i polityki, choć stanowią ramy działania, nie są elementem spójnego, uniwersalnego procesu wdrażania środków zaradczych lub kompensacyjnych.

Kluczowe stało się opracowanie wieloaspektowego, systemowego rozwiązania, uwzględniającego specyfikację przyrodniczą, lokalizacyjną i operacyjną, które może wspierać podejmowanie decyzji w celu minimalizowania negatywnego wpływu transportu kolejowego na ekosystemy. Przedstawiona w tej pracy propozycja procesu analityczno-decyzyjnego stanowi uzupełnienie istniejących strategii ochrony środowiska i może przyczynić się do redukcji śmiertelności zwierząt i fragmentacji siedlisk.

Praca składa się z pięciu części:

- analizy danych dotyczących kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w Polsce
- kompleksowej oceny i klasyfikacji rozwiązań redukujących negatywny wpływ transportu na ekosystemy
- opisu autorskiej adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do wdrażania rozwiązań

- studium przypadku zastosowania opracowanego rozwiązania dla wybranego odcinka linii kolejowej
- wniosków i rekomendacji przedstawicieli sektora kolejowego i naukowego opracowanych na podstawie przeprowadzonych wywiadów eksperckich.

Tym samym efektem pracy będzie szczegółowa charakterystyka wpływu transportu kolejowego na bioróżnorodność, ze szczególnym uwzględnieniem zjawiska kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami, a także przedstawienie podstaw praktycznego narzędzia wspierającego wdrażanie odpowiednich środków łagodzących, z wykorzystaniem katalogu rozwiązań, uzupełnione o interdyscyplinarną perspektywę wskazującą szanse, wyzwania i możliwe kierunki dalszych działań. Stanowi bezpośrednią próbę realizacji strategii zrównoważonego rozwoju w warunkach rzeczywistych.

2. Transport kolejowy a bioróżnorodność w kontekście strategii zrównoważonego rozwoju

2.1. Idea zrównoważonego rozwoju

Koncepcja zrównoważonego rozwoju, wprowadzona do przestrzeni publicznej w raporcie Brundtland [1] w 1987 roku, integruje troskę o środowisko naturalne, rozwój gospodarczy i społeczny. W tym dokumencie zrównoważony rozwój został zdefiniowany jako taki, który „zaspokaja potrzeby obecnego pokolenia bez narażania zdolności przyszłych pokoleń do zaspokajania swoich potrzeb”. Zatem jej celem jest zapewnienie stabilności ekonomicznej i społecznej przy zachowaniu harmonii człowieka z otaczającym go światem przyrody. Istotą tego podejścia jest analiza długofalowych skutków działań człowieka, zarówno na poziomie lokalnym jak i globalnym [2]. Poza ograniczaniem degradacji środowiska naturalnego kluczowe są zmiany w systemach gospodarczych i społecznych, które umożliwiłyby wsparcie regeneracji zasobów naturalnych lub ich kompensację.

Pierwszy wieloaspektowy plan działań na rzecz wprowadzenia zrównoważonego rozwoju został zaprezentowany i przyjęty na Szczycie Ziemi w Rio de Janeiro w 1992 roku. Agenda 21 Organizacji Narodów Zjednoczonych obejmuje szeroki zakres tematów, w tym ochronę środowiska, promowanie zrównoważonej gospodarki i zapewnienie sprawiedliwego traktowania obywateli. W ten sposób wyznaczono kluczowe obszary wymagające poprawy oraz kierunki globalnych działań.

Jednym z najbardziej znanych dokumentów dotyczących zrównoważonego rozwoju jest Deklaracja z Johannesburga, która została przyjęta podczas Światowego Szczytu Zrównoważonego Rozwoju (ang. *World Summit on Sustainable Development*, WSSD) w 2002 roku [3]. Deklaracja skupiała się na podejmowaniu praktycznych działań, które pozwolą na realizację idei dzięki zaangażowaniu społeczności międzynarodowej. Najważniejszymi elementami strategii stały się: eliminacja ubóstwa na świecie, ochrona środowiska naturalnego, globalna i międzybranżowa współpraca, niwelowanie nierówności społecznych oraz zrównoważone wykorzystanie zasobów [4]. Tym samym podkreślona została idea trzech filarów zrównoważonego rozwoju – ekonomicznego, społecznego i środowiskowego oraz potrzeba włączenia ich analizy w procesy decyzyjne.

Pierwszy z nich – filar ekonomiczny – dotyczy rozwoju stabilnej gospodarki z poszanowaniem zasobów naturalnych. W tym celu zalecane są inwestycje w tzw. zielone technologie, które zmniejszają wpływ przemysłu na środowisko, gospodarkę o obiegu zamkniętym, redukcję zanieczyszczeń związanych z działalnością człowieka oraz efektywne wykorzystanie źródeł surowców, w szczególności nieodnawialnych [5].

Filar społeczny obejmuje aspekty związane z poprawą jakości życia, przede wszystkim dzięki redukcji ubóstwa, zapewnienie równego traktowania bez względu na płeć, religię, rasę i orientację, powszechny dostęp do edukacji i opieki zdrowotnej. Wskazuje, że zrównoważony rozwój społeczny można osiągnąć przez sprawiedliwe traktowanie jednostek, minimalizację marginalizowania mniejszości oraz włączenie obywateli w procesy kształtowania polityki regionów, państw i organizacji międzynarodowych [6].

Filar środowiskowy związany jest z ochroną ekosystemów i zasobów naturalnych. Wśród najważniejszych aspektów działań należy podkreślić ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, łagodzenie zmian klimatycznych (w tym poprzez promowanie odnawialnych

źródeł energii), ochronę różnorodności biologicznej, efektywne zarządzanie zasobami wodnymi i ziemnymi [2,7].

Istotą wdrożenia strategii zrównoważonych działań ludzkich jest długoterminowa, interdyscyplinarna współpraca przedstawicieli różnych sektorów, która pozwoli na zachowanie równowagi między potrzebami rozwojowymi, a ograniczeniami otaczającego świata.

Interdyscyplinarnym, wielowymiarowym i międzysektorowym podejściem charakteryzuje się globalny plan „Transforming our world: Agenda 2030 for Sustainable Development” [8], zwany skrótowo Agenda 2030, przyjęty przez państwa członkowskie ONZ w dniu 25 września 2015 roku podczas szczytu w Nowym Jorku. Dokument wyznacza międzynarodowe ramy działań do roku 2030, stając się kamieniem milowym wdrażania strategii na rzecz zrównoważonego rozwoju. Agenda 2030 składa się z 17 Celów Zrównoważonego Rozwoju (ang. *Sustainable Development Goals*, SDGs), przedstawionych na rysunku 1.1 i powiązanych z nimi 169 zadań, które w idei mają zapewnić zachowanie równowagi między trzema kluczowymi filarami rozwoju. Dzięki uniwersalnemu podejściu, plan adresowany jest dla wszystkich państw członkowskich, zarówno krajów wysoko rozwiniętych, jak i wciąż rozwijających się [9,10]. Cele to naczynia połączone, wymagające rozważnych działań we wszystkich sektorach, aby zachować ogólną równowagę.



Rys. 1.1. Cele zrównoważonego rozwoju [11]

Agenda 2030 służy nie tylko jako deklaracja postulatów politycznych, lecz przede wszystkim określa praktyczne ramy do śledzenia stanu i postępów w zakresie zrównoważonego rozwoju. Członkowie ONZ są zobowiązani do dostarczania regularnych raportów na temat wyników swoich działań. Dzięki temu wyznaczane są indywidualne wskaźniki SDG, które pozwalają międzynarodowej społeczności ocenić realizację wskazanych celów. Tym samym idea zrównoważonego rozwoju nie obejmuje wyłącznie ochrony środowiska (choć jest to jej istotny filar), ale pozwala zastosować w przestrzeń publicznej holistyczne podejście, łączące cele, zadania i monitorowanie efektów w zakresie działań człowieka w różnych obszarach, płaszczyznach i poziomach.

Poprzez ochronę środowiska naturalnego można rozumieć zarówno odpowiedzialne zarządzanie zasobami, przeciwdziałanie zmianom klimatycznym, jak i niwelację obecnych i przyszłych negatywnych skutków oddziaływań antropologicznych na ekosystemy lądowe i wodne. Liczebność obszarów wymagających działań sprawia, że zagadnienie to jest jednym z najważniejszych aspektów zrównoważonego rozwoju. Strategie zawierają zarówno ramy i regulacje prawne oraz oddolne, indywidualne inicjatywy podejmowane przez sektor prywatny i publiczny. Często mają one na celu wspieranie zrównoważonych praktyk w zakresie produkcji, konsumpcji czy też życia codziennego. Ważnym elementem tych działań jest edukacja ekologiczna i zwiększanie świadomości społecznej na temat wpływu człowieka na środowisko.

Wśród celów wskazanych w Agendzie 2030, pięć z nich dotyczy bezpośrednio środowiska naturalnego [12]:

- Cel 6: Czysta woda i warunki sanitarne – w zakresie efektywnego zarządzania zasobami wodnymi i zapobiegania zanieczyszczeniom wód
- Cel 7: Czysta i dostępna energia – w zakresie dążenia do osiągnięcia niedrogiej, niezawodnej, zrównoważonej i nowoczesnej energii, w tym wspieranie rozwoju odnawialnych źródeł energii
- Cel 13: Działania na rzecz klimatu – działań w celu przeciwdziałania zmianom klimatycznym i ich skutkom, w tym zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie odporności na zmiany klimatyczne
- Cel 14: Życie pod wodą – w zakresie ochrony oceanów, mórz i zasobów morskich poprzez zmniejszenie zanieczyszczeń, ochronę ekosystemów morskich oraz zrównoważoną gospodarkę rybacką
- Cel 15: Życie na lądzie – w zakresie ochrony ekosystemów lądowych, promowanie zrównoważonego zarządzania lasami, ochrona bioróżnorodności oraz przeciwdziałanie pustynnieniu i degradacji gleby.

Jednakże, poza powyższymi punktami, można wymieniść także trzy cele, które w sposób pośredni wiążą się ze zmniejszeniem negatywnego oddziaływania sektorów gospodarki na środowisko naturalne:

- Cel 9: Innowacyjność, przemysł, infrastruktura – w zakresie wspierania rozwoju nowoczesnych, zielonych technologii oraz zmniejszania wpływu rozbudowy infrastruktury i działań przemysłowych na otoczenie
- Cel 11: Zrównoważone miasta i społeczności – w zakresie inwestowania w ekologiczne budownictwo, niskoemisyjne i odporne na zmiany klimatyczne
- Cel 12: Odpowiedzialna konsumpcja i produkcja – w zakresie zmniejszenia ilości odpadów, ograniczenia marnotrawstwa i wprowadzania zrównoważonego wykorzystywanie zasobów naturalnych.

Przedstawione zestawienie obszarów związanych z ochroną środowiska w globalnym planie działań ONZ wskazuje jak ważnym, złożonym i wielowymiarowym zagadnieniem. Realizacja każdego ze wskazanych celów jest związana z licznymi zadaniami dedykowanymi różnym branżom, co pozwala na wdrożenie konkretnych działań w praktyce i wprowadzenia korzystnych zmian na poziomie lokalnym, jak i globalnym [13].

2.2. Ochrona bioróżnorodności ekosystemów

2.2.1. Powaga problemu i hierarchizacja działań

Cel 15 Agendy 2030 – Życie na lądzie – bezpośrednio odnosi się do działań ekologicznych. Obejmuje zadania związane z ochroną, odbudową i promowaniem zrównoważonego użytkowania ekosystemów lądowych, takich jak lasy, mokradła, góry i sucholądy, zgodnie z międzynarodowymi umowami. Wskazuje na konieczność uwzględnienia wartości ekologicznych i usług ekosystemowych w planowaniu polityk i strategii ochronnych [14]. Oprócz ustanawiania obszarów chronionych, należy także oceniać reprezentatywność ekosystemów w systemach ochrony oraz prowadzić ewaluację skuteczności wprowadzanych rozwiązań. Jednym z głównych aspektów działań na rzecz środowiska naturalnego a jednocześnie jednym z globalnych największych wyzwań staje się ochrona bioróżnorodności, realizowana poprzez zatrzymanie utraty różnorodności biologicznej, ochrona zagrożonych gatunków i zapobieganie ich wyginięciu.

Bioróżnorodność, stanowiąca fundament stabilności ekosystemów i dobrostanu ludzkości, znajduje się w krytycznym punkcie zagrożenia. Tempo wymierania gatunków osiągnęło niespotykane dotąd wartości, napędzane działalnością człowieka – od wylesiania, przez zmiany klimatyczne, po zanieczyszczenie środowiska i nadmierną eksploatację zasobów naturalnych. Degradacja ekosystemów nie tylko prowadzi do zaniku unikalnych form życia, ale również osłabia zdolność środowiska do podtrzymywania podstawowych funkcji, takich jak oczyszczanie powietrza i wody, zapylenie upraw czy regulacja klimatu. W obliczu tego wyzwania kluczowe staje się priorytetyzowanie działań ochronnych i wdrażanie strategii, które pozwolą na skuteczną rekonstrukcję i ochronę naturalnych zasobów [15,16].

Wnioski z globalnych i europejskich raportów dotyczących badań nad różnorodnością biologiczną wskazują na powagę problemu [17–19]. Tempo wymierania gatunków na Ziemi jest obecnie 1000 razy wyższe niż naturalne tempo tła¹, co stanowi jedno z największych zagrożeń dla ekosystemów i stabilności planety [20]. Międzynarodowy, interdyscyplinarny raport na temat aktualnego stanu planetarnych granic² alarmuje, że granica dotycząca integralności biosfery, w tym różnorodności genetycznej, została w pełni przekroczona (graficznie przedstawiono na rysunku 2.1), co oznacza wysokie ryzyko utraty kontroli nad postępującymi negatywnymi zmianami w wyniku działań człowieka [21].

Pomimo ciągłych wysiłków państw członkowskich różnorodność biologiczna w Unii Europejskiej nadal ulega zmniejszeniu. Według Europejskiej Agencji Środowiska 15% siedlisk znajduje się w korzystnym stanie ochrony, podczas gdy 81% zostało sklasyfikowanych jako mające zły lub niedostateczny status. Jednym z czynników przyczyniających się do tego trendu jest rozpowszechnienie małych obszarów chronionych w całej Europie, które zazwyczaj mają powierzchnię mniejszą niż 1 km² i są często izolowane od siebie [22]. Konsekwencje utraty różnorodności biologicznej obejmują:

- utratę i degradację siedlisk
- zmiany klimatyczne

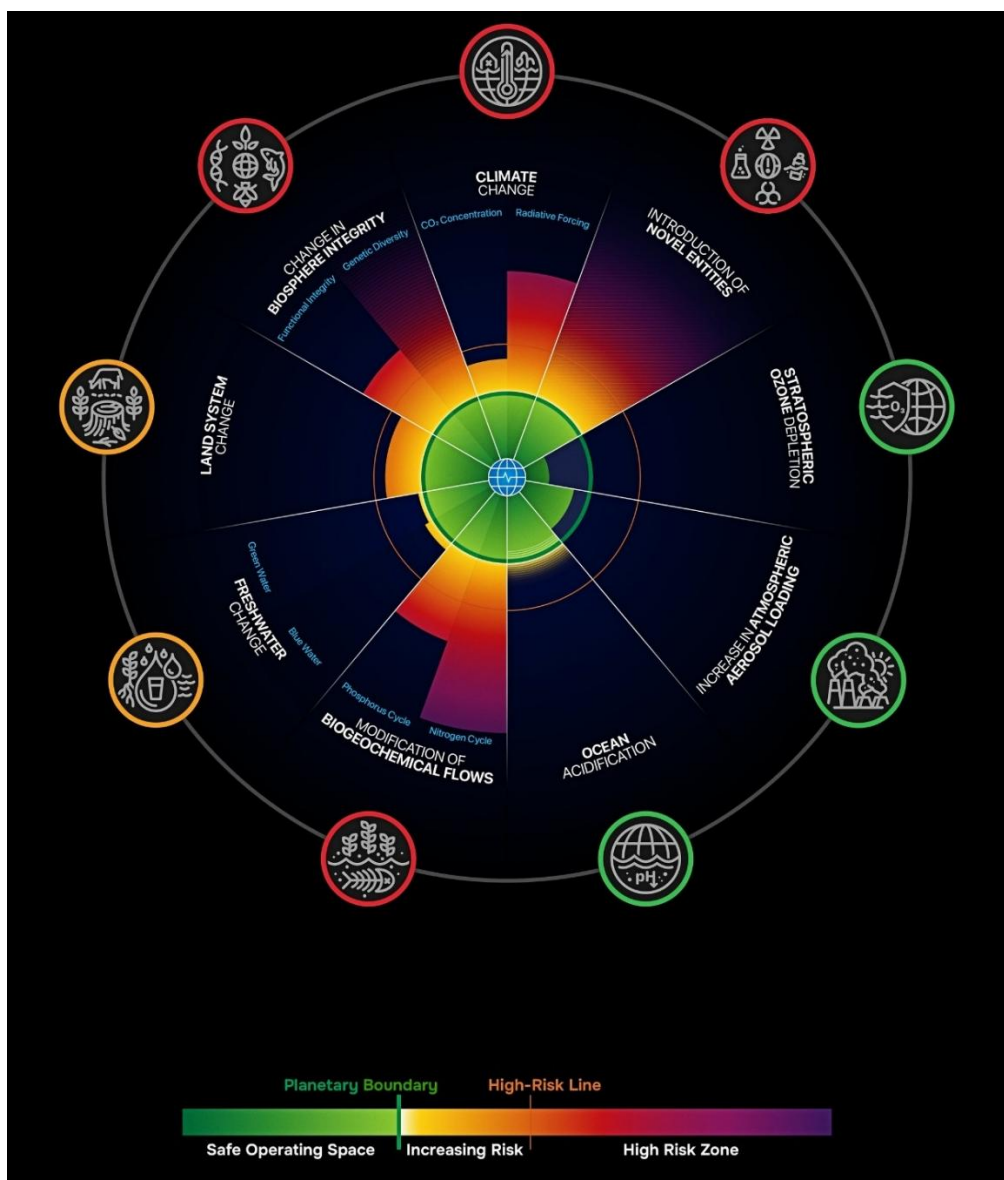
¹ Tempo tła (ang. *background extinction rate*) – naturalna, przeciętna szybkość wymierania gatunków w historii Ziemi, mierzona w długich okresach geologicznych, gdy nie występowały żadne nadzwyczajne katastrofy biologiczne [294]

² Granice planetarne (ang. *planetary boundaries*) – idea wprowadzona w 2009 rozumiana jako granice bezpiecznego funkcjonowania i rozwoju społeczeństw [295]

- nadmierną eksploatację zasobów naturalnych
- zanieczyszczenie
- wprowadzanie inwazyjnych gatunków obcych.

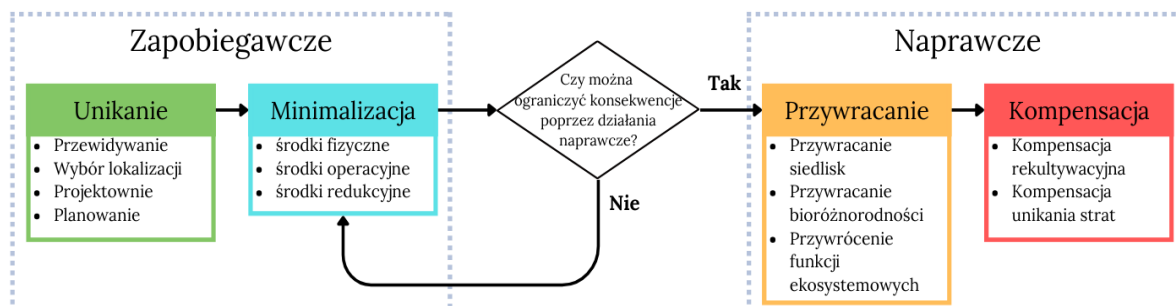
W 2015 roku w ramach inicjatywy Cross-Sector Biodiversity Initiative (CSBI) opracowano hierarchię działań mitygacyjnych, które należy uwzględnić podczas planowania działań [23]:

- zapobieganie negatywnym skutkom, na przykład poprzez staranny wybór lokalizacji, które unikają ekologicznie wrażliwych siedlisk, lub planowanie zakłócających działań poza sezonami lęgowymi gatunków
- redukcja wpływów, jeśli unikanie nie jest możliwe, poprzez wdrożenie środków takich jak bariery lub systemy kontroli
- rekultywacja uszkodzonych siedlisk do ich pierwotnego stanu w przypadku, gdy środki zapobiegawcze okażą się niemożliwe do zastosowania
- kompensacja trwałych, nieodwracalnych szkód poprzez tworzenie lub odnawianie siedlisk poza miejscem oddziaływania.



Rys. 2.1. Granice planetarne i stopień ich przekroczenia w roku 2024 [24]

Opisane ramy pozwalają na wyznaczanie osiągalnych celów, poprawę wyników oraz identyfikowanie najbardziej opłacalnych rozwiązań. Mogą również służyć jako narzędzie wspomagające analizę ryzyka i zarządzanie projektami. Uznaje się je za zbiór priorytetowych kroków mających na celu redukcję negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Niemniej jednak nie jest to proces liniowy i często wymaga iteracji, co przedstawiono na rysunku 2.2.



Rys. 2.2. Hierarchia mitygacji środowiskowej, diagram schematyczny na podstawie [23]

Skuteczna ochrona bioróżnorodności wymaga hierarchizacji działań, czyli ustalenia priorytetów w zakresie minimalizowania negatywnego wpływu działalności człowieka na środowisko. Kluczowe jest zastosowanie zasady zapobiegania, zgodnie z którą najbardziej efektywnym rozwiązaniem jest unikanie ingerencji w przyrodę na etapie planowania inwestycji. Jeśli to niemożliwe, należy wdrażać działania kompensacyjne, takie jak odtwarzanie zniszczonych ekosystemów czy tworzenie korytarzy ekologicznych.

2.2.2. Międzynarodowe ramy i strategie działania

Potrzeba podjęcia działań na rzecz ochrony środowiska i różnorodności biologicznej została rozpoznana przez ekologów i polityków wiele lat temu, co doprowadziło do opracowania międzynarodowych instrumentów prawnych – konwencji i dyrektyw Unii Europejskiej. Można wymienić następujące międzynarodowe traktaty:

- Konwencja Ramsarska (1971), oficjalnie znana jako Konwencja o obszarach wodno-błotnych mających znaczenie międzynarodowe, zwłaszcza jako siedliska ptaków wodnych
- Konwencja Bońska (1979), czyli Konwencja o ochronie wędrownych gatunków dzikich zwierząt (CMS)
- Konwencja Berneńska (1979), znana również jako Konwencja o ochronie dzikiej flory i fauny europejskiej oraz ich siedlisk naturalnych
- Konwencja z Espoo (1991), dotycząca oceny oddziaływania na środowisko w kontekście transgranicznym wraz z Protokołem z Kijowa (2003) w sprawie strategicznej oceny oddziaływania na środowisko
- Konwencja o różnorodności biologicznej (1992)
- Europejska Konwencja Krajobrazowa (2000)

oraz akty prawne Unii Europejskiej:

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2001/42/WE z dnia 27 czerwca 2001 r. w sprawie oceny skutków niektórych planów i programów na środowisko, znana jako Dyrektywa SEA (ang. *Strategic Environmental Assessment*) (2001)

- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2011/92/UE z dnia 13 grudnia 2011 r. w sprawie oceny skutków niektórych przedsięwzięć publicznych i prywatnych na środowisko, zmieniona Dyrektywą 2014/52/UE, znana jako Dyrektywa EIA (ang. *Environmental Impact Assessment*) (2011/2014)
- Dyrektywa Rady nr 92/43/EWG z dnia 21 maja 1992 r. w sprawie ochrony siedlisk przyrodniczych oraz dzikiej fauny i flory, znana jako Dyrektywa siedliskowa (1992)
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2009/147/WE z dnia 30 listopada 2009 r. w sprawie ochrony dzikiego ptactwa, znana jako Dyrektywa ptasia (2009).

Jedną z pierwszych konwencji poruszających te kwestie była Konwencja Ramsarska [25], której celem jest ochrona i zrównoważone użytkowanie obszarów wodno-błotnych poprzez działania lokalne, regionalne i narodowe oraz współpracę międzynarodową. Obszary wodno-błotne, w tym bagna, torfowiska, równiny zalewowe i obszary przybrzeżne, są uznawane za ekologicznie istotne, zapewniające siedliska dla dzikiej przyrody i pełniące kluczową rolę dla społeczności ludzkich [26]. Przykładem mogą być obszary takie jak Delta Dunaju w Rumunii, gdzie realizacja projektów infrastruktury kolejowej uwzględnia wrażliwe ekosystemy [27]. Takie podejście sprzyja bardziej ostrożnemu planowaniu i wdrażaniu inwestycji, w sposób minimalizujący ryzyko degradacji terenów podmokłych, a tym samym wspiera praktyki zrównoważonego rozwoju.

Konwencja CMS [28], znana również jako Konwencja Bońska, to międzynarodowy traktat przyjęty w Bonn w Niemczech w 1979 roku. Jej celem jest ochrona gatunków migrujących i ich siedlisk na całej trasie migracji. CMS umożliwia globalną współpracę między krajami, które dzielą te gatunki, i zapewnia ramy dla ich ochrony oraz zrównoważonego użytkowania. Porusza ona zagrożenia, takie jak niszczenie siedlisk, zmiany klimatu i polowania, promując środki takie jak odtwarzanie siedlisk, ochrona prawna i badania naukowe. CMS obejmuje szeroki zakres gatunków, w tym ptaki, zwierzęta morskie i ssaki lądowe, zapewniając ich ochronę wzdłuż tras migracyjnych [29], poprzez porozumienia i specjalne plany działań, takie jak Central Asian Mammals Initiative [30], koncentrujące się na ochronie siedlisk oraz zaangażowaniu społeczności lokalnych, promuje się planowanie tras kolejowych w sposób nienaruszający ciągłości korytarzy ekologicznych.

W kontekście europejskiej przyrody istotna jest Konwencja Berneńskiej, która dotyczy ochrony dzikiej flory i fauny oraz ich siedlisk naturalnych w Europie. Zapisy konwencji koncentrują się na ochronie gatunków zagrożonych i wrażliwych, promowaniu zrównoważonego zarządzania ich siedliskami oraz wspieraniu współpracy między państwami europejskimi. Obejmuje środki mające na celu kontrolę eksploatacji gatunków i siedlisk, podkreśla znaczenie zachowania różnorodności biologicznej oraz zachęca do tworzenia polityk i ustawodawstwa krajowego zgodnych z tymi celami. Konwencja Berneńska stanowi kluczowe ramy ochrony europejskiego dziedzictwa przyrodniczego [31,32]. Przykładami realizacji postulatów tej konwencji są: szmaragdowa sieć (ang. *Emerald Network*) obszarów z zagrożonymi gatunkami zwierząt [33], plany działania dla poszczególnych przypadków oraz projekty takie jak Rewilding Europe [34], których celem jest przywrócenie naturalnych procesów i siedlisk, promowanie różnorodności biologicznej i odporności ekosystemów. Traktat ten zapewnia, że linie transportowe i praktyki budowlane nie szkodzą krytycznym siedliskom, co może prowadzić do wyboru alternatywnych tras lub wdrożenia środków mitygujących.

Konwencja o różnorodności biologicznej CBD [35] jest jednym z najbardziej znanych traktatów międzynarodowych, przyjętym na Szczycie Ziemi w Rio de Janeiro, którego celem jest promowanie zrównoważonego rozwoju poprzez ochronę różnorodności biologicznej. CBD odnosi się do różnych aspektów różnorodności biologicznej, w tym ekosystemów, gatunków i różnorodności genetycznej, a także uznaje suwerenność narodów nad ich zasobami biologicznymi. Podkreśla również znaczenie włączenia kwestii różnorodności biologicznej do krajowych procesów decyzyjnych i wspierania współpracy międzynarodowej. Jednym z efektów CBD jest ustanowienie obszarów chronionych i rozpoczęcie projektów odbudowy ekosystemów. Innym jest ułatwienie pozyskiwania funduszy na ochronę różnorodności biologicznej za pośrednictwem Globalnego Funduszu Środowiska, który wspierał między innymi ochronę sieci obszarów chronionych w Bhutanie [36]. Konwencja wskazuje również na potrzebę integracji środków na rzecz różnorodności biologicznej w różnych sektorach: turystyce, rolnictwie, transporcie. Prowadzi to do projektów kolejowych, które uwzględniają projekty i praktyki przyjazne dla różnorodności biologicznej, takie jak zielone mosty i tunele, które pozwalają dzikim zwierzętom bezpiecznie przekraczać [37].

Europejska Konwencja Krajobrazowa zobowiązuje państwa do uwzględniania wartości krajobrazu w planowaniu przestrzennym, także w kontekście infrastruktury transportowej [38]. W przypadku kolei promuje integrację tras z otoczeniem, unikanie fragmentacji krajobrazu oraz ochronę jego ciągłości, co pośrednio wspiera zachowanie korytarzy ekologicznych i siedlisk. Praktyczne wdrożenia obejmują projekty takie jak Trans-European Green Network [39] czy inicjatywy regionalne w Polsce jak LIFE Karpaty Łączą [40], gdzie aspekty krajobrazowe są uwzględniane przy lokalizacji inwestycji w parkach krajobrazowych i dolinach rzecznych.

Konwencja z Espoo ustanowiła międzynarodowe zasady przeprowadzania oceny oddziaływania na środowisko w przypadku inwestycji mogących mieć wpływ transgraniczny [41]. Choć sama koncepcja oceny oddziaływania na środowisko (EIA), rozwijała się wcześniej na poziomie krajowym i wspólnotowym, konwencja ujedynoliciła podstawowe procedury konsultacyjne oraz zobowiązała państwa-sygnatariuszy do wzajemnego informowania się o potencjalnych skutkach środowiskowych. Dokument ten ma szczególne znaczenie w przypadku, gdy inwestycje prowadzone przez jedno państwo mogą negatywnie oddziaływać na środowisko państwa sąsiedniego – zwłaszcza jeśli dane państwo nie podlega bezpośredniemu prawu unijnemu i brakuje spójnych ram wspólnotowych, a wdrożenie odpowiednich środków łagodzących może być ograniczone [42].

Konwencja z Espoo stanowiła fundament do późniejszego rozwoju strategicznej oceny oddziaływania na środowisko (SEA), której obowiązek stosowania został wprowadzony oraz Dyrektywą 2001/42/WE [43] w sprawie oceny wpływu niektórych planów i programów na środowisko. Jej rozwinięciem był Protokół z Kijowa (2003), który w sposób formalny wprowadził SEA jako ocenę planów i programów o potencjalnym wpływie na środowiska.

SEA określa zasady i wymagania przeprowadzania strategicznej oceny środowiskowej w krajach członkowskich UE, w celu zapewnienia, że plany i programy uwzględniają aspekty środowiskowe już na etapie ich opracowywania. Dotyczy planów i programów, które mogą mieć znaczący wpływ na środowisko, w szczególności w takich sektorach jak transport, energetyka, gospodarka odpadami czy ochrona przyrody. Każde państwo członkowskie UE dostosowuje swoje przepisy do wymogów Dyrektywy SEA. W Polsce procedury SEA

reguluje Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (tzw. Ustawa OOS) oraz rozporządzenia wykonawcze określające szczegóły procedur [44]. SEA odgrywa kluczową rolę w ochronie bioróżnorodności, umożliwiając identyfikację i minimalizację potencjalnych zagrożeń dla ekosystemów. W przeciwieństwie do EIA, które dotyczy pojedynczych inwestycji, SEA analizuje skutki środowiskowe ujęte na poziomie strategicznym – w dokumentach planistycznych i programowych. Dzięki analizie wpływu planów i programów na różnorodność biologiczną, SEA pozwala na ochronę siedlisk przyrodniczych, ograniczenie fragmentacji krajobrazu oraz zachowanie szlaków migracyjnych zwierząt [45,46]. W kontekście transportu kolejowego, procedura ta wspiera projektowanie tras minimalizujących ingerencję w cenne przyrodniczo obszary, takich jak rezerваты i korytarze ekologiczne [47]. Ponadto SEA może pomóc w tworzeniu infrastruktury wspierającej ochronę bioróżnorodności, np. poprzez projektowanie wiaduktów ekologicznych czy zielonych nasypów, które integrują ochronę przyrody z rozwojem transportu.

Przykładem zastosowania procedury SEA w krajowej praktyce jest prognoza oddziaływania na środowisko dla projektu dokumentu „PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. – zamierzenia inwestycyjne na lata 2021–2030 z perspektywą do 2040 roku” [47,48]. Dokument ten, przygotowany zgodnie z wymogami ustawy OOS, odnosi się do potencjalnych oddziaływań środowiskowych planowanych inwestycji kolejowych, obejmując m.in. kwestie bioróżnorodności, ochrony obszarów Natura 2000, jakości powietrza i krajobrazu. Analiza zawiera identyfikację możliwych zagrożeń oraz ogólne zalecenia dotyczące unikania lub ograniczania negatywnego wpływu, np. poprzez właściwe lokalizowanie inwestycji lub stosowanie działań kompensacyjnych. Warto jednak zauważyć, że w wielu przypadkach oceniane oddziaływania uznawane są za nieznaczące, co może ograniczać operacyjny wymiar zaleceń środowiskowych. Tym samym dokument ten dobrze ilustruje obowiązujące podejście do SEA w planowaniu rozwoju infrastruktury kolejowej w Polsce, gdzie aspekt środowiskowy jest formalnie uwzględniany, ale w praktyce podejmowane działania można uznać za zachowawcze.

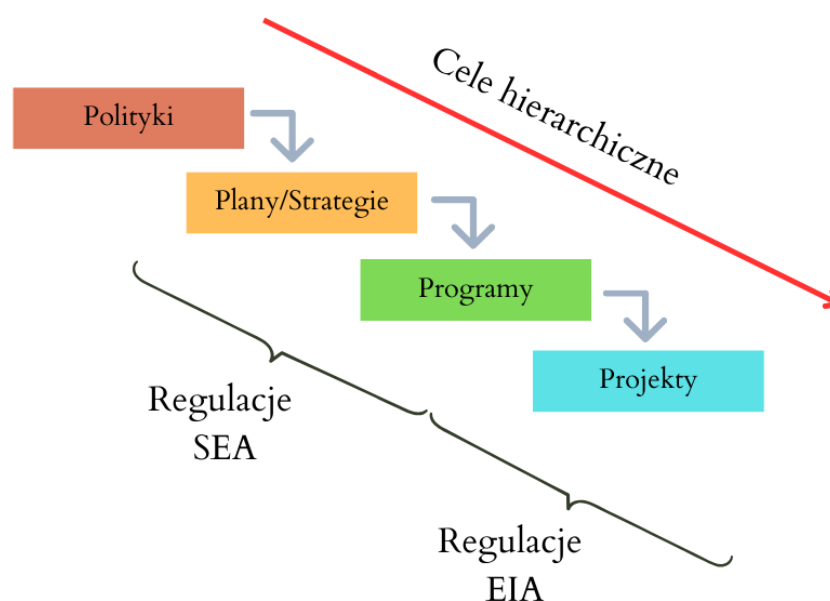
Idea EIA jest regulowana przez Dyrektywę 2011/92/UE Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie oceny wpływu niektórych przedsięwzięć publicznych i prywatnych na środowisko [49]. Dyrektywa przewiduje:

- określenie rodzajów przedsięwzięć wymagających obowiązkowej oceny środowiskowej (w tym m.in. budowę dalekobieżnych linii kolejowych) oraz takich, które mogą być oceniane w zależności od decyzji państw członkowskich (budowa nowych linii kolejowych i terminali transportu intermodalnego)
- uwzględnienie opinii społeczeństwa w procesach podejmowania decyzji
- szczegółowe wytyczne dotyczące konsultacji międzypaństwowych w przypadku przedsięwzięć o potencjalnym wpływie transgranicznym
- możliwość integracji procedury oceny środowiskowej z innymi procesami wydawania zezwoleń inwestycyjnych.

Procedura oceny oddziaływania na środowisko w ramach Dyrektywy obejmuje opis przedsięwzięcia, informacje o wpływie projektu na różne aspekty środowiska, opis alternatywnych rozwiązań oraz środków zapobiegawczych i kompensacyjnych, wyniki konsultacji społecznych i międzyinstytucjonalnych oraz decyzję o przyznaniu lub odmowie wydania zezwolenia na realizację przedsięwzięcia, wydaną przez organ właściwy.

W przypadku inwestycji kolejowych EIA wspiera ocenę wpływu inwestycji na siedliska przyrodnicze, krajobraz, jakość powietrza, poziom hałasu, a także populacje dzikich zwierząt. Odpowiednio przeprowadzona procedura pozwala zidentyfikować zagrożenia i zaplanować skuteczne działania minimalizujące lub kompensacyjne [50]. Jednak pomimo potencjału EIA często traktowana jest jako formalność, realizowaną pod presją czasową i inwestycyjną, a wymagane wdrożenia nie podlegają kontroli [51]. Rysunek 2.3 ilustruje zależność pomiędzy oceną SEA i EIA w procesie planowania i realizacji inwestycji. Wskazuje ona na hierarchiczną strukturę dokumentów planistycznych – od polityk, przez strategie i programy, aż po konkretne projekty – dla których obowiązują różne procedury oceny środowiskowej zgodnie z zakresem i etapem zaawansowania.

Dyrektywa siedliskowa [52] ma na celu promowanie utrzymania różnorodności biologicznej poprzez wymaganie od państw członkowskich Unii Europejskiej ochrony siedlisk przyrodniczych oraz fauny i flory. Dyrektywa ustanawia sieć Natura 2000 – spójną sieć obszarów chronionych w całej UE, zapewniającą ochronę cennych i zagrożonych siedlisk oraz gatunków. Wskazuje środki służące zachowaniu i zrównoważonemu wykorzystaniu środowiska naturalnego, przyczyniając się do nadrzędnego celu, jakim jest zatrzymanie utraty bioróżnorodności w UE [53,54]. Dyrektywa wymaga dokładnych ocen potencjalnych oddziaływań na chronione obszary, zapewniając, że aspekty ekologiczne są uwzględniane w planowaniu projektów infrastrukturalnych i transportowych. Nakłada obowiązek stosowania środków minimalizujących szkody dla siedlisk i gatunków oraz zachęca do rozważania alternatywnych rozwiązań, aby uniknąć znaczących oddziaływań ekologicznych. Uzupełnieniem Dyrektywy siedliskowej jest Dyrektywa ptasia [55], formalnie znana jako Dyrektywa 2009/147/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 30 listopada 2009 r. w sprawie ochrony dzikiego ptactwa, obejmująca tworzenie i zarządzanie obszarami Natura 2000 dla ochrony ptaków, wdrażanie programów ochrony zagrożonych gatunków oraz monitoring populacji i działań mających na celu zachowanie różnorodności biologicznej.



Rys. 2.3. Relacje między strategiczną oceną oddziaływania na środowisko (SEA) a oceną oddziaływania środowisko (EIA) na podstawie [56]

Sieć Natura 2000 jest filarem strategii Unii Europejskiej mającej na celu powstrzymanie spadku różnorodności biologicznej oraz zapewnienie długoterminowej ochrony najbardziej wartościowych i zagrożonych gatunków i siedlisk w Europie. Jej celem jest utrzymanie lub przywrócenie siedlisk przyrodniczych oraz dzikich gatunków do korzystnego stanu ochrony na całym ich naturalnym obszarze występowania w UE [57]. Sieć ta nie jest systemem rezerwatów przyrody wyłączających działalność człowieka, lecz uznaje potrzebę integracji działań ludzkich z celami ochrony, promując zrównoważone użytkowanie obszarów, które mogą współistnieć z potrzebami przyrody. Na rysunku 2.4 przedstawiono obszary ochrony w ramach Sieci Natura 2000 w Polsce. W przypadku rozwoju infrastruktury (w tym związanej z transportem) inwestycje mogą być realizowane na obszarach Natura 2000. Ograniczenia dotyczą jedynie projektów, których realizacja może mieć szkodliwy wpływ na przyrodę. Takie inwestycje wymagają uprzedniej oceny środowiskowej. Zabronione jest podejmowanie działań, które mogłyby, osobno lub w połączeniu z innymi działaniami, znacząco negatywnie wpływać na cele ochrony tego obszaru, w szczególności poprzez [58]:

- pogorszenie stanu siedlisk przyrodniczych lub siedlisk gatunków roślin i zwierząt, dla których obszar Natura 2000 został wyznaczony
- negatywny wpływ na gatunki, dla których obszar Natura 2000 został wyznaczony
- pogorszenie integralności obszaru Natura 2000 lub jego połączeń z innymi obszarami.

Jest to tzw. zapis ogólny, dlatego podejmowanie działań zależy od interpretacji i sposobu oceny sformułowania „znaczący wpływ”, co oznacza dużą swobodę w podejmowaniu decyzji. Brakuje również definicji uniwersalnych kryteriów oceny środowiskowej oraz bezpośredniej ochrony siedlisk czy planów łączących.



Rys. 2.4. Mapa obszarów chronionych w ramach Sieci Natura 2000: obszary specjalnej ochrony (określone na podstawie dyrektywy ptasiej) zaznaczono kolorem niebieskim, natomiast specjalne obszary ochrony (określone na podstawie dyrektywy siedliskowej) – kolorem czerwonym [59]

Unijna strategia na rzecz bioróżnorodności 2030 to kompleksowy plan mający na celu odbudowę i ochronę różnorodności biologicznej w Europie do 2030 roku. Stanowi ona kluczowy element Europejskiego Zielonego Ładu, dążąc do przywrócenia przyrody do naszego życia [60]. W kontekście transportu strategia podkreśla potrzebę zrównoważonego rozwoju infrastruktury, która minimalizuje negatywny wpływ na ekosystemy. Chociaż dokument nie zawiera bezpośrednich odniesień do obszaru kolejowego, promuje ogólne podejście do integracji kwestii bioróżnorodności w planowaniu i realizacji projektów infrastrukturalnych. Oznacza to, że rozwój sieci transportowych, w tym kolejowych, powinien uwzględniać ochronę siedlisk naturalnych, minimalizację fragmentacji ekosystemów oraz tworzenie korytarzy ekologicznych umożliwiających migrację gatunków. Ponadto strategia wzywa do przeznaczania odpowiednich środków finansowych na ochronę i promocję bioróżnorodności, co może obejmować inwestycje w ekologiczne rozwiązania. Implementacja tych założeń w sektorze transportu kolejowego może przyczynić się do zmniejszenia jego wpływu na środowisko naturalne, wspierając jednocześnie cele strategii dotyczące odbudowy bioróżnorodności w Europie.

Cel niniejszego podrozdziału stanowiło podsumowanie międzynarodowych polityk i strategii w zakresie ochrony środowiska, w szczególności bioróżnorodności, oraz ich praktycznych wdrożeń, takich jak plany działań, wyznaczanie obszarów chronionych czy projekty rewitalizacyjne. Wiele z nich w samej treści nie odnosi się bezpośrednio do transportu szynowego, stanowią jednak ramy, w obrębie których powinien on się rozwijać, aby zachować zgodność z zasadami zrównoważonego rozwoju. Ich ogólny wkład obejmuje m.in.:

- promowanie rygorystycznych procedur oceny oddziaływania na środowisko, uwzględniających aspekty bioróżnorodności i ochrony siedlisk
- opracowanie standardów i zaleceń dla projektów infrastrukturalnych, w tym kolejowych
- podnoszenie świadomości znaczenia bioróżnorodności i usług ekosystemowych, co wpływa na decydentów, inżynierów oraz opinię publiczną, sprzyjając wdrażaniu ekologicznych rozwiązań w transporcie kolejowym.

Międzynarodowe prawo ochrony środowiska ustanawia ramy globalnych działań na rzecz ochrony środowiska, ale wymaga dalszej współpracy międzynarodowej, aby skutecznie rozwiązywać kompleksowe wyzwania ekologiczne i zapewnić zrównoważony rozwój. Podkreśla się znaczenie przestrzegania ustanowionych zasad i umów, a także potrzebę wzmocnienia mechanizmów egzekwowania prawa i zwiększenia zaangażowania wszystkich aktorów na poziomie globalnym [61]. W ten sposób strategie tworzą fundament dla działań środowiskowych, które powinny być realizowane także w obszarze transportu kolejowego.

2.3. Ocena oddziaływania na środowisko jako kluczowy element zapewnienia zrównoważonego rozwoju transportu kolejowego

2.3.1. Zrównoważony transport kolejowy

Zrównoważony transport odnosi się do takiego sposobu przemieszczania się, który uwzględnia praktyki i technologie mające na celu minimalizowanie negatywnego wpływu na środowisko, społeczeństwo i gospodarkę, przy jednoczesnym maksymalizowaniu efektywności oraz długoterminowej trwałości. W kontekście transportu kolejowego obejmuje

on różne aspekty operacji kolejowych, infrastruktury i polityk, które dążą do równowagi między zaspokajaniem potrzeb transportowych a zapewnieniem troski o środowisko. Kluczowe elementy zrównoważonego transportu obejmują wpływ na środowisko, efektywność energetyczną, bezpieczeństwo oraz dostępność społeczną [62–64].

W pierwszym przypadku rozwój ma na celu minimalizowanie ekologicznego śladu pojazdów szynowych i infrastruktury kolejowej. Obejmuje to redukcję emisji gazów cieplarnianych, zanieczyszczeń powietrza i hałasu poprzez działania takie jak elektryfikacja, wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, poprawa efektywności energetycznej oraz wdrażanie skutecznych praktyk zarządzania odpadami. W przyszłości priorytetem będzie zwiększenie efektywności energetycznej poprzez optymalizację projektów pociągów, systemów napędowych i infrastruktury w celu minimalizowania zużycia energii. Obejmuje to rozwój systemów hamowania regeneracyjnego, efektywne planowanie rozkładów jazdy oraz integrację z inteligentnymi sieciami energetycznymi, co pozwoli maksymalizować odzysk energii i minimalizować jej straty.

Zrównoważony transport oznacza także zapewnienie bezpieczeństwa i ochrony pasażerów, pracowników oraz infrastruktury. Obejmuje to wdrażanie środków bezpieczeństwa, nowoczesnych systemów sygnalizacyjnych, skutecznych praktyk konserwacyjnych oraz protokołów bezpieczeństwa, które minimalizują liczbę wypadków i potencjalnych zagrożeń.

Głównym celem wdrożenia idei dostępności społecznej jest zapewnienie integracyjnego i równego dostępu do transportu. Oznacza to, że transport kolejowy musi być przystępny cenowo, niezawodny i możliwy dla różnych grup społecznych. Dotyczy to w szczególności osób z niepełnosprawnościami, seniorów oraz innych grup marginalizowanych.

Wprowadzanie zrównoważonych rozwiązań często obejmuje również integrację kolei z innymi środkami transportu [65–67], ułatwiając efektywne zarządzanie przewozem osób i dóbr.

2.3.2. Rodzaje oddziaływań transportu kolejowego na środowisko naturalne

Chociaż transport kolejowy stanowi zrównoważoną alternatywę dla transportu drogowego oraz jest uważany za jeden z najbardziej przyjaznych środowisku środków transportu pod względem emisji gazów cieplarnianych i zużycia energii elektrycznej [68], opisana idea zrównoważonego transportu wydaje się pomijać inne aspekty wpływu na środowisko. Oprócz negatywnych skutków środowiskowych, szczegółowo opisanych w literaturze, takich jak hałas, emisje spalin i zużycie energii, które są i będą dalej redukowane dzięki rozwiązaniom technologicznym i odpowiednim regulacjom, wciąż nie w pełni zbadany został obszar pozostałych negatywnych zjawisk, bezpośrednio zagrażających środowisku. Konstrukcja, eksploatacja i utrzymanie elementów systemów transportu kolejowego mogą znacząco wpływać na otaczające ekosystemy, zmieniając procesy ekologiczne i dynamikę rozwoju siedlisk. Infrastruktura transportowa może degradować ekosystemy poprzez zużycie gruntów, fragmentację krajobrazu, efekt bariery behawioralnej, toksyczne emisje ze spalania paliw oraz śmiertelność dzikich zwierząt w wyniku kolizji z pojazdami kolejowymi [69–73]. Wymienione wcześniej aspekty prowadzą do utraty lub zubożenia bioróżnorodności ekosystemów, której niezbędna ochrona jest wskazana w Agendzie 2030, w ramach Celu 15 „Życie na ziemi”. Należy zatem kompleksowo analizować różne źródła negatywnych oddziaływań sieci transportu kolejowego na środowisko naturalne, aby dobierać właściwe narzędzia i metody do zapobiegania wielopłaszczyznowym szkodliwym wpływom.

Zanieczyszczenie hałasem można uznać za każdy zakłócający lub niepożądany dźwięk, który wpływa na dobrostan oraz zdrowie psychiczne, emocjonalne i fizyczne ludzi lub innych organizmów. Wśród symptomów wpływu zanieczyszczenia hałasem na organizmy można wyróżnić niezadowolenie, niepokój i irytację. Ponadto hałas może prowadzić do rozwoju takich schorzeń, jak nadciśnienie tętnicze [74], problemy ze snem [75], niepełna sprawność funkcjonalna [76], a nawet utrata słuchu [77].

Jednym ze źródeł zanieczyszczenia hałasem jest transport kolejowy. Zanieczyszczenie hałasem związane z koleją może mieć charakter zarówno fali akustycznej propagującej się w powietrzu, jak i wibracji przenoszonych na ziemię podczas przejazdu składu kolejowego [78]. Źródła hałasu w transporcie kolejowym mają złożony charakter, wynikający zarówno z trybu pracy, konstrukcji pojazdów, jak i infrastruktury kolejowej (rysunek 2.5). Do przyczyn wynikających z trybu pracy zalicza się m.in. użycie syren pociągowych w określonych sytuacjach, np. przy przejeżdżaniu przez przejazdy kolejowe. Hałas związany z konstrukcją pojazdu obejmuje dźwięki generowane przez system napędowy, hałas aerodynamiczny przy dużych prędkościach, systemy hamulcowe oraz elementy toczne, takie jak łożyska czy koła [79–81]. Szczególne znaczenie ma hałas powstający w wyniku kontaktu koła z szyną [82].

Hałas ten przyjmuje różne formy. Najbardziej typowym jest hałas toczenia, który występuje na prostych odcinkach torów. Charakteryzuje się on emisją dźwięków w szerokim zakresie częstotliwości i wynika z bezpośredniego kontaktu koła z szyną oraz zużycia tych elementów, w tym powstawania nierówności i chropowatości. Szczególnie uciążliwy jest hałas impulsowy generowany przez elementy takie jak płaskie miejsca na kołach czy przejazdy przez złącza szynowe lub rozjazdy [83]. Równie problematyczne jest przenoszenie niskoczęstotliwościowych wibracji na ziemię podczas przejazdu pojazdu kolejowego, znane jako wibracje gruntowe [84]. Wpływają one negatywnie na funkcjonowanie układu sercowo-naczyniowego, zdolność do regeneracji organizmu i odpowiednią reakcję na stres [85].



Rys. 2.5. Główne źródła hałasu generowanego przez transport szynowy

Hałas generowany przez środki transportu ma znaczący wpływ na dziką przyrodę, oddziałując negatywnie na zachowania zwierząt oraz jakość ich siedlisk, jak przedstawiono na rysunku 2.6. Badania wykazały, że hałas transportowy zakłóca naturalne procesy ekologiczne, takie jak żerowanie, wybór siedlisk oraz interakcje społeczne wśród zwierząt

[86]. Zanieczyszczenie akustyczne może ograniczać zdolność drapieżników, takich jak nietoperze, do skutecznego lokalizowania ofiar [87], a zakłócenia dźwiękowe wpływają na zachowania ssaków kopytnych oraz ich wybór miejsc żerowania [88]. Dodatkowo, hałas może zmieniać wzorce migracyjne, prowadząc do unikania siedlisk w pobliżu torów kolejowych, co może ograniczać dostęp do kluczowych zasobów [89] i wpływać na różnorodność biologiczną [90]. Ptaki leśne, szczególnie w okresie zimowym, wykazują zmiany w zachowaniach w wyniku ekspozycji na dźwięki o wysokiej intensywności, co potwierdza ich wrażliwość na zakłócenia akustyczne [91,92].



Rys. 2.6. Wybrane skutki oddziaływania hałasu i drgań generowanych przez pojazdy szynowe na dzikie zwierzęta i ekosystemy

Podobne obserwacje dotyczą różnorodności biologicznej w chronionych siedliskach, gdzie hałas z kolei szybkobieżnych ogranicza liczebność populacji ptaków i innych gatunków [93]. Wibracje gruntowe, generowane przez ruch pojazdów szynowych, mogą zakłócać funkcje biologiczne zwierząt, prowadząc do dezorientacji, unikania obszarów w pobliżu infrastruktury kolejowej oraz fragmentacji siedlisk [94]. Efekty te mają istotne konsekwencje dla populacji dzikich gatunków, szczególnie tych o ograniczonej mobilności [95]. W związku z tym hałas pochodzący z transportu stanowi jedno z głównych wyzwań w ochronie przyrody, wymagając skutecznych strategii ograniczających jego wpływ na faunę i florę [96].

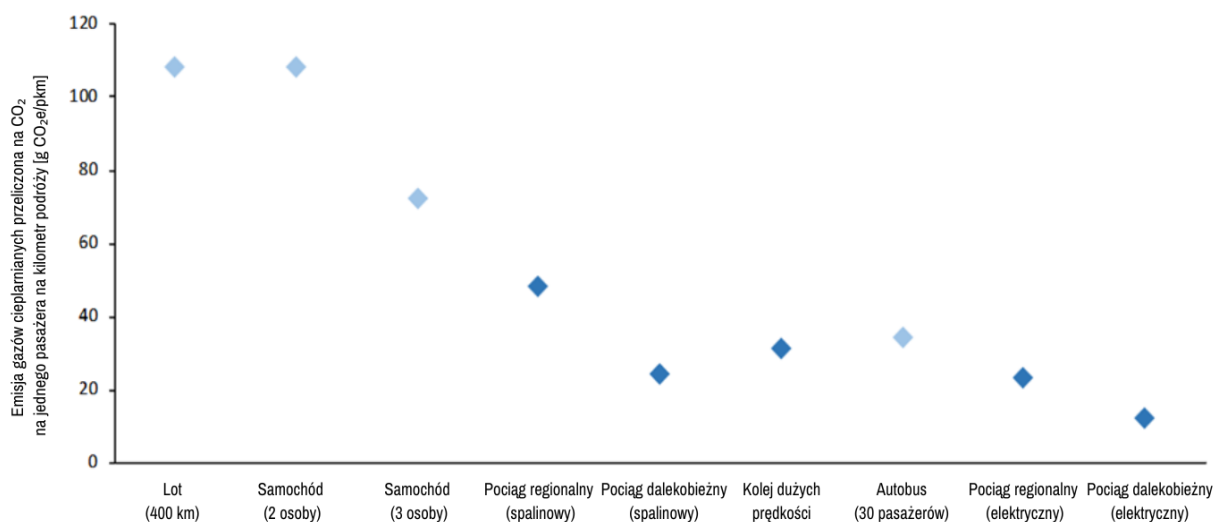
Redukcja hałasu jest kluczowym elementem zrównoważonego transportu kolejowego. Do podstawowych metod ograniczania drgań i hałasu należą rozwiązania konstrukcyjne ograniczające emisję źródła oraz elementy infrastruktury zmniejszające propagację fal akustycznych i drgań [97]. W Unii Europejskiej podejmowane działania w ramach specyfikacji technicznych interoperacyjności „Tabor kolejowy – Hałas” obejmują dwie strategie: ograniczanie hałasu u źródła oraz zapobieganie jego propagacji. Wśród metod minimalizowania oddziaływań można wymienić [82,84,98–101]:

- modernizacje technologiczne w taborze, optymalizacja geometrii kół, poprawa aerodynamiki czy zastosowanie nowoczesnego zawieszenia
- instalację barier akustycznych
- wykorzystanie nowych materiałów lub modyfikacja dynamicznych właściwości konstrukcji pojazdów
- modernizacja torów, w tym zastosowanie szyn bezстыkowych, zmniejszenie liczby rozjazdów i instalacja tłumiących podkładów

- regularne utrzymanie infrastruktury
- użycie elastycznych podkładów na podtorzu.

W kontekście ochrony przyrody, postulowane jest wdrażanie technologii redukcji hałasu oraz planowanie infrastruktury transportowej w sposób minimalizujący zakłócenia w kluczowych siedliskach.

Emisje atmosferyczne związane z transportem kolejowym są niższe niż w przypadku innych środków transportu (porównanie przedstawione na rysunku 2.7), co czyni kolej jedną z bardziej efektywnych energetycznie form transportu. Z tego względu rozwój kolei jest promowany jako rozwiązanie zrównoważone [102,103].



Rys. 2.7. Średnie emisje związane dla międzymiastowych podróży pasażerskich według środka transportu (obliczone przy założeniu emisji dwutlenku węgla na poziomie 400 g na kilowatogodzinę dla pojazdów elektrycznych) [104]

Jednak kolej nie jest całkowicie neutralna dla środowiska i generuje szkodliwe zanieczyszczenia. Emisje w transporcie kolejowym można podzielić na bezpośrednie i pośrednie. Emisje bezpośrednie związane są z użytkowaniem pojazdów szynowych, szczególnie zasilanych paliwami kopalnymi, i obejmują emisje gazów cieplarnianych, tlenków azotu oraz pyłów zawieszonych, które pochodzą z silników diesla, zużycia hamulców i ścierania torów [105,106]. Z kolei emisje pośrednie wynikają z funkcjonowania infrastruktury i produkcji taboru, obejmując emisje gazów cieplarnianych i pyłów generowane przez elektrownie, urządzenia konserwacyjne oraz procesy produkcji i utrzymania pojazdów [107,108].

Poprawa jakości powietrza w pobliżu torów kolejowych ma zasadnicze znaczenie dla ochrony zdrowia zarówno dzikiej przyrody, jak i ludzi. Emisje spalin z transportu kolejowego, w tym gazy cieplarniane, tlenki azotu oraz pyły zawieszane, mogą mieć szkodliwy wpływ na dziką przyrodę i ekosystemy, szczególnie w pobliżu torów kolejowych [109]. Zanieczyszczenia powietrza wpływają negatywnie na stan roślin i zwierząt, zakłócając procesy fotosyntezy i obniżając jakość siedlisk naturalnych. Zwłaszcza dla zwierząt żyjących w pobliżu torów emisje te mogą prowadzić do zaburzeń w oddychaniu, zmniejszenia zdolności reprodukcyjnych oraz ograniczenia dostępności pokarmu. Emisja tlenków azotu i siarki prowadzi do zakwaszenia gleby i wód gruntowych, co negatywnie wpływa na organizmy wodne i roślinność [110]. Dodatkowo, pyły zawieszane, w tym PM_{2.5} i PM₁₀,

mogą być szkodliwe dla małych zwierząt, takich jak owady czy ptaki, zmieniając ich habitaty i wpływając na ich przetrwanie [111]. Z tego powodu konieczne jest podejmowanie działań w celu ograniczenia emisji z transportu kolejowego, by zminimalizować ich wpływ na przyrodę i ekosystemy.

Aby zredukować emisje, Unia Europejska wprowadziła normy dla pojazdów w kategorii NRMM³, które obejmują limity emisji toksycznych związków i pyłów [112]. Kolejną metodą jest elektryfikacja linii kolejowych, która pozwala na eliminację pojazdów z silnikami diesla, pod warunkiem modernizacji źródeł energii, np. zastąpienia elektrowni opartych na gazach kopalnych odnawialnymi źródłami energii lub energetyką jądrową [107]. Dodatkowo, wprowadzanie pojazdów z napędem alternatywnym, takich jak jednostki zasilane wodorem, stanowi ekologiczną alternatywę [113]. Kolejnym krokiem w redukcji emisji jest poprawa efektywności energetycznej, która obejmuje stosowanie lżejszych materiałów, systemów odzyskiwania energii z hamowania oraz ulepszanie aerodynamiki pojazdów [114], a także modernizację napędów w kierunku zmniejszenia zużycia paliwa i materiałów eksploatacyjnych [115]. Ponadto, odpowiednie planowanie tras i przystanków pozwala na zarządzanie zużyciem energii, zwłaszcza dla pociągów międzymiastowych, które charakteryzują się mniejszym zużyciem energii na pasażero-kilometr w porównaniu do pociągów regionalnych [116].

Wśród bezpośrednich zagrożeń środowiskowych wynikających z nie zrównoważonego rozwoju sieci transportowych wymienia się fragmentację środowiska, prowadzącą do utraty różnorodności genetycznej, degradację siedlisk oraz zwiększoną śmiertelność zwierząt [117–119]. Liczne badania dotyczące tego zagadnienia koncentrują się głównie na drogach i autostradach [120–122] a nie na infrastrukturze kolejowej. Problem pozostaje jednak ten sam, choć stopień jego oddziaływania może się różnić [69,123]. Linie kolejowe przecinają siedliska oraz szlaki migracyjne zwierząt [71,124], które często określane są mianem korytarzy ekologicznych lub korytarzy łączności siedliskowej, wpływając tym samym na życie dzikich zwierząt na wiele sposobów. W tabeli 2.1. zostało przedstawione porównanie natężenia ruchu samochodowego i kolejowego w zakresie wpływu na swobodę przemieszczenia się zwierząt oraz sugerowanych podejść mitygacyjnych.

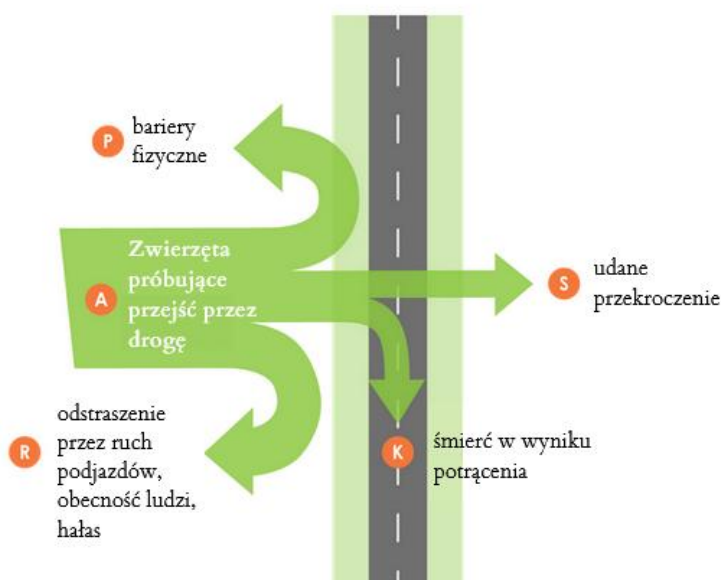
Efekt bariery behawioralnej [69,89,127], znany również jako efekt bariery lub efekt fragmentacji, odnosi się do wpływu infrastruktury transportowej, takiej jak linie kolejowe, na populację dzikich zwierząt oraz ich wzorce przemieszczania się. Linie kolejowe mogą działać zarówno jako fizyczne, jak i psychologiczne bariery, które utrudniają lub zakłócają naturalne ruchy i zachowania zwierząt, prowadząc do fragmentacji, izolacji oraz potencjalnych negatywnych konsekwencji dla łączności ekologicznej. Bariery te mogą oddziaływać na duże ssaki kopytne, ptaki, gady, małe ssaki oraz owady, takie jak trzmiele [94,119,127–130].

Na rysunku 2.8 przedstawiono symbolicznie możliwe zakończenia prób przekroczenia drogi przez zwierzę odstępianie od zamiaru migracji z powodu barier fizycznych lub psychologicznych, śmierć w wyniku potrącenia przez pojazd lub udane przejście na drugą stronę. Efekt bariery (B) definiowany jest jako różnica między prawdopodobieństwem udanego przekroczenia przeszkody (S) a prawdopodobieństwem śmierci zwierzęcia (K), jego odstraszenia (R) lub zablokowania przejścia (P).

³ NRMM (ang. *Non-Road Mobile Machinery*) – to maszyny wykorzystywane w pracach terenowych, w tym w budowie i utrzymaniu infrastruktury kolejowej, które nie poruszają się po drogach publicznych [296]

Tabela 2.1. Zależność między natężeniem ruchu drogowego i kolejowego a ryzykiem śmiertelności oraz efektem bariery dla ssaków. Potrzeby w zakresie działań mitygujących mogą różnić się w zależności od skali infrastruktury oraz od gatunku ([125], zaktualizowane na podstawie [126] z wykorzystaniem danych empirycznych ze Szwecji)

Natężenie ruchu (wartości orientacyjne)		Wpływ na swobodę przemieszczenia się zwierząt	Sugerowane podejście mitygujące
Drogi samochodowe	Linie kolejowe		
< 100 pojazdów dziennie	< 100 pociągów dziennie	Duża swoboda przemieszczania się większości dużych ssaków; jednak mniejsze gatunki mogą nadal doświadczać efektu bariery lub zwiększenie śmiertelności	W przypadku większych zwierząt działania mitygujące mogą nie być konieczne; mniejsze gatunki mogą wymagać specjalnych rozwiązań
1000 – 4000 pojazdów dziennie	100 – 200 pociągów dziennie	Zmniejszona swoboda przemieszczania się większości gatunków, zwiększenie śmiertelności	Należy skupić się na zapobieganiu kolizjom; mniejsze gatunki mogą wymagać indywidualnych rozwiązań
4000 – 10000 pojazdów dziennie	200 – 400 pociągów dziennie	Ograniczona swoboda przemieszczania się większości gatunków, wysokie ryzyko śmierci	Działania mitygujące powinny równoważyć efekt bariery i ryzyko śmiertelności
> 10000 pojazdów dziennie lub droga ogrodzona	> 400 pojazdów dziennie lub linia kolejowa ogrodzona	Brak swobody przemieszczania się i/lub bardzo wysokie ryzyko śmierci	Należy skupić się na zapewnieniu bezpiecznych przejść, całkowitym oddzieleniu ruchu zwierząt i transportu



Rys. 2.8. Główne czynniki przyczyniające się do efektu bariery infrastruktury dla dzikich zwierząt (z [125] na podstawie [134])

Koleje mogą dzielić siedliska dzikiej przyrody, prowadząc do separacji populacji oraz fragmentacji większych ekosystemów [131]. Obecność infrastruktury kolejowej może powodować powstawanie odizolowanych fragmentów siedlisk, ograniczając możliwości przemieszczania się zwierząt w obrębie ich naturalnych zasięgów. Fragmentacja ta może

negatywnie wpływać na zdolność zwierząt do odnajdywania odpowiednich zasobów, partnerów rozrodczych oraz terytoriów, co prowadzi do spadku różnorodności genetycznej i może zwiększać ryzyko lokalnego wymierania populacji. Jednym z podstawowych warunków zachowania bioróżnorodności jest zapewnienie ciągłości i przepuszczalności korytarzy ekologicznych. Fragmentacja powodowana przez infrastrukturę kolejową może ograniczać przepływ genów pomiędzy populacjami dzikich zwierząt. Ograniczone przemieszczanie się oraz zmniejszone możliwości krzyżowania mogą prowadzić do izolacji genetycznej, zwiększenia wsobności oraz spadku różnorodności genetycznej [132,133]. W dalszej perspektywie może to wpłynąć na zdolność adaptacyjną populacji zwierząt, czyniąc je bardziej podatnymi na zmiany środowiskowe, choroby oraz inne zagrożenia dla równowagi ekosystemów.

Oprócz zagrożeń genetycznych dla bioróżnorodności, linie kolejowe mogą zakłócać naturalne wzorce przemieszczania się zwierząt, która często polega na określonych korytarzach lub szlakach migracyjnych w celu zdobywania pożywienia, rozmnażania oraz dyspersji [89,95]. Zwierzęta mogą unikać przekraczania linii kolejowych z powodu hałasu, wibracji oraz postrzeganego zagrożenia związanego z przejazdem pojazdów szynowych. Takie zakłócenia mogą prowadzić do zmian w trasach migracyjnych, ograniczenia dostępu do kluczowych zasobów oraz zwiększonego wydatku energetycznego w poszukiwaniu alternatywnych tras, co podnosi poziom stresu u zwierząt. Zmiany te w użytkowaniu siedlisk, selekcji zasobów oraz dynamice społecznej mogą prowadzić do trwałych modyfikacji behawioralnych [135], które mogą wywoływać kaskadowe skutki w całym ekosystemie, w tym zmiany w relacjach drapieżnik-ofiara oraz w składzie zbiorowisk roślinnych.

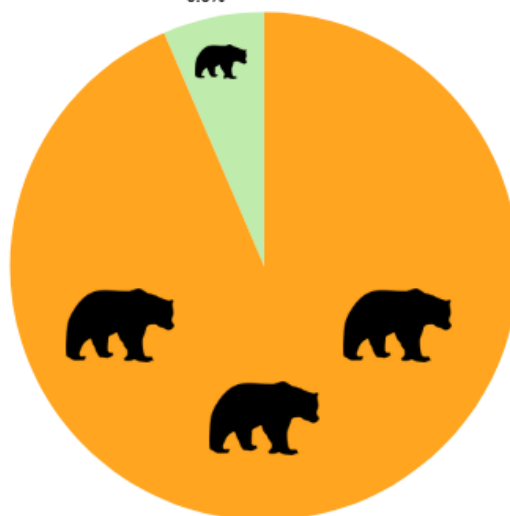
Efekt kaskadowy związany jest również ze zwiększoną śmiertelnością wynikającą z kolizji dzikich zwierząt z pociągami, co wpływa na liczebność populacji zwierząt w danym obszarze. Zwierzęta o ograniczonej mobilności lub wolniejszych reakcjach, takie jak gady, płazy oraz duże ssaki, są szczególnie narażone na kolizje z pociągami lub innymi elementami infrastruktury kolejowej. Kolizje te mogą prowadzić do poważnych obrażeń lub śmierci, co dodatkowo potęguje negatywny wpływ kolei na przetrwanie populacji fauny.

Według badań przeprowadzonych w stanie Montana w Stanach Zjednoczonych w latach 1980-2002 na 109-kilometrowym odcinku linii kolejowej między West Glacier a Browning zginęło 29 niedźwiedzi grizzly. W tym samym okresie i obszarze badań tylko 2 niedźwiedzie zginęły w wyniku potrącenia na drodze samochodowej. Procentowe przedstawienie wyników obserwacji znajduje się na rysunku 2.9. Tym samym kolizje niedźwiedzi z pojazdami szynowymi były 11-krotnie częstsze na torach kolejowych niż na równoległej drodze i stanowiły drugą najczęstszą przyczynę ich śmiertelności, zaraz po kłusownictwie [136].

Śmiertelności zwierząt w wyniku kolizji z pojazdami szynowymi zależy od wielu uwarunkowań, takich jak prędkość i konstrukcja pojazdów, brak tras ucieczki oraz obecność czynników przyciągających zwierzęta na tory, jak przedstawiono na rysunku 2.10. Przykładowo, ciepło emitowane przez szyny może przyciągać gady poszukujące ciepła, a roślinność rosnąca wzdłuż torów może stanowić źródło pokarmu dla roślinożerców. Ponadto, odpady i resztki jedzenia wyrzucane przez pasażerów mogą przyciągać drapieżniki i padlinożerców, takich jak niedźwiedzie czy dziki, a ciała zwierząt zabitych w wyniku kolizji mogą dodatkowo przyciągać padlinożerne gatunki [72].

Śmiertelność niedźwiedzi w stanie Montana (USA) w wyniku kolizji z pojazdami w latach 1980-2002

Liczba śmiertelnych kolizji na drodze samochodowej
6.5%



Liczba śmiertelnych kolizji na torach kolejowych
93.5%

Rys. 2.9. Śmiertelność niedźwiedzi na obszarze badań między West Glacier a Browning w stanie Montana (USA) [136]



Rys. 2.10. Najważniejsze czynniki wpływające na występowanie kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami

Częstotliwość kolizji dzikich zwierząt z pojazdami szynowymi zależy od charakteru krajobrazu, liczebności i koncentracji zwierząt w danym obszarze, wysokości nasypu kolejowego w stosunku do naturalnego terenu oraz sezonowych migracji zwierząt. Dodatkowo, wpływ na liczbę kolizji mają natężenie ruchu kolejowego, prędkość pojazdów, technika budowy linii kolejowej oraz odległość torów od osiedli ludzkich [137,138]. Większą częstotliwość zdarzeń występuje w godzinach nocnych, szczególnie o zmierzchu i o świcie, a także jesienią i zimą. Może to wynikać z faktu, że populacje zwierząt kopytnych wzrastają jesienią, gdy formują większe stada i migrują na zimowe żerowiska [139]. Warunki pogodowe również odgrywają istotną rolę – obecność grubej pokrywy śnieżnej (np. w krajach

skandynawskich i Kanadzie) przyczynia się do zwiększonej śmiertelności łośi w miesiącach zimowych [140]. Wysokie zasy śnieżne mogą powodować blokowanie torów przez łośie, które wykorzystują tory jako łatwiejszą trasę poruszania się w trudnych warunkach zimowych, co dodatkowo zwiększa ryzyko kolizji.

Na ogół do kolizji dochodzi na użytkach zielonych w pobliżu lasów na obszarach słabo zurbanizowanych. Ekspansja związana z turystyką, zmiany klimatyczne i polowania zmieniają wzorce zachowania zwierząt i zakłócają ich migrację, co może prowadzić do zwiększonej śmiertelności, podwyższonego poziomu stresu oraz nieprzewidywalnych reakcji, zwiększających ryzyko kolizji.

Z ekologicznego i środowiskowego punktu widzenia, najpoważniejsze konsekwencje dla ekosystemu mają kolizje śmiertelne pojazdów szynowych z rzadkimi gatunkami zwierząt, które żyją w niewielkich grupach na rozległych obszarach i charakteryzują się niską rozrodczością (np. ryś [42], niedźwiedź [136,141], słoń [142]). Śmierć jednego osobnika z danej grupy rodzinnej może zagrozić przetrwaniu całej populacji w danym siedlisku, co dodatkowo potęguje negatywne skutki dla różnorodności biologicznej. Należy podkreślić, że zdecydowana większość kolizji kolejowych z dzikimi zwierzętami kończy się ich śmiercią [143]. W Kolumbii Brytyjskiej (Kanada) rocznie ginie około 200 łośi w kolizjach z pociągami [144]. Problem dotyczy nie tylko ssaków – badania pokazują, że udział ptaków w ogólnej liczbie śmiertelnych kolizji na może być bardzo wysoki – sięga 55% w Hiszpanii i 57% w Holandii. Szczególnie narażone są sowy i ptaki drapieżne: w Hiszpanii stanowiły one odpowiednio 22,5% i 19,2% wszystkich ptaków zabitych przez pociągi, a we Francji 16% przypadków śmiertelności płomykówki wynikało ze zderzenia z pojazdem. W Holandii kolej była drugą najczęstszą przyczyną śmierci myszołowa (7,1%) i pustułki (4,6%) [73], przy czym rzeczywista skala problemu jest zapewne większa, gdyż znaczna część zdarzeń pozostaje niezauważona i nieraportowana.

Oprócz kolizji, zdarzają się również zdarzenia śmiertelne związane z porażeniem prądem, uwięzieniem w szynach i uderzeniami przewodu jezdnego sieci trakcyjnej [69]. Negatywny wpływ infrastruktury kolejowej, w szczególności słupów rurowych podtrzymujących sieć trakcyjną, zaobserwowano w postaci tworzenia pułapek na ptaki gniazdujące, co powoduje ich śmierć. W Hiszpanii na 19-kilometrowym odcinku linii kolei dużych prędkości, przy 96 niez izolowanych słupach trakcyjnych, znaleziono 162 martwe ptaki w ciągu 3,5 roku monitoringu [145]. Ponadto budowa i utrzymanie infrastruktury transportowej często wiąże się z niszczeniem lub zmianą siedlisk. Oprócz zagospodarowania terenu pod budowę linii, co wiąże się z wycinką lasu i wycinką roślinności, ważny jest również czynnik hałasu i ślady obecności człowieka, które zakłócają ekosystem. Oczyszczanie terenu pod tory, nasypy i konstrukcje wsporcze może bezpośrednio usuwać lub degradować naturalne siedliska, eliminując kluczowe zasoby i schronienie dla wielu gatunków [111,146]. Koleje mogą również wprowadzać gatunki inwazyjne poprzez transport materiałów lub tworzenie nowych siedlisk, co dodatkowo zagraża rodzimej różnorodności biologicznej [147].

Warto dodać, że kolizje ze zwierzętami wpływają bezpośrednio na bezpieczeństwo ruchu kolejowego, które stanowi integralną część koncepcji zrównoważonego rozwoju transportu. Należy zwrócić szczególną uwagę na zagrożenia dla taboru kolejowego, pasażerów oraz przewożonego ładunku wynikające z wypadków z udziałem zwierząt. Kolizje ze zwierzętami oraz ich wymierne konsekwencje są szczególnie dotkliwe dla pociągów pasażerskich [148], co wynika z ich większej prędkości oraz specyfiki konstrukcyjnej pojazdów. Jednostki

trakcyjne, zarówno elektryczne, jak i spalinowe, są bardziej podatne na uszkodzenia w wyniku zderzeń niż masywne lokomotywy prowadzące pociągi towarowe. Kolidując z dużymi zwierzętami, takimi jak jelenie, niedźwiedzie, łosie czy słonie, może powodować poważne uszkodzenia pojazdu trakcyjnego lub lokomotywy. W skrajnych przypadkach, zderzenie ze stadem zwierząt może prowadzić do wykolejenia pociągu. W Polsce odnotowano co najmniej dwa udokumentowane przypadki wykolejenia pojazdów szynowych w wyniku kolizji z dzikimi zwierzętami. W 2001 r. na odcinku Rzepin – Kunowice pociąg EuroCity „Posnania” uderzył w watahę dzików, co spowodowało uszkodzenie elementów podwozia i w konsekwencji wykolejenie lokomotywy, bez obrażeń wśród pasażerów (wykolejenie nastąpiło z powodu oberwanych części podwozia lokomotywy, tj. zgarniacza, zbiornika powietrznego, elektromagnesu SHP i rur piaskowych, które dostały się pod koła lokomotywy) [149]. Natomiast w 2023 r. na trasie Bielsk Podlaski – Czeremcha zderzenie z dzikim zwierzęciem doprowadziło do wykolejenia trzech pustych wagonów cysternowych [150]. W skali międzynarodowej jednym z najbardziej tragicznych zdarzeń była kolizja w indyjskim rezerwacie Chapramari w 2013 r., w której pociąg wjechał w stado liczące ok. 40–50 słoni, powodując śmierć siedmiu osobników (w tym dwóch młodych) i zranienie kolejnych dziesięciu [151]. Do jednego z najpoważniejszych wypadków w Europie doszło w 1984 r. w Polmont w Szkocji, gdzie pociąg pasażerski wykoleił się po zderzeniu z krową, która przedostała się na tory. W katastrofie śmierć poniosło 13 osób, a 61 zostało rannych [149].

Do elementów pojazdu najbardziej narażonych na uszkodzenia należą poszycie nadwozia, reflektory, szyby czołowe, układ zawieszenia, systemy chłodzenia oraz układy zawierające płyny eksploatacyjne [152–155]. Dodatkowo, nagłe hamowanie podjęte w celu uniknięcia kolizji może prowadzić do obrażeń pasażerów oraz uszkodzenia przewożonego ładunku, zwłaszcza jeśli jest on kruchy lub podatny na wstrząsy. Jednak w większości przypadków zdarzenia tego rodzaju skutkują przede wszystkim opóźnieniami w ruchu kolejowym oraz zakłóceniami w harmonogramach przejazdów, co generuje zarówno straty finansowe, jak i wizerunkowe dla przewoźników kolejowych [156–158]. Skala i skutki zdarzeń kolejowych z udziałem zwierząt w Polsce są szerzej opisane w Rozdziale 5.

Transport kolejowy jest istotnym źródłem zanieczyszczenia gleb metalami ciężkimi, wielopierścieniowymi węglowodorami aromatycznymi (WWA, ang. *PAHs – Polycyclic Aromatic Hydrocarbons*) i herbicydami⁴, które mogą utrzymywać się przez dziesięciolecia ze względu na niską biodegradowalność [159]. Badania [160] przeprowadzone w węzle kolejowym Łąka Główna wykazały, że stężenia metali ciężkich w glebie, w szczególności ołowiu i kadmu, były istotnie większe zarówno bezpośrednio między szynami (ang. *rail gauge*), jak i na poboczu toru (ang. *shoulder*), znacząco przewyższając wartości kontrolne. Zanieczyszczenia te wpływają negatywnie na środowisko naturalne, ponieważ są toksyczne dla roślin i organizmów glebowych, zaburzając procesy biologiczne i stanowiąc pośrednie zagrożenie dla równowagi całego ekosystemu [161]. Ponadto zmiana struktury gleby podczas budowy i eksploatacji nasypu kolejowego może prowadzić do utraty roślinności, zagęszczenia podłoża i zaburzenia drenażu wodnego, co sprzyja erozji, oraz może wpływać na procesy mineralizacji węgla i obniżenie jakości gleby [162,163].

⁴ Herbicydy – chemiczne środki ochrony roślin, stosowane w celu niszczenia lub hamowania wzrostu niepożądanego roślności, przede wszystkim chwastów [298]

Zanieczyszczenie WWA oraz metalami ciężkimi dotyczy także ekosystemów wodnych, takich jak cieki wodne przecinających lub graniczących z liniami kolejowymi. Ponadto związki chemiczne związane z eksploatacją infrastruktury kolejowej oraz wyciekami produktów naftowych ze zbiorników paliwowych, osiągają poziom stanowiący zagrożenie dla organizmów wodnych [164], podobnie jak stosowane na terenach kolejowych herbicydy mogą występować w dawkach śmiertelnych dla zwierząt wodnych, w szczególności dla populacji ryb [165].

Transport kolejowy stanowi także źródło rozprzestrzeniania inwazyjnych gatunków roślin i zwierząt poprzez przewożenie ładunków zawierających obce organizmy oraz rozbudowę i utrzymanie infrastruktury. Badania przeprowadzone w południowo-wschodniej Polsce wykazały, że linie kolejowe sprzyjają rozprzestrzenianiu się gatunków inwazyjnych do otaczających siedlisk. Wyniki analizy kanonicznej⁵ wykazała, że czynniki antropogeniczne – takie jak natężenie ruchu pociągów, odległość od torów kolejowych, odległość od zabudowań oraz gęstość zaludnienia – w połączeniu z uwarunkowaniami klimatycznymi (średnia temperatura i opady) łącznie wyjaśniają 30,9% zmienności w składzie gatunkowym roślin inwazyjnych [166]. Ponadto infrastruktura kolejowa sprzyja osiedlaniu się obcych gatunków, tworząc specyficzne siedliska o zmienionych warunkach ekologicznych [167], stanowiące zagrożenie dla rodzimych ekosystemów i ich różnorodności biologicznej [147].

W tabeli 2.2. przedstawiono podsumowanie opisanych wcześniej wybranych rodzajów negatywnego wpływu transportu kolejowego na środowisko naturalne. Dokonano porównania obszarów oddziaływania od jednostkowego (dotyczące pojedynczych osobników), przez siedliskowe (obejmujące populacje gatunków oraz warunki ich życia), aż do zakresu ekosystemowego, czyli całego dynamicznego układu wraz ze wzajemnymi powiązaniem między gatunkami ożywionymi i nieożywionymi.

Tabela 2.2. Obszary oddziaływania na środowisko wybranych aspektów transportu kolejowego

Wybrany aspekt oddziaływania transportu kolejowego na środowisko naturalne	Obszar oddziaływania
Zanieczyszczenie hałasem	Jednostki, siedliska
Emisja spalin	Ekosystemy
Bezpośrednie zagrożenia dla zwierząt	Jednostki, siedliska, ekosystemy
Zanieczyszczenie gleb	Ekosystemy
Zanieczyszczenie wód	Jednostki, siedliska, ekosystemy
Wprowadzanie gatunków inwazyjnych	Ekosystemy

Wpływ rozbudowy i eksploatacji infrastruktury kolejowej na środowisko jest wieloaspektowy i zróżnicowany pod względem skali. Niektóre oddziaływania – hałas, kolizje pojazdów ze zwierzętami, zanieczyszczenie wód, mogą dotyczyć zarówno pojedynczych

⁵ Analiza kanoniczna (ang. *Canonical Correspondence Analysis*) – wielowymiarowa metoda statystyczna stosowana w ekologii, pozwalająca ocenić zależności pomiędzy składem gatunkowym a zmiennymi środowiskowymi [297]

organizmów, jaski i całych siedlisk i ekosystemów. Natomiast inne, takie jak emisja zanieczyszczeń do atmosfery, metale ciężkie w glebie lub gatunki inwazyjne przybyłe wraz z ładunkiem towarowym, skutkują długofalowymi, powolnymi zmianami na poziomie ekosystemowym, stopniowo zaburzając naturalną równowagę. Wnioskiem z analizy jest podkreślenie złożoności konsekwencji środowiskowych transportu kolejowego, wskazanie na konieczność podejmowania działań minimalizujących negatywne oddziaływania i wdrażania idei zrównoważonego rozwoju.

2.4. Rozwój transportu a ochrona bioróżnorodności

2.4.1. Kontekst zagadnienia

Jak przedstawiono w Rozdziale 2.3.2, infrastruktura kolejowa i związana z nią eksploatacja stanowią istotne źródło presji na środowisko naturalne, prowadząc do zakłóceń w funkcjonowaniu ekosystemów oraz osłabienia kondycji populacji dzikich zwierząt. Szczególnie poważnym problemem jest fragmentacja siedlisk, uznawana za jedno z kluczowych zagrożeń dla bioróżnorodności w Europie [126], która ogranicza przemieszczanie się osobników, prowadzi do izolacji populacji i w konsekwencji do spadku różnorodności genetycznej. Skutki tych oddziaływań mają istotne konsekwencje dla przetrwania wielu gatunków oraz funkcjonowania ekosystemów, a ich minimalizacja wymaga efektywnych strategii planowania i zarządzania transportem. Skala i złożoność tych oddziaływań sprawiają, że problem ma wymiar systemowy, wykraczający poza granice poszczególnych inwestycji czy obszarów geograficznych.

W celu minimalizacji negatywnego wpływu infrastruktury transportowej konieczne jest wdrażanie środków zaradczych. Ponadto, kluczowym elementem jest uwzględnianie aspektów środowiskowych już na etapie planowania inwestycji poprzez stosowanie ocen oddziaływania na środowisko (SEA, EIA) oraz prowadzenie długoterminowego monitoringu skuteczności wdrożonych rozwiązań. Niezbędna jest interdyscyplinarna perspektywa i współpraca specjalistów z zakresu inżynierii, transportu oraz ekologii. W odpowiedzi na te wyzwania opracowano międzynarodowe programy, projekty i narzędzia mające na celu ochronę bioróżnorodności, minimalizację negatywnego wpływu transportu na środowisko naturalne, wymianę doświadczeń oraz podnoszenie świadomości środowiskowej. Wybrane przykłady tych rozwiązań zostały omówione w kolejnych podrozdziałach.

2.4.2. Programy, projekty i narzędzia wspierające ochronę bioróżnorodności w obszarze transportu

W obliczu rosnących zagrożeń dla bioróżnorodności wynikających z rozwoju infrastruktury transportowej, powstało wiele inicjatyw mających na celu minimalizację negatywnych skutków dla środowiska. Projekty realizowane na poziomie europejskim i globalnym koncentrują się na opracowywaniu strategii ochrony siedlisk, redukcji fragmentacji ekosystemów oraz zwiększeniu świadomości ekologicznej w sektorze transportowym.

Jednym z kluczowych przedsięwzięć była europejska inicjatywa COST Action 341 (ang. *European Cooperation in Science and Technology*), realizowana w latach 1998–2003, która koncentrowała się na problemie wpływu infrastruktury transportowej na bioróżnorodność i ekosystemy. Głównym celem tego projektu było opracowanie pierwszych europejskich

wytycznych dotyczących ochrony dzikiej przyrody w kontekście transportu. W szczególności COST Action 341 zajmował się:

- fragmentacją siedlisk – badaniem, jak infrastruktura transportowa wpływa na ekosystemy i populacje zwierząt
- barierami ekologicznymi – analizą, jak drogi i linie kolejowe utrudniają migrację zwierząt i zakłócają szlaki ekologiczne
- zieloną infrastrukturą – opracowaniem rozwiązań, takich jak przejścia dla zwierząt, „ekodukty” i zielone mosty, które umożliwiają zachowanie łączności między siedliskami
- zrównoważonym transportem – wypracowaniem strategii minimalizujących wpływ nowych inwestycji transportowych na środowisko

Najważniejszym rezultatem COST Action 341 było opublikowanie w 2003 roku pierwszych europejskich wytycznych pt. "Wildlife and Traffic: A European Handbook for Identifying Conflicts and Designing Solutions" [126]. Był to przełomowy dokument zawierający rekomendacje dotyczące projektowania infrastruktury transportowej w sposób przyjazny dla przyrody. Chociaż główny nacisk położono na transport drogowy, to autorzy podkreślają, że linie kolejowe również mogą mieć istotny wpływ na środowisko, zwłaszcza w regionach o dużej bioróżnorodności oraz tam, gdzie sieć kolejowa przecina naturalne szlaki migracyjne zwierząt. Tym samym analiza wraz z wytycznymi przyjmuje charakter uniwersalny.

Wśród negatywnych skutków infrastruktury transportowej w zakresie bioróżnorodności dokument wymienia efekty pierwotne (utrata siedlisk, bariery dla zwierząt, zwiększona śmiertelność zwierząt w wyniku kolizji) oraz wtórne (zmiany w strukturze krajobrazu, zanieczyszczenie hałasem, światłem i chemikaliami, zaburzenia ekosystemów wodnych). Środki zaradcze i sposoby ograniczania wpływu obejmują przemyślane projektowanie tras, zmniejszenie efektu bariery poprzez budowę mostów ekologicznych, zarządzanie krajobrazem przy infrastrukturze oraz redukcję śmiertelności zwierząt poprzez systemy ostrzegawcze i odstrasżające. Oceny oddziaływania na środowisko (SEA, EIA) powinny być integralną częścią planowania, wraz z analizą wielkoskalową, identyfikującą kluczowe obszary ochrony, oraz współpracą międzysektorową i konsultacjami społecznymi.

Wytyczne te stały się podstawą do dalszych działań w zakresie integracji ochrony bioróżnorodności z planowaniem transportowym i są nadal wykorzystywane w różnych europejskich inicjatywach, takich jak projekt BISON (ang. *Biodiversity and Infrastructure Synergies and Opportunities for European Transport Networks*) finansowany z programu Horizon 2020.

Projekt BISON, realizowany w latach 2021–2023, miał na celu lepszą integrację kwestii bioróżnorodności z planowaniem, budową, eksploatacją i likwidacją europejskich sieci transportowych. W konsorcjum projektu przedstawicielem Polski jest Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad. Działania w ramach projektu wsparły identyfikację przyszłych potrzeb badawczych i innowacyjnych w zakresie lepszej integracji bioróżnorodności z infrastrukturą transportową oraz opracowanie trwałych i odpornych metody budowy, utrzymania oraz inspekcji, które mogą być stosowane w różnych gałęziach transportu w celu zmniejszenia presji na bioróżnorodność [168]. W ramach projektu opracowano Strategiczną Agendę Badawczą i Wdrożeniową (ang. *Strategic Research and Deployment Agenda, SRDA*), która syntetyzuje istniejącą wiedzę, identyfikuje luki i możliwości w polityce oraz

finansowaniu, a także proponuje ścieżki badawcze mające na celu sprostanie wyzwaniom środowiskowym [169]. Dodatkowo, przygotowano podręcznik zatytułowany "Biodiversity and Infrastructure: A Handbook for Action", mający na celu zachęcenie sektorów transportu i ekologii do współpracy na rzecz zrównoważonego rozwoju infrastruktury [125]. W kontekście transportu kolejowego, BISON dąży do opracowania trwałych i odpornych metod budowy, utrzymania oraz inspekcji linii kolejowych, które minimalizują negatywny wpływ na ekosystemy. Projekt promuje wymianę wiedzy i najlepszych praktyk między państwami członkowskimi UE, co ma na celu wspieranie działań na rzecz ochrony bioróżnorodności w sektorze kolejowym [170].

Instrumentem polityki spójność Unii Europejskiej, wspierającym współpracę transgraniczną, transnarodową i międzyregionalną jest program Interreg. Jego celem jest zmniejszanie różnic rozwojowych oraz integracja terytorialna poprzez projekty związane z ochroną środowiska, infrastrukturą i zrównoważonym transportem, w tym kolejowym. Interreg umożliwia dofinansowanie inicjatyw mających na celu minimalizację negatywnego wpływu infrastruktury kolejowej na ekosystemy, takie jak budowa korytarzy ekologicznych, przejść dla zwierząt, ochrona obszarów Natura 2000 oraz rozwój zielonej infrastruktury wzdłuż szlaków kolejowych [171].

Interreg wspiera także badania nad wpływem kolei na środowisko, umożliwiając opracowanie nowoczesnych metod planowania i modernizacji linii kolejowych, które zmniejszają fragmentację siedlisk i poprawiają integrację aspektów ekologicznych w transporcie. Program pozwala na wymianę wiedzy i doświadczeń między krajami, co sprzyja wdrażaniu innowacyjnych rozwiązań, takich jak zielone nasypy kolejowe czy technologie redukujące emisję i hałas generowany przez pojazdy szynowe.

Program „Łącząc Europę” (CEF) to kluczowy unijny instrument finansowy wspierający rozwój infrastruktury kolejowej w sposób zrównoważony ekologicznie. Jego głównym celem jest nie tylko modernizacja i poprawa efektywności transportu kolejowego, ale także minimalizacja jego negatywnego wpływu na środowisko i bioróżnorodność [172]. W ramach CEF realizowane są projekty, które uwzględniają ochronę siedlisk naturalnych i migracji zwierząt. Przykładem jest modernizacja linii E75 Rail Baltica (Białystok – Osowiec) oraz Skierniewice – Łuków, gdzie uwzględniono rozwiązania minimalizujące fragmentację ekosystemów. Program wspiera budowę korytarzy ekologicznych i przejść dla zwierząt, co pozwala na utrzymanie łączności między siedliskami i redukcję kolizji ze zwierzętami [173]. Dodatkowo, projekty finansowane przez CEF promują zieloną infrastrukturę, obejmującą ekologiczne nasypy kolejowe, zalesienia oraz technologie ograniczające hałas i emisję spalin, co pozytywnie wpływa na ochronę ekosystemów przy trasach kolejowych. Dzięki tym działaniom program przyczynia się do zrównoważonego rozwoju transportu kolejowego, który nie tylko poprawia mobilność, ale także wspiera ochronę bioróżnorodności w Europie.

Propozycję podsumowania działań mających na celu minimalizację negatywnych aspektów transportu kolejowego przedstawiła Międzynarodowa Unia Kolei (fr. *Union Internationale des Chemins de fer*; UIC). Projekt rEvERsE (Ecological Effects of Railways on Wildlife) ma na celu poprawę zrozumienia wpływu kolei na bioróżnorodność oraz identyfikację sposobów na jego ograniczenie.

UIC, we współpracy ze swoimi członkami, przygotował Plan Działań na rzecz Bioróżnorodności (Biodiversity Action Plan) oraz globalne wytyczne dla operatorów kolejowych i zarządców infrastruktury kolejowej, mające na celu wzmocnienie wysiłków na

rzecz ochrony, wspierania i poprawy stanu dziedzictwa przyrodniczego [174]. Główne cele projektu obejmują łagodzenie fragmentacji siedlisk oraz zwiększenie ochrony bioróżnorodności w systemach kolejowych poprzez wymianę wiedzy i doświadczeń, ocenę wpływu kolei na przetrwanie dzikich zwierząt w Europie oraz opracowanie strategii ograniczania tych zagrożeń.

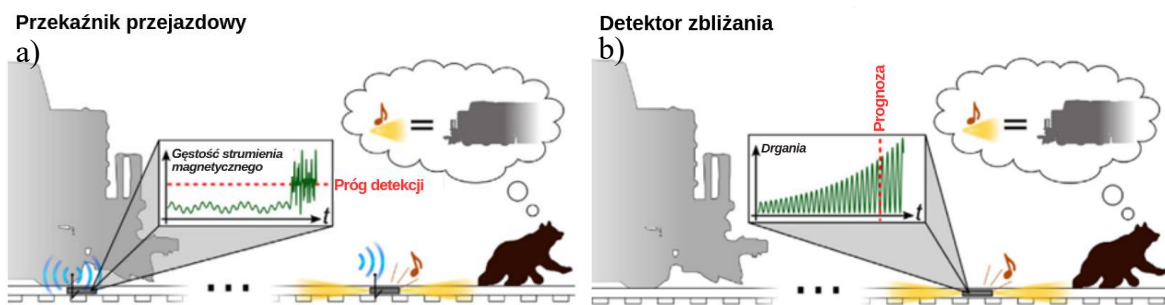
W ramach inicjatywy przygotowywane są studia przypadków, analizujące rozwiązania stosowane przez wybranych przewoźników oraz zarządców infrastruktury kolejowej, aby umożliwić wzajemne inspirowanie się oraz wymianę wiedzy i doświadczeń w zakresie realizacji zadań związanych ze zrównoważonym rozwojem. Dokumenty opracowane w ramach projektu rEvERsE dotyczą strategii kolejowych w kontekście ochrony bioróżnorodności [175] oraz wytycznych dotyczących zarządzania infrastrukturą kolejową [176]. Można uznać je za kamień milowy w procesie globalnej poprawy stanu środowiska w kontekście transportu kolejowego.

2.4.3. Metody minimalizacji negatywnego wpływu kolei na ekosystemy

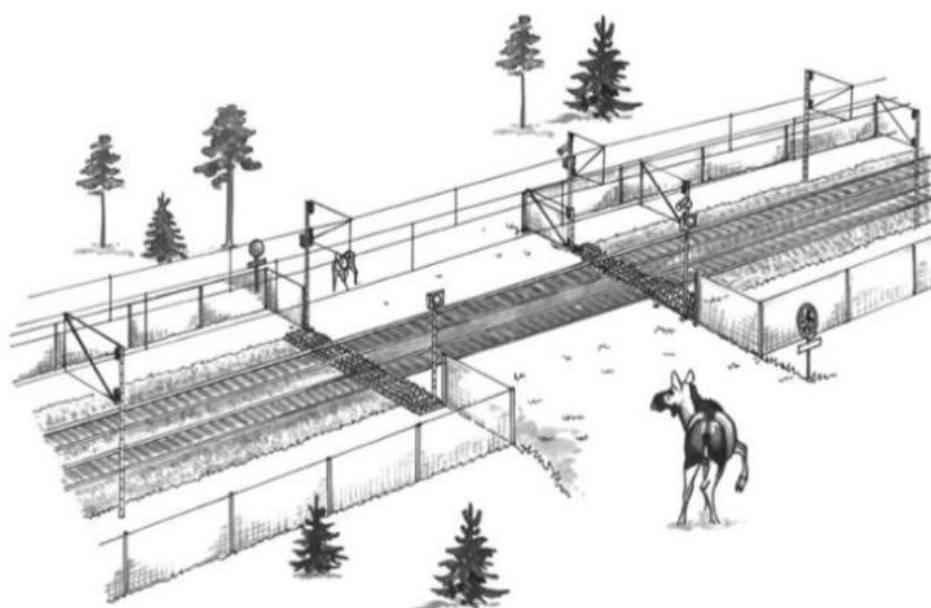
Wśród podejść do ograniczania oddziaływania transportu kolejowego na środowisko najważniejszym jest zapobieganie przecinaniu wartościowych przyrodniczo i wrażliwych na czynniki zewnętrzne siedlisk zwierząt poprzez odpowiedzialne planowanie tras (dzięki takim narzędziom jak SEA i EIA). Choć strategie środowiskowe ustanawiają ramy rozwoju infrastruktury kolejowej, to niejednokrotnie nie ma możliwości efektywnego ominięcia pewnych obszarów lub skutki oddziaływania są właściwie rozpoznane na już eksploatowanych trasach. Wtedy należy wdrożyć środki minimalizujące szkody dla środowiska.

Przeciwdziałanie zwiększonej śmiertelności zwierząt w wyniku kolizji z pociągami wymaga kompleksowego podejścia, które obejmuje identyfikację obszarów wysokiego ryzyka, wdrażanie środków łagodzących dla dzikich zwierząt, nakładanie ograniczeń prędkości i systemów ostrzegawczych oraz zapewnianie świadomości społecznej i edukacji [177]. Przeprowadzanie badań i analizowanie danych dotyczących kolizji w celu zidentyfikowania miejsc, w których śmiertelność dzikich zwierząt jest bardziej powszechna, pomaga w ustaleniu priorytetów działań łagodzących, takich jak budowa przejść dla dzikich zwierząt [72], instalowanie ogrodzeń wzdłuż torów lub wdrażanie strategii zarządzania roślinnością w celu zmniejszenia atrakcyjności dla dzikich zwierząt [95], co może pomóc zminimalizować ryzyko kolizji. Dodatkowe egzekwowanie ograniczeń prędkości na obszarach wrażliwych oraz wdrażanie skutecznych systemów ostrzegawczych, takich jak urządzenia emitujące sygnały dźwiękowe [178] lub systemy z wykorzystaniem analizy drgań do wczesnego wykrywania obecności [179] zwierząt w pobliżu torów kolejowych, może zapewnić dodatkowe środki bezpieczeństwa zarówno dla zwierząt, jak i operatorów pociągów. Drugim aspektem zagadnienia jest zapobieganie fragmentacji siedlisk i zapewnieniu łączności korytarzy ekologicznych poprzez budowanie wiaduktów nad torami, przepustów w nasypie pod torami lub przejść pod szynami dla małych zwierząt [180].

Wśród wielu różnych podejść warto wymienić innowacyjne metody informowania o zbliżającym się pociągu w strefie potencjalnej kolizji z dzikimi zwierzętami w oparciu o drgania szyn badane w Kanadzie [181] (rysunek 2.11) oraz projekty przejść dla zwierząt badane w Szwecji [182] (rysunek 2.12) lub Japonii [183].



Rys. 2.11. System ostrzegania przed dzikimi zwierzętami aktywowany przez pociągi został przetestowany na trasach kolejowych w Parku Narodowym Banff (Alberta, Kanada) oraz Parku Narodowym Yoho (Kolumbia Brytyjska, Kanada) [181]: a) przełącznik przejazdowy przesyła sygnał do zdalnego urządzenia ostrzegawczego za pomocą czujników wykrywającego nadjeżdżających pociąg b) detektor zbliżania się łączy sygnały ostrzegawcze oraz wibracje generowane przez pojazd, umożliwiając identyfikację zbliżającego się pociąg na odległość



Rys. 2.12. Schemat eksperymentalnego przejścia dla zwierząt na poziomie torów, łączącego metody infrastrukturalne metody i akustyczne systemy odstraszenia zwierząt uruchamiane sygnałem zbliżającego się pociągu, badanego w Szwecji [182]

Szczegółowa klasyfikacja dostępnych rozwiązań mitygujących wpływ kolei na dzikie zwierzęta, wraz z wskazaniem warunków zalet i ograniczeń stosowania oraz wyników ewaluacji skuteczności, została przedstawiona w Rozdziale 6.

Pomimo stosowania różnych rozwiązań technicznych efektu bariery behawioralnej, fragmentacji siedlisk lub zwiększonej śmiertelności zwierząt w wyniku kolizji nie można całkowicie ograniczyć [126]. Poprzez usystematyzowanie stosowania środków mitygujących, w tym ich rozważny wybór, wdrożenie i ewaluacja skuteczności, oraz przyjęcie praktyk przyjaznych dla środowiska jest możliwa ochrona populacji dzikich zwierząt przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa i niezawodności ruchu kolejowego oraz urzeczywistnienie harmonijnego współistnienia infrastruktury transportowej i ochrony różnorodności biologicznej. Niezbędne stają się narzędzia, które ułatwią procesy decyzyjne i dynamiczne reagowanie na potrzeby środowiska.

3. Cel i teza pracy

3.1. Zasadność podjęcia tematu

Pomimo licznych inicjatyw, które wspierają ochronę bioróżnorodności w ramach rozwoju infrastruktury transportowej, nadal istnieje luka badawcza w zakresie zarządzania oddziaływaniem sieci transportowych na środowisko, w szczególności wdrażania metod minimalizacji bezpośredniego, negatywnego wpływu na ekosystemy. Transport kolejowy, choć nazywany jest najbardziej przyjaznym środowisku środkiem przemieszczania ludzi i towarów, głównie z racji nowoczesnych technologii i regulacji prawnych dotyczących redukcji emisji gazów cieplarnianych oraz hałasu, wiąże się z poważnymi konsekwencjami dla otaczających infrastrukturę ekosystemów. Budowa, modernizacja i użytkowanie linii kolejowych prowadzi do fragmentacji siedlisk, zmiany wzorców migracyjnych zwierząt oraz ich zwiększonej śmiertelności w wyniku kolizji z pojazdami, co jest szczególnie istotnym problemem na obszarach o dużej bioróżnorodności. Projekty takie jak COST Action 341, BISON i rEvERsE pozwoliły na opracowanie rekomendacji w zakresie ograniczania wpływu na środowisko, jednak brakuje praktycznych narzędzi i modeli umożliwiających diagnozowanie niepożądanych z perspektywy przyrodniczej zjawisk oraz wdrażanie środków mitygacyjnych w sposób dostosowany do warunków i specyfiki infrastruktury kolejowej. Konieczne stało się opracowanie systemowego rozwiązania, które uwzględni specyfikę różnych regionów, charakterystykę ruchu kolejowego oraz unikalne potrzeby ekosystemów narażonych na szkody w wyniku rozwoju transportu szynowego.

Jednym z największych wyzwań jest brak holistycznego, a jednocześnie elastycznego spojrzenia na zarządzanie wpływem kolei na środowisko, które uwzględniałoby zarówno aspekty planowania przestrzennego, analizę danych, jak i operacyjne rozwiązania mitygacyjne. Obecne stosowane metody oceny oddziaływania na środowisko (EIA, SEA) są często ograniczone do analizy przedinwestycyjnej, co utrudnia skuteczne dostosowywanie strategii ochrony do zmieniających się warunków. Ponadto, choć istnieją różne technologie i metody minimalizujące negatywnego wpływu kolei – takie jak wiadukty ekologiczne, czy systemy odstraszenia zwierząt w momencie nadjeżdżającego pojazdu – nie określono kompleksowej metody działań wspierających podejmowanie decyzji, który integrowałby rozwiązania w sposób dostosowany do lokalnych warunków ekologicznych. Opracowanie adaptacyjnej, wieloaspektowej ramy analityczno-decyzyjnej do wdrażania środków mitygacyjnych i oceny ich skuteczności umożliwi uporządkowanie i podniesienie efektywności działań proekologicznych w ramach strategii zrównoważonego rozwoju. Takie rozwiązanie łączy analizę czynników, katalog nowoczesnych narzędzi oraz zbiór rekomendacji, z założeniem iteratywnej ewaluacji skuteczności wdrożonych środków, i pozwala na bieżące i dynamiczne dostosowywanie strategii ochrony bioróżnorodności do zmieniających się warunków środowiskowych i operacyjnych w całym cyklu życia infrastruktury kolejowej. Stosowanie takiego podejścia może przyczynić się do skuteczniejszego ograniczania fragmentacji siedlisk, redukcji śmiertelności zwierząt i lepszej integracji aspektów środowiskowych z procesami planistycznymi i operacyjnymi. Ponadto adaptacyjna rama może stanowić podstawę do opracowania zintegrowanego narzędzia informatycznego (np. w formie aplikacji lub arkusza analitycznego), które wspierałoby proces decyzyjny w sposób ustrukturyzowany i łatwy do dostosowania przez różne instytucje zaangażowane w działanie.

3.2. Teza pracy

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następującą tezę:

Opracowanie adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do planowania i wdrażania działań łagodzących negatywny wpływ transportu kolejowego na dzikie zwierzęta – uwzględniającej aspekty przestrzenne, przyrodnicze i operacyjne – stanowi rozwiązanie wspierające proces decyzyjny na rzecz ochrony bioróżnorodności i ograniczania kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami.

Teza zostanie przyjęta, jeżeli:

- wykaże się logiczny związek między proponowanym rozwiązaniem systemowym, a możliwością skuteczniejszego ograniczania negatywnego wpływu transportu kolejowego na dzikie zwierzęta i ekosystemy
- studium przypadku, przeprowadzone z zastosowaniem opracowanej ramy, uwzględniające rzeczywiste uwarunkowania przestrzenne, przyrodnicze i operacyjne, doprowadziło do realnych i spójnych wniosków, stanowiących praktyczne uzupełnienie dotychczasowych strategii ochrony środowiska w kontekście transportu kolejowego
- adaptacyjna rama uwzględnia aktualny stan wiedzy, dostępne rozwiązania technologiczne, obowiązujące przepisy prawne oraz cele strategiczne związane z ochroną środowiska w sektorze kolejowym
- zaproponowany proces analityczno-decyzyjny może być zastosowany w praktyce planowania inwestycji i modernizacji infrastruktury kolejowej.

3.3. Cele pracy

Celem naukowym pracy jest przedstawienie aspektów zrównoważonego rozwoju w kontekście transportu kolejowego poprzez dokonanie przeglądu i oceny dostępnych metod mitygujących wpływ infrastruktury kolejowej na bioróżnorodność siedlisk naturalnych, analizę danych statystycznych dotyczących lokalizacji, jak i przyczyn i skutków kolizji pojazdów z dzikimi zwierzętami w Polsce, oraz propozycję podejścia do wdrażania odpowiednich rozwiązań w reakcji na bieżąco diagnozowane sytuacje negatywnego oddziaływania kolei na ekosystemy, która umożliwi dostosowanie strategii ochronnych do warunków środowiskowych i operacyjnych. Dodatkowym elementem celu poznawczego jest identyfikacja praktycznych barier i możliwości wdrożeniowych w oparciu o doświadczenia eksperckie, które posłużyły do sformułowania uzupełniających rekomendacji i przedstawienia możliwie szerokiej, interdyscyplinarnej i wieloaspektowej perspektywy.

Celem utylitarnym pracy jest opracowanie adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej wspierającej podejmowanie decyzji w zakresie planowania, modernizacji i eksploatacji infrastruktury kolejowej w sposób minimalizujący jej oddziaływanie na stan bioróżnorodności siedlisk w otoczeniu sieci transportowej. Proponowane rozwiązanie systemowe ma umożliwić wdrażanie skuteczniejszych środków mitygujących wpływ transportu na dzikie zwierzęta, takich jak przejścia, system ostrzegawcze i odstrasżające, czy zrównoważone zarządzanie terenami kolejowymi, przy jednoczesnym zachowaniu efektywności i stabilności transportu. Rama docelowo może służyć jako narzędzie informatyczne wspomagające administrację zarządzającą rozwojem transportu kolejowego

oraz instytucje branżowe i środowiskowe w podejmowaniu optymalnych decyzji dotyczących ochrony ekosystemów.

3.4. Zakres pracy

Dysertacja obejmuje wieloaspektową analizę wpływu transportu kolejowego na bioróżnorodność ekosystemów, ze szczególnym uwzględnieniem kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami, oraz opracowanie propozycji adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do doraźnego wdrażania środków mitygacyjnych, która docelowo może stać się narzędziem wspomagania decyzji środowiskowych.

Praca składa się z trzech głównych filarów i uzupełnienia w postaci studium przypadków oraz wywiadów eksperckich. Pierwszym etapem jest przedstawienie wyników analizy danych dotyczących kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami, otrzymanych od państwowego zarządcy infrastruktury kolejowej oraz regionalnych przewoźników kolejowych, prowadzących statystyki potrażeń zwierzyny. W rezultacie zidentyfikowano linie kolejowych o największym natężeniu zdarzeń oraz gatunków zwierząt najczęściej uczestniczących w kolizjach, rozkład czasowy (miesięczny i dobowy) oraz skutki zdarzeń dla środowiska i przewoźników. Wyniki uzyskane statystycznie uzupełniono interpretacjami środowiskowymi i transportowymi. Łącznie pozwoliło to na ocenę skali problemu w kontekście eksploatacji linii kolejowych oraz wstępnie określenie czynników i warunków wpływających na te zjawisko.

Dokonano przeglądu literatury naukowej i branżowej dotyczącej aspektów środowiskowych rozwoju transportu kolejowego, ze szczególnym uwzględnieniem metod minimalizacji jego negatywnego wpływu na ekosystemy. W rezultacie opracowano klasyfikację dostępnych rozwiązań mitygacyjnych, warunki wdrażania tych metod w różnych kontekstach środowiskowych i infrastrukturalnych oraz wskazano możliwości ewaluacji ich efektywności. Opracowanie przyjęło formę praktycznego katalogu narzędzi i technologii, który może wspierać proces decyzyjny w zakresie doboru sposobów redukcji skutków fragmentacji siedlisk i ograniczania śmiertelności dzikich zwierząt.

Kluczowym elementem pracy, wykorzystującej rezultaty analizy danych i katalogu dostępnych metod mitygacyjnych, jest propozycja autorskiej adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do wdrażania rozwiązań łagodzących wpływ transportu na dziką przyrodę, które integruje diagnozowanie negatywnych oddziaływań kolei na bioróżnorodność z doбором adekwatnych rozwiązań. Rama obejmuje identyfikację krytycznych obszarów i linii kolejowych, analizę czynników i możliwości zarządzania nimi, ocenę dostępnych narzędzi oraz sposoby ewaluacji skuteczności wdrożonych działań. Rama, uprzednio sformalizowana, może stanowić uzupełnienie dla przedinwestycyjnych procedur oceny oddziaływania na środowisko, a także funkcjonować jako niezależne narzędzie wspierające podejmowanie decyzji w odpowiedzi na bieżące potrzeby ekologiczne.

Zastosowanie opracowanej ramy zostało przedstawione w studium przypadku dwóch odcinków linii kolejowych, wybranych na podstawie wyników analizy statystycznej oraz specyfiki ich otoczenia przyrodniczego, co stanowi zarazem uzupełnienie rozważań i analiz w postaci praktycznego przykładu wykorzystania rozwiązania, jak i podsumowanie zagadnienia. W ramach badań terenowych przeprowadzono identyfikację czynników wpływających na kolizje pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami w wybranych lokalizacjach oraz ocenę możliwości wdrożenia skutecznych środków zaradczych. Na tej

podstawie zaproponowano konkretne rekomendacje mające na celu minimalizację liczby zdarzeń i poprawę łączności siedlisk poprzez lepszą integrację infrastruktury kolejowej z otaczającymi ekosystemami. Efektem studium jest zbiór wytycznych dla określonych stron zainteresowanych i podkreślenie konieczności zastosowania holistycznego podejścia do ochrony bioróżnorodności w duchu zrównoważonego rozwoju transportu kolejowego.

W celu poszerzenia perspektywy oraz lepszego zrozumienia realnych uwarunkowań wdrażania rozwiązań ekologicznych w sektorze kolejowym, przeprowadzono również wywiady eksperckie z przedstawicielami instytucji i przedsiębiorstw związanych z infrastrukturą kolejową, eksploatacją pojazdów oraz producentem dostępnej technologii ochrony zwierząt. Opinie ekspertów, stanowiące uzupełnienie analiz ilościowych i przeglądu literatury, pozwoliły na uwzględnienie praktycznego kontekstu funkcjonowania systemu transportu kolejowego, identyfikację barier organizacyjnych i systemowych, a także ocenę szans na wdrożenie rekomendowanych rozwiązań jak i samego rozwiązania systemowego w postaci adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej. Część komentarzy została włączona w treść rozdziałów poświęconych analizie zjawiska kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami oraz klasyfikacji i ocenie metod mitygowania natomiast wskazane możliwości, jak i obszary do doskonalenia, zostały zaprezentowane w osobnym panelu eksperckim.

Praca stanowi zarówno naukową podstawę dla skuteczniejszego zarządzania wpływem kolei na środowisko, jak i praktycznych narzędzi wspierających decyzje w zakresie planowania i eksploatacji infrastruktury transportowej w sposób zrównoważony i przyjazny dla ekosystemów.

4. Metodyka badań

Niniejsza praca doktorska opiera się na interdyscyplinarnym podejściu badawczym, łączącym metody analizy ilościowej i jakościowej w celu oceny wpływu transportu kolejowego na bioróżnorodność i opracowania procesu analityczno-decyzyjnego wdrażania środków mitygacyjnych.

Do analizy statystycznej danych dotyczących kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami wykorzystano środowisko programowania Python i program Microsoft Excel w celu eksploracji danych i wyznaczeniu odcinków linii kolejowych o największym natężeniu zdarzeń. Określenie ich charakterystyki środowiskowej było możliwe dzięki analizie topograficznej z użyciem Mapy Interaktywnej Linii Kolejowych [184], Mapy korytarzy ekologicznych w Polsce [59] oraz Mapy Google.

Systematyczny przegląd literatury naukowej i branżowej [185] pozwolił na określenie luki badawczej oraz dokonanie klasyfikacji rozwiązań redukujących liczbę kolizji oraz efekty fragmentacji siedlisk, umożliwiając szczegółową analizę dostępnych środków, zalet i wad ich stosowania oraz efektywność w różnych warunkach. W rezultacie opracowano katalog dostępnych rozwiązań, który stanowi praktyczne wsparcie w procesie wyboru odpowiednich środków mitygacyjnych.

Na podstawie zgromadzonych danych i informacji opracowano autorską adaptacyjną ramę analityczno-decyzyjną do wdrażania rozwiązań łagodzących wpływ transportu na dzikie zwierzęta. Koncepcja i rozwój ramy opierały się na efektach systematycznego przeglądu literatury, analizie luk badawczych [186] oraz krytycznej ocenie istniejących rozwiązań z wykorzystaniem dedukcji w celu rozwiązania problemu rozwojowego [187]. Możliwość i skuteczność jej zastosowania oceniono w studium przypadku, w którym przeprowadzono badania terenowe oparte na obserwacji własnej.

Istotnym uzupełnieniem przyjętej metodyki badawczej były również jakościowe wywiady eksperckie [188], szczególnie efektywne w przypadku badań interdyscyplinarnych, gdzie dane ilościowe są niewystarczające do pełnego zrozumienia złożonych zjawisk [189], przeprowadzone z przedstawicielami instytucji zaangażowanych w tematykę minimalizowania wpływu transportu kolejowego na dzikie zwierzęta. Wśród rozmówców znaleźli się eksperci reprezentujący zarówno sektor naukowy i przemysłowy, jak i instytucje badawcze oraz praktykę kolejową – w tym specjalista w zakresie inżynierii środowiska i przejść dla zwierząt, przedstawiciele regionalnych przewoźników kolejowych, dyrektor instytutu badawczego oraz pomysłodawca urządzeń odstrasżających zwierzęta z torów kolejowych. Wywiady miały charakter pogłębiony i półstrukturyzowany [190], pozostawiający swobodę eksploracji wątków rozmowy oraz uzyskanie opinii i interpretacji badanego zjawiska. Głównym celem było zidentyfikowanie barier oraz możliwości skutecznego ograniczania oddziaływania kolei na ekosystemy, w tym w szczególności zmniejszenia liczby kolizji z dzikimi zwierzętami, z różnych perspektyw zawodowych i instytucjonalnych. Pozyskany materiał pozwolił na uwzględnienie praktycznych doświadczeń oraz pogłębioną interpretację wyników analiz ilościowych i literaturowych, a także wskazanie rekomendacji środowiskowych.

5. Kolizje pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami w Polsce

Kolizje pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami stanowią jedno z kluczowych zagrożeń dla bioróżnorodności w kontekście transportu kolejowego, przyczyniając się do fragmentacji siedlisk, śmiertelności z oraz zakłócenia szlaków migracyjnych. Mimo rosnącej świadomości ekologicznej i niektórych prób metod minimalizujących negatywne efekty, problem wciąż nie został kompleksowo rozwiązany, a jego skala i charakterystyka wymagają pogłębionej analizy. W celu oceny rzeczywistej relacji transportu kolejowego i dzikiej przyrody, przygotowano analizę statystyczną danych dotyczących zdarzeń kolejowych z udziałem zwierząt w Polsce. Analiza opiera się na danych udostępnionych przez ogólnopolskiego zarządcę infrastruktury PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. oraz następujących regionalnych przewoźników kolejowych:

- Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o.
- Kolei Dolnośląski Sp. z o.o.
- Kolei Małopolskich Sp. z o.o.
- Arriva RP Sp. z o.o.
- Kolei Śląskich Sp. z o.o.

W podrozdziale dotyczącym zarządcy infrastruktury skupiono się na ogólnej problematyce kolizji ze zwierzętami – częstotliwości, identyfikacji linii kolejowych o największej liczbie kolizji, rozkładzie czasowym zdarzeń – natomiast w podrozdziałach dotyczących przewoźników regionalnych kluczowe wnioski dotyczą wpływu na stabilność, płynność i bezpieczeństwo ruchu kolejowego, ze szczególnym uwzględnieniem szkód powstałych w wyniku zderzeń i opóźnień. Przy analizie konkretnych linii kolejowych, w tym ich przebiegu, charakterystyki otoczenia oraz znaczeniu dla sieci transportowej korzystano z Mapy Interaktywnej Linii Kolejowych zarządzanej przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Wyniki analiz stanowią podstawę dla dalszych badań nad wdrażaniem skutecznych środków ochrony zwierząt, wpływających bezpośrednio na podniesienie poziomu bezpieczeństwa ruchu, oraz integracji ekologicznych aspektów w planowaniu i eksploatacji infrastruktury kolejowej.

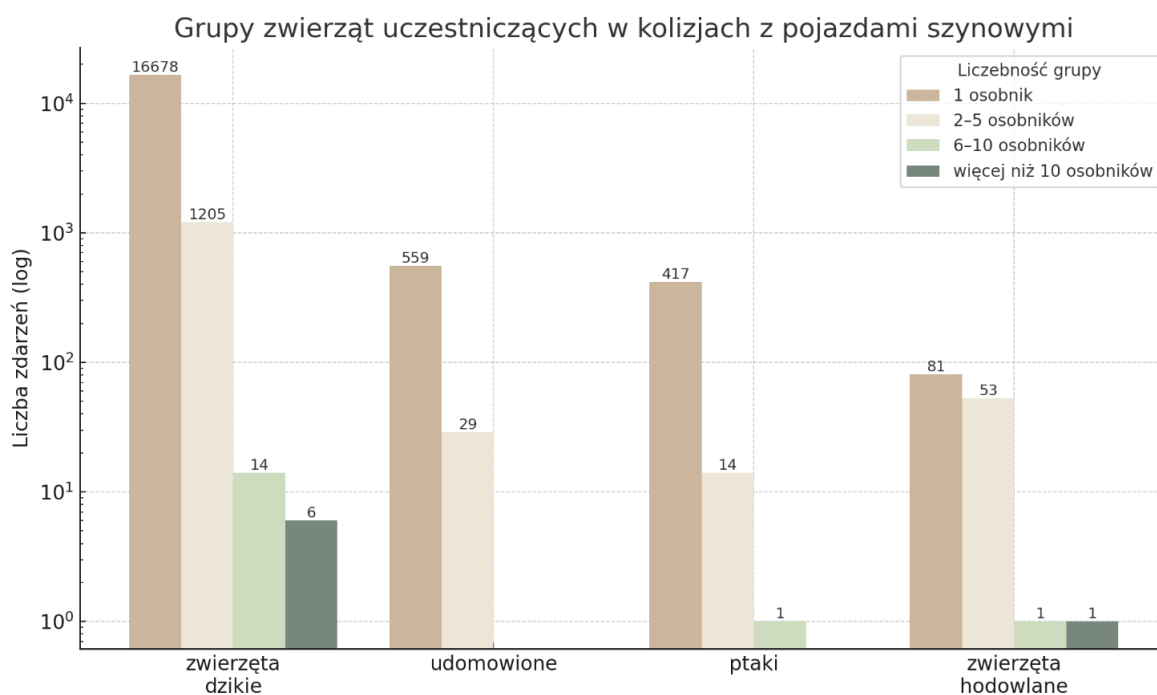
5.1. Analiza danych PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

Dane uzyskane od zarządcy infrastruktury kolejowej PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. [191] obejmują okres od stycznia 2017 do grudnia 2021 i informacje nt.: numeru i kilometrażu linii kolejowej, grupę i gatunek zwierząt, liczbę osobników oraz godzinę i datę kolizji. Łącznie kolejowy.

W pierwszej kolejności przeanalizowano grupy zwierząt uczestniczących w kolizjach. Na rysunku 5.1 przedstawiono zestawienie wraz z przedziałami liczbowymi osobników (z pominięciem zwierząt określonych jako “niezidentyfikowane”). Kolizje z pojazdami najczęściej dotyczą zwierząt dzikich, w szczególności pojedynczych osobników, choć występują też zdarzenia z mniejszą lub większą grupą, co może wskazywać na migracje stadne. W zdarzeniach biorą też udział zwierzęta udomowione i hodowlane oraz ptaki.

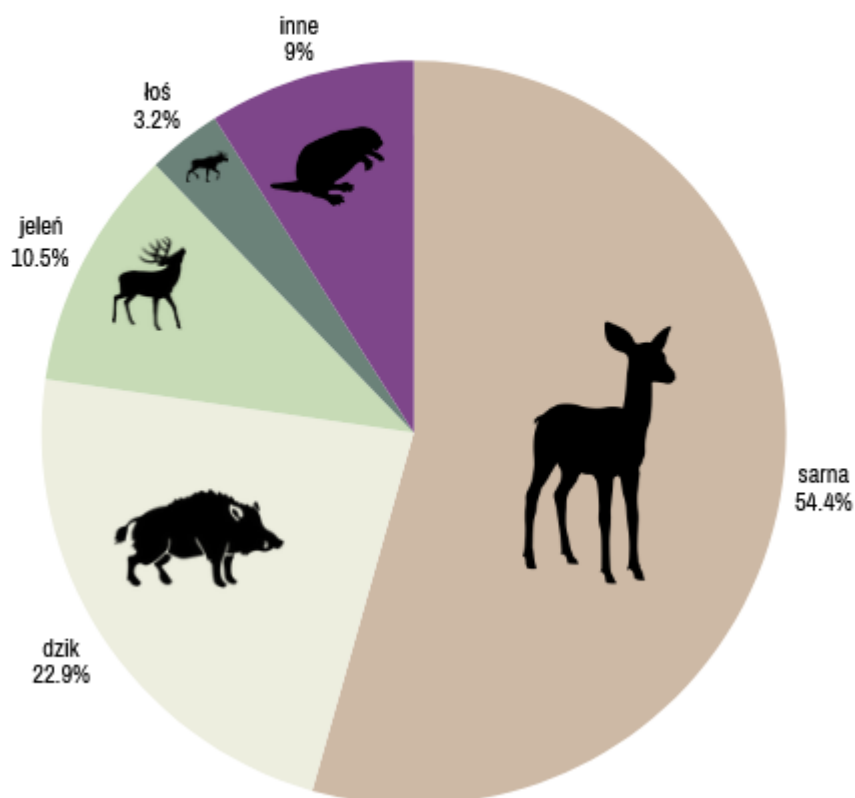
Następnie przeanalizowano poszczególne gatunki zwierząt dzikich i ptaków, z którymi została zgłoszona kolizja w trakcie eksploatacji linii kolejowej. Zwierzęta udomowione i hodowlane, choć ich obecność na torach również stanowi zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego, znajdują się poza zakresem analizy środowiskowej przeprowadzanej w tej

pracy. Na rysunku 5.2 przedstawiono cztery gatunki dzikich zwierząt najczęściej uczestniczących w kolizjach.



Rys. 5.1. Grupy zwierząt uczestniczących w kolizjach z pojazdami szynowymi

**Gatunki dzikich zwierząt najczęściej uczestniczących
w kolizjach z pojazdami szynowymi
na podstawie danych PKP PLK S.A.**



Rys. 5.2. Gatunki dzikich zwierząt najczęściej uczestniczących w kolizjach z pojazdami szynowymi

Dane wskazują, że w największej liczbie zdarzeń uczestniczą najczęściej sarny (10375 zdarzeń), dziki (4368 zdarzeń) i jelenie (2002 zdarzeń). W mniejszym, choć zauważalnym stopniu, problem dotyczy także łosi (613 zdarzeń). Wśród gatunków w kategorii „inne” warto wskazać relatywnie często rejestrowane zdarzenia z bobrami, lisami i danielami.

Należy także dodać, że 338 przypadków zostało zgłoszonych jako “niezidentyfikowane”, a 175 jako “niezidentyfikowany ptak”. Wynika to prawdopodobnie z braku możliwości dokładnego rozpoznania i zareportowania gatunku wskutek kolizji przy dużej prędkości pociągu lub w trudnych warunkach pogodowych czy terenowych. Ponadto, w szczególności w przypadku mniejszych zwierząt, pozostaje niewystarczająca ilość śladów biologicznych do określenia gatunku bez szczegółowej analizy.

Najczęściej rejestrowane w bazach danych kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami są ptaki i ssaki. W przypadku ssaków wynika to głównie z ich rozmiaru, częstych migracji i wolniejszych reakcji w sytuacji zagrożenia, natomiast zdarzenia z ptakami są skutkiem przelotów na niskich wysokościach, gdzie są one narażone na uderzenia. Płazy i gady (np. żaby, ropuchy, węże, jaszczurki) rzadko są zgłaszane do statystyk zdarzeń. Wynika to przede wszystkim z niewielkiego rozmiaru, przez co nie stanowią zagrożenia dla pojazdu i są trudne do zauważenia przez maszynistów. Ponadto często charakteryzują się nocną aktywnością oraz sezonowym występowaniem, co wpływa na niższe zainteresowanie wpływem linii kolejowych na ich siedliska, choć są ważnymi elementami ekosystemów.

W kontekście ochrony środowiska szczególnie ważne są gatunki rzadkie lub znajdujące się pod ochroną (ściśle lub częściową) lub są objęte całorocznym okresem ochronnym (w przypadku łosia) zgodnie z polskim prawem [192].

W tabeli 5.1 przedstawiono gatunki ssaków spełniających powyższe kryteria, natomiast w tabeli 5.2 gatunków ptaków.

Tabela 5.1. Gatunki ssaków chronionych najczęściej uczestniczących w kolizjach z pojazdami szynowymi

Gatunek ssaka chronionego	Liczba zdarzeń
łoś	613
bóbr	97
borsuk	15
żubr	11
wilk	6

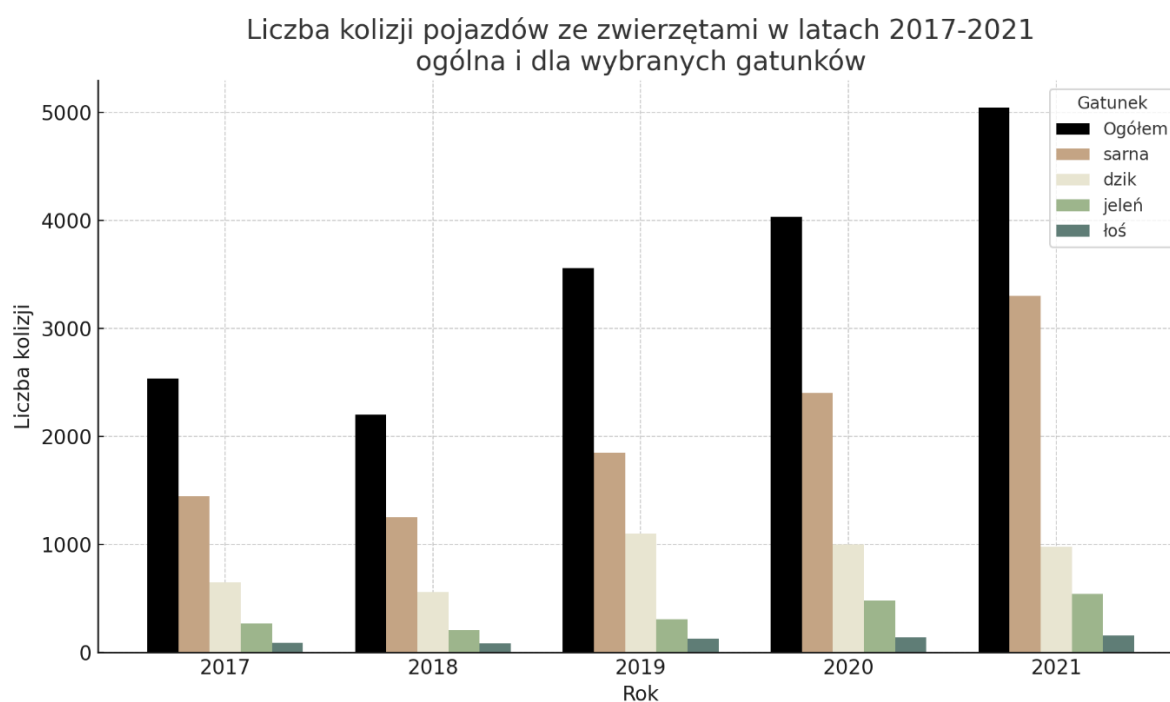
Tabela 5.2. Gatunki ptaków chronionych najczęściej uczestniczących w kolizjach z pojazdami szynowymi

Gatunek ptaka chronionego	Liczba zdarzeń
jastrząb	22
łabędź	22
orzeł	19
bocian	9
żuraw	8

Wśród cennych przyrodniczo gatunków zwierząt w polskich ekosystemach najwięcej potrażeń dotyczyło łosia, co wynika z jego dużych rozmiarów i wolnej reakcji na zbliżający się pojazd. Ponadto kolizje dotyczą także bobrów, oraz w zdecydowanie mniejszej skali takich

gatunków jak borsuk, żubr i wilk. Wśród gatunków ptaków chronionych w Polsce kolizje dotyczyły najczęściej jastrzębi, łabędzi i orłów. W przypadku jastrzębi i orłów jest to prawdopodobnie związane z żerowaniem w pobliżu torów, natomiast u łabędzi charakterystyczny są niskie wysokości lotów. Warto podkreślić, że gatunki chronione mogą być zagrożone w określonych regionach, w których występują, i gdzie należy wdrażać odpowiednie, dopasowane do charakteru terenu, rozwiązania ograniczające kolizje.

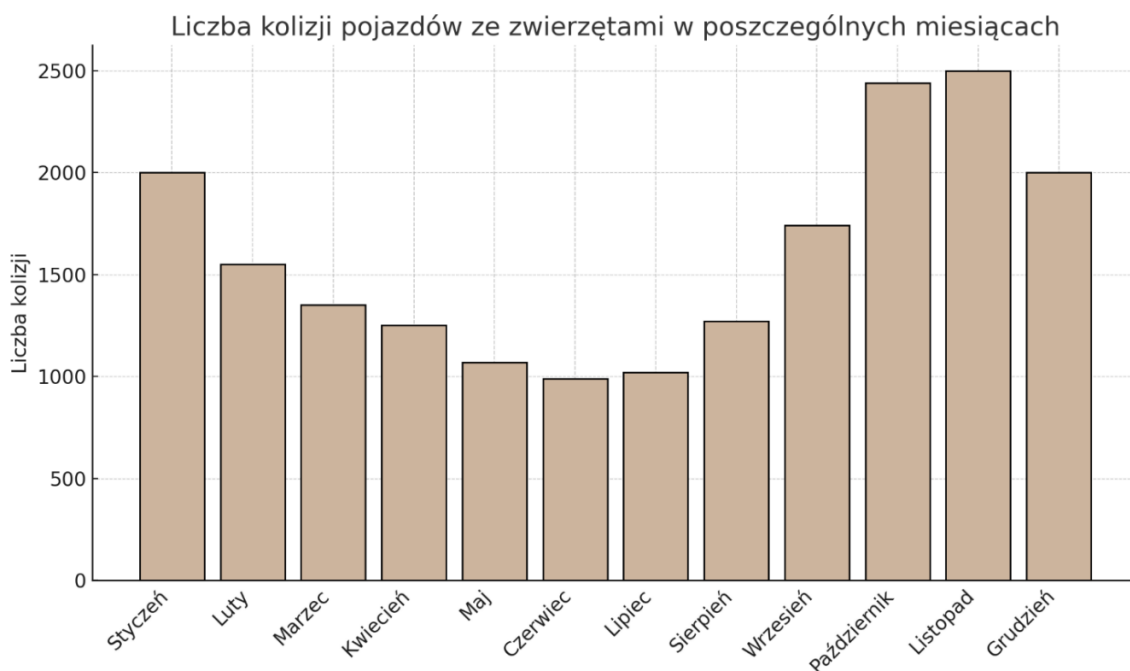
Dokonano także analizy rozkładu czasowego zdarzeń. Przedstawiony wykres na rysunku 5.3 pokazuje liczbę kolizji zwierząt z pojazdami w latach 2017–2021, zarówno ogólną, jak i dla wybranych gatunków.



Rys. 5.3. Liczba kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w latach 2017–2021 na podstawie danych PKP PLK S.A.

W latach 2017–2021 liczba kolizji wykazywała trend wzrostowy, co sugeruje, że pomimo stosowania strategii środowiskowych problem w zakresie bezpieczeństwa ruchu kolejowego oraz jego oddziaływania na otoczenie naturalne staje się coraz większym problemem. Liczba kolizji z sarnami zwiększyła się prawie dwukrotnie w przeciągu 5 lat, co może być związane ze zwiększającą się populacją tych zwierząt w polskich lasach, a także z intensyfikacją ruchu kolejowego i zwiększaniem przepustowości linii. Dziki również uczestniczyły w coraz większej liczbie zdarzeń, choć zmiana nie była tak dynamiczna jak w przypadku zdarzeń z udziałem saren. W przypadku jeleni i łośi, mimo że liczba zdarzeń z ich udziałem była mniejsza niż w przypadku saren i dzików, odnotowano również stopniowe zwiększenie liczby kolizji. Czarne słupki na wykresie, obrazujące ogólną liczbę kolizji, wskazują na wyraźne zwiększenie liczby zdarzeń po 2018 roku, co może być wynikiem zarówno uwarunkowań przyrodniczych, jak i transportowych.

Kolizje zwierząt z pojazdami wykazują sezonowe i dobowe wzorce, które mogą być związane z aktywnością zwierząt, warunkami środowiskowymi oraz intensywnością ruchu. Analiza miesięczna i dobową pozwala zidentyfikować okresy o najwyższym ryzyku zdarzeń. Miesięczny rozkład liczby kolizji w skali roku został przedstawiony na rysunku 5.4.



Rys. 5.4. Miesięczny rozkład liczby kolizji pojazdów ze zwierzętami na podstawie danych PKP PLK S.A.

Liczba kolizji zwierząt z pojazdami wykazuje sezonowe wahania, z największą liczbą zdarzeń w październiku i listopadzie. Wiąże się to z tym, że w okresie jesiennym zwiększa się populacja zwierząt kopytnych, które formują większe stada i migrują na zimowe żerowiska [139]. Najmniej zdarzeń odnotowano w miesiącach letnich (maj – lipiec), co może być związane z innymi większą dostępnością pożywienia w jednym miejscu oraz lepszą widocznością.

Dobowy rozkład liczby kolizji został pokazany na rysunku 5.5. Można zauważyć, że najwięcej kolizji ze zwierzętami miało miejsce w godzinach wieczornych, między 19:00 a 22:00, oraz w godzinach między 5:00 a 7:00, co zgadza się z okresem największej aktywności zwierząt kopytnych, takich jak sarny czy jelenie, które przemieszczają się w poszukiwaniu miejsc do żerowania i odpoczynku najczęściej o świcie i zmierzchu [193]. W środku dnia dzikie zwierzęta charakteryzują się ograniczoną aktywnością.



Rys. 5.5. Dobowy rozkład liczby kolizji pojazdów ze zwierzętami na podstawie danych PKP PLK S.A.

Następnie wyznaczono linie kolejowe, na których zarejestrowano najwięcej zdarzeń (biorąc pod uwagę całą długość linii). W tabeli 5.3 przedstawiono zestawienie obejmujące liczbę kolizji w okresie 5 lat, długość linii kolejowej oraz gęstość zdarzeń, zdefiniowaną jako liczbę kolizji na kilometr trasy, zgodnie ze wzorem 1:

$$\vartheta = \frac{L_z}{D} \quad (1)$$

gdzie:

ϑ – gęstość zdarzeń

L_z – liczba zdarzeń zarejestrowanych na danej linii kolejowej w analizowanym okresie

D – długość linii kolejowej w kilometrach.

Tabela 5.3. Zestawienie linii z największą całkowitą liczbą i gęstością zdarzeń

Numer Linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń	Długość linii kolejowej [km]	Gęstość zdarzeń [liczba zdarzeń/km]
3	Warszawa Zachodnia – Kunowice	929	473	1,96
202	Gdańsk Główny – Stargard	807	334	2,42
1	Warszawa Zachodnia – Katowice	694	318	2,19
91	Kraków Główny – Medyka	687	257	2,67
273	Wrocław Główny – Szczecin Główny	637	356	1,79

Najwięcej kolizji pojazdów z dzikimi zwierzętami miało miejsce na linii nr 3, przebiegającej z Warszawy Zachodniej do Kunowic, będącej jedną z najważniejszych magistrali transportu krajowej i międzynarodowego dzięki połączeniu z zachodnią granicą Polski, oraz częścią transeuropejskiej sieci transportowej. Jest ona także najdłuższą linią w opracowanym zestawieniu, co wpływa na mniejszą gęstość zdarzeń. Natomiast analizując gęstość zdarzeń, która pozwala wyznaczyć niejako bezwzględną liczbę zdarzeń, należy zauważyć podkreślić przede wszystkim wartości dla linii 91 (Kraków Główny – Medyka i granica z Ukrainą) oraz linię nr 202, z Gdańska Głównego do Stargardu, co związane jest z licznymi terenami leśnymi w ich otoczeniu. Linie nr 1 i 273, przebiegające w różnych regionach Polski, są również bardzo istotnymi elementami międzynarodowej sieci kolejowej, łącząc miasta wojewódzkie. Tym samym wysoka liczba kolizji ze zwierzętami, mająca wpływ na bezpieczeństwo oraz regularność ruchu kolejowego, jest podstawą do zintensyfikowania działań na rzecz zapobieganiu takim zdarzeniom.

Następnie dokonano analizy 10-kilometrowych odcinków linii kolejowych. W tym celu najpierw podzielono linie na segmenty, zsumowano w nich liczbę kolizji, by wyznaczyć te miejsca sieci kolejowej, w których jest najwięcej zdarzeń na niewielkim odcinku. Wyniki tej analizy przedstawiono w tabeli 5.4. Wskazano szczególną charakterystykę linii: główną międzynarodową linią kolejową (ACC) oraz transeuropejską sieć transportową (TEN-T). Brak opisu oznacza linię o mniejszym znaczeniu dla całej sieci. Dopasowano także stacje/przystanki osobowe najbliższe wyznaczonym punktom początkowym i końcowym odcinka.

Najwięcej zdarzeń zarejestrowano na linii 139 Katowice – Zwardoń, która jest kompleksową linią transportową w transeuropejskiej sieci. Między stacjami Katowice Podlesie – Tychy Żwaków w analizowanym okresie czasu doszło do 193 zgłoszonych do PKP PLK kolizji ze zwierzętami. Na tej samej linii do wielu zdarzeń doszło także w kolejnych

kilometrach trasy, między stacjami Tychy Żwaków i Piasek. Łącznie, na długości 20 km, miały miejsce 302 zdarzenia.

Tabela 5.4. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji na 10-kilometrowych odcinkach

Numer linii	Nazwa linii	KM	Liczba zdarzeń	Najbliższe stacje/przystanki osobowe
139	Katowice – Zwardoń (AGC/TEN-T)	10–20	193	Katowice Podlesie – Tychy Żwaków
356	Poznań Wschód – Bydgoszcz Główna	10–20	135	Owińska – Przebędowo
139	Katowice – Zwardoń (AGC/TEN-T)	20–30	109	Tychy Żwaków – Piasek
91	Kraków Główny – Medyka (AGC/ TEN-T)	20–30	103	Podłęże – Stanisławice
91	Kraków Główny – Medyka (AGC/ TEN-T)	50–60	85	Brzesko Okocim – Biadoliny
357	Sulechów – Luboń k/Poznania	90–100	84	Strykowo Poznańskie – Trzebaw Rosnówko
140	Katowice Ligota – Nędza	0–10	79	Katowice – Mikołów
356	Poznań Wschód – Bydgoszcz Główna	20–30	78	Przebędowo – Sława Wielkopolska
275	Wrocław Muchobór – Gubinek (AGC/ TEN-T)	20–30	75	Mrozów – Przedmoście Święte
140	Katowice Ligota – Nędza	10–20	69	Mikołów – Orzesze

W województwie wielkopolskim wysoką liczbą zdarzeń charakteryzuje się drugorzędna, choć ważna dla regionalnego ruchu pasażerskiego, linia 356 łącząca Poznań z Bydgoszczą przez Murowaną Goślinę i Środę Wielkopolską (łącznie 213 odnotowanych kolizji). Linia nr 91, łącząca Kraków z polsko-ukraińską granicą w Medyce, również jest miejscem licznych kolizji – na odcinku 10–20 km miały miejsce 103 zdarzenia, a na odcinku 50–60 km 85 zdarzeń. Na górnym Śląsku również zarejestrowano liczne kolizje na drugiej linii, o numerze 140 i znaczeniu państwowym (łącznie 148 zdarzeń). Kolejno na linii nr 357 Sulechów – Luboń koło Poznania (90–100 km) odnotowano 84 kolizje, a na linii nr 275 Wrocław Muchobór – Gubinek na granicy polsko-niemieckiej – 69 kolizji.

Wyniki analizy tych danych wskazują, że niektóre odcinki, szczególnie w rejonie Górnego Śląska, Wielkopolski i Podkarpacia wyróżniają się wyjątkowo dużą liczbą kolizji z dzikimi zwierzętami, co może wynikać zarówno z uwarunkowań środowiskowych (bliskość lasów, łąk), jak i intensywności ruchu kolejowego.

Większość zdarzeń dotyczyła dzikich ssaków, takich jak sarny, jelenie i dziki, które ze względu na regularne migracje dzienne i sezonowe w poszukiwaniu pożywienia i nowych siedlisk, często przemieszczają się wzdłuż lub w poprzek torów kolejowych, przez co są najbardziej narażone na potrącenia. Istotnym problemem jest śmierć zwierząt objętych ochroną w wyniku kolizji, co podkreśla potrzebę wdrażania rozwiązań mitygacyjnych. Rozkład czasowy kolizji pokrywa się z rytmem dobowym i rocznym aktywności zwierząt. Wyniki analizy wskazują na znaczne różnice regionalne – szczególnie dużą liczbę kolizji odnotowano na odcinkach linii kolejowych w województwach śląskim, wielkopolskim i podkarpackim, gdzie intensywny ruch kolejowy przecina kompleksy leśne. Na poziomie ogólnym zastosowano analizę 10-kilometrowych odcinków, co pozwoliło wskazać regiony o największej intensywności kolizji. W analizach szczegółowych, ukierunkowanych na identyfikację lokalnych hotspotów, zasadne jest jednak stosowanie krótszych odcinków i metod bardziej czułych, takich jak okno ruchome. Zwiększenie liczby kolizji w latach 2017–2021 udowadnia, że problem się potęguje, co potwierdza konieczność systemowego podejścia i zarządzania negatywnym oddziaływaniem transportu kolejowego na siedliska naturalne.

5.2. Analiza danych przewoźników regionalnych

5.2.1. Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o.

Dane otrzymane od wielkopolskiego przewoźnika kolei regionalnych – Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o. [153] obejmują okres od stycznia 2018 do czerwca 2022 i informacje związane z kolizją takie jak: numer linii, opis, miejsce i data zdarzenia, typ pojazdu, rodzaj uszkodzenia pojazdu, gatunek zwierzęcia uczestniczącego w kolizji, szlak oraz opóźnienie w miejscu i na przyjeździe.

Łącznie Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o. odnotowały 1103 zdarzenia, z czego 91 skutkowało uszkodzeniem taboru (8,3%). W tabeli 5.5 przedstawiono zestawienie pięciu linii kolejowych o największej liczbie zdarzeń.

Tabela 5.5. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji według danych Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o.

Numer Linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń
3	Warszawa Zachodnia – Kunowice	218
356	Poznań Wschód – Bydgoszcz Główna	181
272	Kluczbork – Poznań Główny	141
357	Sulechów – Luboń k/Poznania	136
281	Oleśnica – Chojnice	112

Dane przewoźnika regionalnego pokrywają się z wynikami analizy informacji otrzymanych od zarządcy infrastruktury – ponownie bardzo wysoką liczbą kolizji charakteryzują się linia nr 3 (218 zdarzeń), linia nr 356 (181 zdarzeń) oraz linia nr 357 (136 zdarzeń). W mniejszym, choć zauważalnym, stopniu do wielu zdarzeń doszło w południowej części województwa, na liniach nr 272 i 281.

Dla przewoźników, poza aspektami środowiskowymi, ważne są też skutki kolizji, czyli uszkodzenia taboru i opóźnienia przyjazdu do stacji docelowej. W tabeli 5.6 przedstawiono linie kolejowe, na których najczęściej mają miejsce uszkodzenia taboru w wyniku potrącenia zwierzęcia.

Tabela 5.6. Zestawienie linii z największą liczbą uszkodzeń taboru wskutek potrącenia dzikiego zwierzęcia według danych Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o.

Numer Linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń z uszkodzeniem taboru
3	Warszawa Zachodnia – Kunowice	16
281	Oleśnica – Chojnice	15
356	Poznań Wschód – Bydgoszcz Główna	13
14	Łódź Kaliska – Zasieki	10
357	Sulechów – Luboń k/Poznania	10

Najwięcej kolizji skutkujących uszkodzeniem taboru miało miejsce na linii nr 3 oraz nr 281. O ile w pierwszym przypadku jest to w dużym stopniu związane z dużą intensywnością ruchu kolejowego na ważnej magistrali kolejowej, to trasa Oleśnica – Chojnice ma znaczenie zdecydowanie bardziej regionalne, podobnie jak pozostałe linie przedstawione w tabeli. Uszkodzenie pojazdu wiąże się zazwyczaj z dłuższym lub krótszym czasem zablokowania

torów, co ma negatywny wpływ na stabilność i płynność transportu zarówno lokalnego jak i krajowego.

Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o. wskazały pojazdy, których najczęściej dotyczyły uszkodzenia w wyniku kolizji ze zwierzętami. Są to zespoły trakcyjne z rodzin pojazdów EN57 (23 zdarzenia), SA132 (18), EN56 (17) oraz 48WE (14). Uszkodzenia dotyczyły przede wszystkim:

- zgarniacza (25 zdarzeń)
- przewodów, m.in. powietrznych, zasilających, hamulcowych (20 zdarzeń)
- poszycia (7 zdarzeń)
- reflektorów (5 zdarzeń).

Ponadto w ośmiu sytuacjach doszło do zniszczenia wielu elementów, a niektóre uszkodzenia uniemożliwiły dalszą bezpieczną jazdę (np. uszkodzenie układu hamulcowego, uszkodzenie zbiornika powietrza). W kolizjach skutkujących uszkodzeniem pojazdu najczęściej brały udział sarny (45% zdarzeń), jelenie (25%) i dziki (21%).

Ze stratami materialnymi dla przewoźników wiąże się także drugi negatywny skutek kolizji – opóźnienie przejazdu. W tabeli 5.7 przedstawiono statystykę opóźnień w zdarzeniach, w których został uszkodzony pojazd. Osobno zsumowane zostały sytuacje z opóźnieniami w miejscu zdarzenia i na stacji końcowej.

Tabela 5.7. Zestawienie opóźnień związanych z kolizjami z dzikimi zwierzętami ze skutkiem uszkodzenia taboru według danych Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o.

Opóźnienie [min]	Liczba przypadków opóźnienia w miejscu kolizji	Liczba przypadków opóźnienia przy przyjeździe na stację końcową
0	10	23
1–10	25	25
11–20	33	17
21–30	10	9
>30	13	17

Można zauważyć, że najwięcej opóźnień w miejscu zdarzenia – bezpośrednio związanych z kolizją – mieściło się w przedziale 11–20 minut. Z kolei na stacji docelowej przybyciu najczęściej odnotowywano opóźnienia do 10 minut, co sugeruje, że w wielu przypadkach pociąg nadrobił część opóźnienia w dalszej trasie. W 10 przypadkach nie odnotowano żadnego opóźnienia pociągu w następstwie zdarzenia, co może świadczyć o tym, że uszkodzenie było nieznaczne i nie miało wpływu na płynności jazdy. Poważniejsze opóźnienia – przekraczające 30 minut – wystąpiły w 13 przypadkach w miejscu kolizji oraz w 17 przypadkach na końcu trasy. Największe opóźnienie w miejscu zdarzenia wyniosło 154 minuty w miejscu zdarzenia (i 153 minuty na stacji docelowej) i miało miejsce na szlaku Żerków – Jarocin (linia nr 281). Było spowodowane uszkodzeniem zaworu węża zasilającego przewód główny elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57-1025 w wyniku kolizji z sarną. Ponad dwugodzinne opóźnienie wyniknęło także z uszkodzenia piasecznicy pojazdu EN76-047 w kolizji z dzikiem na szlaku Pobiedziska - Biskupice (linii nr 353 kierunek Poznań Wschód –Skandawa).

Różnica między opóźnieniem odnotowanym w miejscu zdarzenia, a opóźnieniem przy przybyciu na stację końcową wynika prawdopodobnie z faktu, że część opóźnienia była nadrabiana w trakcie dalszej jazdy. W innych przypadkach różnica mogła się powiększać, np.

z powodu konieczności jazdy z ograniczoną prędkością po uszkodzeniu pojazdu, czy też w związku z ustępowaniem pierwszeństwa pociągom o wyższym priorytecie.

Największa różnica między czasem przyjazdu a opóźnieniem w miejscu kolizji wyniosła 71 minut – odnotowano ją na linii 281. Największa różnica między czasem przybycia, a opóźnieniem w miejscu kolizji wyniosła 71 minut na linii 281 pomiędzy stacjami Jarocin i Żerków (42 minuty opóźnienia w miejscu zdarzenia, 113 minut opóźnienia na przybyciu do stacji docelowej).

5.2.2. Koleje Dolnośląskie Sp. z o.o.

Dane otrzymane od dolnośląskiego przewoźnika kolei regionalnych – Koleje Dolnośląskie Sp. z o.o. [152] obejmują okres od maja 2020 do października 2022 i informacje związane z kolizją takie jak: miejsce i data zdarzenia, numer pociągu i seria pojazdu, rodzaj uszkodzenia pojazdu, gatunek zwierzęcia uczestniczącego w kolizji, szlak i kilometr linii. Na tej podstawie wyznaczono także numery linii, aby zachować spójność analizy porównawczej.

Łącznie Koleje Dolnośląskie Sp. z o.o. odnotowały 1101 zdarzeń, z czego 166 skutkowało uszkodzeniem taboru (15%). W tabeli 5.8 przedstawiono zestawienie pięciu linii kolejowych o największej liczbie zdarzeń skutkujących uszkodzeniem pojazdu.

Tabela 5.8. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji z uszkodzeniem taboru według danych Kolei Dolnośląskich Sp. z o.o.

Nr linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń z uszkodzeniem pojazdu
275	Wrocław Muchobór – Gubinek	30
274	Wrocław Świebodzki – Zgorzelec	27
282	Miłkowice – Jasień	19
276	Wrocław Główny – Międzyzylesie	14
281	Oleśnica – Chojnice	13

Na liniach 275 oraz 274 miało miejsce najwięcej kolizji spowodowanych przez dzikie zwierzęta, w których doszło do uszkodzenia pojazdu. Pierwsza z nich jest jedną z głównych linii międzynarodowych, a także częścią transeuropejskiej sieci transportowej, o znaczeniu kompleksowym, zarówno pasażerskim jak i towarowym. Linie o numerach 274, 282 oraz 276 mają znaczenie państwowe, i przecinają zalesione tereny górskie. Wyniki dotyczące linii nr 281, łączącej cztery województwa z południa na północ przebiegając w pobliżu parków krajobrazowych i obszarów ochrony przyrody, potwierdzają wnioski z analizy danych przewoźnika wielkopolskiego, wskazując na potrzebę pogłębionej analizy informacji dotyczącej tej trasy.

Licznie uszkodzone zostały nowoczesne elektryczne zespoły trakcyjne takie jak Impuls firmy NEWAG (typ 31WE – 33 kolizje, typ 45WE – 29 kolizji) oraz o napędzie spalinowym SA134 (33 kolizje) oraz SA135 (23 kolizje) produkcji PESA Bydgoszcz. Wśród najczęstszych uszkodzeń w wyniku zderzenia z dzikimi zwierzętami można wskazać uszkodzenie:

- zgarniacza (79 zdarzeń)
- przewodów (17 zdarzeń)
- poszycia (11 zdarzeń)
- układu hamulcowego (9 zdarzeń)
- zderzaka, spojlera, osłony sprzęgu (po 8 zdarzeń).

W kolizjach skutkujących uszkodzeniem pojazdu najczęściej brały udział sarny (51% zdarzeń), dziki (27%) i jelenie (16%).

5.2.3. Koleje Małopolskie Sp. z o.o.

Dane otrzymane od małopolskiego przewoźnika kolei regionalnych – Koleje Małopolskie Sp. z o.o. [154] obejmują okres od kwietnia 2016 do września 2022 i informacje związane z kolizją takie jak: godzina i data zdarzenia, numer pojazdu, szczegółowy opis zdarzenia (gatunek zwierzęcia uczestniczącego w kolizji, rezultat oględzin pojazdu, podjęte działania, ewentualne opóźnienia), szlak i kilometraż linii.

Łącznie Koleje Małopolskie Sp. z o.o. odnotowały 459 zdarzeń, z czego 93 skutkowało uszkodzeniem taboru (20%). W tabeli 5.9 przedstawiono zestawienie pięciu linii kolejowych o największej liczbie zdarzeń.

Tabela 5.9. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji według danych Kolei Małopolskich Sp. z o.o.

Numer linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń
91	Kraków Główny – Medyka	222
96	Tarnów – Leluchów	80
8	Warszawa Zachodnia – Kraków Główny	57
109	Kraków Bieżanów – Wieliczka Rynek	26
118	Kraków Główny – Kraków Lotnisko	22

Najwięcej kolizji miało miejsce na linii nr 91 Kraków Główny – Medyka, bo aż 222 zdarzenia (48% wszystkich zarejestrowanych kolizji). Analogicznie jak w analizie danych PKP PLK S.A., tak wysoka liczba wynika głównie z dużej intensywności ruchu na linii o znaczeniu międzynarodowym, łączącą sieć transportową z Ukrainą, która przebiega przez obszerne tereny leśne. Drugą najwyższą liczbą zdarzeń z udziałem dzikich zwierząt charakteryzuje się linia nr 96, przebiegająca przez Popradzki Park Krajobrazowy w Beskidzie Sądeckim o dużej wartości przyrodniczej i licznych gatunkach chronionych. Także na linii nr 8, łączącej stolicę województwa małopolskiego, świętokrzyskiego oraz stolicę kraju, licznie dochodzi do kolizji ze zwierzętami, przy czym warto zauważyć, że nie bez wpływu pozostaje aspekt długości linii i różnorodność otoczenia torów. Zdecydowanie mniej zdarzeń zarejestrowano lokalnie wokół Krakowa, na liniach nr 109 i nr 118. W tabeli 5.10 znajduje się analogiczne zestawienie zdarzeń, w których uszkodzony został pojazd przewoźnika.

Tabela 5.10. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji z uszkodzeniem taboru według danych Kolei Małopolskich Sp. z o.o.

Numer linii	Przebieg linii	Liczba zdarzeń z uszkodzeniem pojazdu
91	Kraków Główny – Medyka	52
8	Warszawa Zachodnia – Kraków Główny	11
109	Kraków Bieżanów – Wieliczka Rynek	11
118	Kraków Główny – Kraków Lotnisko	9
96	Tarnów – Leluchów	6

Linie kolejowe użytkowane przez Koleje Małopolskie Sp. z o.o., na których miało miejsce najwięcej uszkodzeń taboru w wyniku zderzenia z dzikimi zwierzętami, są tymi samymi, na których dochodzi do największej liczby zdarzeń ogółem. Ponownie linia nr 91 zostaje

zidentyfikowana jako linia charakteryzująca się wysokim oddziaływaniem na środowisko wokół i podatnością na wystąpienie kolizji ze zwierzętami przechodzącymi przez tory, które skutkują zniszczeniem części pojazdu (56% wszystkich zarejestrowanych zdarzeń).

Analizując porównawczo Tabelę 5.9 i 5.10 warto zauważyć, że w przypadku linii nr 109 Kraków Bieżanów – Wieliczka Rynek oraz 118 Kraków Główny – Kraków Lotnisko odpowiednio aż 42% i 41% kolizji skutkowało uszkodzeniem pojazdu, co może być niepokojącą diagnozą dla przewoźnika, wskazującą na potrzebę zapobiegania takim zdarzeniom i ograniczeniu strat materialnych.

Wśród eksploatowanych pojazdów najczęściej uszkodzone zostały pojazdy produkowane przez PESA Bydgoszcz – elektryczne zespoły trakcyjne typu EN77, EN79 i EN78 – odpowiednio 49, 22 i 17 zdarzeń. Zgłaszano głównie uszkodzenia spojlera (39 zdarzeń) i zgarniacza (32 zdarzeń). W pozostałych przypadkach były to pojedyncze zniszczenia elementów i układów, takich jak układ hamulcowy, pantograf, czujnik ETCS, przewody powietrzne. W zdarzeniach najczęściej uczestniczyły sarny (52%), dziki (19%) i jelenie (15%).

Baza danych małopolskiego przewoźnika pozwoliła także na analizę skutków czasowych kolizji, czyli opóźnień pociągu. W tabeli 5.11 przedstawiono podsumowanie opóźnień w miejscu i na przybyciu, które są związane z uszkodzeniem taboru w wyniku kolizji z dziką zwierzyną.

Tabela 5.11. Zestawienie opóźnień związanych z kolizjami z dzikimi zwierzętami ze skutkiem uszkodzenia taboru według danych Kolei Małopolskich Sp. z o.o.

Opóźnienie [min]	Liczba opóźnień przejazdu w miejscu	Liczba opóźnień przejazdu na przybyciu do stacji docelowej
0	55	60
1–10	17	12
11–20	12	11
21–30	2	1
>30	7	9

Zdecydowana większość zdarzeń, nawet z uszkodzeniem taboru, albo nie skutkowało opóźnieniem przejazdu albo było to opóźnienie niewielkie (do 10 minut). Jednakże przypadki opóźnień powyżej 30 minut miały poważne skutki dla płynności ruchu w regionie. Dzięki szczegółowym uwagom zapisanym w bazie danych możliwe jest odtworzenie zdarzeń. Największe opóźnienie – 242 minuty na miejscu – spowodowane było kolizją pojazdu z sarną na linii 91 między stacjami Brzesko-Okocim i Sterkowiec, w wyniku której doszło do uszkodzenia czoła kabiny, przewodów powietrznych i kabli elektrycznych, uniemożliwiając dalszą jazdę. Zgodnie z notatką nt. zdarzenia, tor na szklaku Brzesko-Okocim – Białolino został zamknięty od godz. 21:40 do godz. 1:05. Po godzinie czekania pasażerowie zostali zabrani przez następny pociąg relacji Kraków Główny – Tarnów (również w wyniku tego opóźniony 22 minuty), a do ruchu lokalnego wykorzystano podstawiony skład zastępczy. Podobnie w wyniku zderzenia pociągu z przebiegającym stadem jeleni na lokalnej linii nr 93 prowadzącej z Trzebini do Zebrzydowic, zostały opóźnione 3 przejazdy, o łącznej wartości opóźnienia 90 minut. Stwierdzono uszkodzenie pudła, osłony sprzęgu, nieszczelność układu pneumatycznego, co wymagało zjechania taboru na oględziny i serwis, a dla podróżnych podstawienia składu zastępczego.

5.2.4. Arriva RP Sp. z o.o.

Dane otrzymane od kujawsko-pomorskiego przewoźnika kolei regionalnych – Arriva RP Sp. z o.o. [155] obejmują okres od lutego 2016 do listopada 2022 i informacje związane z kolizją takie jak: godzina i data zdarzenia, numer linii, gatunek zwierzęcia uczestniczącego w kolizji, wskazanie uszkodzenia, opóźnienie przejazdu na przybyciu, szlak, stacja i kilometraż linii.

Łącznie Arriva RP Sp. z o.o. odnotowały 83 zdarzenia, z czego 34 skutkowało uszkodzeniem taboru (43%). W tabeli 5.12 przedstawiono zestawienie pięciu linii kolejowych o największej liczbie zdarzeń. Najwięcej zdarzeń miało miejsce na linii nr 208, łączącej Działdowo i Chojnice (37% wszystkich kolizji) i przebiegającej w pobliżu czterech parków krajobrazowych – Tucholskiego, Wdeckiego, Brodnickiego i Welskiego. Ponadto do zdarzeń z udziałem zwierząt dochodziło także na linii nr 207 oraz 201, która również znajduje się w otoczeniu Tucholskiego i Wdeckiego Parku Krajobrazowego, przecinając naturalny korytarz ekologicznych łączący oba obszary leśne. Wymienione linie mają znaczenie państwowe w systemie transportu kolejowego.

Tabela 5.12. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji według danych Arriva RP Sp z o.o.

Numer linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń
208	Działdowo – Chojnice	31
207	Toruń Wschodni – Malbork	20
201	Nowa Wieś Wielka – Gdynia Port	19

Na tych samych trasach przejazdu pociągów kujawsko-pomorskiego przewoźnika występują uszkodzenia taboru w wyniku kolizji ze zwierzętami, co zostało przedstawione w tabeli 5.13.

Tabela 5.13. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji z uszkodzeniem taboru według danych Arriva RP Sp. z o.o.

Numer linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń z uszkodzeniem pojazdu
208	Działdowo – Chojnice	14
201	Nowa Wieś Wielka – Gdynia Port	8
207	Toruń Wschodni – Malbork	4

Uszkodzenia pojazdu najczęściej były skutkami kolizji na linii nr 208, następnie na linii nr 201 oraz 207. Obejmowały one przed wszystkim uszkodzenie układu pneumatycznego (8 zdarzeń), uszkodzenie przewodów (6 zdarzeń) oraz zgarniacza (4 zdarzenia). Dwukrotnie pojazd był niezdatny do dalszej jazdy. Wśród zwierząt najczęściej uczestniczących w kolizjach skutkujących uszkodzeniem pojazdu należy wymienić sarny (32%), dziki (29%) oraz jelenie (29%).

Informacje dotyczące opóźnień w wyniku uszkodzenia pojazdu w kolizji z dzikim zwierzęciem zostały przedstawione w tabeli 5.14. Wśród analizowanych przypadków jeden z przejazdów został całkowicie rozwiązany w związku z urwaniem zaworu od przewodu głównego i zasilającego. Zdecydowana większość kolizji, pomimo uszkodzenia taboru, nie wiązała się z opóźnieniem pociągu.

Tabela 5.14. Zestawienie opóźnień związanych z kolizjami z dzikimi zwierzętami ze skutkiem uszkodzenia taboru według danych Arriva RP Sp. z o.o.

Opóźnienie [min]	Liczba opóźnień przejazdu na przybyciu do stacji docelowej
0	16
1–10	6
11–20	2
21–30	3
>30	6

W dwóch sytuacjach opóźnienie przekroczyło 2 godziny – w wyniku przerwania przewodu głównego między stacjami Maksymilianowo – Stronno na linii nr 201 w kolizji z sarną (159 minut opóźnienia) oraz również w pobliżu Maksymilianowa, na szlaku do Kotomierza, na linii 131 kolizja z dzikiem skutkowałą rozszczelnieniem układu pneumatycznego. Zdarzenia te miały miejsce w środku obszarów leśnych otaczających miejscowości.

5.2.5. Koleje Śląskie Sp. z o.o.

Dane otrzymane od śląskiego przewoźnika kolei regionalnych – Koleje Śląskie Sp. z o.o. [158] obejmują okres od stycznia 2020 do października 2024 i informacje związane z kolizją takie jak: miejsce/szlak zdarzenia, numer linii, kilometraż, data i godzina, gatunek zwierzęcia uczestniczącego w kolizji, określenie zdarzenia/uszkodzenie taboru, informacja dotycząca opóźnienia lub jego braku, oraz koszt naprawy szkody (rejestrowany od 2022 do 2024).

Łącznie Koleje Śląskie Sp. z o.o. odnotowały 1402 zdarzenia, z czego 175 skutkowało uszkodzeniem taboru (13%). W tabeli 5.15 przedstawiono zestawienie pięciu linii kolejowych o największej liczbie zdarzeń.

Tabela 5.15. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji według danych Kolei Śląskich Sp. z o.o.

Numer linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń
139	Katowice – Zwardoń	420
140	Katowice Ligota – Nędza	244
1	Warszawa Zachodnia – Katowice	224
143	Kalety – Wrocław Popowice	70
137	Katowice – Legnica	50

Informacje regionalnego przewoźnika pokrywają się z danymi PKP PLK S.A. wskazując na linie nr 139, 140 oraz 1 jako kluczowe w analizie kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami. Sytuacje na linii nr 139 stanowią 30% wszystkich zdarzeń, na linii nr 140 – 17%, a na linii nr 1 – 16%. W dalszej kolejności do zdarzeń często dochodzi na liniach nr 143 i 137 istotnych dla regionu i jego połączeń z województwami opolskim i dolnośląskim.

Wysoka liczba zdarzeń na Śląsku jest prawdopodobnie związana z przeplatającymi się terenami leśnymi oraz przestrzenną zabudową ośrodków miejskich i infrastrukturą drogową, co skutkuje bardzo wąskimi korytarzami, którymi zwierzęta mogą się przemieszczać z jednego obszaru lasu do drugiego. Ponadto sieć transportowa na Górnym Śląsku jest wyjątkowo gęsta, a ruch kolejowy intensywny.

Cztery z pięciu wcześniej wskazanych tras stały także miejscami najczęstszych uszkodzeń taboru w wyniku kolizji ze zwierzętami, czego potwierdzenie znajduje się w tabeli 5.16. Najwięcej kolizji skutkujących uszkodzeniem pojazdu zdarzyło się na linii nr 139 oraz

nr 1 (odpowiednio 27% i 25% wszystkich zdarzeń oraz 11% i 19% względem zarejestrowanych kolizji na tych liniach). Są to istotne elementy sieci transeuropejskiego transportu, co skutkuje poważnymi konsekwencjami dla stabilności ruchu kolejowego w przypadku zablokowania toru i kaskadowych opóźnień przejazdów następnych pociągów. Stosunkowo niewiele uszkodzeń pojazdu zgłoszono na linii nr 140 (tylko 8% w stosunku do zdarzeń na linii), a także na liniach nr 143 Kalety – Wrocław Popowice oraz 148 Pszczyna – Rybnik, przebiegającej przez Park Krajobrazowy Cysterskie Kompozycje Krajobrazowe Rud Wielkich i liczne tereny leśne.

Tabela 5.16. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji z uszkodzeniem taboru według danych Kolei Śląskich Sp. z o.o.

Numer linii	Nazwa linii	Liczba zdarzeń
139	Katowice – Zwardoń	47
1	Warszawa Zachodnia – Katowice	43
140	Katowice Ligota – Nędza	20
143	Kalety – Wrocław Popowice	13
148	Pszczyna – Rybnik	11

Wśród uszkodzeń taboru w wyniku kolizji z dzikimi zwierzętami najczęściej występowały: uszkodzenie zgarniacza (38 zdarzeń), uszkodzenie poszycia (20 zdarzeń), uszkodzenie układu pneumatycznego i uszkodzenie spojlera (po 15 zdarzeń). Ponadto kilkakrotnie miały miejsce złożone uszkodzenia kilku elementów w jednej kolizji, np. układu pneumatycznego, zgarniacza, poszycia i przewodów lub uszkodzenie maźnicy, dwóch piasecznic, dwóch spojlerów, dwóch zgarniaczy i pudła pojazdu. Tak obszerne uszkodzenia wynikały najczęściej z zderzenia ze stadem zwierząt kopytnych. Zwierzęta najczęściej uczestniczące w kolizjach to dziki (33%, w tym w aż 16 przypadkach doszło do zderzenia z całym stadem dzików), sarny (31%), jelenie (30%, w tym trzykrotnie w stadzie), łosie (3,4%).

Dane śląskiego przewoźnika obejmowały również szczegółowe informacje dotyczące opóźnień przejazdu związanego z uszkodzeniem taboru w kolizji ze zwierzętami. W celu ich klarowanego przedstawienia, w tabeli 5.17 znajduje się zestawienie dotyczące liczby pociągów opóźnionych w wyniku pojedynczego zdarzenia na linii, natomiast w tabeli 5.18 – sumaryczne minutowe opóźnienie wszystkich przejazdów w wyniku pojedynczego zdarzenia na linii.

Tabela 5.17. Zestawienie liczby opóźnionych pociągów związanych z kolizjami z dzikimi zwierzętami ze skutkiem uszkodzenia taboru według danych Koleje Śląskie Sp. z o.o.

Liczba opóźnionych pociągów	Liczba zdarzeń z uszkodzeniem pojazdu
0	23
1	106
2	29
3	8
4	3
5	2
6	2
7	1
20	1

Sumaryczne opóźnienia pociągów w większości przypadków nie przekraczały 10 minut (45% zdarzeń) lub mieściły się w zakresie 11–20 minut (22% zdarzeń). Natomiast wysoka liczba opóźnień powyżej 30 minut (16%) świadczy o kolizjach z poważnymi uszkodzeniami taboru, które wstrzymują lokalny ruch na dłuższy czas. Tak było w przypadku zdarzenia na linii nr 1 na szlaku Częstochowa – Poraj, w wyniku którego stwierdzono obszerne uszkodzenie obejmujące maźnicę, piasecznice, spojłery, zgarniacze i pudło nad sprzęgiem.

Tabela 5.18. Zestawienie sumarycznych opóźnień pociągów wskutek uszkodzenia taboru w kolizji z dzikimi zwierzętami według danych Koleje Śląskie Sp. z o.o.

Sumaryczne opóźnienie	Liczba opóźnień przejazdów na przybyciu do stacji docelowej
0	23
1–10	78
11–20	38
21–30	8
>30	28

Kolizja ze stadem łani skutkowałą opóźnieniem siedmiu pociągów o łącznej sumie 384 minut (w tym trzech pociągów o ponad 1,5 godziny). Tak skrajne efekty kolizji wynikały z dużego natężenia ruchu na linii, jako jednej z głównych krajowych i międzynarodowych tras transportowych.

Koleje Śląskie Sp. z o.o. udostępniły także cenne informacje dotyczące szacunkowych kwot napraw wybranych uszkodzeń dla okresu 2022–2024. Przygotowane zostały na potrzeby ubezpieczyciela i nie obejmują one wszystkich przypadków, z racji analizy wartości franszyzy redukcyjnej. Kwoty napraw przyjmują szerokie zakresy w ramach jednego elementu, ze względu na stopień uszkodzenia, kryteria oraz możliwości naprawy. Poniżej przedstawione są koszty naprawy elementów, których uszkodzenia najczęściej występują wskutek potrącenia zwierzyny:

- pudło 100 zł – 6300 zł
- układ hamulcowy 400 zł – 1600 zł
- zgarniacz 906 zł – 43500 zł
- absorber 2100 zł – 9800 zł
- przewody 3000 zł
- spojler 3000 zł – 34900 zł
- piasecznica 10200 zł
- poszycie 11000 zł – 17800 zł
- układ pneumatyczny 20500 zł
- sprzęg 21000 zł
- złożone naprawy 2 600 zł (przewody i sprzęg) – 21 030 zł (reflektory, absorber, malatura).

Powyższe wyliczenie wskazuje, że koszty napraw, w zależności od powagi i obszerności uszkodzenia, są kwotami znaczącymi i redukcja liczby kolizji ze zwierzętami jest zagadnieniem zarówno ważnym dla środowiska, bezpieczeństwa ruchu kolejowego oraz w celu ograniczania strat materialnych i czasowych dla przewoźników.

5.3. Podsumowanie wyników analizy

Wyniki wykonanej analizy danych statystyczny kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w Polsce wskazują na skalę problemu, zarówno pod względem liczby zdarzeń, jak i ich konsekwencji środowiskowych i transportowych. Podsumowanie najważniejszych informacji znajduje się w tabeli 5.19. Można zauważyć, że lata rejestru się powtarzają lub zązębiają, co umożliwia kompleksową analizę czasową na przestrzeni łącznie ośmiu lat. Dane PKP PLK S.A. obejmują wszystkie zgłoszone do zarządcy infrastruktury zdarzenia, natomiast informacje przewoźników dotyczą transportu lokalnego.

Tabela 5.19. Podsumowanie analizy danych dotyczących kolizji pojazdów ze zwierzętami

Zarządca infrastruktury/ przewoźnik	Lata rejestru	Całkowita liczba zdarzeń	Uśredniona liczba zdarzeń/ rok	Całkowita liczba zdarzeń z uszkodzeniem taboru	Zdarzenia z uszkodzeniem taboru/wszystkie zarejestrowane zdarzenia [%]
PKP PLK S.A.	2017 – 2021	19169	3884	–	–
Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o.	2018 – 2022	1103	221	91	8,3 %
Koleje Dolnośląskie Sp. z o.o.	2020 – 2022	1101	367	166	15,1 %
Koleje Małopolskie Sp. z o.o.	2016 – 2022	459	66	93	20,1%
Arriva RP Sp. z o.o.	2016 – 2022	83	12	36	43,4 %
Koleje Śląskie Sp. z o.o.	2020 – 2024	1402	280	175	12,5 %

Najwięcej kolizji miało miejsce w obszarze Dolnego i Górnego Śląska oraz w Wielkopolsce. Najczęściej w wyniku potrącenia dzikich zwierząt uszkodzone były pojazdy obsługiwane przez Koleje Śląskie Sp. z o.o., natomiast najrzadziej przez Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o., natomiast najwyższy procent kolizji z uszkodzeniem taboru względem wszystkich zarejestrowanych zdarzeń zarejestrował prywatny przewoźnik kolejowy Arriva RP Sp. z o.o.

Zwierzęta najczęściej uczestniczące w kolizjach to sarny, jelenie, dziki i sporadycznie łośie. Szczególnie niebezpieczne dla bezpieczeństwa przejazdu są zderzenia ze stadami zwierząt, które skutkują poważnymi i obszernymi uszkodzeniami.

Uszkodzenia dotyczące tylko jednego elementu pojazdu zdarzają się zdecydowanie częściej (w 92%), natomiast zdarzają się też zaawansowane uszkodzenia wielu elementów lub całej części taboru, co wpływa na wartość opóźnienia przejazdu oraz koszty naprawy. Wśród najczęstszych pojedynczych uszkodzeń wskutek zderzenia z przebiegającym przez tory zwierzęciem są uszkodzenia: zgarniacza, spojlera, przewodów, zderzaka, układu pneumatycznego i poszycia. Niektóre inne szkody, takie jak uszkodzenie silnika, sprzęgu, układu paliwowego, czy pantografu, choć zdarzają się rzadko, uniemożliwiają dalszą eksploatację taboru.

Zwiększenie liczby zdarzeń w analizowanym okresie sugeruje, że dotychczasowe środki zapobiegające kolizjom są niewystarczające. Zastosowanie analizy przestrzennej pozwoliło zidentyfikować linie i ich odcinki o szczególnie wysokiej liczbie kolizji, co umożliwia bardziej precyzyjne planowane działań mitygacyjnych. Sezonowy i dobowy rozkład zdarzeń koreluje z naturalną aktywnością zwierząt, co podkreśla konieczność strategii ochrony do warunków środowiskowych.

Dane udostępnione przez przewoźników regionalnych umożliwiły analizę wpływu kolizji na stabilność i płynność ruchu kolejowego. Kolizje ze zwierzętami wiążą się nie tylko

z uszkodzeniami taboru, ale także z opóźnieniami, które w skrajnych przypadkach mogą trwać nawet kilka godzin. W zależności od regionu i charakterystyki linii, skala jest zróżnicowana – szczególnie duża liczba zdarzeń odnotowana została na liniach przebiegających przez kompleksy leśne i obszary o dużych populacjach zwierząt. Choć najwięcej zdarzeń dotyczy saren, jeleni i dzików, szczególnie niepokojące z punktu widzenia ochrony bioróżnorodności są kolizje z łosiami, bobrami, wilkami. Dodatkowe koszty napraw taboru oraz zarządzanie opóźnieniami może stanowić istotne obciążenia dla przewoźników.

Zdaniem ekspertów z sektora transportu kolejowego kolizje ze zwierzętami postrzegane są przede wszystkim jako źródło zakłóceń w ruchu kolejowym – opóźnień, odwołań pociągów i uszkodzeń taboru. Proces przywracania pojazdów do eksploatacji może trwać tygodnie lub miesiące, co wiąże się z kosztami logistycznymi i ubezpieczeniowymi. Problem jest coraz częściej identyfikowany i poruszany, m.in. przez przewoźników, wnioski z poprzednich projektów są wyciągane przy planowaniu kolejnych inwestycji, a w wybranych przypadkach podejmowane są działania prewencyjne [194]. Z perspektywy przewoźnika kolejowego kolizje z dzikimi zwierzętami są postrzegane jako realny, choć nie najwyższy priorytet operacyjny. Dane dotyczące kolizji z dzikimi zwierzętami są gromadzone przez przewoźników i raportowane raz w roku do Urzędu Transportu Kolejowego, jednak system ten pełni obecnie głównie funkcję sprawozdawczą. Brakuje mechanizmów przekształcania tych danych w konkretne działania zaradcze czy inwestycyjne, co ogranicza ich użyteczność decyzyjną. Przewoźnicy dostrzegają skalę zjawiska – choć liczba zdarzeń w skali całego systemu transportowego nie jest wysoka, ich skutki są odczuwalne: opóźnienia, utrata dostępności pojazdów i zwiększenie kosztów eksploatacyjnych [156]. Zgodnie z obowiązującymi procedurami, każdy przypadek zderzenia wymaga zatrzymania pociągu i dokonania oględzin przez maszynistę, co może powodować opóźnienia sięgające kilkudziesięciu minut. Poza wyłączeniem z eksploatacji w przypadku uszkodzenia, dodatkowo konieczne bywa czyszczenie i dezynfekcja pojazdów, szczególnie przy zdarzeniach skutkujących zabrudzeniem złączy międzywagonowych. Wszystkie te czynniki oddziałują na punktualność, dostępność taboru oraz ogólny komfort podróży [157].

PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. w przedstawionym stanowisku podkreślają, że ochrona dzikich zwierząt uwzględniana jest w ramach inwestycji infrastrukturalnych, przede wszystkim tam, gdzie zostało to wskazane w decyzjach o środowiskowych uwarunkowaniach. W ocenie zarządcy infrastruktura torowa nie stanowi istotnej bariery dla migracji większości dużych ssaków, a działania minimalizujące ograniczane są do lokalizacji uznanych za niewrażliwe na podstawie danych o kolizjach, analiz korytarzy ekologicznych oraz prognoz ruchu. Stosowane środki obejmują adaptację istniejących obiektów jako przejść dla zwierząt, budowę przejść z wygradzeniami dla mniejszych gatunków oraz montaż urządzeń odstrasżających typu UOZ-1 [195]. Liczba wdrożonych urządzeń odstrasżających (ponad 1000 sztuk na 73 km linii) może wskazywać na aktywność w tym zakresie, jednak przedstawione stanowisko sugeruje zachowawcze podejście – skoncentrowane na wypełnianiu wymogów formalnych, bez jednoznacznych deklaracji co do systemowej skali działań prewencyjnych. Brakuje odniesienia do szerszego planowania środowiskowego ani wskazań dotyczących integracji ochrony przyrody z długofalowymi strategiami infrastrukturalnymi.

Powyższe wnioski wskazują na potrzebę wdrażania nowych, kompleksowych rozwiązań integrujących aspekty ekologiczne z zarządzaniem infrastrukturą kolejową oraz eksploatacją taboru, odpowiadających na dynamicznie zmieniające się warunki środowiskowe.

6. Klasyfikacja i ocena dostępnych rozwiązań redukujących negatywny wpływ transportu na ekosystemy

6.1. Cele działań i zakres analizy

Wśród kluczowych celów działań środowiskowych związanych z infrastrukturą kolejową znajdują się:

- zwiększenie liczby siedlisk poprzez tworzenie i odtwarzanie naturalnych ekosystemów wzdłuż sieci kolejowej
- redukcja liczby zwierząt ginących na torach, szczególnie gatunków chronionych, poprzez powszechne stosowanie środków zapobiegających kolizjom
- zwiększenie łączności siedlisk wzdłuż sieci kolejowej poprzez wdrażanie spójnych rozwiązań zapewniających integrację terenu
- ograniczenie zanieczyszczenia środowiska poprzez eliminację substancji toksycznych oraz zmniejszenie powierzchni terenów zdegradowanych w pobliżu linii kolejowych.

Analiza przedstawiona poniżej koncentruje się w głównej mierze na zapobieganiu zdarzeń kolejowych z udziałem dzikich zwierząt (lub ich śmierci w wyniku kontaktu z elementami infrastruktury), ponieważ są one kluczowe dla zachowania łączności siedlisk i tym samym ochrony bioróżnorodności ekosystemów. Należy podkreślić, że wiele z proponowanych metod adaptowano z transportu drogowego, gdzie problematyka kolizji ze zwierzętami oraz fragmentacji siedlisk była analizowana znacznie wcześniej. Jednak ich wdrożenie w kontekście kolei wymaga dostosowania do odmiennych warunków operacyjnych [123]. Pozostałe aspekty działań środowiskowych wymagają szczegółowych analiz przyrodniczych oraz ekologicznych i tym samym wdrożenia dostosowanych do nich indywidualnych rozwiązań bazujących na studium przypadku.

6.2. Różne podejścia – metody infrastrukturalne, aktywne, złożone, uzupełniające

Istnieje kilka strategii mających na celu ograniczenie negatywnego wpływu kolei na dziką przyrodę. Jedną z najważniejszych metod jest budowa przejść dla zwierząt, takich jak przejścia górne/nadziemne (ang. *overpasses, ecoducts*) i dolne/podziemne (ang. *underpasses*), które zapewniają bezpieczne przekraczanie torów przez zwierzęta [177]. Podobne rozwiązania są szeroko stosowane na autostradach [196–198].

W przypadku inwestycji drogowych najwyższych klas technicznych (autostrady, drogi ekspresowe) wymóg budowy przejść dla zwierząt może mieć charakter obligatoryjny, jeśli został określony w decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach, co w praktyce jest częste ze względu na obowiązujące procedury oceny oddziaływania na środowisko i stosowanie wytycznych Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA). Odmiennie wygląda sytuacja w sektorze kolejowym, gdzie brak jest dedykowanych przepisów technicznych narzucających konieczność stosowania przejść. Ich realizacja wynika z obowiązujących przepisów środowiskowych oraz adaptacji wytycznych drogowych. Główną podstawą prawną jest Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnieniu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (DZ.U. 2008 Nr 199 poz. 1227) [199]. Zgodnie z art. 66 raport oddziaływania na środowisko musi zawierać opis działań kompensacyjnych

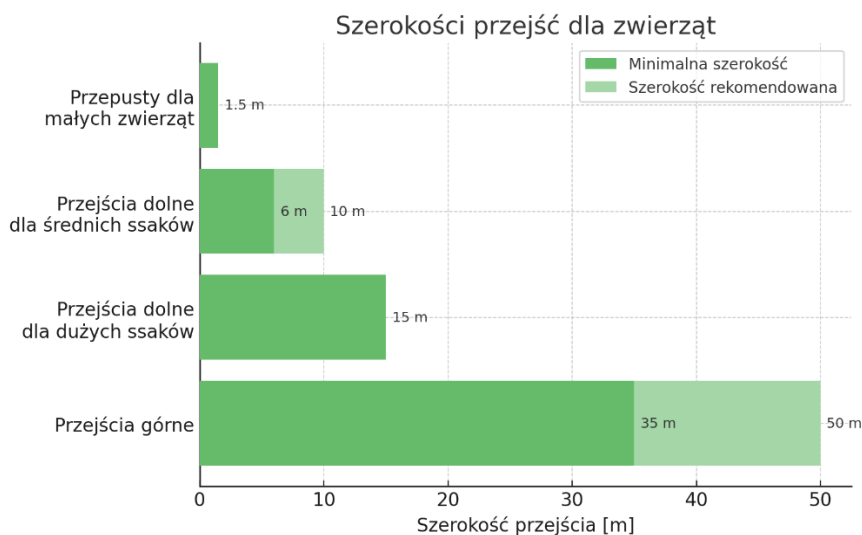
i minimalizujących wpływ inwestycji, w tym dotyczących ochrony tras migracyjnych zwierząt. W przypadku gdy planowana linia kolejowa przecina obszary cenne przyrodniczo lub korytarze migracyjne, Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowiska może, w decyzji środowiskowej, nałożyć obowiązek wykonania przejść dla zwierząt – zarówno nadziemnych, jak i podziemnych. W praktyce ustalenia te stanowią główną podstawę formalną do ich realizacji. Dokumentami określającymi standardy projektowania przejść są „Wytyczne projektowania przejść dla zwierząt na drogach krajowych”, opracowane przez GDDKiA, „Poradnik projektowania przejść dla zwierząt i działań ograniczających śmiertelność zwierząt przy drogach” przygotowany w ramach projektu realizowanego przez Stowarzyszenie Pracownia na rzecz Wszystkich Istot ze środków Funduszu dla Organizacji Pozarządowych, we współpracy i pod patronatem Generalnego Dyrektora Ochrony Środowiska [200], wytyczne europejskie zawarte w materiałach projektu IENE „Biodiversity & Infrastructure: A Handbook for Action” [125] zaadaptowane do warunków infrastruktury kolejowej oraz wewnętrzne procedury i wytyczne PKP Polskich Linii Kolejowych S. A. Za oddolne kompendium wiedzy z zakresu projektowania przejść i przepustów, w szczególności z perspektywy inżynierskiej, można uznać także monografię „Tematyka ekologicznych obiektów gruntowo-powłokowych w budownictwie komunikacyjnym” [201].

Wytyczne te dzielą przejścia dla zwierząt na trzy podstawowe kategorie: przejścia górne (ekodukty), przejścia dolne dla średnich i dużych ssaków, oraz przejścia dla małych zwierząt (przepusty, tunele). Każda z tych kategorii posiada określone minimalne parametry, których spełnienie warunkuje ich funkcjonalność. Kluczowym aspektem skuteczności przejść dla zwierząt są ich wymiary, w szczególności szerokość, ponieważ rozmiar przejścia determinuje, które gatunki będą z niego korzystać [202]. Jednocześnie badania symulacyjne wskazują, że większą łączność siedlisk uzyskuje się, stosując kilka mniejszych przejść (4–7) o łącznej szerokości równej jednemu dużemu, niż w przypadku pojedynczej szerokiej konstrukcji [203]. Dlatego istotnym elementem procesu wdrażania takich rozwiązań jest ich właściwe zaplanowanie i lokalizacja, co wymaga współpracy z ekologami i biologami [204].

Na podstawie wytycznych wskazanych w [205], w przypadku przejść górnych (ekoduktów), przeznaczonych głównie dla dużych ssaków (takich jak jelenie, łosie, dziki, wilki czy niedźwiedzie), zalecana szerokość użytkowa przejścia wynosi co najmniej 35 metrów, przy czym często rekomenduje się szerokości rzędu 50 metrów, zwłaszcza w przypadku autostrad i dróg ekspresowych. Maksymalne nachylenie powierzchni przejścia i nasypów najść to 15 %, stosunek szerokości do długości przejścia powinien mieć wartość > 0,8. Przejścia te powinny być wyposażone w warstwę gleby i roślinności zbliżoną do naturalnej pokrywy terenu, ekrany akustyczne i świetlne ograniczające stres zwierząt, a także w ogrodzenia naprowadzające o wysokości co najmniej 2,0–2,5 metra, które prowadzą zwierzęta do przejścia i ograniczają wtargnięcia na jezdnię w innych miejscach.

Dla przejść dolnych stosuje się różne minimalne wymiary w zależności od grupy docelowej zwierząt. Dla dużych ssaków przejścia powinny mieć szerokość co najmniej 15 metrów, wysokość 3,5 metra (zalecane 5 metrów) oraz tzw. współczynnik otwartości nie mniejszy niż 1,5 (liczony jako iloczyn szerokości i wysokości podzielony przez długość obiektu). Dla średnich ssaków (np. lisy, borsuki, kuny) stosuje się przejścia o szerokości minimum 6 metrów (zalecane 10 metrów), wysokości 2,5 metra (zalecane 3,5 metra) i współczynnika otwartości na poziomie min. 0,7. Natomiast dla małych zwierząt (płazy, gady, drobne ssaki) projektuje się różne typy przejść, których wymiary są dostosowane do grupy docelowej oraz warunków

lokalnych. W przypadku przejść w formie przepustów o przekroju prostokątnym minimalna szerokość użytkowa wynosi zwykle około 1,5 metra i wysokość 1 metr, natomiast dla konstrukcji rurowych średnica minimalna to około 0,5–0,8 m. Obiekty te powinny posiadać powierzchnię pokrytą warstwą gruntu o dużych zdolnościach retencjonowania wody i składać się z grupy przepustów, obejmujących całą szerokość szlaku migracyjnego. Na rysunki 6.1 przedstawiono podsumowanie informacji dotyczących wymaganej szerokości przejść w zależności od ich typu i przeznaczenia.



Rys. 6.1. Zestawienie szerokości przejść dla zwierząt w zależności od typu obiektu

Poza wymiarami przejść istotne znaczenie mają również inne czynniki, takie jak:

- odpowiednia lokalizacja
- warunki fizyczne (np. rodzaj podłoża, oświetlenie)
- przylegające siedliska
- zakłócenia (np. obecność ludzi i ruchu drogowego w pobliżu)
- interakcje międzygatunkowe.

Najskuteczniejsze przejścia dla zwierząt to te, które są zintegrowane z systemami kierunkowymi, czyli ogrodzeniami prowadzącymi zwierzęta w stronę przejść i zapobiegającymi ich przypadkowemu wtargnięciu na tory [206]. Ogrodzenia o wysokości minimum 2 metrów muszą być zakotwiczone w gruncie, aby uniemożliwić podkop, i powinny ciągnąć się wzdłuż odcinka drogi w obu kierunkach od przejścia [126,207]. W praktyce brak ogrodzenia skutkuje bardzo niską efektywnością przejścia i zwiększonym ryzykiem kolizji. Ogrodzenia powinny również zawierać trasy ucieczki lub jednokierunkowe bramki, które umożliwią zwierzętom wydostanie się z obszaru torów w sytuacji, gdy przedostały się przez barierę [206]. W przypadku przejść naziemnych równie ważnym elementem jest otaczająca roślinność, która umożliwia zaadaptowanie wiaduktu do pobliskiego terenu i „wtopienie się” w tło krajobrazu, zazwyczaj lasu [208,209]. Na rysunku 6.2 przedstawiono przykład przejścia naziemnego dla dużych zwierząt, którego rozwiązania konstrukcyjne mogą w ograniczonym stopniu sprzyjać skutecznemu wykorzystaniu przez zwierzęta – pomimo zastosowania ogrodzeń naprowadzających brak odpowiedniej roślinności i duża wysokość przejścia zmniejsza szanse na wtopienie w krajobraz. Natomiast na rysunku 6.3 znajduje się przykład przejścia naziemnego o niewielkim nachyleniu (przyjmującego formę mostu dzięki

wykorzystaniu nasypów po obu stronach drogi) i bujnej roślinności, stanowiącej część otaczającego terenu.



Rys. 6.2. Przejście nadziemne w Rzepin-Kunowice w zachodniej Polsce [212,213]



Rys. 6.3. Przejście nadziemne dla dużych zwierząt niedaleko Hilversum w Niderlandach nad autostradą A27 i przebiegającą równolegle linią kolejową Hilversum – Utrecht [214,215]

Dla małych i średnich zwierząt niejednokrotnie wystarczająca adaptacja przepustów, które były pierwotnie używane do przepływu wody. Polega to na zainstalowaniu dodatkowych półek w przepustach i ogrodzeń prowadzących do wejścia. Rozwiązania takie są stosowane m.in. na linii E-75 Rail Baltica Warszawa – Białystok – granica z Litwą, gdzie na odcinku Sadowne Węgrowskie – Czyżew znajduje się 26 przepustów i dwa zaadaptowane mosty, a na odcinku Czyżew – Białystok 23 przepusty i 7 zaadaptowanych mostów (zdjęcie z monitoringu wykorzystania przepustu znajduje się na rysunku 6.4). Środki te zostały zaplanowane i zaimplementowane podczas modernizacji linii kolejowej współfinansowanej z instrumentu Unii Europejskiej CEF „Łącząc Europę” [210]. W ramach tego samego programu powstają przejścia dla zwierząt na linii E59 na odcinku Poznań Główny – Szczecin Dąbie [211], przedstawione na rysunku 6.5.

Innym sposobem ochrony małych zwierząt (w szczególności płazów i gadów) są przejścia na powierzchni toru, bezpośrednio pod szynami (np. pozostawiając szczelinę między tłuczniem kruszonym kamieniem a stopką szyny) [177,193], przedstawione na rysunkach 6.6 i 6.7.



Rys. 6.4. Monitoring przejścia podziemnego dla małych i średnich ssaków na Rail Baltica [210]



Rys. 6.5. Obiekt na linii kolejowej Poznań–Szczecin dostosowany do migracji zwierząt [211]



Rys. 6.6. Przejścia pod szynami w prefekturze Nara w Japonii [216,217]



Rys. 6.7. Przejście dla zwierząt w podkładach kolejowych (ang. *Sleeper Fauna Passage*, nl. *Dwarsligger Fauna Passage*) – rozwiązanie eksperymentalne wprowadzone przez ProRail i Movares w rezerwacie przyrody Naardemeer w Niderlandach [218]

W praktyce, w opinii ekspertów zajmujących się infrastrukturą kolejową oraz przejściami dla zwierząt nad szlakami komunikacyjnymi, w przeciwieństwie do infrastruktury transportu samochodowego, przejścia nad torami są kosztowne i rzadko stosowane – częściej budowane, gdy przebiegają równolegle z drogą ekspresową lub autostradą (według danych podanych przez GDDKiA w 2019 roku średni koszt budowy górnego przejścia dla zwierząt nad drogą samochodową wynosi ok. 11 mln zł — bez dodatkowych nasadzeń, krajobrazowego wykończenia czy kompleksowego ogrodzenia [219]). Przepusty w nasypie uważane są za rozwiązanie korzystne technicznie, o ile możliwe jest ich poszerzenie. Tego typu rozwiązania, możliwe zwłaszcza przy przebiegu linii po nasypie, mogą łączyć cele hydrotechniczne i środowiskowe, bez konieczności budowy odrębnych obiektów [194]. Warto zaznaczyć, że obecnie funkcjonujące zapisy mają charakter rekomendacji lub wytycznych projektowych, nie zaś norm prawnie obowiązujących, co znacząco osłabia ich egzekwowalność. Brakuje jednoznacznych zasad przypisujących odpowiedzialność za utrzymanie i kontrolę funkcjonowania przejść. W praktyce obiekty te podlegają zarządcy infrastruktury, który nie zawsze dysponuje kompetencjami w zakresie nadzoru przyrodniczego, jednakże mogą zlecać (i zlecają) ekspertyzy [220]. Istnieje również problem nietrafnego doboru lokalizacji przejść dla zwierząt. Podkreśla się kluczowe znaczenie rozpoznania faktycznych szlaków migracyjnych, ponieważ w niektórych przypadkach monitoring porealizacyjny wykazuje, że zbudowane dużym nakładem przejścia góra nie są wykorzystywane [194]. Przejścia dla zwierząt mogą okazać się nieskuteczne z powodu błędów projektowych, takich jak niewłaściwy profil ramp, czy błędny dobór gatunków roślin i wielkości nasadzeń. Istotnym czynnikiem pogarszającym efektywność obiektów jest także brak odpowiedniego utrzymania w trakcie eksploatacji. Wybór rodzaju przejścia powinien być determinowany lokalnym układem terenu.

Na etapie realizacji inwestycji może dochodzić do ograniczania wymiarów przejść z powodów ekonomicznych, mimo że ich efektywność zależy w dużej mierze od odpowiednich parametrów przestrzennych – w szczególności w przypadku przejść nadziemnych. Równocześnie zauważalny jest brak zaktualizowanego katalogu typowych obiektów oraz jednolitych standardów projektowych. Przez pewien czas problemem stanowił brak usystematyzowanych procedur w zakresie doboru parametrów przejść, które uwzględniałyby lokalne warunki środowiskowe, potrzeby konkretnych gatunków oraz kontekst przestrzenny. Obecnie budowane przejścia górne posiadają odpowiednie parametry geometryczne, co wynika z działań inżynierów i przyrodników, w tym między innymi z Katedry Inżynierii Leśnej z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu [220].

Spośród możliwych środków ochronnych, za najbardziej przejrzyste i przewidywalne z punktu widzenia niektórych przewoźników uznawane jest stosowanie ogrodzeń wzdłuż linii kolejowych, analogicznie do praktyk wdrażanych w transporcie drogowym. Wskazuje się na konieczność spójności działań międzysektorowych, szczególnie tam, gdzie kolej przebiega równoległe do autostrady — sytuacje, w których zwierzę napotyka barierę drogową i zawraca na niezabezpieczony tor, mogą paradoksalnie zwiększać ryzyko kolizji. Jednocześnie podkreśla się, że przejścia dla zwierząt – zarówno nadziemne, jak i podziemne – powinny być zawsze skanalizowane ogrodzeniem, aby spełniały swoją funkcję [157].

Alternatywnym podejściem jest zastosowanie aktywnych systemów ostrzegania, uruchamianych w momencie wykrycia obecności zwierzęcia w pobliżu torów. Stosowane sygnały mogą obejmować wizualne, dźwiękowe, węchowe. Badania wskazują, że kombinacja różnych bodźców może znacząco zwiększyć skuteczność systemów odstrasżających [178,221]. Przykładem innowacyjnego rozwiązania jest urządzenie ochrony zwierząt UOZ-1, przedstawione na rysunku 6.8, opracowane we współpracy z biologami, w tym z autorytetem w dziedzinie zoologii behawioralnej, prof. Simoną Kossak. Zasada działania systemu UOZ opiera się na emisji sekwencji dźwiękowych, które symulują sytuację naturalnego zagrożenia dla dzikich zwierząt. Ich celem jest aktywacja automatycznej reakcji instynktu samozachowawczego poprzez oddziaływanie na więcej niż jeden zmysł (najczęściej słuch i wzrok), co zwiększa wiarygodność bodźca. Sekwencje te bazują na naturalnych dźwiękach, takich jak alarmowe głosy ptaków, głosy drapieżników, oraz krzyki zwierząt w stanie bezpośredniego zagrożenia [222].



Rys. 6.8. Wygląd i rozmieszczenie urządzeń UOZ-1 wzdłuż torów (materiały producenta [227])

Urządzenie emituje serię kluczowych bodźców, które powodują, że zwierzęta opuszczają tory kolejowe [223]. Bodźce te obejmują dźwięki, które zwierzęta instynktownie kojarzą z niebezpieczeństwem, takie jak alarm sówki, szczekanie psa, wycie wilka czy pisk dzika. Wyniki monitoringu wskazują na wysoką skuteczność tego rozwiązania na testowanych odcinkach linii kolejowych [224]. Zdaniem pomysłodawcy podstawowe znaczenie ma odpowiednie zsynchronizowanie działania systemu z ruchem pociągów – skuteczność zależy od tego, czy finał sekwencji zbiega się z momentem nadjeżdżania pociągu. Istotna jest także jakość dźwięku – kompresja danych może obniżyć skuteczność oddziaływania przez utratę kluczowych cech akustycznych. Średnia skuteczność systemu oceniana jest na poziomie około 80–90%, przy czym wskazano, że pełnej skuteczności nie da się osiągnąć ze względu

na różnorodność reakcji poszczególnych gatunków i osobników. Czynniki takie jak ruja, głód, stres czy wcześniejsze doświadczenia ze środowiskiem mogą wpływać na zmienność zachowań zwierząt [222]. Urządzenia obecnie stosowane są na niektórych liniach kolejowych w Polsce, na Litwie i w Rosji [176,225]. Choć innowacyjne rozwiązanie zostało docenione w Konkursie Kultury Bezpieczeństwa 2023, organizowanym przez Urząd Transportu Kolejowego i promującym działania, innowacje oraz idee, które realnie wpływają na poprawę bezpieczeństwa w transporcie kolejowym [226], to wciąż spotyka się z nieufnością niektórych instytucji branżowych,

Innowacyjny system wykrywania słońi opracowany przez Sensonic, znany jako system Gajraj [228], wykorzystuje technologię Distributed Acoustic Sensing (DAS) i sztuczną inteligencję do detekcji kroków zbliżających się słońi. System opiera się na światłowodowych kablach zakopanych wzdłuż torów, które umożliwiają monitorowanie w czasie rzeczywistym ruchu słońi w pobliżu infrastruktury kolejowej. Wizualizacja pomiaru drgań w wyniku stąpania słońia, odbierana przez światłowód wzdłuż torów, została przedstawiona na rysunku 6.9. W momencie, gdy zwierzęta zbliżają się zbyt blisko torów, system wysyła ostrzeżenia do personelu kolejowego, co pozwala na podjęcie odpowiednich działań zapobiegawczych, takich jak ograniczenie prędkości pociągu lub jego całkowite zatrzymanie, zapobiegając tym samym śmiertelnym kolizjom z tymi zagrożonymi wyginieciem zwierzętami.



Rys. 6.9. Wizualizacja działania systemu Gajraj z użyciem przewodów światłowodowych w celu detekcji słońi zbliżających się do torów kolejowych [228]

Cennym uzupełnieniem tego typu systemów odstrasżających jest wykorzystanie technologii wczesnego wykrywania, takich jak kamery na podczerwień, radary i czujniki ruchu, które zwiększają skuteczność odstrasżania zwierząt z torów kolejowych. Do innowacyjnych metod należą systemy ostrzegania przed nadjeżdżającym pociągiem w obszarach o wysokim ryzyku kolizji ze zwierzętami, bazujące na detekcji wibracji torów – technologia ta została przebadana w Kanadzie, gdzie testy terenowe wskazały skrócenie czasu przebywania jeleni wapiti w pobliżu torów oraz skuteczność detekcji zbliżających się pojazdów wynoszącą 80% [181]. Podobne projekty wdrożono również w Szwecji (krótkotrwały efekt odstrasżenia jeleni po aktywacji urządzeń odstrasżających) [182] oraz Japonii (zmniejszenie liczby obserwacji jeleni w pobliżu torów o 45%) [183], gdzie infrastrukturalne rozwiązania zintegrowano z systemami akustycznego odstrasżania zwierząt. Wspólne wnioski z przeprowadzonych eksperymentów wskazują na potrzebę łączenia

systemów detekcji obecności pojazdu lub zwierząt na torach z punktowym, krótkotrwałym uruchomieniem sygnałów odstrasżających, także wdrożenie długofalowego monitoringu w celu badania potencjalne habituacji zwierząt do stosowanych sygnałów.

Dodatkową metodą wspomagającą ograniczanie kolizji jest odpowiednie zarządzanie roślinnością wzdłuż korytarzy transportowych. Może to znacząco zmniejszyć atrakcyjność tych obszarów dla dzikich zwierząt. Modyfikacja szaty roślinnej, np. usuwanie określonych gatunków roślin pełniących funkcję pokarmową lub osłonową dla zwierząt, redukuje prawdopodobieństwo wtargnięcia zwierząt na tory – według badań przeprowadzonych w południowej Norwegii zmniejszono w ten sposób liczbę kolizji z łośiami o 49% [229]. Wyniki analiz dla transportu drogowego jednocześnie wskazały, że standardowe praktyki utrzymania pasa przydrożnego — takie jak częste koszenie lub usuwanie krzewów liściastych — mogą niekiedy zwiększać atrakcyjność poboczy dla dużych roślinożerców, w tym łośi, poprzez tworzenie dogodnych warunków żerowania. Przekształcenie otaczającego siedliska w sposób zmniejszający jego atrakcyjność może dodatkowo zniechęcać zwierzęta do zbliżania się do linii kolejowych. Rekomenduje się modyfikację składu roślinności (np. wprowadzanie gatunków mniej atrakcyjnych pokarmowo) oraz łączenie zarządzania zielenią z rozwiązaniami inżynieryjnymi, co zwiększa skuteczność ograniczania kolizji [230]. Podobne zalecenia przedstawia raport Federalnej Administracji Autostrad (ang. *Federal Highway Administration*) wskazując zarządzanie roślinnością jako element kompleksowej strategii redukcji kolizji na obszarach o dużej aktywności zwierząt [231]. Utrzymywanie przejrzystych pasów przytorowych jest możliwe dzięki wykorzystaniu nowoczesnych technologii nowoczesnych technologii, takich jak monitoring z użyciem systemów GIS, czujników czy analiz opartych na sztucznej inteligencji [232].

Kolejną, choć kontrowersyjną, strategią minimalizacji kolizji jest wprowadzenie ograniczeń prędkości na odcinkach o wysokiej aktywności zwierząt, szczególnie o świcie i zmierzchu, kiedy aktywność wielu gatunków jest największa [148,233].

Nowocześniejszym, zintegrowanym z ruchem kolejowy, podejściem jest opracowany na Politechnice Śląskiej model predykcji kolizji pociągów z dzikimi zwierzętami i towarzysząca mu mapa wydarzeń kolejowych [234]. Model zakłada bieżącą analizę i przetwarzanie danych przestrzennych oraz czasowych w celu identyfikacji odcinków torów kolejowych o podwyższonym ryzyku wystąpienia kolizji, z uwzględnieniem zmienności dobowej oraz sezonowej. Wizualnym narzędziem wspomagającym model predykcyjny jest mapa wydarzeń kolejowych, która umożliwia monitorowanie zagrożeń w czasie rzeczywistym i ich analizę w dłuższej perspektywie. W opinii autorki rozwiązania zaletą jest jego potencjał do dostarczania maszynistom aktualnych, dynamicznych informacji o zagrożeniu w konkretnym czasie i miejscu, co może sprzyjać utrzymaniu czujności operacyjnej. Model zaprojektowano jako uniwersalny i skalowalny, możliwy do zastosowania przez różnych przewoźników bez konieczności istotnej przebudowy systemów. Oprócz wartości operacyjnej, narzędzie to może również pełnić funkcję analityczną, wspierając zarządców infrastruktury i instytucje środowiskowe w planowaniu działań kompensacyjnych. Wśród ryzyk związanych z wdrożeniem metody wskazuje się kwestie techniczne i finansowe, a także ryzyko zjawiska habituacji – spadku reaktywności użytkowników na zbyt częste ostrzeżenia. Zaznaczono także, że skuteczne wdrożenie takiego rozwiązania wymaga jego integracji z szerszymi systemami informacyjnymi (np. szkoleniowymi lub wspomagania prowadzenia pociągu) oraz oparcia na współdzielonej bazie danych, powstającej w wyniku realnej współpracy między

przewoźnikami, zarządcą infrastruktury i instytucjami ochrony przyrody. Wśród działań zapobiegawczych podejmowanych przez przewoźników zastosowanie znajdują mechanizmy informacyjne, w tym biuletyny operacyjne zawierające dane o lokalizacji i czasie kolizji oraz ostrzeżenia kierowane do maszynistów. Celem jest zwiększenie świadomości operacyjnej, choć skuteczność takich działań zmniejsza się wraz z przeciążeniem poznawczym prowadzących pojazdy i ograniczoną możliwością reakcji. W tego typu rozwiązaniach kluczowe jest systemowe wsparcie oraz integracja wiedzy i danych międzyinstytucjonalnych [156].

Innowacyjnym pomysłem jest modyfikacja tras migracyjnych zwierząt kopytnych poprzez strategiczne rozmieszczanie sztucznych miejsc żerowania [177]. W ten sposób naturalne korytarze migracyjne mogą zostać przesunięte tak, aby unikać przecięcia z siecią kolejową. W Norwegii dokarmianie łośi zmniejszyło liczbę kolizji o 40% [229], natomiast w Ameryce zastosowanie dokarmiania interwencyjnego w odniesieniu do jeleni mulaków pozwoliło ograniczyć kolizje nawet o niemal 50% [235], przy czym metoda ta rekomendowana jest jedynie w obszarach o szczególnie wysokim ryzyku. Jednocześnie wykazano, że dokarmianie może skutecznie modyfikować trasy migracyjne jedynie w specyficznych warunkach — przede wszystkim w końcowej fazie migracji, w obrębie zimowisk, gdzie dostępność pokarmu jest ograniczona [236].

Choć powyższe metody zostały opisane w publikacjach naukowych, zarówno badawczych jak i przeglądach literatury, nie dokonano kompleksowego porównania, które wspierałoby procesy decyzyjne dotyczące wyboru odpowiednich rozwiązań w praktyce.

6.3. Klasyfikacja i analiza porównawcza metod mitygujących oddziaływanie transportu kolejowego na ekosystemy

W tabeli 6.1 przedstawiono klasyfikację metod zmniejszenia śmiertelności dzikich zwierząt w wyniku kolizji z pojazdami szynowymi wraz z oceną ich zalet i wad. Zostały one podzielone na 3 rodzaje: rozwiązania infrastrukturalne (pasywne), aktywne oraz uzupełniające, które mogą być stosowane w celu ograniczenia ryzyka kolizji oraz ochrony bioróżnorodności wzdłuż linii kolejowych. Przedstawione metody różnią się pod względem kosztów, skuteczności oraz możliwości wdrożenia, co pozwala na ich odpowiednie dostosowanie do warunków środowiskowych i operacyjnych.

Tabela 6.1. Klasyfikacja i ocena metod ograniczających śmiertelność zwierząt w wyniku kolizji z pojazdami szynowymi

Kategoria rozwiązania	Typ	Zalety	Ograniczenia	Uwagi
Infrastrukturalne (pasywne)	Małe przejścia pod torami [69,175]	<ul style="list-style-type: none"> niski koszt łatwe do instalacji 	<ul style="list-style-type: none"> przeznaczone tylko dla małych zwierząt (gady, płazy itp.) 	Trwają badania, ale dotychczasowe monitorowanie wskazuje na skuteczność.
	Ochrona ptaków na sieciach trakcyjnych [175,237]	<ul style="list-style-type: none"> zmniejszenie ryzyka porażeń prądem u ptaków ograniczenie zwarć 	<ul style="list-style-type: none"> wymagana duża liczba urządzeń na danym obszarze koszty instalacji konieczność konserwacji i napraw 	Skuteczność monitorowana w codziennej eksploatacji

Infrastrukturalne (pasywne)	Przejścia nadziemne [196,238]	<ul style="list-style-type: none"> • łatwa możliwość monitorowania skuteczności • najbardziej "naturalne" rozwiązanie • skuteczne dla wszystkich gatunków 	<ul style="list-style-type: none"> • wysoki koszt • wymagają integracji z krajobrazem • wymagają systemów naprowadzających • powinny być planowane na etapie przedinwestycyjnym 	Skuteczne, jeśli są właściwie zaprojektowane, ułożone i konserwowane
	Przejścia podziemne dla małych ssaków [177,239]	<ul style="list-style-type: none"> • możliwość wykorzystania rur, przepustów lub nieużywanych mostów/wiaduktów 	<ul style="list-style-type: none"> • wymagają systemów naprowadzających • ryzyko uwięzienia zwierząt • może stać się pułapką wykorzystaną przez drapieżniki 	Skuteczne dla dróg i autostrad, badania nad zastosowaniem w kolejnictwie trwają.
	Ogrodzenia z gęstych siatek [177,240]	<ul style="list-style-type: none"> • fizyczna bariera uniemożliwiająca dostęp do torów • niski koszt 	<ul style="list-style-type: none"> • ograniczają bioróżnorodność • ryzyko uwięzienia zwierząt – możliwość zranienia zwierząt 	Skuteczne w ograniczaniu kolizji, ale powodują fragmentację siedlisk.
Aktywne	Sygnaly dźwiękowe [178,179,182, 241]	<ul style="list-style-type: none"> • skuteczne dla wielu gatunków • małe urządzenia • nie zakłócają naturalnych zachowań zwierząt 	<ul style="list-style-type: none"> • wymagają integracji z systemem sterowania ruchem kolejowym • wymagają zasilania • nieefektywne dla kolei dużych prędkości i gęstego ruchu pociągów (następstwo ≤ 5 min w aglomeracjach) 	Skuteczność potwierdzona dla wybranych gatunków.
	Sygnaly zapachowe [221,242]	<ul style="list-style-type: none"> • niski koszt • łatwe do aplikacji 	<ul style="list-style-type: none"> • wymagają regularnej aplikacji 	Skuteczność zmienna w zależności od warunków pogodowych i gatunku zwierzęcia.
	Sygnaly wizualne [241,243]	<ul style="list-style-type: none"> • niski koszt • łatwa instalacja 	<ul style="list-style-type: none"> • wymagają energii • muszą być odpowiednio rozmieszczone • nieodpowiednie dla wszystkich gatunków (różne poziomy wzroku) 	Niespójne wyniki w ocenie skuteczności na drogach, niska skuteczność w kolejnictwie.
	Systemy wczesnego wykrywania [244,245]	<ul style="list-style-type: none"> • zwiększają skuteczność ochrony • możliwość optymalizacji 	<ul style="list-style-type: none"> • wysoki koszt • wymagają zasilania • wymagana integracja z systemem sterowania ruchem kolejowym 	Skuteczność potwierdzona dla wybranych gatunków, trwają dalsze badania.

Uzupełniające	Ograniczenie prędkości na odcinkach hotspotów [177]	<ul style="list-style-type: none"> wydłuża czas reakcji zwierząt i umożliwia im ucieczkę z torów 	<ul style="list-style-type: none"> może być problematyczne dla przewoźników 	Skuteczne, jeśli połączone z innymi metodami.
	Usuwanie roślinności wzdłuż torów [246]	<ul style="list-style-type: none"> zwiększa widoczność 	<ul style="list-style-type: none"> wymaga regularnych nakładów finansowych niszczy siedliska może sprzyjać rozprzestrzenianiu inwazyjnych gatunków roślin 	Badania wskazują zarówno pozytywne, jak i negatywne rezultaty.
	Zmiana tras migracyjnych zwierząt (wykorzystanie sztucznych miejsc żerowania) [236,246,247]	<ul style="list-style-type: none"> możliwość zarządzania zachowaniami zwierząt nie wymaga ingerencji w infrastrukturę kolejową 	<ul style="list-style-type: none"> wymaga regularnej kontroli przez leśników i ekologów niezbędny monitoring skuteczności głównie dla kopytnych 	Wymaga długoterminowych badań, ale dotychczasowe wyniki potwierdzają skuteczność.
	Model predykcyjny kolizji [234]	<ul style="list-style-type: none"> wsparcie w zarządzaniu ruchem kolejowym m.in. w postaci ostrzeżeń dla maszynistów łatwy do wdrożenia łatwość do aktualizacji i rozwoju 	<ul style="list-style-type: none"> zależny od jakości danych działanie pośrednie podatność na czynnik ludzki 	Weryfikacja modelu wskazuje na skuteczność, przydatność i uniwersalność.

Ocena skuteczności zastosowanej metody może być przeprowadzona bezpośrednio poprzez monitoring i zbieranie danych (np. śledzenie populacji dzikich zwierząt [139,178,221,239] oraz ocenę jakości siedlisk [208], ustalanie wskaźników wydajności (np. wskaźniki kolizji [177,248], metryki bioróżnorodności [99,240]), wykorzystanie narzędzi technologicznych (np. teledetekcja i czujniki środowiskowe [249–251]) oraz pośrednio za pomocą badań ankietowych wśród interesariuszy, przeglądów eksperckich i badań porównawczych.

W przypadku funkcjonowania przejść naziemnych, które stanowią najbardziej kosztowne i wymagające pod kątem inżynierskim rozwiązanie, wymagany jest monitoring zarówno operacyjny, potwierdzającego zgodność z założeniami projektowymi, jak i naukowy, dostarczającego wiedzy o dynamice migracji i zachowaniu zwierzyny. Fotopułapki nie zapewniają wystarczającej jakości danych, stąd wykorzystywane są odporne na warunki atmosferyczne kamery szerokokątne. Nie istnieje natomiast uniwersalny wskaźnik ilościowy określający skuteczność przejścia dla zwierząt – kluczowa pozostaje ocena jakościowa eksperta, oparta na wiedzy przyrodniczej oraz obserwacji tropów użytkowania obiektu przez zwierzęta. Ocena ta obejmuje najczęściej poziomy intensywności migracji: częsta, umiarkowana, sporadyczna [220]. Iteracyjna ocena, wraz z elastycznymi planami zarządzania, pozwala na dostosowanie środków łagodzących w miarę pojawiania się nowych informacji i postępu technologicznego.

6.4. Kontekst wyboru rozwiązań i wyzwania wdrożeniowe

Istotnym czynnikiem wpływającym zarówno na wybór odpowiednich środków, jak i na ich potencjalną skuteczność, jest aspekt finansowy projektu [252]. Analiza kosztów i korzyści (cost-benefit analysis, CBA) [253] powinna obejmować nie tylko określenie celu i zakresu wdrożenia wybranego rozwiązania, ale także uwzględniać koszty pośrednie (np. administracyjne, wpływ na płynność ruchu kolejowego) oraz koszty bezpośrednie (np. budowa, instalacja, konserwacja i eksploatacja środków zaradczych). Identyfikacja korzyści powinna obejmować zarówno aspekty środowiskowe (np. zatrzymanie utraty bioróżnorodności, poprawa przepuszczalności korytarzy ekologicznych), aspekty bezpieczeństwa (szczególnie redukcję liczby kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami), jak i korzyści ekonomiczne i społeczne związane ze zrównoważonym wykorzystaniem obszarów o wysokiej wartości przyrodniczej. Po przypisaniu określonej wartości pieniężnej każdemu z tych aspektów możliwe jest określenie wskaźnika kosztów i korzyści. Analizy te mogą mieć kluczowe znaczenie dla podejmowania działań łagodzących oraz mogą stanowić narzędzie decyzyjne [254,255]. Ponadto konieczne jest przeprowadzanie regularnych analiz wrażliwości w celu oceny wpływu zmian kluczowych założeń na końcowe wyniki [256].

Kontekst geograficzny odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu projektowania, wdrażania i skuteczności strategii minimalizacji negatywnego wpływu infrastruktury transportowej [89,257]. Mogą one wpływać zarówno na możliwość zastosowania, jak i efektywność wybranych rozwiązań. Różne regiony charakteryzują się unikalnymi ekosystemami oraz specyficznymi cechami krajobrazu, które wymagają dostosowanych strategii. Te różnice mogą determinować zakres działań środowiskowych: inne podejście będzie skuteczne w górskich regionach Europy, inne na afrykańskiej sawannie czy azjatyckich stepach. Klimat również stanowi istotny czynnik, w tym sezonowe zmiany pogodowe i ekstremalne zjawiska atmosferyczne, które należy uwzględnić podczas wdrażania strategii ochronnych oraz projektowania rozwiązań infrastrukturalnych. Ponadto, w obszarach miejskich przestrzeń na duże struktury minimalizujące wpływ transportu może być ograniczona, podczas gdy na terenach wiejskich możliwości wdrożeniowe mogą być bardziej elastyczne.

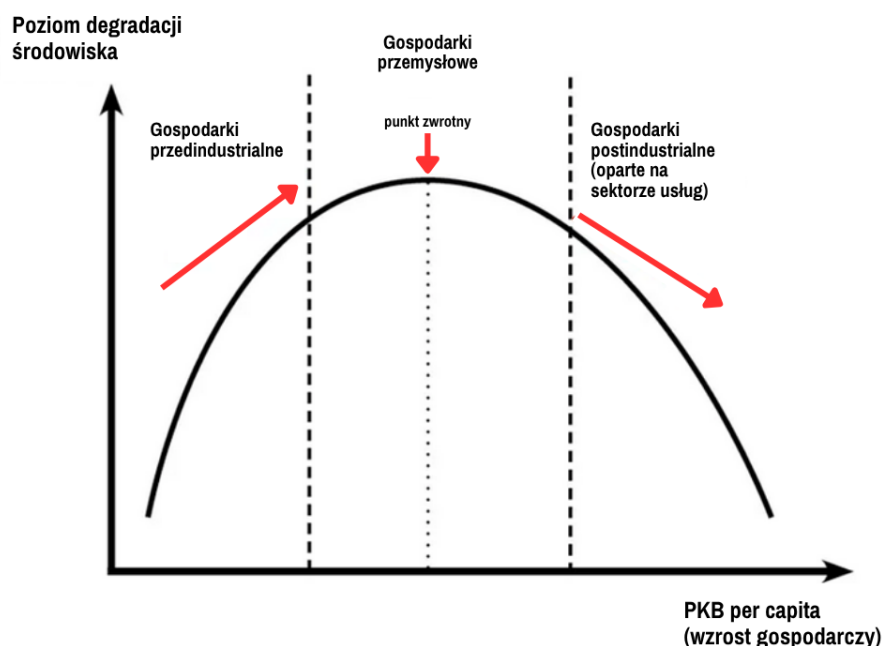
Kontekst kulturowy i gospodarczy znacząco wpływa na wdrażanie strategii minimalizacji wpływu infrastruktury na środowisko. Nacisk na wzrost gospodarczy w porównaniu z ochroną środowiska jest różny w zależności od regionu, odzwierciedlając unikalne priorytety i wyzwania (szczególnie w rozwijających się krajach takich jak BRICS [258]). Jednak koncepcja zrównoważonego rozwoju wymaga zachowania równowagi między aspektami ekonomicznymi, społecznymi i środowiskowymi.

Kompleksowa analiza wskaźników zrównoważonego rozwoju w krajach Unii Europejskiej wykazuje, że sam wzrost gospodarczy nie jest wystarczający do poprawy jakości życia [259]. Badania dotyczące Europy Południowo-Wschodniej wskazują na potrzebę kontekstowych i wielowymiarowych podejść, które uwzględniają lokalne wartości kulturowe i warunki gospodarcze, aby zwiększyć skuteczność działań ochronnych [260]. W takich przypadkach warto podkreślać znaczenie działań środowiskowych i wskazywać różnorodne korzyści dla wielu interesariuszy, np. zwiększenie bezpieczeństwa ruchu kolejowego, czy rozwój turystyki poprzez ochronę cennych obszarów przyrodniczych. Silne ramy instytucjonalne są kluczowe dla integracji kwestii środowiskowych z szerszymi strategiami rozwojowymi, zwłaszcza

w regionach, gdzie wzrost gospodarczy często dominuje nad działaniami na rzecz ochrony przyrody [261].

Istotnym czynnikiem wpływającym na możliwości wdrażania strategii minimalizujących negatywny wpływ transportu kolejowego na środowisko naturalne jest również poziom rozwoju społeczno-gospodarczego danego państwa. Wskaźnik Rozwoju Społecznego (Human Development Index – HDI), obejmujący takie elementy jak długość życia, poziom wykształcenia i dochód narodowy per capita, może stanowić przydatny punkt odniesienia dla oceny potencjału i priorytetów środowiskowych w danym kraju. Państwa o wysokim HDI dysponują zazwyczaj bardziej rozwiniętymi strukturami instytucjonalnymi, większą dostępnością do źródeł finansowania i wyższą świadomością ekologiczną społeczeństwa, co przekłada się na większe zaangażowanie w ochronę bioróżnorodności oraz skuteczniejsze wdrażanie rozwiązań inżynierskich i organizacyjnych sprzyjających zrównoważonemu rozwojowi sektora transportu. W państwach o średnim HDI dominującym celem nadal bywa rozwój infrastruktury i efektywność systemu transportowego, co może ograniczać skalę i zakres działań środowiskowych, jeśli nie są one obligatoryjnie narzucane przepisami lub bezpośrednio powiązane z finansowaniem zewnętrznym [262].

Korelacja między poziomem rozwoju gospodarczego a stopniem ochrony środowiska została opisana w literaturze w ramach tzw. krzywej środowiskowej Kuznetsa (ang. *Environmental Kuznets Curve*, EKC), przedstawionej na rysunku 6.10.



Rys. 6.10. Model krzywej środowiskowej Kuznetsa, ilustrujący zależność pomiędzy poziomem degradacji środowiska a wzrostem gospodarczym (PKB per capita) [265]

Koncepcja ta zakłada, że na wczesnych etapach wzrostu gospodarczego presja na środowisko wzrasta – m.in. wskutek intensyfikacji eksploatacji zasobów naturalnych, rozbudowy infrastruktury oraz industrializacji. Dopiero po przekroczeniu pewnego progu rozwoju (punktu zwrotnego) następuje zmiana paradygmatu: zwiększenie świadomości społecznej i poprawa jakości życia prowadzą do rosnącego zainteresowania ochroną przyrody i wdrażania regulacji środowiskowych [263,264].

W odniesieniu do obszaru transportu kolejowego oznacza to, że państwa o wyższym poziomie HDI chętniej inwestują w przejścia dla zwierząt, urządzenia minimalizujące hałas

czy kompleksowe rozwiązania mitygujące fragmentację siedlisk. Z kolei w krajach o średnim poziomie rozwoju cele te często pozostają podporządkowane priorytetom techniczno-ekonomicznym.

Zestawienie poziomu HDI (który dla Polski wynosi 0,906, 35 miejsce na świecie i 18 miejsce w Unii Europejskiej [266]), praktyk instytucjonalnych oraz zakresu działań środowiskowych wskazuje, że Polska znajduje się w tzw. punkcie przejściowym – pomiędzy fazą wzrostu gospodarczego dominującego nad ochroną środowiska a fazą zwiększonego zaangażowania w działania proekologiczne, zgodnie z modelem krzywej środowiskowej Kuznetsa. W takim przypadku istotne staje się projektowanie takich rozwiązań środowiskowych, które nie tylko spełniają wymogi formalne, ale też generują korzyści społeczne i operacyjne, możliwe do uwzględnienia w analizach efektywności i planowaniu strategicznym. Podnoszenie świadomości społecznej na temat zrównoważonego rozwoju oraz tworzenie międzynarodowych programów w celu pozyskania funduszy na działania minimalizujące wpływ transportu na środowisko może być znaczącym wsparciem.

Na podstawie przeprowadzonych rozmów z przedstawicielami sektora kolejowego wskazano, że jednym z kluczowych wyzwań w planowaniu infrastruktury kolejowej – zwłaszcza w kontekście rozwiązań środowiskowych – pozostaje jakość procesu decyzyjnego na etapie projektowania. Opracowywane rozwiązania powinny być szczegółowo przeanalizowane i poprzedzone rzetelnymi konsultacjami, a nie traktowane jedynie jako formalność służąca realizacji inwestycji. Niewystarczająca staranność w przygotowaniu projektów może prowadzić do sytuacji, w których pomimo poniesienia znacznych nakładów finansowych nie osiąga się oczekiwanych efektów ekologicznych – przykładowo: przejścia dla zwierząt są lokalizowane w miejscach nieodpowiednich z punktu widzenia ich rzeczywistego wykorzystania, a ekrany akustyczne montowane są w lokalizacjach, które nie przynoszą istotnych korzyści w redukcji hałasu. W związku z tym istotne jest stosowanie bardziej precyzyjnych modeli prognostycznych, opartych na lokalnych danych oraz weryfikowalnych pomiarach porealizacyjnych, jak również dążenie do ich dalszego doskonalenia, tak aby możliwe było jak najdokładniejsze odwzorowanie rzeczywistych warunków środowiskowych.

Wymagania środowiskowe, zwłaszcza związane z koniecznością uzyskiwania decyzji środowiskowych również dla modernizowanych linii, stanowią istotne ograniczenie inwestycyjne. Procesy środowiskowe doprowadziły w przeszłości do zablokowania lub znacznego opóźnienia wielu projektów. Przykład linii Legnica–Lubin–Rudna Gwizdanów ilustruje sytuację, w której pojedynczy protest skutkował koniecznością przesunięcia tej realizacji inwestycji (o charakterze rewitalizacyjnym) o kilka lat. Mimo braku obszarów chronionych, proces administracyjny został zahamowany z powodu obawy o hałas, pomimo że projekt zakładał jego redukcję [194].

Eksperti wskazują, że wdrażanie rozwiązań ekologicznych na liniach kolejowych może napotykać ograniczenia wynikające m.in. z uwarunkowań przestrzennych (np. szerokości pasa kolejowego), wymogów formalnych (konieczność uzyskiwania dodatkowych pozwoleń) czy trudności w dopasowaniu do dostępnych budżetów inwestycyjnych. Wskazuje się, że środki te, choć pożądate, bywają pomijane ze względu na ryzyko przekroczenia zakładanych kosztów realizacji. Pojawiają się też wątpliwości dotyczące sposobów oceny opłacalności tego typu inwestycji w warunkach kolejowych, zwłaszcza w kontekście braku jednoznacznych wskaźników zwrotu ekonomicznego. W przypadku modernizacji

istniejących linii, które nie wiążą się z przebudową geometrii toru, rozwiązania służące ochronie dzikich zwierząt zazwyczaj nie są uwzględniane. Tego rodzaju wdrożenia podejmowane są głównie w ramach budowy nowych odcinków [157].

Wdrożenia systemów ochrony zwierząt realizowane są najczęściej przy okazji kompleksowych modernizacji infrastruktury, co wiąże się z ich finansowaniem z funduszy zewnętrznych, głównie unijnych. Pomysłodawca i producent urządzeń odstrasżających UOZ-1 wskazał, że w przypadku inwestycji finansowanych wyłącznie ze środków krajowych lub eksploatacyjnych takie rozwiązania są znacznie rzadziej stosowane. Można także zaobserwować praktykę lokowania urządzeń w miejscach wynikających z dokumentacji środowiskowej sporządzanej bez wnikliwej analizy terenowej. Często występują przypadki niedopasowania lokalizacji systemów odstrasżających zwierzęta do realnych tras migracji. Wskazano, że mapy kolizji, korytarzy ekologicznych oraz lokalizacji urządzeń odstrasżających zwierzęta nie pokrywają się, co świadczy o braku spójnej strategii wdrażania działań minimalizujących. Zdarzają się również decyzje o zbyt małej długości chronionych odcinków, co umożliwia obchodzenie ich przez zwierzęta, przez co działania są nieskuteczne i niezgodne z rzeczywistymi potrzebami migracyjnymi zwierząt [222].

Przedstawione strategie minimalizacji negatywnego wpływu transportu kolejowego na bioróżnorodność oraz kolizje z dzikimi zwierzętami stanowią kompleksowy zestaw działań, które mogą znacząco ograniczyć oddziaływanie infrastruktury kolejowej na środowisko naturalne. Jednak kluczowe jest, aby podejście to było dynamiczne i dostosowywane do lokalnych warunków oraz specyfiki poszczególnych projektów infrastrukturalnych.

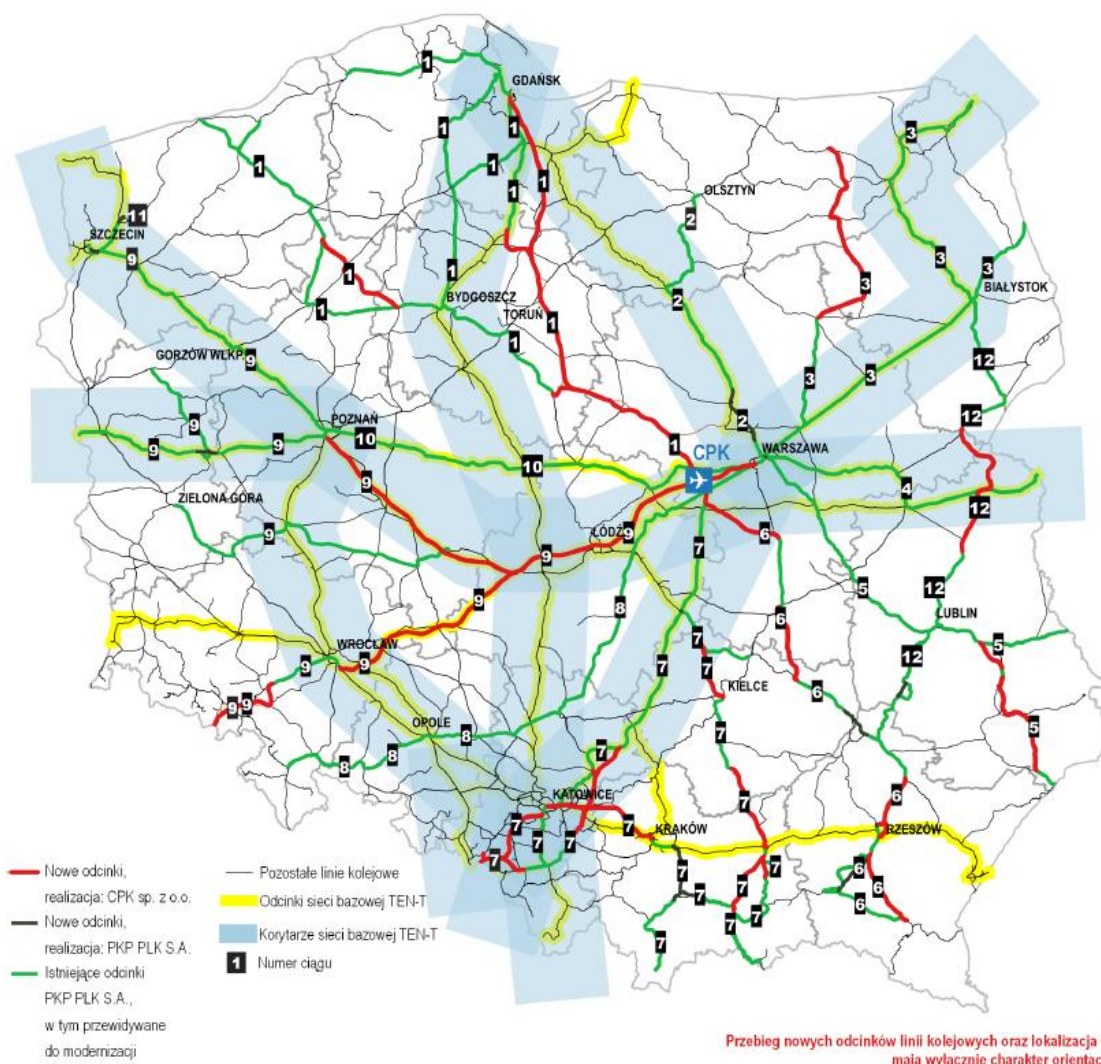
6.5. Przypadek Centralnego Portu Komunikacyjnego – analiza dokumentacji środowiskowej dużej inwestycji

Centralny Port Komunikacyjny (CPK) to jedno z największych współczesnych przedsięwzięć infrastrukturalnych w Polsce, zakładające budowę nowego lotniska oraz rozległej sieci kolejowej, integrującej główne aglomeracje kraju z planowanym węzłem w rejonie Baranowa, pomiędzy Warszawą a Łodzią. Kluczowym komponentem przedsięwzięcia jest Program Kolejowy CPK, obejmujący budowę ponad 2 000 km nowych linii kolejowych, w tym odcinków KDP (kolei dużych prędkości), które mają umożliwić przejazd z Warszawy do najważniejszych miast Polski w czasie do 2,5 godziny. Program ten zakłada realizację 12 tras kolejowych, w tym 10 tzw. „szprych”, które mają połączyć różne regiony Polski z Warszawą i planowanym lotniskiem CPK, które przedstawione są na mapie na rysunku 6.11. Celem jest zapewnienie szybkich połączeń kolejowych między głównymi miastami kraju a centralnym węzłem komunikacyjnym [267].

Tak szeroko zakrojona inwestycja niesie ze sobą istotne skutki środowiskowe – w szczególności w zakresie przekształcenia siedlisk, fragmentacji korytarzy ekologicznych oraz ryzyka kolizji infrastruktury ze zwierzętami. Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie pogładowej analizy wpływu kolejowego komponentu CPK na bioróżnorodność, ze szczególnym uwzględnieniem planowanych działań minimalizujących i kompensacyjnych, a także procedury środowiskowej i założeń strategicznych państwa.

W 2022 r. złożono Raport Oceny Oddziaływania na Środowisko obejmujący wszystkie elementy inwestycji (lotniskowe, kolejowe i drogowe), a decyzja środowiskowa została wydana przez Regionalną Dyрекcję Ochrony Środowiska w Warszawie 7 lipca 2023 r. [268] Z uwagi na liczne odwołania (m.in. gminy Baranów, Teresin, Jaktorów, organizacje społeczne

i osoby prywatne), sprawa trafiła do Generalnej Dyrekcji Ochrony Środowiska i oczekuje na ostateczne rozstrzygnięcie [269].



Rys. 6.11. Kolejowe Liniowe Inwestycje Towarzyszące CPK - projekt Strategicznego Studium Lokalizacyjnego CPK [270]

Dokumentacja OOŚ wskazuje szereg potencjalnych oddziaływań kolejowego komponentu CPK na środowisko. Komponent kolejowy inwestycji CPK przecina liczne lokalne i regionalne korytarze ekologiczne oraz obszary przyrodniczo cenne. Najbardziej narażone są doliny rzek: Pisia Gągolina, Głęboka Struga, Bzura, kompleksy leśne w gminach Baranów, Wiskitki i Teresin, łąki śródpolne i siedliska wilgotne będące ostojami płazów i ptaków. Oddziaływania obejmują:

- trwałą utratę siedlisk (ok. 150 ha)
- efekt barierowy dla dużych i średnich ssaków (m.in. saren, dzików, lisów, łosi)
- kolizje pojazdów szynowych ze zwierzętami
- zakłócenia orientacji echolokacyjnej u nietoperzy i płoszenie ptaków
- przekształcenia hydrologiczne terenów bagiennych i łąk wilgotnych [271,272].

Choć komponent kolejowy nie przecina bezpośrednio obszarów Natura 2000, stwierdzono oddziaływania pośrednie na specjalne obszary ochrony siedlisk „Dąbrowa Radziejowska”, „Łąki Żukowskie” oraz „Puszcę Kampinoską”. Dokumenty środowiskowe zawierają również szczegółowe opisy potencjalnych skutków dla określonych grup zwierząt i siedlisk,

m.in. płazów, gadów, motyli (modraszki, czerwończyki), ptaków łąkowych oraz nietoperzy korzystających z luk w infrastrukturze jako zimowisk i miejsc rozrodu.

W odpowiedzi na te zagrożenia przewidziano szereg działań mitygacyjnych i kompensacyjnych, mających na celu ograniczenie negatywnego wpływu na dziką zwierzęta, w szczególności w zakresie zachowania ciągłości korytarzy migracyjnych oraz zapobiegania kolizjom z pojazdami szynowymi. Zaplanowano budowę przejść dla zwierząt (górných i dolnych – m.in. rejonie Gągoliny, Nowego Oryszewa, Aleksandrowa i doliny Rawki, między Mszczonowem a Wiskitkami) przekształcanie obiektów hydraulicznych w przepusty dla zwierząt (przykładowe lokalizacje obejmują cieki Pisia, Gągolina, Mrowna/Rokitnica), ogrodzenia, schronienia dla nietoperzy oraz monitoring działań ochronnych. Ponadto zaplanowano działania kompensacyjne w postaci odtworzenia siedlisk łąkowych, nasadzenia drzew i krzewów, rewitalizacji oczek wodnych dla płazów i stworzeniu stref buforowych przy mokradłach i ciekach wodnych. Wszystkie obiekty zostaną objęte monitoringiem porealizacyjnym w celu oceny ich funkcjonalności i skuteczności ochrony bioróżnorodności. Planuje się użycie fotopułapek, analizę tropów przy przejściach dla zwierząt, monitoring populacji ptaków i nietoperzy w promieniu do 5 km, ocena sukcesu działań kompensacyjnych (roślinność, siedliska) oraz pomiary hałasu i drgań w pobliżu siedlisk wrażliwych [273]. Na podstawie informacji przedstawionych w dokumentacji OOS planowane działania wydają się być wystarczająco kompleksowe i długofalowe, aby zminimalizować oddziaływanie inwestycji na dzikie zwierzęta i ekosystemy, przy założeniu, że wdrożenie rozwiązań odbędzie się we właściwych lokalizacjach korytarzy migracyjnych przy współpracy interdyscyplinarnych zespołów eksperckich oraz zapewnieniu odpowiedniego utrzymania i monitoringu poinwestycyjnego.

Strategia rozwoju obszaru otoczenia CPK do roku 2044, opracowana przez Ministerstwo Funduszy i Polityki Regionalnej, podkreśla znaczenie integracji inwestycji z systemem ochrony przyrody. Zakłada ona m.in. współzarządzanie środowiskiem, rozwój błękitno-zielonej infrastruktury, renaturyzację cieków i wdrożenie zasady "no net loss"⁶ [274].

Komponent kolejowy CPK wiąże się z wielkoskalowym oddziaływaniem na bioróżnorodność. Choć ingerencja jest nieunikniona, zaplanowane przejścia dla zwierząt, odtworzenia siedlisk i działania kompensacyjne mogą ograniczyć negatywne skutki. Kluczowa będzie ich skuteczna realizacja, oparta na danych monitoringu oraz współpracy z samorządami i jednostkami ochrony przyrody. Uwzględnienie celów strategii wzmacnia perspektywę zrównoważonego podejścia do realizacji tego projektu.

⁶ Zasada „no net loss” (brak netto strat) to koncepcja stosowana głównie w ochronie środowiska i planowaniu przestrzennym, której celem jest zapewnienie, że łączna wartość przyrodnicza obszaru nie zmniejszy się w wyniku realizacji inwestycji lub innych działań człowieka [299]

7. Adaptacyjna rama analityczno-decyzyjna do wdrażania rozwiązań mitygujących wpływ transportu na dzikie zwierzęta (WILD-RAIL)

7.1. Koncepcja i cel opracowania

Proces opracowania autorskiej, adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do wdrażania rozwiązań mitygujących wpływ transportu na dziką przyrodę dla ochrony bioróżnorodności w transporcie kolejowym (akronim WILD-RAIL, ang. *Wildlife-Impact Limitation & Decision framework for Rail transport*), opisanej w niniejszej pracy opierał się na kilku kluczowych etapach, mających na celu rozwiązanie zagadnienia rozwojowego, zgodnie z klasyfikacją Czesława Cempla [187]. Problem ten dotyczył poszukiwania nowej, bardziej elastycznej i adaptacyjnej ramy systemowej, umożliwiającej minimalizację negatywnego wpływu transportu kolejowego na bioróżnorodność ekosystemów, która może być zastosowana nie tylko w projektach infrastrukturalnych, ale także jako bieżąca reakcja na diagnozowane sytuacje zagrażające środowisku, stanowiąc uzupełnienie ogólnych strategii i procedur.

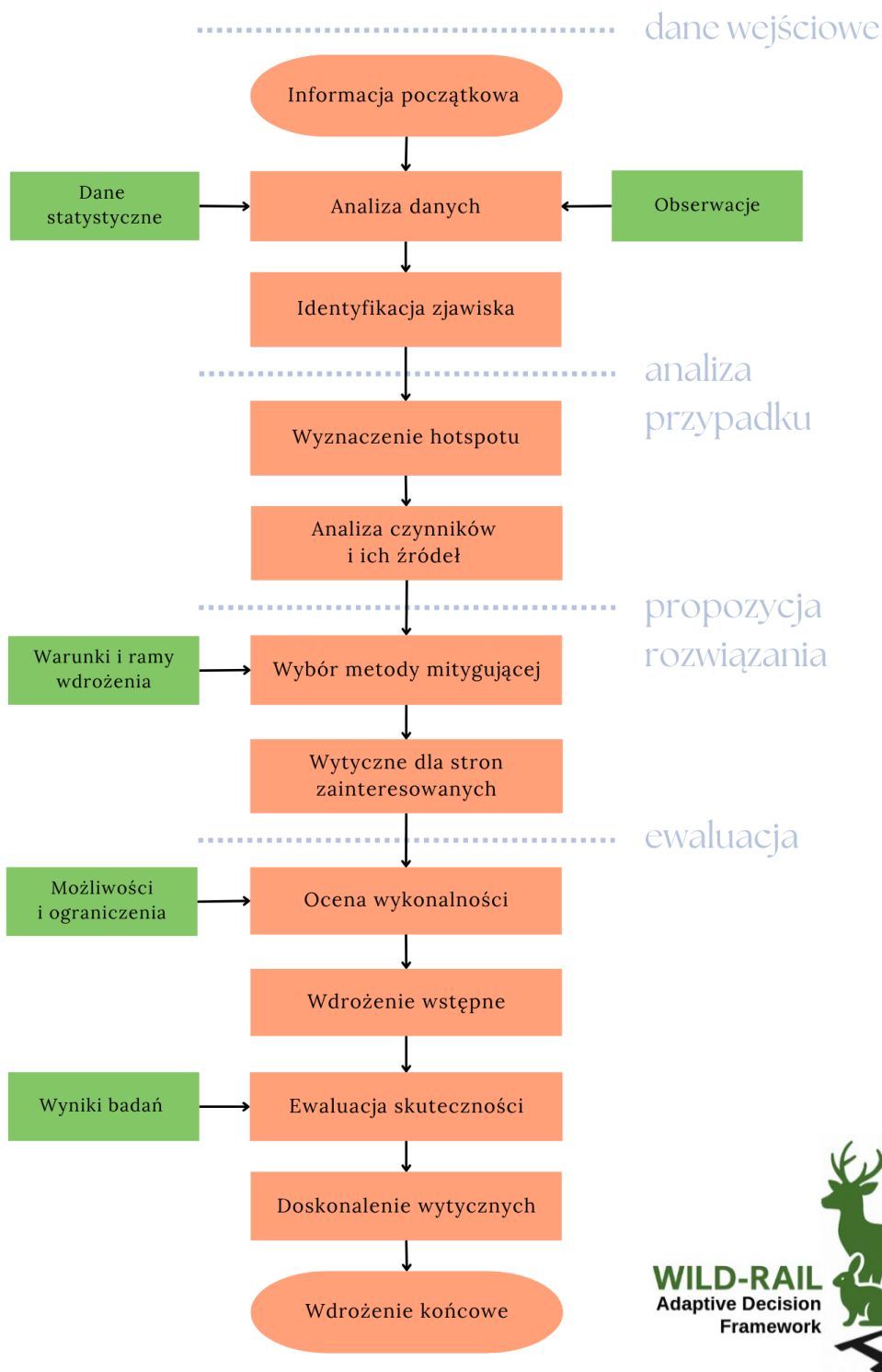
Przeprowadzono systematyczny przegląd literatury [185] w celu określenia aktualnego stanu wiedzy na temat oddziaływań na dzikie zwierzęta w pobliżu torów kolejowych oraz istniejących rozwiązań mitygujących. Analiza luk badawczych [186] pozwoliła na identyfikację braków w dotychczasowych badaniach i metodach, ujawniając, że obecne podejścia nie uwzględniają w sposób całościowy problemu ochrony bioróżnorodności w kontekście transportu kolejowego oraz że brakuje narzędzi, które mogą zostać wykorzystane do identyfikacji niepożądanego zjawiska mającego miejsce w funkcjonującym systemie transportowym, nie wyłącznie w planach i projektach.

Na podstawie zgromadzonych informacji przeprowadzono krytyczną ocenę istniejących rozwiązań z wykorzystaniem metody dedukcji [187] oraz logiki dialektycznej [275]. Analiza ta obejmowała ocenę sposobów, w jakie obecne podejścia uwzględniają ochronę środowiska, oraz ocenę ich skuteczności i ograniczeń.

Po zgromadzeniu i przeanalizowaniu informacji na temat środków minimalizujących wpływ transportu kolejowego na środowisko, a także analizy regulacji środowiskowych i strategii międzynarodowych, konieczne stało się zaproponowanie podejścia umożliwiającego wdrożenie odpowiednich metod dostosowanych do warunków środowiskowych, na różnych etapach rozwoju sieci transportowej, które może służyć jako narzędzie wspomagające podejmowanie decyzji.

Strategię wdrożenia rozwiązań można zdefiniować jako dynamiczny, iteracyjny i wielowymiarowy proces obejmujący różne działania podejmowane przez strony zaangażowane w celu przekształcenia planów w rzeczywistość i osiągnięcia założonych celów. Jej adaptacyjna forma, określana w niniejszej pracy jako rama analityczno-decyzyjna (ang. *framework*) obejmuje podstawowe elementy, takie jak: ocena stanu obecnego, określenie celów, planowanie działań, komunikacja, zarządzanie projektem, realizacja działań, ocena, monitorowanie i doskonalenie. Natomiast wśród kluczowych aspektów wpływających na skuteczność można wymienić określenie warunków efektywności oraz zdolności i kompetencje zespołu [276]. Rama ta może być również postrzegana jako zbiór strategicznych praktyk operacyjnych, które znajdują odzwierciedlenie w konkretnych działaniach przy wykorzystaniu różnych narzędzi [277].

Zaprezentowane na rysunku 7.1 rozwiązanie umożliwia identyfikację bezpośrednich zagrożeń dla dzikich zwierząt, i tym samym dla stanu bioróżnorodności, na terenach oddziaływania transportu kolejowego jako element strategii zrównoważonego rozwoju. Przyjmuje ono formę procesu analityczno-decyzyjnego, którego etapami są: identyfikacja zjawiska, analiza czynników, dobór odpowiednich środków mitygacyjnych oraz monitorowanie i udoskonalanie rozwiązania, wraz ze schematem wytycznych dla stron zainteresowanych.



Rys. 7.1. Graficzne przedstawienie kolejnych etapów ramy WILD-RAIL do minimalizowania negatywnego wpływu elementów systemu transportu kolejowego na środowisko

W niniejszej pracy świadomie przyjęto określenie „adaptacyjna rama analityczno-decyzyjna” (ang. *framework*), ponieważ proponowane rozwiązanie nie stanowi pojedynczej, sztywnej metody ani zamkniętego algorytmu postępowania, lecz strukturalny, a jednocześnie elastyczny zestaw zasad, procedur i narzędzi umożliwiających skuteczne wdrażanie rozwiązań mitygacyjnych w zróżnicowanych warunkach środowiskowych i operacyjnych. Termin „*framework*” jest powszechnie stosowany w literaturze naukowej do opisu konstrukcji pośrednich między koncepcją teoretyczną a metodą szczegółową – zapewniających wystarczający poziom ogólności, by możliwe było ich zastosowanie w różnych kontekstach, a zarazem dostateczny poziom struktury, by ukierunkować proces decyzyjny i wdrożeniowy. Pozwala to zarówno na formalizację procesu, jak i na zachowanie wysokiej elastyczności, co jest kluczowe w przypadku działań wymagających uwzględnienia lokalnych uwarunkowań ekologicznych i technicznych. W tym sensie zastosowanie terminu „*framework*” precyzyjnie oddaje istotę zaproponowanego rozwiązania oraz osadza je w kontekście współczesnych badań nad zarządzaniem oddziaływaniami środowiskowymi.

Podkreślenie adaptacyjnego charakteru tej ramy wynika z założenia, że proces mitygowania oddziaływań transportu kolejowego na bioróżnorodność wymaga ciągłego dostosowywania narzędzi i strategii do zmieniających się uwarunkowań przyrodniczych, przestrzennych, technologicznych i instytucjonalnych. Zgodnie z podejściem iteracyjnym, każdy cykl wdrożeniowy obejmuje etap analizy, implementacji, monitoringu oraz ewaluacji, których wyniki mogą prowadzić do modyfikacji przyjętych rozwiązań. Takie ujęcie jest zgodne z dobrymi praktykami zarządzania środowiskowego oraz z zasadami zrównoważonego rozwoju, promującymi procesy uczenia się organizacji (ang. *learning cycles*) i zarządzania adaptacyjnego (ang. *adaptive management*).

Opracowana rama składa się z czterech wzajemnie powiązanych etapów: pozyskania i analizy danych wejściowych, analizy przypadku, propozycji rozwiązania – obejmującej wybór metody mitygacyjnej oraz sformułowanie rekomendacji – oraz etapu ewaluacji, w którym realizowane są działania wdrożeniowe i ocena ich skuteczności. Trzy pierwsze etapy mają charakter analityczno-decyzyjny i realizowane są głównie przez podmioty lub jednostki projektujące rozwiązanie w odpowiedni na zidentyfikowaną potrzebę, przy czym bazują na dostępnych danych, obserwacjach terenowych oraz analizach eksperckich.

Etap czwarty, obejmujący ocenę wykonalności, wdrożenie wstępne, monitoring oraz ewentualne udoskonalenie i wdrożenie końcowe, stanowi natomiast obszar odpowiedzialności instytucji wdrażającej rozwiązanie w praktyce. Uwzględnia on zarówno czynniki techniczne, ekonomiczne oraz instytucjonalne, mające wpływ na skuteczność i trwałość interwencji.

Tak zdefiniowany proces pozwala na zintegrowanie aspektów koncepcyjnych i operacyjnych w jeden spójny ciąg działań – od identyfikacji problemu po jego praktyczne rozwiązanie – co wzmacnia użyteczność ramy analityczno-decyzyjnej jako narzędzia wspierającego wdrażanie strategii zrównoważonego rozwoju w sektorze transportu kolejowego.

W przeciwieństwie do wcześniejszych opracowań, które często koncentrowały się na pojedynczych zagadnieniach, takich jak kolizje z dzikimi zwierzętami czy fragmentacja siedlisk, niniejsza adaptacyjna rama dokonuje krytycznej oceny istniejących rozwiązań, identyfikuje luki oraz proponuje elastyczne mechanizmy dostosowywania narzędzi do różnorodnych warunków środowiskowych i operacyjnych. Dzięki pełnej integracji

planowania strategicznego, wdrażania oraz monitorowania, rama zapewnia iteracyjne doskonalenie procesu i umożliwi bieżącą modyfikację działań w odpowiedzi na nowe dane oraz zmieniające się uwarunkowania. Jego innowacyjny i holistyczny charakter pozwala na szerokie zastosowanie w zróżnicowanych kontekstach geograficznych i ekonomicznych, stanowiąc istotny wkład w ochronę bioróżnorodności w planowaniu i eksploatacji infrastruktury transportowej.

W kolejnych podrozdziałach szczegółowo opisano kluczowe etapy adaptacyjnej ramy – identyfikację zjawisk, analizę obszarów problemowych (hotspots), czynniki wpływające na środowisko oraz wybór odpowiednich metod minimalizacji negatywnego oddziaływania. Następnie przedstawiono uogólnione, uproszczone studium przypadku oraz elementy rekomendacji dla interesariuszy. Podkreślono także elastyczność i iteracyjny charakter ramy, umożliwiające dopasowanie działań do lokalnych potrzeb i warunków. Główną ideą opracowanej ramy jest wdrażanie odpowiednich rozwiązań oraz realizacja działań zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju transportu kolejowego, przy jednoczesnym zapewnieniu mechanizmów ich długoterminowej ewaluacji i doskonalenia.

7.2. Identyfikacja zjawiska

Koncepcja obejmuje diagnozę problemu negatywnego wpływu transportu kolejowego na dzikie zwierzęta oraz dobór odpowiednich środków minimalizujących to oddziaływanie. W tym celu konieczne jest określenie potrzeby, którą w omawianym przypadku stanowi ograniczenie utraty bioróżnorodności w ekosystemach poddanych fragmentacji przez linie kolejowe. Fragmentacja siedlisk oraz zwiększona śmiertelność zwierząt w wyniku kolizji z pojazdami kolejowymi są kluczowymi czynnikami wpływającymi na ten proces.

Oprócz aspektów ekologicznych należy zauważyć, że zdarzenia z udziałem zwierząt mają również bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo kolejowe, co stanowi jeden z celów zrównoważonego rozwoju. W związku z tym wdrażanie odpowiednich działań zaradczych przynosi pozytywne efekty zarówno dla środowiska naturalnego, jak i dla branży transportowej oraz ogólnego komfortu podróży.

W celu określenia skali tego zjawiska można wykorzystać następujące metody:

- analizę dostępnych danych ilościowych i jakościowych pochodzących od:
 - przewoźników kolejowych, którzy rejestrują zdarzenia
 - zarządców infrastruktury w danym obszarze
 - organizacji zajmujących się ochroną środowiska
 - instytucji państwowych związanych z zarządzaniem zasobami naturalnymi (zarządy Lasów Państwowych, dyrekcje Parków Narodowych, Parków Krajobrazowych oraz obszarów chronionych)
- analizę korytarzy ekologicznych oraz zachowań zwierząt (na podstawie dostępnej literatury oraz wywiadów z osobami bezpośrednio zaangażowanymi w badania monitoringowe)
- osobistą obserwację relacji między środowiskiem naturalnym a transportem kolejowym
- wiadomości medialne (po uprzedniej weryfikacji).

Na podstawie zgromadzonych informacji możliwe jest zidentyfikowanie kluczowych stron zainteresowanych związanych z dostawcami powyższych danych. Do tej grupy należą przede wszystkim przewoźnicy kolejowi i zarządcy infrastruktury, a także instytucje państwowe,

organizacje pozarządowe zajmujące się ochroną środowiska, władze lokalne, badacze przyrody oraz dostawcy rozwiązań technologicznych (producenci i dystrybutorzy systemów oraz urządzeń). Rekomendowane jest, aby w procesie wdrażania rozwiązań mitygacyjnych udział wszystkich tych podmiotów powinien stanowić wymóg formalny, a ich współdziałanie powinno obejmować jasno określony podział ról i odpowiedzialności w zakresie pozyskiwania, przekazywania i analizy danych. Takie podejście zapewnia spójność działań, minimalizuje luki informacyjne i zwiększa skuteczność planowanych działań ochronnych.

W ramach etapu identyfikacji można już przeprowadzić wstępną analizę danych statystycznych, umożliwiającą m.in. wyznaczenie kilku odcinków linii kolejowych o najwyższej liczbie kolizji z wykorzystaniem okna ruchomego, aby wykryć lokalne nagromadzenia zdarzeń oraz określić charakterystykę linii kolejowej i jej otoczenia.

7.3. Analiza hotspotów oraz czynników wpływających na ich lokalizację

Identyfikacja hotspotów, czyli lokalizacji o podwyższonym ryzyku zaistnienia negatywnego oddziaływania na ekosystemy, stanowi kluczowy element w badaniach oraz wdrażaniu odpowiednich rozwiązań. Jest to w szczególności niezbędne w przypadku kolizji pojazdów kolejowych z dzikimi zwierzętami, jak i w innych sytuacjach, np. fragmentacji siedlisk rzadkich gatunków lub gniazdowania ptaków chronionych w pobliżu infrastruktury kolejowej. Proces ten wymaga zrozumienia zachowań zwierząt, zwłaszcza w kontekście korytarzy ekologicznych (analizy ekosystemowe prowadzone przez zoologów, przyrodników oraz leśników, a także doraźne badania telemetryczne), uzyskania danych statystycznych dotyczących ruchu kolejowego (w tym liczby kolizji) oraz bezpośrednich obserwacji terenowych. Wśród istotnych informacji wykorzystywanych w analizie przypadku znajdują się:

- czynniki związane z bezpieczeństwem transportu – liczba i częstotliwość kolizji, konsekwencje dla taboru kolejowego, w tym szacunkowe straty finansowe i/lub czasowe, przepustowość linii oraz jej znaczenie w systemie transportowym
- czynniki środowiskowe – gatunki i populacje zwierząt dotkniętych kolizjami oraz ogólna charakterystyka fauny występującej w danym obszarze, ich znaczenie dla ekosystemu, trasy migracyjne przecinające linie kolejowe, obserwacje zachowań zwierząt w odpowiedzi na obecność torów i pojazdów, badania terenowe oraz wpływ zmian infrastrukturalnych na bioróżnorodność.

W analizie statystycznej kolizji zwierząt z pojazdami w celu wyznaczenia hotspotu na podstawie dostępnych informacji można wykorzystać dwa parametry:

- wartość 75. percentyla z rozkładu liczby kolizji w celu określenia odcinków o długości 1 km, w których liczba kolizji jest równa lub większa od wartości 75. percentyla.

$$i = 0,75 \times (n + 1) \quad (2)$$

gdzie:

n – liczba 2-kilometrowych i kilometrowych odcinków linii kolejowej

i – pozycja 75. percentyla w uporządkowanym rosnąco zbiorze liczby kolizji.

Jeśli i jest całkowite to x_i stanowi wartość 75. percentyla. W przeciwnym wypadku należy interpolować tę wartość:

$$X_P = X_{[P]} + (P - [P]) \times (X_{[P]+1} - X_{[P]}) \quad (3)$$

gdzie:

X_P – interpolowana wartość percentyla

$X_{[P]}$ – wartość na pozycji $[P]$

$X_{[P]+1}$ – wartość na następnej pozycji

$[P]$ – zaokrąglenie w dół

- wskaźnik częstości kolizji na 1000 przejazdów (na podstawie informacji o przepustowości linii, tj. liczbie przejazdów w określonym czasie):

$$W_{KP1000} = \left(\frac{L_K}{L_P} \right) \cdot 1000 \quad (4)$$

gdzie:

W_{KP1000} – wskaźnik częstości kolizji na 1000 przejazdów

L_K – liczba kolizji na danym odcinku linii kolejowej w określonym czasie

L_P – liczba przejazdów pociągów na tym odcinku linii kolejowej w tym samym czasie.

Zastosowanie wartości 75. percentyla pozwala skupić się na miejscach o dużej koncentracji kolizji przy zachowaniu skalowalności analizy – zarówno szerokiej identyfikacji obszaru, jak i precyzyjnej lokalizacji. Z kolei wykorzystanie wskaźnika częstości kolizji na 1000 przejazdów pozwala na ujęcie zjawiska w sposób proporcjonalny do ruchu pociągów, a nie tylko na podstawie samej liczby zdarzeń, dzięki czemu można lepiej porównać odcinki linii kolejowych o różnej przepustowości, co nadaje analizie cechy niezależności od natężenia ruchu i większej intuicyjności.

Wartość 1,0 została przyjęta jako próg wskaźnika W_{KP1000} sugerujący potencjalny hotspot, ponieważ oznacza co najmniej jedną kolizję na 1000 przejazdów. Wartość została przyjęta arbitralnie jako wstępne kryterium, co wynika ze wstępnych analiz statystycznych, dynamicznie zmieniającego się rozkładu jazdy pociągów, czyli zmiennej przepustowości linii, licznych modernizacji infrastruktury kolejowej wpływających na przebieg tras i częstotliwość kursowania pociągów oraz braku pełnych danych historycznych dotyczących ruchu kolejowego w okresie objętym analizą liczby kolizji.

Na potrzeby analizy przypadku zwiększonej śmiertelności zwierząt w wyniku potrąceń przez pojazdy szynowe, hotspot można zdefiniować statystycznie jako odcinek linii kolejowej, na którym:

- liczba kolizji przekracza wartość 75. percentyla na długości 2 km, 1 km lub 0,5 km linii i/lub
- wskaźnik W_{KP1000} jest równy lub większy niż 1 lub jest wyraźnie wyższy w porównaniu z innymi odcinkami lub liniami kolejowymi.

Wskazane jest uzupełnienie analiz ilościowych w formie wniosków z badań i monitoringu środowiskowego, bezpośrednich obserwacji oraz dodatkowych informacji uzyskanych od stron zainteresowanych, np. zarządców terenów leśnych, aby uzyskać kompleksowy obraz zjawiska.

Takie podejście umożliwia określenie miejsc, w których szlaki migracyjne lub istotne siedliska zwierząt przecinane są przez linie kolejowe, co pozwala na priorytetowe i precyzyjne wdrażanie rozwiązań środowiskowych. W przypadku analizy oddziaływania transportu

kolejowego na łączność ekosystemów, ochronę bioróżnorodności siedlisk oraz wpływu na mniejsze zwierzęta, niezgłaszane w rejestrze kolizji z pociągami, w wyniku czego próbką statystyczna jest niewystarczająca do analizy ilościowej, większy nacisk powinien być położony na jakościowe analizy środowiskowe.

Przeprowadzenie takiej analizy hotspotu (zarówno w sposób kompleksowy, jak i poprzez kompilację badań z różnych obszarów) pozwala na identyfikację czynników wpływających na zjawisko. Czynniki te mogą być klasyfikowane według ich źródła (wynikające z działalności człowieka lub procesów naturalnych) oraz charakteru (bezpośrednie i pośrednie), co zostało przedstawione w tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Czynniki wpływające na występowanie zwierząt na torach kolejowych, które powodują kolizje z pojazdami

	Czynniki związane z działalnością człowieka	Czynniki środowiskowe
pośrednie	<ul style="list-style-type: none"> • plany rozwoju i modernizacji linii • bez szczegółowych analiz środowiskowych (lub brak wdrożonych odpowiednich rozwiązań) • świadomość nt. zagrożeń wśród stron zainteresowanych 	<ul style="list-style-type: none"> • ukształtowanie terenu • pogoda / warunki klimatyczne • otaczająca roślinność
bezpośrednie	<ul style="list-style-type: none"> • przepustowość linii kolejowej • zastosowana infrastruktura • prędkość jazdy pociągu • wyrzucanie odpadków na tory • odsłonięta sieć trakcyjna 	<ul style="list-style-type: none"> • migracje zwierząt • zachowanie zwierząt (w tym reakcje zwierząt na tory i zbliżające się pojazdy) • żerowanie w pobliżu torów • gniazdowanie w elementach infrastruktury

Kolejnym etapem jest analiza możliwości ograniczenia tych czynników oraz ocena ryzyka ich dalszego rozwoju. Analiza ta może być przeprowadzona indywidualnie, w oparciu o konsultacje z ekspertami, bądź przy wykorzystaniu dostępnych narzędzi, takich jak SWOT, PESTEL lub inne metody przydatne w analizie strategicznej i scenariuszowej [278–280].

W odniesieniu do czynników naturalnych zaleca się poszerzenie wiedzy na temat tras migracyjnych oraz wzorców zachowań zwierząt, ponieważ umożliwia to dobór odpowiednich środków zaradczych oraz planowanie działań, analogicznie do analizy warunków klimatycznych i pogodowych. Warunki pogodowe i klimat, zwłaszcza sezonowe zmiany, mają istotny wpływ na wzorce zachowań zwierząt oraz ich szlaki migracyjne [139], co sprawia, że wzajemne zależności oraz potencjalna zmienność tych aspektów stanowią istotne ryzyko.

W kontekście ukształtowania terenu możliwe jest zarządzanie obszarami przejściowymi, np. poprzez kontrolowanie roślinności. Gdy analiza topografii terenu pozwala na ocenę wykonalności wdrożenia rozwiązań infrastrukturalnych, takich jak przejścia nadziemne i podziemne dla zwierząt, które omówiono w Rozdziale 6.

Czynniki związane z działalnością człowieka mogą być natomiast łatwiej kontrolowane. Przede wszystkim, przyczyny pośrednie można ograniczyć poprzez włączanie analiz środowiskowych do strategii rozwoju oraz implementację odpowiednich rozwiązań już na

etapie planowania budowy lub modernizacji infrastruktury kolejowej. Szansą w tym zakresie jest wykorzystanie funduszy unijnych lub międzynarodowych programów wspierających zrównoważony rozwój.

Ponadto istniejąca infrastruktura może zostać dostosowana poprzez wdrażanie systemów odstraszania zwierząt na torach oraz osłon ochronnych na przewodach napowietrznych. Inną metodą ograniczenia kolizji jest wprowadzenie lokalnych ograniczeń prędkości na odcinkach o podwyższonym ryzyku kolizji ze zwierzętami.

7.4. Wybór rozwiązań mitygacyjnych

Kluczowym aspektem przy wyborze rozwiązań lub zestawu rozwiązań mitygacyjnych jest możliwość ich wdrożenia w danym przypadku. Niezbędna jest również ocena wykonalności, obejmująca warunki terenowe, aspekty ekonomiczne oraz regulacje prawne – nie tylko w kontekście ograniczeń wdrożeniowych, ale także jako szansę na skorzystanie z programów i projektów wspierających zrównoważony rozwój. Następnym etapem jest wybór odpowiedniego rozwiązania lub kilku rozwiązań uzupełniających się. Wśród metod ograniczania negatywnego wpływu na ekosystemy można wyróżnić metody infrastrukturalne (przejścia nadziemne i podziemne, przepusty pod torami, bariery ochronne), metody aktywne (odstraszanie zwierząt znajdujących się w pobliżu torów w momencie nadjeżdżającego pociągu, bez fizycznej bariery), metody zintegrowane (w tym połączenie przejść z systemami wczesnego ostrzegania lub odstraszania z torów) i metody uzupełniające (zarządzanie roślinnością, ograniczanie prędkości jazdy). Metody te, wraz z ich cechami charakterystycznymi oraz oceną skuteczności, zostały szczegółowo opisane w Rozdziale 6.

Wśród czynników, które mają wpływ na decyzję o zastosowaniu konkretnego rozwiązania, można wymienić:

- cel wdrożenia (np. poprawa łączności siedlisk, zapobieganie kolizjom pojazdów ze zwierzętami, ograniczenia śmiertelności zwierząt spowodowanej kontaktem z infrastrukturą kolejową)
- specyfika rozwiązania do gatunków zwierząt
- uwarunkowania krajobrazowe, w tym dostępność lokalizacyjną
- ograniczenia prawne oraz dodatkowe możliwości wynikające z regulacji
- potencjał integracji z infrastrukturą kolejową
- nakłady finansowe i potencjalne źródła dofinansowania (krajowe i międzynarodowe programy wsparcia inwestycji)
- wykonalność techniczna rozwiązania.

Znaczenie ma również zaproponowanie metody oceny skuteczności wdrożonych środków. Uniwersalnym i efektywnym podejściem jest długoterminowy monitoring połączony z analizą danych, umożliwiający określenie trendów. Doraźne metody szacunkowe mogą obejmować analizę wskaźników, analizę kosztów i korzyści (CBA), a także analizę SWOT wdrożenia danego rozwiązania. W przypadku systemów o wysokim stopniu złożoności technologicznej może znaleźć zastosowanie także analiza rodzajów i skutków możliwych błędów (FMEA). Ponadto w ocenie skuteczności wdrożonych rozwiązań można wykorzystać metody statystyczne stosowane w analizie stabilności procesów produkcyjnych, takie jak karta Shewharta [281].

7.5. Rekomendacje dla stron zainteresowanych

Rekomendacje dla stron zainteresowanych minimalizacją negatywnego wpływu transportu kolejowego na ekosystemy stanowią kluczowy mechanizm modelu, ponieważ zawierają najistotniejsze wnioski z przeprowadzonej analizy oraz realistyczne propozycje wdrożenia zmian. Dokument ten powinien obejmować następujące elementy:

- opis zjawiska oraz przyczyn problemu
- wskazanie czynników wpływających na sytuację
- proponowane rozwiązania, wraz z oceną ich wykonalności
- możliwości monitorowania oraz oceny skuteczności wdrożonych środków.

Wymienione elementy stanowią rdzeń rozwiązań dla problemów kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami oraz zaburzeń w rozwoju ekosystemów, tym samym wpływając na stan lokalnej bioróżnorodności, i są centralnym punktem dokumentu zawierającego rekomendacje dotyczące wdrażania odpowiednich działań. Jednak oprócz samego przedstawienia problemu i metod jego rozwiązania, istotne jest również podkreślenie korzyści wynikających z zastosowania środków redukujących te negatywne skutki. Korzyści te powinny być analizowane zarówno w odniesieniu do konkretnego obszaru, jak i całego ekosystemu.

Chociaż głównym celem rekomendowanych działań jest ochrona środowiska naturalnego, niezwykle istotne jest również uwzględnienie aspektów związanych z bezpieczeństwem transportu oraz płynnością ruchu kolejowego. Dlatego zaleca się, aby rekomendacje uwzględniały również:

- propozycje skutecznego angażowania stron zainteresowanych w tym osób działających na różnych szczeblach administracyjnych i w różnych sektorach
- sposoby włączenia zasad zrównoważonego rozwoju, ze szczególnym uwzględnieniem ochrony bioróżnorodności, do strategii i planów działania interesariuszy
- metody komunikacji zasad zrównoważonego rozwoju oraz potrzeby wdrażania odpowiednich rozwiązań, co przyczyni się do zwiększenia świadomości społecznej w tym zakresie.

Takie podejście pozwala na wdrażanie skutecznych działań opartych na współpracy między sektorami transportu, ochrony środowiska oraz administracji publicznej, co sprzyja długofalowej ochronie bioróżnorodności oraz poprawie bezpieczeństwa kolejowego.

7.6. Wdrożenie, monitoring i ewaluacja

Po opracowaniu wytycznych dla interesariuszy następuje etap oceny wykonalności proponowanego rozwiązania. W tym momencie kluczowe znaczenie mają uwarunkowania instytucjonalne, finansowe oraz społeczne, które wpływają na realną możliwość wdrożenia działań mitygacyjnych. Szczególnie istotne są czynniki społeczno-ekonomiczne, takie jak budżet jednostek wdrażających, priorytety rozwojowe w danym regionie oraz poziom świadomości ekologicznej interesariuszy. W sprzyjających warunkach, gdzie ochrona środowiska stanowi element polityki publicznej, możliwe jest podjęcie kompleksowych działań, w tym budowy dużych obiektów inżynierskich, jak naziemne przejścia dla zwierząt. W przypadku ograniczeń budżetowych lub niskiego poziomu akceptacji społecznej, zakres wdrażanych działań może zostać ograniczony. Dlatego też już na etapie planowania inwestycji kolejowych należy uwzględnić możliwość integracji rozwiązań

proekologicznych, które mogą być wówczas współfinansowane w ramach krajowych lub międzynarodowych programów wsparcia.

Jeśli ocena wykonalności potwierdza zasadność i realność implementacji, realizowane jest wdrożenie wstępne wybranej metody. Następnie prowadzi się monitoring skuteczności, którego metody zostały szczegółowo omówione w Rozdziale 6. Monitoring ten pozwala na zebranie danych niezbędnych do przeprowadzenia ewaluacji oraz — w razie potrzeby — wprowadzenia zmian.

Na podstawie zebranych wyników możliwe jest udoskonalenie wytycznych, co stanowi istotny element iteratywnego, dynamicznego podejścia do zarządzania wpływem kolei na środowisko. Elastyczność metody pozwala na jej dostosowanie do zmieniających się uwarunkowań oraz potrzeb różnych użytkowników i interesariuszy.

Ostatecznym etapem jest wdrożenie końcowe, które opiera się na doświadczeniach z etapu pilotażowego oraz zaktualizowanych zaleceniach. Takie podejście umożliwia stopniowe udoskonalanie wdrażanych rozwiązań i zwiększenie ich skuteczności w długiej perspektywie czasowej.

7.7. Możliwość implementacji w formie narzędzia

Przedstawiona w niniejszym rozdziale adaptacyjna rama analityczno-decyzyjna, ze względu na swoją modułową i sekwencyjną strukturę, może stanowić podstawę do opracowania narzędzia wspierającego proces decyzyjny w zakresie ochrony bioróżnorodności w transporcie kolejowym. Ujęcie go w formie interaktywnego formularza lub arkusza umożliwiłoby szybkie i spójne przeprowadzenie analizy odcinka linii kolejowej oraz wygenerowanie rekomendacji działań, z zachowaniem logiki przyjętej procedury.

Opracowane podejście może zostać zaimplementowane w postaci prostego narzędzia analitycznego wspierającego proces decyzyjny w zakresie minimalizowania wpływu infrastruktury kolejowej na bioróżnorodność. Narzędzie takie mogłoby mieć formę formularza, w którym użytkownik odpowiada na zestaw pytań zamkniętych oraz wprowadza podstawowe wskaźniki ilościowe. Na tej podstawie system dokonywałby automatycznej analizy progowej i generował raport w formie mapy drogowej (ang. *roadmap*) przedstawiającej zalecane działania. W raporcie tym znalazłyby się m.in. informacje o tym, jakie działania należy podjąć w analizowanym przypadku, kto jest odpowiedzialny za ich realizację oraz do kogo należy przekazać określone informacje.


Podstawowy mechanizm działania takiego narzędzia mógłby obejmować:

- wprowadzenie danych wejściowych, w tym odpowiedzi typu „tak/nie” (np. czy analizowany odcinek przebiega przez obszary chronione, czy przecina korytarze ekologiczne) oraz wartości liczbowych (np. wskaźnik W_{KP1000} – liczba kolizji/1000 pociągów)
- automatyczną weryfikację, czy określone wskaźniki przekraczają ustalone wartości graniczne
- generowanie rekomendacji opartych na logice drzewa decyzyjnego
- możliwość zapisu raportu w formacie PDF, HTML lub arkusza kalkulacyjnego.

Narzędzie mogłoby zostać zrealizowane w prostej formie, np. jako arkusz kalkulacyjny (np. Excel) z wbudowanymi formułami i warunkowym formatowaniem, lub jako program w języku Python z intuicyjnym interfejsem graficznym (ang. *graphical user interface*, GUI) – wersja poglądowa takiego narzędzia opracowanego w języku Python w środowisku Jupyter

Notebook znajduje się na rysunku 7.2. Obie wersje dawałyby możliwość dostosowania do potrzeb poszczególnych instytucji – poprzez modyfikację listy wskaźników, wartości progowych czy treści rekomendacji – a ich implementacja nie wymagałaby zaawansowanych zasobów technicznych.

WILD-RAIL – Analiza i mapa drogowa



Czy analizowany odcinek przebiega przez obszary objęte ochroną przyrody (Natura 2000, Park Krajobrazowy, Rezerwat)?

Ochrona przyrody:

Czy odcinek linii przecina korytarze ekologiczne łączące duże kompleksy leśne lub siedliska?

Korytarze ekologiczne:

Wskaźnik WKP (kolizje / 1000 pociągów) dla badanego odcinka

WKP:

WKP > 1.0:

Czy w pobliżu odcinka odnotowano znaczną śmiertelność dzikich zwierząt (np. >50 zdarzeń w ciągu 5 lat)?

Śmiertelność > 50 / 5 lat:

Jakie gatunki najczęściej uczestniczą w kolizjach na tym odcinku?

Gatunki:

Czy linia była modernizowana w ostatnich 15 latach?

Modernizacja:

Czy podczas ostatniej modernizacji uwzględniono środki ochrony środowiska (np. przejścia dla zwierząt, ogrodzenia, systemy odstrasżające)?

Ochrona środowiska:

Czy przepustowość linii jest większa niż 50 pociągów/dobę?

Przepustowość:

Jaka jest maksymalna prędkość pociągów na odcinku?

Prędkość:

Czy występuje ograniczona widoczność torów z otaczającego terenu (np. nasyp, wykop, gęsta roślinność)?

Widoczność:

Zakończ i wygeneruj raport

WILD-RAIL – Analiza i mapa drogowa (raport) | 2025-08-14 13:43

OCENA SYTUACJI: Stan wymagający podjęcia działań
Czynniki wpływające: obszary chronione, korytarze ekologiczne, WKP ≥ 1.0, znaczna śmiertelność w pobliżu

Zalecane kroki (mapa drogowa):

- 1) Zainicjować spotkanie z zarządcą infrastruktury i przewoźnikiem w celu potwierdzenia wyników analizy.
- 2) Włączyć do procesu lokalne instytucje związane ze środowiskiem.
- 3) Zanówić szczegółowy monitoring (fotopułapki, analiza tropów, raport sezonowy).
- 4) Przygotować koncepcję techniczną potencjalnych rozwiązań mitygujących
- 5) Zintegrować działania z planowanymi inwestycjami.
- 6) Przygotować harmonogram wdrożenia z podziałem odpowiedzialności i finansowania.

Zapisz raport do HTML

Rys. 7.2. Wersja poglądowa interaktywnego formularza narzędzia WILD-RAIL, opracowanego w języku Python w środowisku Jupyter Notebook

W perspektywie dalszego rozwoju narzędzie to mogłoby zostać zintegrowane z istniejącymi systemami rejestrowania zdarzeń, w tym bazami danych dotyczącymi kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami, co pozwoliłoby na automatyczne pobieranie aktualnych informacji. Możliwe byłoby także włączenie modelu predykcji ryzyka kolizji, opisanego w Rozdziale 6, umożliwiającego prognozowanie obszarów o dużej liczbie zdarzeń. Kolejnym kierunkiem rozwoju mogłoby być zastosowanie algorytmów sztucznej inteligencji

do identyfikacji wzorców w danych oraz proponowania optymalnych działań mitygacyjnych. Uzupełnieniem funkcjonalności mogłaby być wizualizacja wyników analizy w układzie przestrzennym, np. w formie modułu mapowego. Wersja narzędzia opublikowana w formule otwartego dostępu (open-source) dawałaby możliwość jego dalszego rozwijania przez zainteresowane podmioty i dostosowywania do zmieniających się potrzeb oraz uwarunkowań prawnych.

Wskazana propozycja stanowi jedynie przykład potencjalnego kierunku praktycznego wdrożenia przedmiotowej ramy. Implementacja w formie narzędzia decyzyjnego umożliwiłaby nie tylko ułatwienie jej stosowania przez różne instytucje, lecz także zwiększenie spójności podejmowanych działań w skali krajowej. Jednocześnie otwarta konstrukcja pozwalałaby na elastyczne dostosowywanie do specyfiki danego obszaru, wymagań organizacyjnych czy zmian legislacyjnych.

7.8. Podsumowanie

Przedstawione rozwiązanie stanowi propozycję adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do ograniczania negatywnego wpływu transportu kolejowego na dzikie zwierzęta i bioróżnorodność ekosystemów (WILD-RAIL), uwzględniającej zarówno aspekty środowiskowe, jak i społeczne, infrastrukturalne oraz instytucjonalne. Poprzez zintegrowane etapy – od identyfikacji zagrożeń i analizę czynników źródłowych, przez dobór i ocenę metod mitygacyjnych, aż po wdrożenie, monitoring i doskonalenie – możliwe jest opracowanie rozwiązań dostosowanych do lokalnych warunków oraz potrzeb interesariuszy. Ze względu na swoją modułową strukturę, rozwiązanie to może być w prosty sposób zaimplementowane w formie narzędzia, umożliwiającego ujednoczenie procedur oceny oraz usprawnienie procesu wyboru działań mitygacyjnych.

Pomimo potencjału aplikacyjnego zaproponowana rama analityczno-decyzyjna nie jest pozbawiona ograniczeń i wyzwań związanych z jej implementacją. W istotnym stopniu jej koncepcja opiera się na analizie eksperckiej oraz studiach przypadków, co ogranicza możliwość pełnej adaptacji uzyskanych wniosków do różnorodnych kontekstów, w tym odmiennych uwarunkowań środowiskowych i instytucjonalnych (np. linii kolejowych podlegających innym systemom prawnym lub organizacyjnym). Ponadto rekomendowane działania mitygacyjne nie charakteryzują się jednakową skutecznością, która w znacznym zakresie jest zależna od specyfiki lokalnej, co uniemożliwia ich traktowanie jako rozwiązań uniwersalnych. Wdrożenie ramy wymaga odpowiedniego zaplecza kompetencyjnego i zasobów (organizacyjnych, technicznych, finansowych), co wyklucza jej wykorzystanie jako prostego narzędzia możliwego do implementacji bez odpowiedniego przygotowania. Kolejnym ograniczeniem jest zależność od dostępności danych statystycznych i środowiskowych, a także konieczność zapewnienia wysokiego poziomu koordynacji pomiędzy stronami zainteresowanymi, co w praktyce może wydłużać i komplikować proces decyzyjny. Z tej perspektywy szczególnym wyzwaniem pozostaje czasochłonność całego procesu w warunkach ograniczeń czasowych. Istnieje także ryzyko nadmiernego schematyzowania koncepcji WILD-RAIL, polegające na zredukowaniu jej do zestawu czynności proceduralnych i pominięcia pogłębionej analizy kontekstu lokalnego.

Kluczowym zadaniem jest włączenie proponowanej ramy analityczno-decyzyjnej w obowiązujące procedury planistyczne, inwestycyjne i środowiskowe, tak aby mogła

wspierać je w sposób komplementarny, wzmacniając wymiar interdyscyplinarny podejmowanych decyzji.

Dotychczasowe zastosowanie ramy ogranicza się do studiów przypadków o charakterze teoretycznym (przedstawionych w Rozdziale 8 i Rozdziale 9), jednak prezentacja koncepcji w gronie ekspertów spotkała się z pozytywnym odbiorem. Wskazywano na jej potencjalną przydatność w praktyce oraz wartość w systematyzowaniu podejścia do ochrony bioróżnorodności w transporcie kolejowym. Potwierdza to zasadność dalszych prac nad jej rozwinięciem, praktyczną implementacją i pogłębioną ewaluacją w warunkach rzeczywistych.

8. Studium przypadku: linia kolejowa nr 356, Owińska – Bolechowo

8.1. Wprowadzenie i przyczyny wyboru

Niniejsze studium przypadku stanowi szczegółową prezentację procesu zastosowania autorskiej ramy WILD-RAIL w praktyce do identyfikacji, analizy i wyboru rozwiązań mitygacyjnych w rzeczywistych warunkach funkcjonowania infrastruktury kolejowej na przykładzie wybranego odcinka linii kolejowej.

Identyfikację odcinków o najwyższej liczbie kolizji przeprowadzono metodą okna ruchomego o długości 5 km, przesuwanego co 1 km wzdłuż każdej linii kolejowej, zgodnie z podejściami stosowanymi w badaniach nad hotspotami kolizji w transporcie lądowym [282–284]. Dla każdego przesunięcia obliczono liczbę zdarzeń z udziałem zwierząt w analizowanym przedziale kilometrów (zakres lewostronnie domknięty, prawostronnie otwarty). Następnie, aby uniknąć wielokrotnego raportowania tego samego hotspotu, zidentyfikowano najlepsze, nienakładające się okna: w pierwszym kroku wybrano okno o największej liczbie zdarzeń, a w kolejnym usunięto z analizy wszystkie pozostałe okna, które pokrywały się z nim na danej linii. Procedurę powtarzano iteracyjnie aż do wyłonienia dziesięciu odcinków o najwyższych wartościach. Tak otrzymane wyniki przedstawiono w tabeli 8.1, w której zaprezentowano numer linii kolejowej, kilometraż początku i końca 5-kilometrowego odcinka, liczbę odnotowanych na nim kolizji oraz charakterystykę środowiska, przez które dany odcinek przebiega.

Tabela 8.1. Zestawienie 5-kilometrowych odcinków linii kolejowych z największą liczbą zdarzeń

Nr linii	Nazwa linii	KM	Liczba zdarzeń	Najbliższe stacje/przystanki osobowe	Charakterystyka obszarów przylegających
139	Katowice – Zwardoń (AGC/TEN-T)	10–15	156	Katowice Podlesie – Mąkolowice	Obszary zamieszkane, tereny leśne.
356	Poznań Wschód – Bydgoszcz Główna	9–14	104	Owińska – Bolechowo	Obszary zamieszkane, tereny leśne, linia przecina korytarz ekologiczny łączący Park Krajobrazowy Puszcza Zielonka na wschodzie oraz obszar specjalnej ochrony Natura 2000 Biedrusko na zachodzie.
91	Kraków Główny – Medyka (AGC/ TEN-T)	25–30	75	Szarów – Cikowice	Obszary zamieszkane, tereny leśne
357	Sulechów – Luboń k/Poznania	96–101	72	Strykowo Poznańskie – Trzebow Rosnówko	Obszary zamieszkane (miasto Stęszew), tereny leśne, linia przecina obszar Wielkopolskiego Parku Narodowego.
139	Katowice – Zwardoń (AGC/TEN-T)	20–25	65	Tychy Żwaków – Kobiór	Tereny leśne, korytarz ekologiczny prowadzący do Parku Krajobrazowego “Cysterskie Kompozycje Krajobrazowe Rud Wielkich” na zachodzie.
140	Katowice Ligota – Nędza	3–8	64	Katowice Piotrowice – Mikołów	Obszary zamieszkane, tereny leśne.
91	Kraków Główny – Medyka (AGC/ TEN-T)	52–57	58	Brzesko Okocim - Sterkowice	Tereny leśne
356	Poznań Wschód – Bydgoszcz Główna	21–26	54	Przebędowo - Łopuchowo	Obszary zamieszkane, na południowym wschodzie linia kolejowa graniczy z Parkiem Krajobrazowym Puszcza Zielonka oraz przecina korytarze ekologiczne łączące Park z sąsiednimi terenami leśnymi.
356	Poznań Wschód – Bydgoszcz Główna	14–19	52	Bolechowo – Murowana Goślina	Obszary zamieszkane, tereny leśne, korytarz ekologiczny łączący Park Krajobrazowy Puszcza Zielonka na wschodzie oraz obszar specjalnej ochrony Natura 2000 Biedrusko na zachodzie.
139	Katowice – Zwardoń (AGC/TEN-T)	99–104	51	Rajcza – Sól	Obszary zamieszkane, tereny leśne, linia przecina obszar Żywieckiego Parku Krajobrazowego, otoczona przez korytarze ekologiczne.

Do dalszej analizy wybrano linię kolejową nr 356 (Poznań Wschód – Bydgoszcz Główna), a w szczególności odcinek 9–14 km, ze względu na jego wysoką pozycję w powyższej tabeli oraz dodatkowe informacje uzyskane od przewoźników regionalnych, wskazujące na powtarzalność zdarzeń w tym rejonie. Odcinek ten charakteryzuje się przebiegiem przez obszary leśne i korytarze ekologiczne łączące Park Krajobrazowy Puszcza Zielonka z innymi kompleksami leśnymi, co sprzyja częstemu przecinaniu linii kolejowej przez dzikie zwierzęta. Potrącenia na wyznaczonym odcinku 9–14 km najczęściej dotyczyły saren (61%), dzików (18%), jeleni (13%) oraz danieli (5%).

Według danych Kolei Wielkopolskich (w latach 2018–2022) na linii 356 miało miejsce 181 zdarzeń, w tym między stacjami Czerwonak – Murowana Goślina aż 82. W zdecydowanej większości przypadków dochodziło do opóźnienia pociągu w wyniku kolizji (w tym w 48% zdarzeń powyżej 10 minut opóźnienia), a w 13 przypadkach doszło do uszkodzenia taboru (16% zdarzeń). W jednym zdarzeniu brał udział łoś, który ze względu na swoje duże rozmiary i masę stanowi szczególne zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu kolejowego – zderzenie z tym gatunkiem doprowadziło do wyłączenia pojazdu z dalszej eksploatacji wskutek uszkodzenia zbiornika powietrza.

Wyboru miejsca do dalszej analizy dokonano biorąc pod uwagę:

- liczbę zdarzeń określoną we wstępnych analizach statystycznych (na całej linii 356 zgłoszono 383 przypadki potrąceń w ciągu 5 lat objętych bazą danych PKP PLK, czyli w przybliżeniu 3 kolizje na 2 tygodnie)
- wartości przyrodnicze obszarów przylegających (rezerwat Natura 2000 oraz Park Krajobrazowy)
- przecinanie korytarzy ekologicznych, łączących oba siedliska.

8.2. Charakterystyka linii

Linia kolejowa nr 356 to jednotorowa, w większości niezelektryfikowana trasa o długości 128,9 km, odgrywająca kluczową rolę w komunikacji regionalnej, łącząc mniejsze miejscowości z aglomeracją poznańską. Przepustowość linii wynosi średnio 38 pociągów dziennie (stan na luty 2025), jednakże pełni ona istotną funkcję jako kanał dojazdowy do Poznania dla mieszkańców mniejszych miejscowości. Trasa przebiega przez liczne tereny leśne, co nadaje jej unikalny charakter krajobrazowy. Linia użytkowana jest przez przewoźnika Koleje Wielkopolskie S.A.

W latach 2011–2013 przeprowadzono jej modernizację, finansowaną częściowo z funduszy Unii Europejskiej w ramach Wielkopolskiego Regionalnego Programu Operacyjnego na lata 2007–2013. Prace te pozwoliły zwiększyć prędkość pociągów do 120 km/h oraz poprawić komfort podróży, co skutkowało skróceniem czasu przejazdu na trasie Poznań – Wągrowiec i zwiększeniem liczby pasażerów z 2,2 tys. do 3,6 tys. dziennie. Dodatkowo powstały nowe przystanki: Czerwonak Osiedle i Zielone Wzgórze [285,286].

W grudniu 2024 decyzją władz regionalnych – Województwa Wielkopolskiego, PKP PLK i Ministerstwa Infrastruktury – zainicjowano prace koncepcyjne dotyczące elektryfikacji odcinka Poznań Wschód – Wągrowiec, będącego pierwszą częścią szerszego planu (do Gołańczy). W styczniu 2025 podpisano list intencyjny w Murowanej Goślinie, w którym samorządowcy i ministerialni przedstawiciele zadeklarowali wspólne opracowanie dokumentacji koncepcyjnej, w tym studium wykonalności, harmonogramu oraz źródeł finansowania – z perspektywą realizacji inwestycji do roku 2028 [287,288]. Projekt

przewiduje analizę przepustowości linii oraz ewentualne lokalizacje dodatkowych mijanek (Roszkowo Wągrowieckie, Grylewo), tak aby umożliwić bezpieczny i efektywny ruch elektrycznych składów pasażerskich. Obecnie trwają intensywne prace na etapie przygotowania koncepcji i pozyskiwania funduszy – zarówno krajowych, jak i unijnych – z uwzględnieniem celów polityki klimatycznej UE i Krajowego Planu Odbudowy. Planowana elektryfikacja odcinka Poznań–Wągrowiec pozwoli na wyeliminowanie pojazdów spalinowych z węzła poznańskiego, co przyczyni się do zwiększenia przepustowości i poprawy płynności ruchu.

Na rysunku 8.1 przedstawiono przebieg linii kolejowej nr 356 na tle połączeń kolejowych w Polsce.



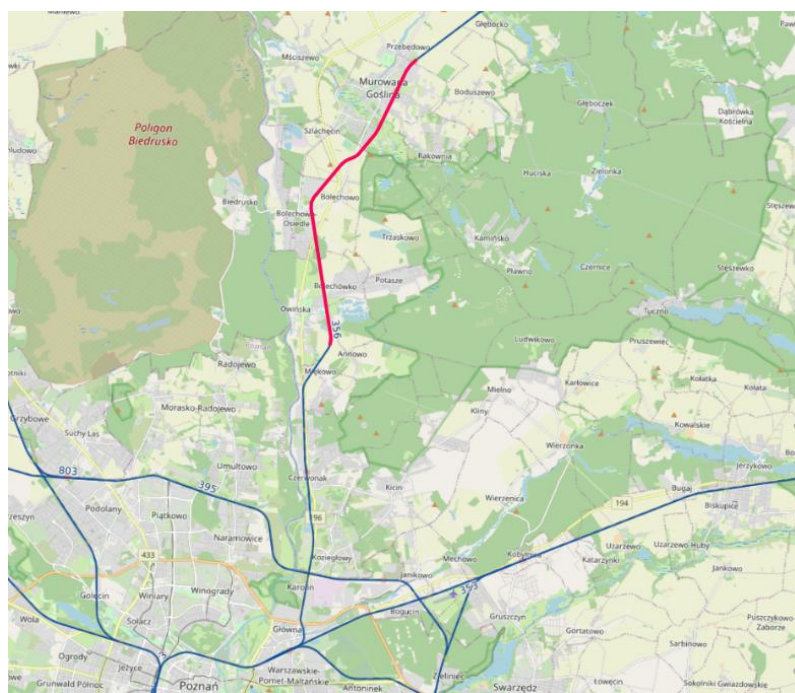
Rys. 8.1. Linia 356 na tle połączeń kolejowych w Polsce [184]

Analizując przebieg linii kolejowej nr 356 między 10 a 20 km (najbliższe stacje/przystanki osobowe Owińska – Przebędowo), łatwo zauważyć, że rozgranicza ona dwa znaczące przyrodniczo tereny leśne – Obszar Natura 2000 Biedrusko na zachodzie oraz Park Krajobrazowy Puszcza Zielonka na wschodzie (rysunek 8.2).

Obszar Natura 2000 Biedrusko to cenny przyrodniczo teren położony na północ od Poznania, obejmujący dawne poligonowe tereny wojskowe. Jest to obszar specjalnej ochrony siedlisk (nr PLH300002) i częściowo także obszar specjalnej ochrony ptaków (nr PLB300002). Charakteryzuje się mozaiką siedlisk, w tym wydmami śródlądowymi, torfowiskami, łąkami i lasami, które stanowią ostoję dla wielu rzadkich gatunków fauny i flory. Spotkać tu można m.in. wilka, bociana czarnego, żółwia błotnego oraz unikatowe rośliny kserotermiczne. Dzięki wieloletniemu użytkowaniu wojskowemu teren zachował swoją naturalność, a ograniczona działalność człowieka sprzyja ochronie przyrody.

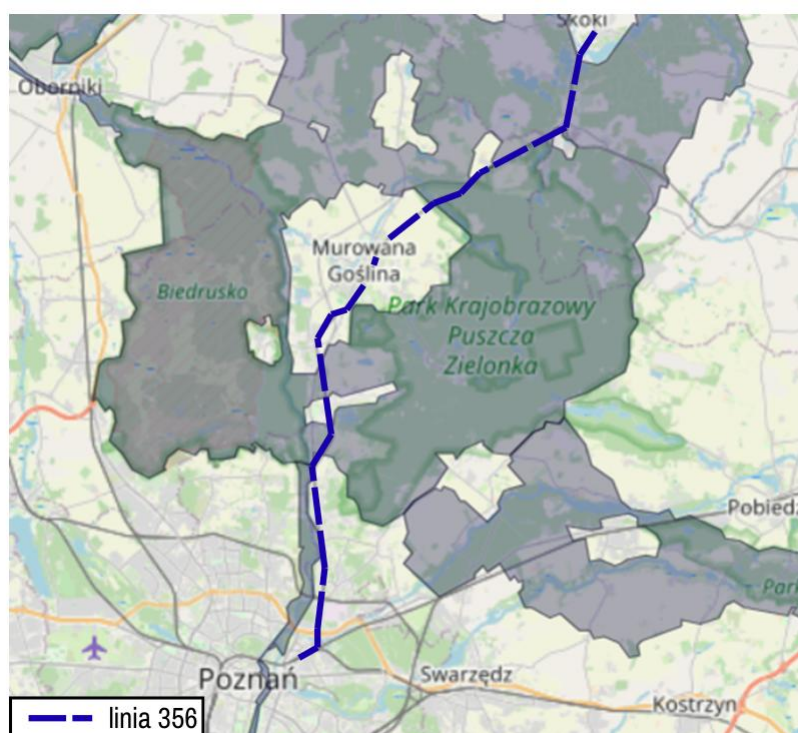
Park Krajobrazowy Puszcza Zielonka to obszar chroniony położony na północny wschód od Poznania, utworzony w 1993 roku, obejmujący fragment największego kompleksu leśnego w regionie – Puszczy Zielonki. Wśród ssaków dominują jeleni szlachetny, sarna europejska

i dzik, które można spotkać na polanach i w gęstych lasach. Liczne są również borsuki, lisy, kuny leśne i tchórze europejskie. W ostatnich latach obserwuje się wilki, które wracają na te tereny, stanowiąc cenny element ekosystemu. Puszcza jest również szlakiem migracyjnym innego chronionego gatunku – łosi [289]. Park pełni ważną funkcję rekreacyjną i edukacyjną, zachowując jednocześnie przyrodnicze bogactwo regionu.



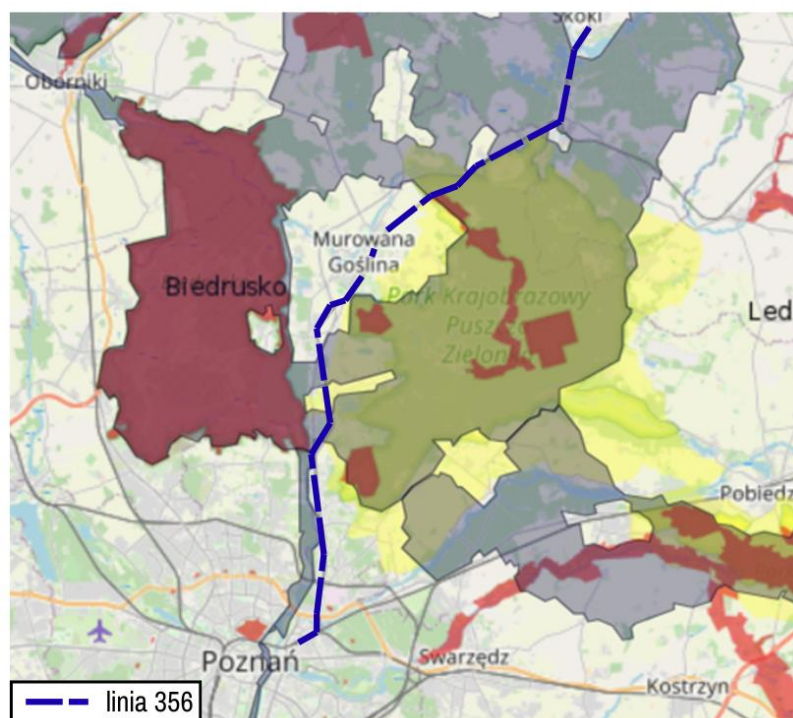
Rys. 8.2. Fragment przebiegu linii nr 356 – czerwonym kolorem oznaczono badany odcinek 10–20 km [184]

Korytarze ekologiczne 2012, łączące oba obszerne siedliska przecinają tory kolejowe na północ i południe od Murowanej Gośliny, co zostało przedstawione na rysunku 8.3.



Rys. 8.3. Mapa korytarzy ekologicznych 2012 – wycinek dla badanego regionu [59]

Korytarze ekologiczne przecinające tory kolejowe są wąskie z racji zabudowań miejskich prężnie rozwijających się jako przedmieścia Poznania. Na rysunku 8.4 przedstawiono korytarze ekologiczne wraz z obszarami chronionymi.



Rys. 8.4. Obszary chronione w otoczeniu wybranego odcinka linii nr 356: kolor czerwony – Obszar specjalnej ochrony Natura 2000, kolor żółty – Park Krajobrazowy, kolor ciemnozielony – korytarz ekologiczny 2012 [59]

8.3. Przykład zastosowania adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej

8.3.1. Identyfikacja zjawiska

Na podstawie opisanego przypadku przedstawiono wykorzystanie ramy WILD-RAIL do wdrażania środków mitygujących negatywny wpływ transportu kolejowego na dzikie zwierzęta i ich siedliska.

Pierwszym etapem procesu analityczno-decyzyjnego jest określenie stron zainteresowanych, czyli przedsiębiorstw i instytucji, dla których analiza sytuacji i wprowadzenie odpowiednich rozwiązań jest korzystna lub pomocna we właściwym zarządzaniu i rozwoju. Uwzględniono podmioty bezpośrednio dotknięte problemem (przewoźnik kolejowy, zarządca infrastruktury) oraz instytucje odpowiedzialne za zarządzanie obszarami przyrodniczymi i zasobami naturalnymi w otoczeniu linii kolejowej. W przedmiotowym studium stronami zainteresowanymi są:

- Koleje Wielkopolskie S. A. – przewoźnik, ponoszący straty w wyniku zdarzeń z udziałem dzikich zwierząt
- PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. – zarządca infrastruktury kolejowej
- Urząd Marszałkowski Województwa Wielkopolskiego
- Zarząd Gminy Czerwonak
- Zarząd Gminy Murowana Goślina
- Zarząd Parku Krajobrazowego Puszcza Zielonka (Zespół Parków Krajobrazowych Województwa Wielkopolskiego)

- Nadleśnictwo Łopuchówko (podlegające pod Regionalną Dyрекcję Lasów Państwowych w Poznaniu)
- Leśny Zakład Doświadczalny Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu – Murowana Goślina.

Następnie należy właściwie zidentyfikować zjawisko, aby określić cel dalszych działań. Na podstawie analizy danych dostarczonych przez PKP PLK S.A. oraz Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o., dotyczących częstości zdarzeń z udziałem dzikich zwierząt oraz ich skutków, a także na podstawie analizy topograficznej terenów otaczających tory kolejowe, stwierdzono zwiększoną śmiertelność zwierząt w wyniku kolizji z pociągami na linii 356. Wysoka liczba kolizji wynika z przecinania korytarza ekologicznego łączącego tereny leśne i obszary ochrony Natura 2000 Biedrusko z terenami Parku Krajobrazowego Puszcza Zielonka, co prowadzi do fragmentacji siedlisk i zaburzeniu tras migracyjnych dzikich zwierząt.

Przy użyciu analizy statystycznej z wykorzystaniem środowiska Python określono odcinki linii, na których dochodzi do największej liczby zdarzeń, by następnie wyznaczyć konkretne punkty jako potencjalne granice obszaru przekraczania torów przez zwierzęta, przechodzące z obszarów leśnych znajdujących się po obu stronach linii.

Na podstawie analizy rozkładu jazdy Kolei Wielkopolskich (stan na luty 2025) wyznaczono przepustowość linii, to jest liczbę przejazdów pociągów na odcinku Owińska – Przebędowo. W ciągu doby przez korytarz ekologiczny łączący Puszcę Zielonkę z Lasem Biedrusko przejeżdża średnio 38 pojazdów szynowych. Można wyznaczyć wskaźnik W_{KP1000} :

$$W_{KP1000} = \left(\frac{L_K}{L_P}\right) \cdot 1000 = \frac{135}{38 \cdot 365 \cdot 5} \cdot 1000 = 1,95 \quad (5)$$

Wartość wskaźnika to 1,95, zatem znacząco przekracza założony próg W_{KP1000} równy 1,0, co stanowi kolejną podstawę do dalszych analiz.

Następnie wyznaczono wartość 75. percentyla dla 1 km:

$$x_{1km} = [1, 5, 5, 8, 13, 14, 20, 21, 21, 27] \quad (6)$$

$$i = 0,75 \times (10 + 1) = 8,25 \quad (7)$$

Ósma i dziewiąta pozycja w uporządkowanym zbiorze jest ta sama, zatem nie zachodzi potrzeba interpolacji:

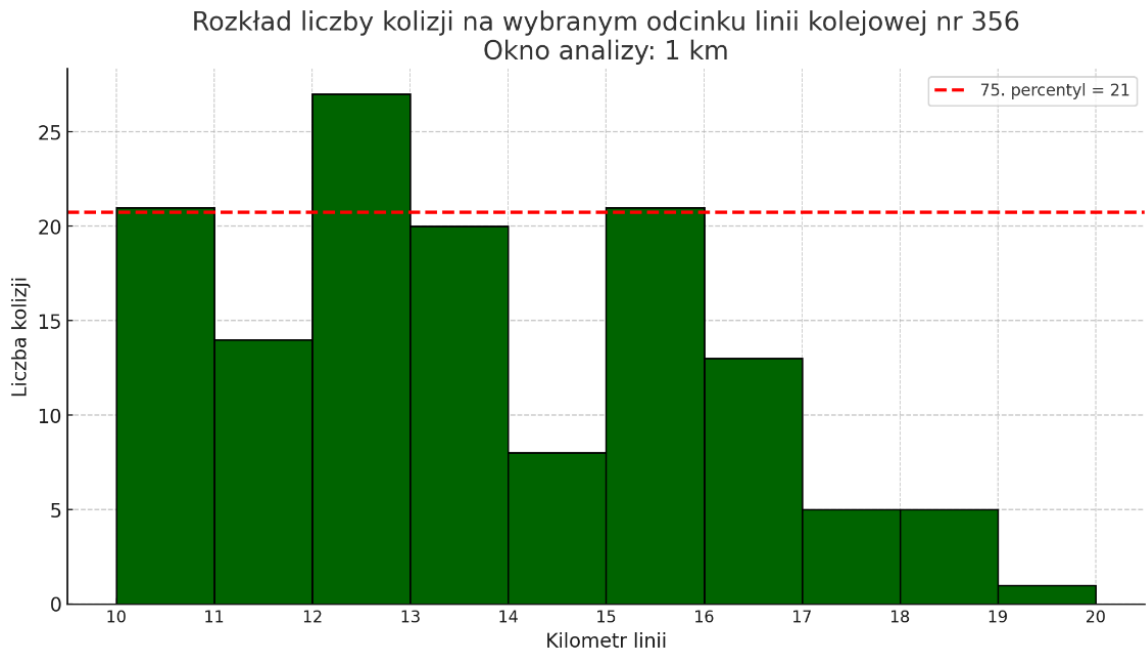
$$75. \text{ percentyl} = 21 \quad (8)$$

Na rysunku 8.5 przedstawiono rozkład kolizji w kilometrowych fragmentach analizowanego odcinka linii nr 356 oraz wartość 75. percentyla. Pozwala to określić, który kilometr wymaga dalszej analizy i wdrażania potencjalnych środków zaradczych.

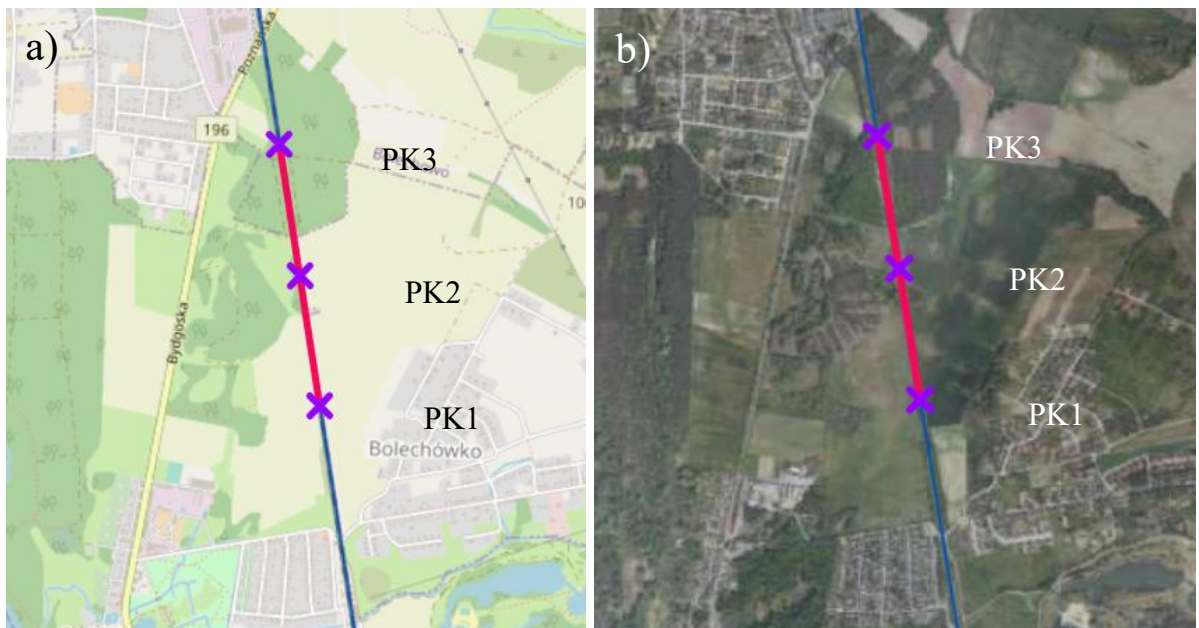
Można zauważyć, że w trzech analizowanych kilometrach liczba kolizji przekroczyła wartość 75. percentyla – 10–11 km (21 zdarzeń), 12–13 km (27 zdarzeń) i 15–16 km (21 zdarzeń). Z racji największej liczby kolizji jako hotspot do dalszej analizy zidentyfikowano odcinek 12–13 km badanej linii.

Wyznaczono punkt kontrolny nr 1 na 12,0 km linii (PK1), punkt nr 2 na 12,5 km (PK2) oraz punkt kontrolny nr 3 na 13,0 km (PK3). Znajdują się one między stacjami Owińska i Bolechowo. Dodatkowym powodem wyboru tego odcinka była dostępność i różnorodność

terenu umożliwiającą dokonanie bezpośredniej analizy czynników wpływających na wysoką liczbę zdarzeń. Autorskie badania terenowe wykonano we wrześniu 2024 r. Na rysunku 8.6 znajdują się mapy z wyznaczonymi punktami kontrolnymi.



Rys. 8.5 Rozkład liczby kolizji na odcinku 10–20 km linii kolejowej nr 356 z oknem analizy o szerokości 1 km i wyznaczoną wartością 75. percentyla.



Rys. 8.6. Oznaczenie punktów kontrolnych na linii nr 356 a) OpenStreetMap b) ortofotomapa [184]

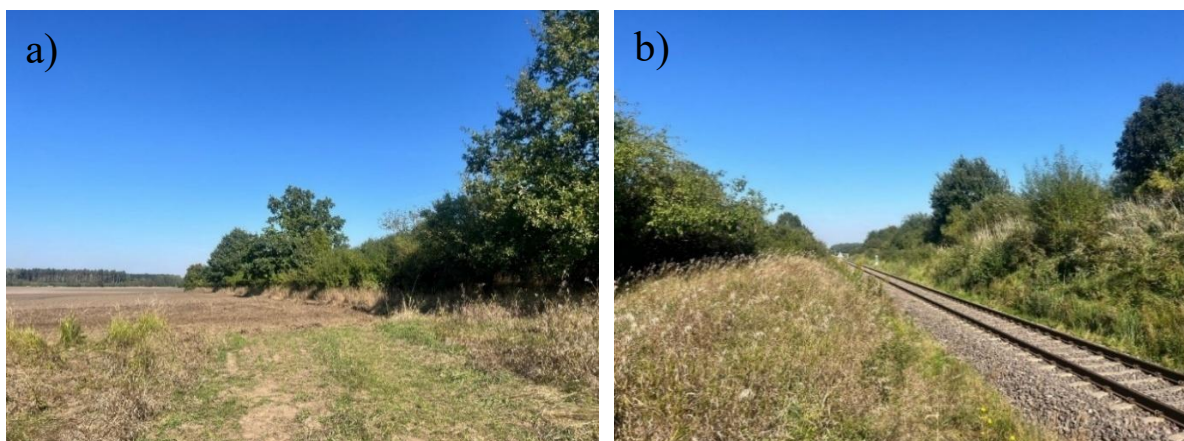
Badania rozpoczęto od przejazdu kolejowo-drogowego między Owińskami a Bolechówkiem na 11,5 km (o oznaczeniu 356 011 383), który stanowi granicę zabudowań ludzkich (rysunek 8.7).



Rys. 8.7. Widok z przejazdu kolejowo-drogowego między Owińskami a Bolechówkiem w stronę Bolechowa

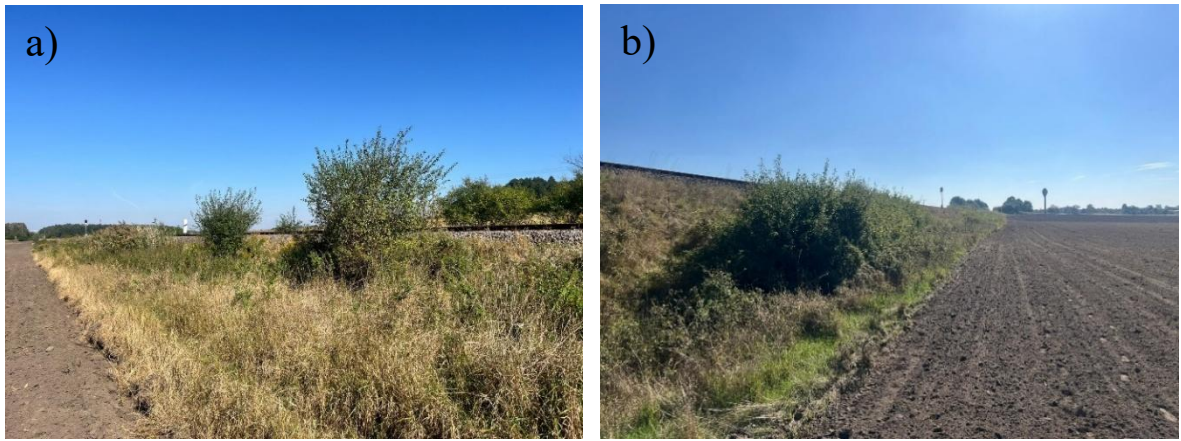
W pierwszej części analizowanego odcinka od 12,0 km do 12,5 km krajobraz dominują pola uprawne. Tory znajdują się na nasypie otoczonym gęstą roślinnością, który początkowo jest na wysokości terenu otaczającego.

Na rysunkach 8.8 i 8.9 ukazane są widoki na tory kolejowe od 11,5 km do 12,0 km w celu przedstawienia uwarunkowań środowiskowych, będących czynnikiem wpływającym na występowanie kolizji pojazdów ze zwierzętami. Można zauważyć, że początkowo tory znajdują się na łagodnym nasypie, lecz otoczonym bardzo gęstymi krzewami, utrudniającymi dostęp.



Rys. 8.8. Widok na tory: a) z pola uprawnego znajdującego się po lewej stronie oraz b) bezpośrednio z nasypu

Następnie roślinność przerzedza się oraz następuje obniżenie terenu pól wokół nasypu, przez co staje on się co bardziej widoczny i trudny do przejścia, wyraźnie rozgraniczając pola, co można zauważyć na rysunku 8.9.



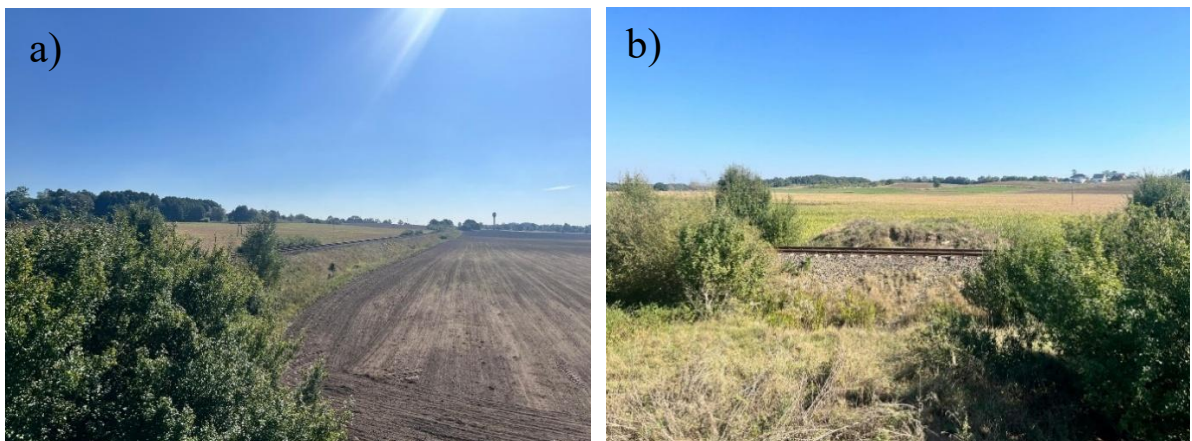
Rys. 8.9. Widok na tory w stronę a) Bolechowa oraz b) Owińsk

Rysunek 8.10 odpowiada pierwszemu punktowi kontrolnemu (PK1 na 12,0 km), wokół którego dochodzi do licznych zdarzeń. Wynika to z przerzedzenia roślinności otaczającej teren, co umożliwia przejście przez tory.



Rys. 8.10. Widok prostopadły na tory z lewej strony na wysokości punktu kontrolnego nr 1

W dalszej części badanego odcinka linii, zobrazonego na zdjęciach na rysunku 8.11 można zauważyć ponownie gęstszą roślinność oraz mniejszą różnicę wysokości między nasypem a terenami wokół.



Rys. 8.11. Widok a) z góry na badany odcinek (w stronę Owińsk) oraz b) prostopadły na tory (na wysokości 12,35 km linii)

W pobliżu punktu kontrolnego nr 2, aż do punktu końcowego na 13,0 km linii, znajdują się tereny leśne. W stronę Bolechowa zaczyna się gęsty las liściasty (m.in. dębowy) i następuje wyrównanie terenu pomiędzy polami a nasypem. Jest też pas roślinności z obu stron, który może utrudnić widoczność zarówno dla maszynistów jak i zwierząt. Ponadto okoliczne lasy pełne żołądzi stanowią atrakcyjne miejsce żerowania. Widok z punktu kontrolnego w stronę Bolechowa i otaczających tory lasów i krzewów znajduje się na rysunku 8.12.



Rys. 8.12. Widok w stronę Bolechowa z punktu kontrolnego nr 2

Na wysokości 12,64 km linii odkryto wydeptane ścieżki zwierząt przechodzące prostopadłe do linii kolejowej, widoczne na rysunku 8.13.



Rys. 8.13. Widoki prostopadłe na tory z prawej strony linii – wydeptane przez zwierzęta przejścia przez tory tuż przed granicą lasu, w pobliżu punktu kontrolnego nr 2

Biorąc pod uwagę połamane gałązki krzewów i szerokość przejścia można założyć, że ścieżki te wydeptane zostały przez zwierzęta kopytne średniej wielkości, przechodzące w stadzie (prawdopodobnie sarny lub dziki). Nie znaleziono wyraźnych tropów, co mogło wynikać zarówno z panujących warunków suszy, jak i ograniczeń w zakresie dostępnej wiedzy specjalistycznej podczas obserwacji terenowej – co podkreśla potrzebę zaangażowania ekspertów ze stron zainteresowanych w procesie obserwacji i oceny.

Podsumowując etap badania, wybrano punkty kontrolne na analizowanym odcinku, wokół których koncentrują się zdarzenia podane w danych statystycznych. Choć wydeptaną ścieżkę odnotowano w punkcie 12,64 km linii, to z uwagi na jej położenie w centralnej części obszaru o dużej liczbie kolizji zdecydowano, że analizą zostanie objęty cały odcinek 12,0–13,0 km linii nr 356. Podejście to pozwala uwzględnić kontekst przestrzenny i zwiększa szansę na identyfikację czynników środowiskowych wpływających na ryzyko kolizji – co w przyszłości może stanowić podstawę do rekomendacji, kiedy zasadnym jest wybór punktu, a kiedy szerszego odcinka jako hotspotu do dalszych analiz.

8.3.2. Analiza czynników, ich źródeł i możliwości zarządzania

Wśród czynników wpływających na zidentyfikowane zjawisko, zgodnie z tabelą 7.1 w Rozdziale 7 wskazano czynniki środowiskowe, w tym:

- lokalizację, ukształtowanie terenu i otaczającą roślinność
- migracje zwierząt.

Badany hotspot znajduje się między na odcinku między dwoma przejazdami kolejowodrogowymi (pierwszy między Owińskami a Bolechówkiem, 11,5 linii 356, o oznaczeniu 356 011 383, drugi w Bolechówku na ulicy Poznańskiej, 13,4 km linii 356, o oznaczeniu 356 013 428). Otaczają go pola uprawne oraz tereny leśne. Występuje tu zmienna gęstość roślinności wokół nasypu oraz zróżnicowana wysokość nasypu względem terenów przyległych, charakterystycznych dla terenu delikatnie pagórkowatego. Na początku badanego odcinka nasyp jest niewidoczny z powodu gęstej roślinności, następnie wyraźnie góruje nad poziomem pól i jest dobrze widoczny, by stopniowo zrównać się z terenem tuż przed lasem dębowym.

Na liczbę kolizji wpływ bezpośrednio obecność zwierząt kopytnych (jelenie szlachetne, sarny europejskie, dziki) oraz innych gatunków ssaków, w tym chronionych (wilki, łosie) w pobliskich lasach. Z racji zagęszczającej się zabudowy mieszkalnej w pobliskich miejscowościach, hotspot jako pas zieleni stanowi naturalny korytarz ekologiczny dla zwierząt przemieszczających się z terenów nadwarciańskich i Obszaru Natura 2000 Biedrusko do Parku Krajobrazowego Puszcza Zielonka. Bliska odległość lasów, rzeki i pól uprawnych sprawia, że obszar charakteryzuje się dużą dostępnością pokarmu dla zwierząt, natomiast łagodny nasyp w części odcinka ułatwia przechodzenie przez tory.

Natomiast wśród czynników, związanych z działaniami ludzi, w tym przypadku rozwojem i eksploatacją infrastruktury kolejowej, można wymienić:

- brak zastosowania jakichkolwiek środków zapobiegających kolizjom
- plany modernizacji nieuwzględniające działań na rzecz ochrony środowiska
- przepustowość linii.

Linia nr 356 była modernizowana w latach 2007–2013 w ramach Wielkopolskiego Regionalnego Programu Operacyjnego, projekt obejmował m.in.: modernizację nawierzchni toru na długości 50,3 km, naprawę obiektów inżynierskich, przebudowę istniejących i budowę nowych peronów z dojazdami przystosowanymi dla obsługi osób

niepełnosprawnych, budowę nowoczesnych komputerowych urządzeń sterowania ruchem kolejowym nastawianych z lokalnego centrum sterowania (LCS) w Wągrowcu, zabudowę akustycznej informacji dla podróżnych oraz modernizację przejazdów kolejowo-drogowych. Warto dodać, że w ramach oceny ryzyka technicznego i operacyjnego dla przypadków potrażeń zwierzyny przez pojazdy kolejowe PKP Polskie Linie Kolejowe S.A podjęto decyzję o konieczności przeprowadzenia monitoringu występowania i zachowania zwierząt na odcinku linii kolejowej nr 3 oraz na linii 356 na odcinku Murowana Goślina – Sława Wielkopolska w celu zaplanowania w przyszłości zabudowy urządzeń ochrony zwierząt UOZ-1 (odcinek wymieniony w tabeli 8.1). Ekspertyza “Monitoring występowania i migracji zwierząt wzdłuż linii kolejowej nr 3 i 356” [290] została zrealizowana przez firmę FPP Enviro Sp. z o.o. i bazowała zarówno na danych archiwalnych zleceniodawcy z lat 2013–2018 oraz monitoringu i wizji terenowej (na podstawie tropów zwierząt i ich śmiertelności) w latach 2017–2018, nie stwierdzając podstaw do wprowadzenia działań minimalizujących w celu ochrony populacji zwierząt, pomimo uprzedniego zakwalifikowania tej linii jako jednego z miejsc o wysokiej liczbie kolizji i wskazaniu lokalizacji intensywnej migracji zwierząt. Zachowawczość tej decyzji może wynikać zarówno z wniosków na podstawie bardzo wąskich zakresów analizy (dane dotyczące kolizji analizowane były dla odcinków linii o długości 0,1 km, pomimo tego, że istotne w kontekście korytarzy ekologicznych jest uwzględnienie całego, szerszego pasa potencjalnego przemieszczania się prostopadle lub równoległe do torów), jak i z przyjęcia perspektywy wnioskowania dla całej populacji dzikich zwierząt, bez szczegółowego kontekstu środowiskowego i ekosystemowego.

Przepustowość linii oszacowano na 38 przejazdów/dobę, prędkość maksymalna osiągnięta na dłuższych odcinkach to 120 km/h, choć między znajdującymi się blisko stacjami w badanym przypadku nie przekracza 100 km/h (wyznaczona na podstawie danych rozkładowych).

Podsumowując analizę czynników można zauważyć, że kluczową kwestią jest lokalizacja – przecięcie korytarza ekologicznego łączącego dwa duże siedliska zwierząt. Drugim aspektem jest brak wdrożenia jakichkolwiek środków zaradczych, pomimo niedawnej sposobności do wprowadzenia odpowiednich rozwiązań w postaci modernizacji linii kolejowej.

Wśród sposobów zarządzania czynnikami można wymienić przede wszystkim:

- monitorowanie tras migracyjnych i trendów we wzorcach zachowań zwierząt
- kontrolę wysokości i gęstości roślinności przy torach kolejowych w celu poprawienia widoczności
- dostosowanie infrastruktury kolejowej poprzez zastosowanie środków mitygacyjnych, takich jak przejścia dla zwierząt, systemy ostrzegawcze i odstraszające
- integracja bardziej szczegółowych analiz środowiskowych w planach modernizacji infrastruktury
- wprowadzenie lokalnych ograniczeń prędkości na wyznaczonym odcinku.

W celu kompleksowej oceny możliwości ograniczenia czynników wpływających na wysoką liczbę kolizji zwierząt z pociągami na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356, przeprowadzono analizę SWOT (przedstawioną w tabeli 8.2) z uzupełniającymi elementami PESTEL (tabela 8.3). Podejście to pozwala zidentyfikować zarówno potencjał wdrożeniowy rozwiązań, jak i ograniczenia wynikające z uwarunkowań przestrzennych, instytucjonalnych oraz środowiskowych.

Tabela 8.2. Analiza SWOT dotycząca możliwości ograniczenia negatywnego wpływu transportu kolejowego na środowisko na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356

Mocne strony (S)	Słabe strony (W)
<ul style="list-style-type: none"> • ukształtowanie terenu i obecność nasypu • zidentyfikowane miejsca migracji – możliwość precyzyjnego lokalizowania rozwiązań • dostępność danych statystycznych oraz obserwacji terenowych • możliwość wprowadzenia ograniczeń prędkości 	<ul style="list-style-type: none"> • brak dotychczasowego wdrożenia rozwiązań mitygujących • pominięcie aspektów środowiskowych przy modernizacji infrastruktury w latach 2007–2013 • gęsta roślinność ograniczająca widoczność zwiększająca ryzyko wtargnięć na tory • brak kompleksowego, lokalnego monitoringu • zachowawcze decyzje dotyczące skutków oddziaływania transportu na środowisko
Szanse (O)	Zagrożenia (T)
<ul style="list-style-type: none"> • planowana elektryfikacja linii – możliwość integracji rozwiązań mitygujących z inwestycją • powiązanie działań ochronnych z projektami modernizacyjnymi współfinansowanymi z funduszy unijnych • priorytetyzacja działań środowiskowych w unijnych programach • sąsiedztwo torów kolejowych z obszarem chronionym Natura 2000 oraz Parku Krajobrazowego Puszcza Zielonka – zwiększenie wagi działań z punktu widzenia planowania przestrzennego • Rosnące znaczenie ochrony bioróżnorodności w polityce transportowej i środowiskowej – zwiększenie świadomości społecznej i nacisk na działania proekologiczne 	<ul style="list-style-type: none"> • brak zauważalnej priorytetyzacji działań ekologicznych na poziomie lokalnym • trudności w alokacji środków dla inwestycji niskobudżetowych w odpowiedzi na bieżące potrzeby – łatwiej zdobyć finansowanie w ramach inwestycji niż utrzymania • postępująca urbanizacja i fragmentacja siedlisk wzdłuż linii • trudność we wskazaniu pojedynczych, jednoznacznych lokalizacji kolizji – migracje rozproszone wzdłuż odcinka • ryzyko powtarzalności zachowawczych ocen środowiskowych nieuwzględniających lokalnego kontekstu przyrodniczego • ryzyko zastosowania najprostszycy środków zaradczych, takich jak całkowite ogrodzenie odcinka – potencjalne przerwanie ciągłości korytarza ekologicznego i dalsza fragmentacja siedlisk

Tabela 8.3. Elementy analizy PESTEL dla przypadku oceny możliwości ograniczenia negatywnego wpływu transportu kolejowego na środowisko na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356

Czynniki	Opis
Polityczne (P)	Potencjalna zgodność z celami strategicznymi Unii Europejskiej oraz międzynarodowymi konwencjami, ale lokalne decyzje inwestycyjne mogą nie uwzględniać wyczerpująco aspektów środowiskowych.
Ekonomiczne (E)	Koszty wdrożenia mogą być relatywnie niskie dzięki integracji z istniejącą infrastrukturą; programy funduszy unijnych pozyskiwanych na inwestycje wspierają działania związanych z ochroną ekosystemów i zrównoważonym transportem.
Społeczne (S)	Rosnąca świadomość społeczna w zakresie ekologii i potrzeby ochrony obszarów wartościowych przyrodniczo.
Technologiczne (T)	Dostępność sprawdzonych rozwiązań technologicznych, istniejące procedury integracji rozwiązań z infrastrukturą kolejową
Środowiskowe (E)	Wysokie znaczenie przyrodnicze badanego obszaru, stanowiącego korytarz ekologiczny łączący siedliska licznych zwierząt, w tym także gatunków chronionych.
Prawne (L)	Ograniczona skuteczność standardowych procedur oceny oddziaływania na środowisko.

Przeprowadzona analiza SWOT, uzupełniona elementami PESTEL, pozwala na kompleksową ocenę warunków wdrożenia środków mitygacyjnych na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356. Ujawnia ona wyraźny potencjał do zastosowania skutecznych działań – zarówno infrastrukturalnych, jak i organizacyjnych – wynikający z cech środowiskowych (istniejący korytarz migracyjny, topografia terenu), jak również z możliwości powiązania planowanych inwestycji (np. elektryfikacji linii) z działaniami proekologicznymi. Jednocześnie analiza wskazuje na istotne bariery, takie jak dotychczasowe pominięcie aspektów środowiskowych w procesach modernizacyjnych, brak lokalnych narzędzi zarządzania danymi o kolizjach, czy ryzyko wdrażania rozwiązań izolacyjnych (np. ogrodzeń) prowadzących do dalszej fragmentacji siedlisk. Zidentyfikowane zagrożenia oraz luki instytucjonalne i prawne potwierdzają zasadność wdrażania systemowej adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej, która uwzględnia lokalny kontekst przyrodniczy i może być podstawą skutecznej strategii ograniczania kolizji zwierząt z infrastrukturą kolejową.

8.3.3. Dobór metod mitygacyjnych

Biorąc pod uwagę powyższe analizy zjawiska i czynników, w szczególności charakterystykę terenu stanowiącego korytarz ekologiczny, gatunki zwierząt uczestniczących w kolizjach z pociągami, jak również możliwości infrastrukturalne wdrożenia środków, rekomenduje się następujące rozwiązania mające na celu minimalizację oddziaływania ruchu kolejowego na faunę pobliskich ekosystemów:

i. **Metoda infrastrukturalna:**

W pierwszej części analizowanego odcinka, gdzie nasyp kolejowy jest wysoki względem otaczających go pól uprawnych (od 12,0 km do 12,5 km linii), możliwe jest wykonanie przejść podziemnych w formie przepustów, z których mogą skorzystać średnie i małe ssaki. Wraz z zaadaptowaniem przepustu wodnego na 12,45 km proponowane jest wykonanie przejścia na 12,05 km linii zgodnie z wytycznymi projektowania przedstawionym w Rozdziale 6.2. W celu naprowadzenia zwierząt można rozważyć zainstalowanie ogrodzenia (na odcinku o długości nie większej niż 40 metrów) połączonego z istniejącą gęstą roślinnością rosnącą wzdłuż i na nasypie przed punktem kontrolny nr 1 (tj. od przejścia kolejowego w Owińskach – od 11,5 km do 12,0 km). W ten sposób możliwe będzie naturalne nakierowanie zwierząt na przejście bez znaczącej integracji w krajobraz, z wykorzystaniem naturalnych przeszkód w postaci zarośli utrudniających dostęp na tory. Niezależnie od tego na całej długości odcinka rekomendowane jest regularne zarządzanie roślinnością w celu poprawienia widoczności wzdłuż torów i ograniczenia możliwości nagłego wtargnięcia na tory.

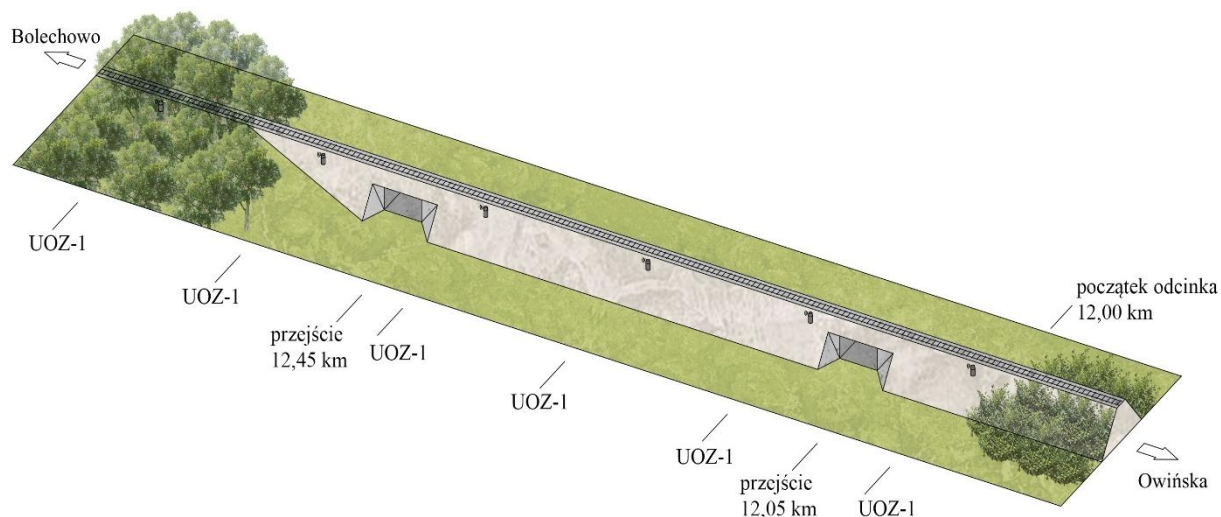
ii. **Metoda aktywna:**

Rozwiązaniem jest wdrożenie systemów odstraszających zwierzęta z torów, np. urządzeń UOZ-1. Zgodnie z zaleceniami producenta, należy je rozmieścić co 70 metrów po przeciwnych stronach torów, a minimalna długość chronionego obszaru powinna wynosić około 400 m. W badanym przypadku te rozwiązania znajdują zastosowanie na całej długości hotspotu 14 urządzeń UOZ-1. Razem z przepustami w nasypie tak zaprojektowane równoległe rozwiązania obejmują oddziaływanie na zarówno mniejsze i większe gatunki zwierząt, umożliwiając im bezpieczną migrację z zachowaniem elastyczności wyboru miejsca przejścia przez tory.

iii. Metoda uzupełniająca:

Stosowanie systemu ostrzegania maszynistów o wysokim ryzyku kolizji na badanym odcinku.

Schemat poglądowy odcinka linii kolejowej nr 356 i wybranych proponowanych rozwiązań znajduje się na rysunku 8.14. Patrząc od prawej: gęsta roślinność przed 12,0 km, naturalnie naprowadzająca na hotspot; dwa przejścia w nasypie – nowy i zaadaptowany przepust hydrologiczny, sześć urządzeń ochrony zwierząt UOZ-1 (po jeden stronie torów), wyrównanie terenu i obszar leśny w drugiej połowie odcinka.



Rys. 8.14. Schemat poglądowy wdrożenia rozwiązań mitygacyjnych od strony zachodniej odcinka linii nr 356 na długości 12,0–12,6 km

W celu kompleksowej oceny ryzyk związanych z wdrożeniem zaproponowanych rozwiązań na wybranym odcinku przeprowadzono uproszczoną analizę FMEA (ang. *Failure Mode and Effects Analysis*). Metoda ta pozwala na identyfikację potencjalnych scenariuszy niepowodzenia, ocenę ich prawdopodobieństwa, skutków oraz wykrywalności, a następnie nadanie im priorytetu według wskaźnika RPN (Risk Priority Number). Analizę przeprowadzono według standardowych wytycznych przedstawionych m.in. w [291–293], przy uwzględnieniu indywidualnych warunków badanego przypadku. Terminologia użyta w tabeli została dostosowana do nomenklatury umożliwiającej integrację z procedurami Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem (SMS), stosowanego przez zarządców infrastruktury i przewoźników kolejowych.

Analizą objęto siedem głównych zagrożeń mogących wpłynąć na efektywność zaproponowanych rozwiązań: infrastrukturalnych (przepusty), aktywnych (urządzenia UOZ-1) oraz eksploatacyjnych (monitorowanie, zmienność tras migracyjnych). Każdy z wariantów oceniono w trzech kategoriach: P – prawdopodobieństwo wystąpienia (1–10), S – znaczenie skutków (1–10), D – wykrywalność zagrożenia (1–10), a następnie obliczono wskaźnik RPN ($P \times S \times D$), który posłużył do wskazania najbardziej krytycznych obszarów wymagających nadzoru. W tabeli 8.4 znajdują się wyniki uproszczonej analizy dla siedmiu przypadków potencjalnych nieskuteczności proponowanych rozwiązań, w tabeli 8.5 przedstawiono wykorzystaną skalę ocen, natomiast w tabeli 8.6 – poziom i interpretację wartości RPN.

Tabela 8.4. Analiza FMEA dla zestawu wskazanych rozwiązań mitygacyjnych na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356

Nr	Źródło zagrożenia	Zagrożenie	Potencjalne skutki	P	S	D	RPN	Proponowane działania zaradcze	Ocena po wdrożeniu działań			
									P	S	D	RPN
1	Brak lub nieodpowiednie utrzymanie przepustu	Niedrożność przepustu (np. błoto, osady, zarastanie)	Zwierzęta nie korzystają z przejścia, większa liczba kolizji	6	3	5	90	Regulame inspekcje sezonowe	2	3	5	30
2	Niespełnienie wymagań projektowych, inne czynniki środowiskowe	Nieodpowiedni rozmiar przepustu	Zwierzęta unikają przejścia – niska skuteczność	3	4	7	84	Dobór parametrów zgodnie z wytycznymi projektowymi; analiza zachowań zwierząt	2	3	4	24
3	Brak zarządzania zielenią	Gęsta, niekontrolowana roślinność wzdłuż torów	Pogorszenie widoczności maszynisty i zwierząt, możliwe nagłe wtargnięcie na tory	5	3	5	75	Planowe zarządzanie zielenią w pasie torowym	2	3	4	24
4	Brak zasilania, uszkodzenia przez czynniki zewnętrzne, brak konserwacji	Awarie urządzeń UOZ-1	Brak odstraszenia; większa liczba kolizji	3	9	3	81	Regulamy serwis urządzeń	3	9	1	27
5	Niewzględnienie rzeczywistych tras migracji i ich zmian, czynniki ekonomiczne	Nieodpowiedni odcinek objęty ochroną urządzeniami UOZ-1	Zwierzęta obchodzą system i wchodzi na tory w innych miejscach	2	8	6	96	Regularny monitoring, analiza tropów zwierząt, weryfikacja pierwotnej lokalizacji urządzeń	2	8	2	32
6	Brak planu monitoringu porealizacyjnego, brak analizy zapisów	Niewystarczające monitorowanie efektywności rozwiązań	Brak danych o skuteczności, brak reakcji na zmiany warunków	4	6	5	120	Fotopułapki, monitoring kamerą szerokokątną, analiza tropów, wyznaczenie osób odpowiedzialnych za monitoring	3	6	2	36
7	Zmiany krajobrazowe, zakłócenia antropogeniczne	Zmiana tras migracyjnych zwierząt po realizacji inwestycji	Zwierzęta nie korzystają z wdrożonych rozwiązań	3	8	6	144	Monitoring porealizacyjny; adaptacyjne zarządzanie (wdrożenie wstępne i końcowe)	3	8	2	48

Tabela 8.5. Skala ocen zastosowana w analizie FMEA

Wartość	P – Prawdopodobieństwo (Probability)	S – Skutki (Severity)	D – Wykrywalność (Detectability)
1	Bardzo mało prawdopodobne	Znikomy wpływ, niezauważalny	Bardzo łatwe do wykrycia przed wystąpieniem.
2 – 3	Mało prawdopodobne	Niewielki wpływ, brak skutków ekologicznych lub operacyjnych	Łatwe do wykrycia – standardowe procedury wystarczają.
4 – 5	Średnie prawdopodobieństwo	Umiarkowany wpływ lokalny, możliwe skutki czasowe	Możliwe do wykrycia – wymaga dodatkowego nadzoru.
6 – 7	Prawdopodobne	Znaczący wpływ środowiskowy lub operacyjny	Trudne do wykrycia bez specjalistycznych środków.
8 – 9	Bardzo prawdopodobne	Poważne skutki – trwałe zakłócenie migracji lub awarie	Bardzo trudne do wykrycia – brak rutynowego nadzoru
10	Niemal pewne	Krytyczne skutki – brak funkcjonalności systemu	Praktycznie niewykrywalne przed wystąpieniem skutków.

Tabela 8.6. Przyjęta skala interpretacji wartości RPN w analizie FMEA

Wartość RPN	Poziom ryzyka	Interpretacja
1 – 60	Niskie ryzyko	Akceptowalne, wymaga jedynie rutynowego monitoringu.
61 – 100	Średnie ryzyko	Wskazana kontrola i stopniowe usprawnianie, ale nie wymaga pilnych działań.
101 – 150	Podwyższone ryzyko	Zalecane jest uwzględnienie dodatkowych działań lub ścisły monitoring.
>150	Wysokie ryzyko	Nieakceptowalne, wymaga natychmiastowych działań.

Podczas analizy nie zidentyfikowano ryzyk o wartości RPN powyżej 150, jednak dwa scenariusze uzyskały wartości powyżej 100, co kwalifikuje je jako zagrożenia o charakterze umiarkowanym lub podwyższonym. Są to: zmiana tras migracyjnych zwierząt po realizacji inwestycji (RPN = 144) oraz brak monitoringu skuteczności wdrożonych rozwiązań (RPN = 120). Są to czynniki trudne do kontrolowania, a jednocześnie krytyczne dla długofalowej skuteczności rozwiązań. W pozostałych przypadkach ryzyko można ocenić jako niskie, w przypadku którego wystarczające są działania planowe i regularny monitoring hotspotu.

Zidentyfikowane ryzyka potwierdzają potrzebę wdrażania działań kontrolnych i adaptacyjnych, takich jak: regularna weryfikacja skuteczności przejść, planowe inspekcje techniczne oraz sezonowa analiza lokalnych uwarunkowań środowiskowych. W celu zobrazowania skuteczności proponowanych działań zaradczych, w tabeli uwzględniono także wartości RPN po ich wdrożeniu. Oceny ponowne zostały oszacowane przy założeniu prawidłowego i terminowego wdrożenia zaproponowanych środków, zgodnie z najlepszymi dostępnymi praktykami. W każdym przypadku odnotowano istotne obniżenie poziomu ryzyka – wartości RPN spadły z poziomu umiarkowanego lub podwyższonego do niskiego (poniżej 60). Największy spadek dotyczył zagrożeń związanych z niewystarczającym monitoringiem i niedrożnością przepustów.

Wnioski z analizy FMEA potwierdzają również zasadność integrowania metod technicznych (np. urządzeń UOZ-1 i przepustów) z rozwiązaniami organizacyjnymi i monitoringowymi, które umożliwiają reagowanie na dynamiczne zmiany w środowisku. Wskazują także, że wdrożenie proponowanych rozwiązań charakteryzuje się akceptowalnym ryzykiem, w szczególności w porównaniu z korzyściami, jakie może przynieść – ograniczenie liczby kolizji pojazdów ze zwierzętami, zachowanie łączności siedlisk oraz podniesienie poziomu bezpieczeństwa i stabilności ruchu kolejowego.

8.3.4. Rekomendacje dla stron zainteresowanych

Zbiór rekomendacji wraz z wytycznymi wdrażania odpowiednich rozwiązań stanowi kluczowy element ramy WILD-RAIL, ponieważ zawiera najważniejsze informacje i wnioski. Istotą dokumentu jest przejrzystość i dostępność dla instytucji zaangażowanych w działania. W tabeli 8.7 przedstawiono wzorzec rekomendacji dla analizowanego przypadku.

Tabela 8.7. Propozycja rekomendacji dotyczących wdrożenia rozwiązań mitygacyjnych w studium przypadku linii kolejowej nr 356

Opis i przyczyny zjawiska
Wyniki analiz statystycznych oraz badań terenowych wskazują na wysoką liczbę kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami na linii kolejowej nr 356, szczególnie na odcinku między stacjami Owińska – Bolechowo. Skutkiem jest zwiększona śmiertelność zwierząt w korytarzu ekologicznym, który łączy siedliska zwierząt w obszarze Natura 2000 Biedrusko oraz Parku Krajobrazowym Puszcza Zielonka. Główne przyczyny kolizji:

- lokalizacja – linia kolejowa przebiega przez wąski pas zieleni otoczony zabudowaniami, a jednocześnie przecina cenne przyrodniczo obszary leśne po obu stronach torów
- ukształtowanie terenu – zmienna wysokość nasypu kolejowego oraz gęstość roślinności wpływają na wybór przez zwierzęta konkretnych przejść przez tory
- trasy migracyjne dzikich zwierząt - przebiegające przez linię kolejową szlaki migracyjne zwierząt, zwiększają ryzyko kolizji
- brak skutecznych środków zapobiegawczych – do tej pory nie wdrożono odpowiednich rozwiązań technicznych ani organizacyjnych, które mogłyby zminimalizować oddziaływanie kolei na środowisko w tym obszarze.

Identyfikacja obszaru krytycznego (hotspot)

Na podstawie analiz wyznaczono odcinek 12,0–13,0 km linii kolejowej jako kluczowe miejsce kolizji, wymagający pilnego wdrożenia środków zaradczych. W otoczeniu odcinka znajdują się pola uprawne, tereny leśne i siedziby ludzkie.

Konsekwencje kolizji dla transportu i ekosystemu

Powtarzające się zdarzenia z udziałem dzikich zwierząt mają negatywne skutki zarówno dla bezpieczeństwa, jak i płynności funkcjonowania transportu kolejowego. Mogą one prowadzić do: zagrożenia dla zdrowia i życia pasażerów, uszkodzeń taboru kolejowego, opóźnień i zakłóceń w ruchu pociągów.

Kolizje wpływają także na stabilność lokalnego ekosystemu, stanowiąc realne zagrożenie dla bioróżnorodności. Oprócz częstych przypadków potrażeń zwierząt kopytnych, korytarzem ekologicznym przemieszczają się również inne gatunki, w tym objęte ochroną, dla których zwiększona śmiertelność może znacząco wpłynąć na populację i zachowanie równowagi ekologicznej w rejonie obszaru Natura 2000 Biedrusko oraz Parku Krajobrazowego Puszcza Zielonka.

Rekomendacje rozwiązania

Mając na uwadze charakterystykę terenu stanowiącego korytarz ekologiczny, gatunki zwierząt uczestniczących w kolizjach z pociągami oraz możliwości infrastrukturalne wdrożenia środków zaradczych, rekomenduje się wdrożenie działań minimalizujących wpływ transportu kolejowego na dzikie zwierzęta pobliskich ekosystemów poprzez odpowiedzenie rozwiązania infrastrukturalne i organizacyjne.

Na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej 356 rekomenduje się zastosowanie podejścia zintegrowanego, łączącego metody infrastrukturalne, aktywne i uzupełniające. Na odcinku wysokiego nasypu zastosowane powinny być metody infrastrukturalne:

- budowa przejść podziemnych (przepustów) w nasypie kolejowym na odcinku 12,0 – 12,5 km, umożliwiających migrację zwierząt, takich jak sarny, dziki i inne małe ssaki. Wykorzystanie istniejącego przepustu wodnego na wysokości 12,45 km oraz budowa dodatkowego przejścia na 12,05 km linii
- opcjonalna instalacja ogrodzeń, które naprowadzą zwierzęta na bezpieczne przejścia w nasypie
- zarządzanie roślinnością wzdłuż torów w celu poprawy widoczności i ograniczenia nagłego wtargnięcia zwierząt na tory.

Aby umożliwić swobodne przekraczanie torów i minimalizować fragmentację siedlisk należy zastosować też metody aktywne:

- systemy odstrasżające zwierzęta, takie jak urządzenia UOZ-1, rozmieszczone co 70 metrów po przeciwnych stronach torów – łącznie 14 urządzeń, 7 po każdej stronie.

Ponadto zaleca się także wdrożenie metody uzupełniającej w formie systemu ostrzegania maszynistów o wysokim ryzyku kolizji.

Możliwości monitorowania i oceny skuteczności wdrożonych działań
<p>Wśród sposobów ewaluacji efektywności proponowanych rozwiązań można wskazać:</p> <ul style="list-style-type: none"> • regularne i szczegółowe raportowanie liczby kolizji przez przewoźników • ustalenie wskaźników kolizji i analiza trendów • monitoring wykorzystania przepustów i oddziaływania sygnałów odstraszających na zwierzęta przy użyciu czujników detekcji (np. fotopułapek) • analiza tropów zwierząt i wpływu zastosowanych środków na szlaki migracyjne. <p>Zalecane jest także wprowadzanie modyfikacji w strategii działania w zależności od wyników oceny skuteczności.</p>
Najważniejsze korzyści z wdrożenia rekomendacji
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Dla ekosystemu: ochrona siedlisk poprzez ograniczanie śmiertelności zwierząt. ➤ Dla transportu kolejowego: redukcja liczby kolizji, zwiększenie bezpieczeństwa ruchu pasażerskiego, zmniejszenie opóźnień pociągów. ➤ Dla społeczeństwa: wzrost świadomości ekologicznej oraz poprawa jakości transportu kolejowego.
Integracja rekomendacji z polityką transportową
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Uwzględnienie proponowanych rozwiązań w strategiach zarządzania infrastrukturą kolejową. ➤ Korzystanie z instrumentów polityki spójności oraz programów Unii Europejskiej, które wspierają zrównoważony rozwój transportu. ➤ Tworzenie interdyscyplinarnych zespołów badawczych w celu opracowania i wdrażania rozwiązań ograniczających wpływ kolei na środowisko, w tym angażowanie przewoźników, zarządców infrastruktury, organizacji ekologicznych i instytucji państwowych związanych z zarządzaniem zasobami naturalnymi. ➤ Organizacja regularnych konsultacji i szkoleń podnoszących świadomość w zakresie wpływu transportu na środowisko dla pracowników sektora kolejowego.
Metody komunikacji i edukacji w zakresie zrównoważonego transportu
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Kampanie informacyjne kierowane do społeczności lokalnej, pasażerów oraz pracowników. ➤ Szkolenia dla maszynistów i personelu w zakresie reagowania na zagrożenia związane z kolizjami pojazdów z dzikimi zwierzętami. ➤ Popularyzacja tematyki ochrony przyrody i zrównoważonego rozwoju.

8.3.5. Możliwość wdrożenia, metody monitoringu i ewaluacji efektywności proponowanych rozwiązań

Wdrożenie środków mających na celu zmniejszenie liczby kolizji pojazdów z dzikimi zwierzętami i tym samym ograniczenie wpływu na ekosystemy, wymaga spełnienia warunków technicznych, finansowych oraz społeczno-politycznych. Kluczowe aspekty to dostępność funduszy, gotowość instytucji odpowiedzialnych (w tym przypadku zarządcy infrastruktury kolejowej) oraz akceptację stron zainteresowanych dla proponowanych rozwiązań.

Aspekty techniczne obejmują:

- uwarunkowania przestrzenne, umożliwiające budowę przepustów w nasypie, ogrodzeń kierunkowych i urządzeń odstraszających zwierzęta z torów
- możliwość integracji rozwiązań z istniejącą infrastrukturą kolejową, w tym w zakresie poboru energii, informacji z systemu sterowania ruchem kolejowym oraz detekcji zwierząt w pobliżu torów lub zbliżających się pojazdów

- monitoring terenu przed wdrożeniem w celu dostosowania rozwiązań do aktualnych tras migracyjnych.

Aspekty finansowe przed wszystkim wiążą się z:

- oszacowaniem kosztów instalacji poszczególnych rozwiązań i włączenie ich w strategię rozwoju,
- pozyskaniem funduszy z krajowych i międzynarodowych programów wsparcia i innych inicjatyw związanych z ochroną środowiska i zrównoważonym transportem;
- współpracą międzysektorową – koordynacja działań pomiędzy sektorem publicznym (zarządcami infrastruktury, samorządami lokalnymi, instytucjami ochrony środowiska) oraz prywatnym (np. przedsiębiorstwa transportowe, organizacje ekologiczne),
- zróżnicowanymi źródłami finansowania – wykorzystanie zarówno kapitału publicznego, jak i prywatnego, w ramach partnerstw publiczno-prywatnych, lub współfinansowania w ramach projektów organizacji międzynarodowych.

Aspekty społeczno-polityczne:

- Akceptacja stron zainteresowanych – stworzenie interdyscyplinarnego zespołu specjalistów związanych zarówno z transportem kolejowym, administracją publiczną oraz instytucjami ekologicznymi;
- Warunki gospodarcze i priorytetyzacja działań – dostosowanie wybranych rozwiązań do aktualnych potrzeb regionu;
- Regulacje i polityka transportowa – uwzględnienie działań proekologicznych w strategiach rozwoju i modernizacji linii kolejowych, nie tylko na etapie przedinwestycyjnym, co ułatwi finansowanie i wdrażanie środków zaradczych.

W sprzyjających warunkach – dostępnych funduszach, przychylniej polityce transportowej i środowiskowej oraz konsensusu stron zainteresowanych – możliwe jest wdrożenie pełnego zakresu proponowanych rozwiązań, w tym budowy przejść dla zwierząt oraz systemów odstrasżających. W sytuacji, kiedy priorytetem są inne działania na rzecz sektora transportu kolejowego, konieczne może być zastosowanie tańszych i prostszych rozwiązań, takich jak ogrodzenia naprowadzające, zarządzanie roślinnością oraz monitoring migracji zwierząt. Zatem wdrożenie rekomendowanych środków (wszystkich lub wybranych) jest zatem wykonalne dla analizowanego studium przypadku, ale wymaga odpowiedniego podejścia instytucji odpowiedzialnych, finansowania, integracji z polityką transportową i współpracy międzysektorowej.

W tym kontekście planowana elektryfikacja odcinka Poznań Wschód – Wągrowiec linii kolejowej nr 356, której realizację zakłada się do 2028 roku, może stanowić szansę na wdrożenie kompleksowych rozwiązań proekologicznych. Modernizacja i elektryfikacja linii stwarzają warunki do integracji rozwiązań aktywnych i infrastrukturalnych a także do pozyskania środków finansowych w ramach i funduszy unijnych wspierających zrównoważony transport. Włączenie aspektów środowiskowych do projektów inwestycyjnych już na etapie planowania może znacząco zwiększyć efektywność wdrażanych środków i zapewnić ich trwałość w długim okresie.

Ocena skuteczności wdrożonych działań ograniczających wpływ transportu kolejowego na śmiertelność zwierząt i zubożenie ekosystemów powinna opierać się na kompleksowym monitoringu i analizie danych. Kluczowe metody obejmują:

- bezpośrednio monitorowanie populacji zwierząt, zmian wzorców zachowań i szlaków migracyjnych we współpracy ze specjalistami z zakresu nauk i działalności przyrodniczej
- opracowanie i analiza trendów wartości wskaźników efektywności, takich jak liczba i częstość kolizji, na podstawie szczegółowych raportów przewoźników
- wykorzystanie czujników detekcji (np. fotopułapek) do oceny skuteczności przepustów (stopnia ich wykorzystania przez zwierzęta) oraz skuteczności systemów odstrasżających zwierzęta z torów w momencie nadjeżdżającego pojazdu.

Uzupełnieniem regularnej ewaluacji może być też przegląd ekspercki, analizy i zarządzanie ryzykiem oraz badania porównawcze z podobnymi lokalizacjami i/lub wysoką liczbą kolizji pojazdów ze zwierzętami. W ten sposób iteracyjna ocena umożliwia dostosowanie strategii ochrony i zarządzanie stosowanymi środkami w miarę postępu technologicznego oraz nowych danych ilościowych.

8.4. Podsumowanie rozdziału

Analiza przypadku odcinka 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356 potwierdziła istotność uwzględniania aspektów środowiskowych, zwłaszcza związanych z kolizjami pociągów z dzikimi zwierzętami, w planowaniu, eksploatacji i rozwoju infrastruktury transportowej. Zidentyfikowany odcinek stanowi przykład obszaru o szczególnie wysokim ryzyku śmiertelności zwierząt wynikającym z lokalizacji linii w obrębie korytarza ekologicznego, przy jednoczesnym braku dotychczasowych działań mitygacyjnych.

Wykorzystanie danych statystycznych i wyników badań terenowych umożliwiło precyzyjne zlokalizowanie odcinka o krytycznym znaczeniu oraz ocenę przyczyn i charakteru zjawiska. Dobór rekomendowanych rozwiązań – w tym przejść dla zwierząt, systemów aktywnych UOZ-1 oraz metod zarządzania roślinnością – oparto na autorskiej adaptacyjnej ramie zaproponowanej w Rozdziale 7. Proces analityczno-decyzyjny został uzupełniony wynikami analizy SWOT i PESTEL, a następnie pogłębione oceną ryzyka FMEA.

Wyniki analiz wykazały, że skuteczna minimalizacja negatywnego wpływu kolei na bioróżnorodność jest możliwa, o ile działania są dostosowane do lokalnych warunków środowiskowych i przestrzennych, a także wspierane przez odpowiednie instrumenty instytucjonalne i finansowe. Rekomendacje zawarte w tabeli 7.5 stanowią praktyczne kompendium wiedzy o możliwościach wdrożenia środków ochronnych w realiach regionalnych. Uwzględniają one nie tylko uwarunkowania techniczne i przyrodnicze, lecz także aspekty polityczne, społeczne i organizacyjne, niezbędne do skutecznego wdrażania i utrzymania środków mitygacyjnych.

Na podstawie zastosowanego w studium przypadku analizy FMEA wykazano, że główne czynniki ryzyka dla skuteczności wdrożeń wiążą się z brakiem monitoringu, możliwymi zmianami tras migracyjnych zwierząt, a także ograniczeniami finansowymi i organizacyjnymi. Z drugiej strony, analizy SWOT i elementów PESTEL umożliwiły wskazanie szeregu sprzyjających warunków wdrożeniowych, takich jak: planowana elektryfikacja linii, możliwość integracji z programami unijnymi oraz zwiększenie świadomości społecznej w zakresie ochrony przyrody.

Wnioski z tego rozdziału potwierdzają przydatność autorskiej ramy WILD-RAIL w ocenie i planowaniu rozwiązań mitygujących wpływ transportu kolejowego na środowisko. Studium stanowi przykład, jak komplementarne metody badawcze, różnorodne źródła informacji oraz

interdyscyplinarna perspektywa mogą wspierać podejmowanie decyzji zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju. Przy sprzyjających warunkach instytucjonalnych i finansowych, przedstawione działania mogą zostać z powodzeniem wdrożone, stanowiąc modelowe rozwiązanie do zastosowania także w innych lokalizacjach.

Pomimo kompleksowości zaproponowanej ramy działań i rekomendacji, należy wskazać również potencjalne ograniczenia analizy. Przede wszystkim, badania terenowe prowadzone były w ujęciu jednorocznym, co może nie w pełni odzwierciedlać zmienność sezonową i wzorce migracyjne dzikich zwierząt. Istnieje także ryzyko, że w przypadku braku dostatecznych środków finansowych lub braku koordynacji między stronami zainteresowanymi, pełna realizacja zaleceń nie zostanie osiągnięta, a działania zostaną ograniczone do mniej efektywnych rozwiązań cząstkowych lub niewdrożone w ogóle. Trudności mogą pojawić się również na etapie integracji zaleceń z już funkcjonującymi procedurami eksploatacyjnymi oraz systemami zarządzania infrastrukturą. Wreszcie, skuteczność zastosowanych środków będzie zależna od utrzymania i ewaluacji w dłuższym okresie – co pozostaje poza zakresem niniejszej pracy i wymagać będzie zaangażowania instytucji odpowiedzialnych za monitoring, finansowanie i zarządzanie wpływem na środowisko.

9. Studium przypadku II: przykład ad hoc

9.1. Cel włączenia przypadku

Celem przedstawienia przykładu uzupełniającego było ukazanie możliwości zastosowania proponowanej adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej w sytuacjach mniej złożonych, ale wciąż istotnych z punktu widzenia ochrony przyrody, migracji zwierząt oraz bezpieczeństwa i stabilności transportu kolejowego.

Wybrano przypadek linii nr 139 Katowice – Zwardoń, który charakteryzuje się bardzo dużą przepustowością i przebiegiem przez tereny zarówno intensywnie zurbanizowane jak i tereny leśne o gęstym zadrzewieniu. Linia nie przebiega przez obszary objęte formami ochrony przyrody, lecz przecina korytarze ekologiczne pobliskich lasów, łączące rozległe kompleksy siedlisk. Liczne zgłoszenia kolizji ze zwierzętami na znaczenie tej linii jako przestrzeni potencjalnie konfliktowej.

W odróżnieniu od kompleksowego przypadku omówionego w Rozdziale 8, niniejsze studium ma charakter uproszczony i nie obejmuje wszystkich etapów rozwiązania zaproponowanego w Rozdziale 7 – zastosowano jej podstawowe założenia umożliwiające wstępną ocenę sytuacji i wskazanie potencjalnych działań mitygacyjnych. Służy zobrazowaniu elastyczności i skalowalności ramy WILD-RAIL i potencjalnego zastosowania w praktyce w postaci rozpoznania ad hoc, zrealizowanego w wyniku obserwacji koncentracji zdarzeń w terenie o wyraźnej funkcji korytarza ekologicznego.

9.2. Charakterystyka lokalizacji i identyfikacja zjawiska

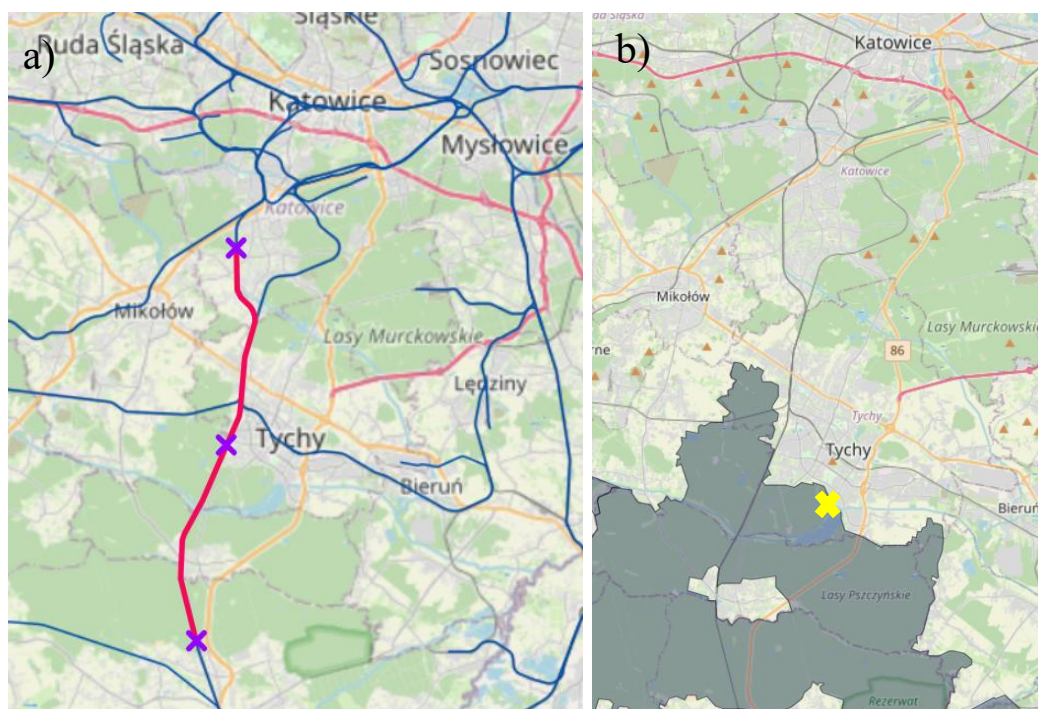
Na podstawie analizy danych PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. dotyczących kolizji na linii nr 139 zidentyfikowano wysoką liczbę zdarzeń – na całej długości odcinka PKP PLK zarejestrowało 637 potrąceń, natomiast na samym odcinku Katowice Podlesie – Piasek, czyli między 10 a 30 km – 302 zdarzenia w latach 2017–2021. Natomiast według rejestru Kolei Śląskich Sp. z o.o. z lat 2020–2024 wynika, że miało miejsce 420 zdarzeń na analizowanej linii, w tym 139 na odcinku przedmiotowym odcinka trasy. Także na tej linii odnotowano 47 uszkodzeń taboru oraz licznych opóźnień w związku z kolizji z dzikimi zwierzętami (pojedynczymi i w stadach), najczęściej z sarnami (41% zdarzeń), dzikami (36% zdarzeń) i jeleniami (13%).

Na analizowanym odcinku w prawie połowie zdarzeń uczestniczyły dziki (47,5% zdarzeń), w mniejszym stopniu sarny (34,5% zdarzeń) i jelenie (18%).

Linia nr 139 ma duże znaczenie dla ruchu pasażerskiego i towarowego jako część transeuropejskiej sieci transportowej o znaczeniu międzynarodowym. W zakresie przewozów pasażerskich, z linii korzystają przewoźnicy regionalni, tacy jak Koleje Śląskie, oraz przewoźnicy dalekobieżni, w tym PKP Intercity, oferujący połączenia międzyregionalne. Linia ta jest kluczowa dla mieszkańców regionu, umożliwiając dojazd do większych ośrodków miejskich, takich jak Katowice, Bielsko-Biała czy Żywiec, a także stanowi istotny szlak turystyczny prowadzący w Beskidy. Dzienna przepustowość odcinka Katowice – Tychy Żwaków (10–20 km) oszacowano na 140 przejazdów, natomiast odcinka Tychy Żwaków – Piasek (20–30 km) na 81 przejazdów dziennie.

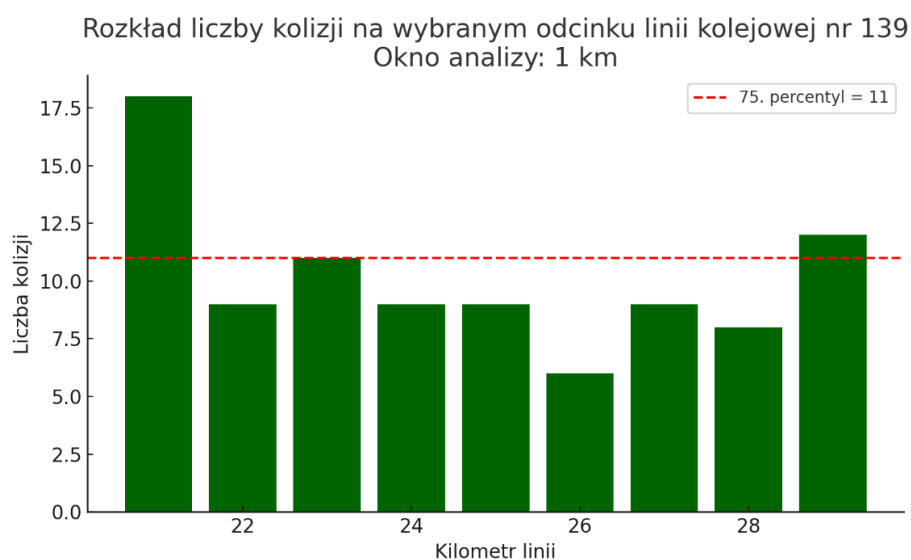
Na rysunku 9.1 przedstawiono przebieg odcinka badanej linii oraz mapę korytarzy ekologicznych w tym obszarze. Na wysokości 21 km linii kolejowej nr 139 torowisko

przecina lokalny korytarz ekologiczny. Z uwagi na funkcję migracyjną tego obszaru oraz zagęszczenie kolizji w jego obrębie, podjęto decyzję o przeprowadzeniu analizy terenowej.



Rys. 9.1. Porównanie a) mapy kolejowej z oznaczonym kolorem czerwonym badanym odcinkiem oraz punktami dla 10 km, 20 km i 30 km linii zaznaczonych fioletowymi krzyżykami oraz b) mapy korytarzy ekologicznych w tym obszarze wraz z miejscem przecięcia przez linię nr 139 zaznaczonym żółtym krzyżykiem [59,184]

Przebieg korytarza potwierdza regularne przemieszczanie się dzikich zwierząt w poprzek torów. Wysoką liczbę kolizji w rejonie między Katowicami a Tychami można wiązać z mozaiką krajobrazową (naprzemienność terenów leśnych i zabudowanych), obecnością barier antropogenicznych (m.in. dróg) oraz dużą liczebnością zwierząt kopytnych, zwłaszcza dzików, zasiedlających okolice zabudowy mieszkaniowej. Choć zjawisko to zasługuje na osobną analizę, w niniejszej pracy ograniczono się do wskazania najważniejszych przesłanek przestrzennych. Na rysunku 9.2 przedstawiono rozkład liczby kolizji na analizowanym odcinku 21–30 km.



Rys. 9.2. Rozkład linii kolizji na odcinku 21–30 km linii nr 139 wraz z wartością 75. percentyla

Statystyczna identyfikacja odcinków o zwiększonym ryzyku z użyciem 75. percentyla wskazała na szczególne nasilenie zdarzeń w obrębie 21–22 km, 23–24 km oraz 29–30 km. Zdecydowano o przeprowadzeniu analizy terenowej w przedziale 21–24 km.

9.3. Analiza terenowa

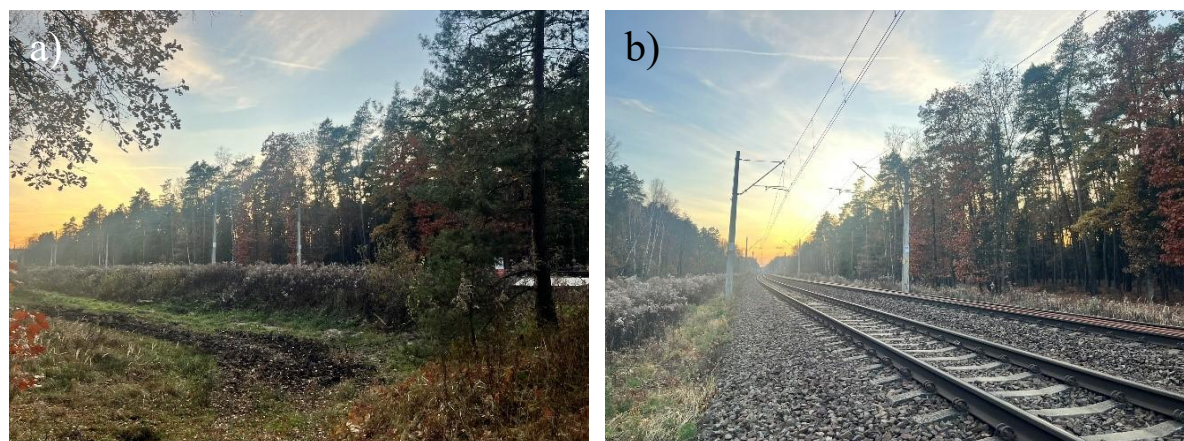
Na badanym odcinku torowisko biegnie na poziomie terenu lub w niewielkim wykopie, co sprzyja swobodnemu przekraczaniu linii przez zwierzęta. Jednocześnie, w warunkach gęstej roślinności, torowisko może być słabo widoczne z poziomu terenu, co zwiększa ryzyko kolizji — zwłaszcza w sytuacji, gdy zwierzę zostaje zaskoczone przez nadjeżdżający pociąg i ucieka w poprzek torów.

Podczas rozpoznania terenowego przeprowadzonego w listopadzie 2024 r. zaobserwowano liczne ślady obecności fauny. W przedziale 21–23 km udokumentowano wyraźne, wydeptane ścieżki migracyjne po obu stronach torowiska, zidentyfikowane na podstawie połamanych krzewów oraz tropów zwierząt kopytnych, prawdopodobnie dzików (rysunki 9.3–9.5).

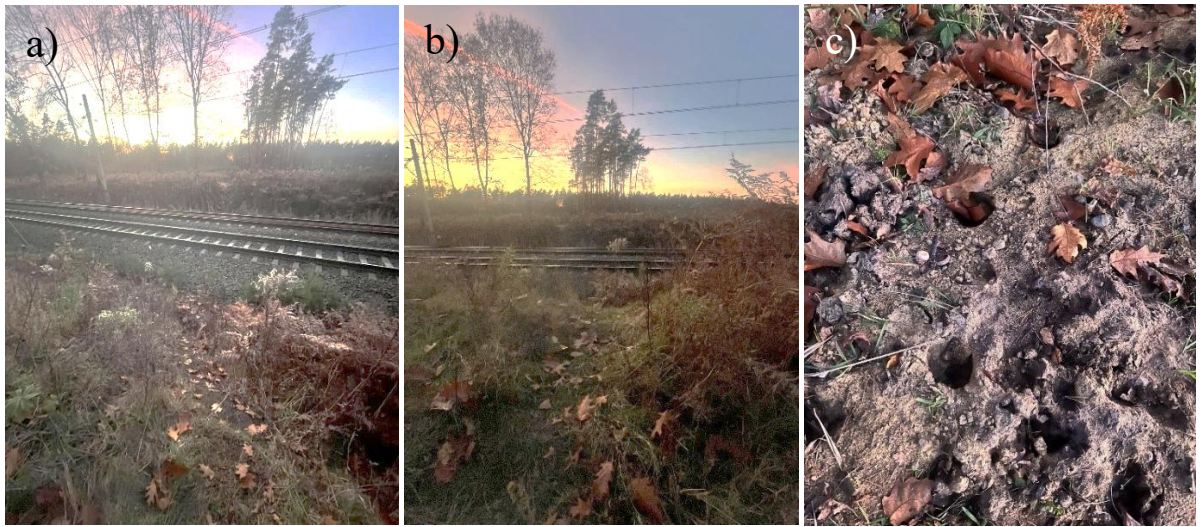
Odcinki 21–22 km oraz 23–24 km przebiegają w obniżeniu terenu, co czyni tory mniej widocznymi i może wpływać na koncentrację zdarzeń.



Rys. 9.3. Widok w kierunku Tychów na wysokości 21,9 km a) i b) z otaczających terenów c) z poziomu torów; można zaobserwować niewielki wykop i zasłaniającą tory roślinność



Rys. 9.4. Widok na tory w kierunku południowo-zachodnim, 23 km linii a) z terenów przytorowych b) z poziomu torów



Rys. 9.5. a) i b) ścieżki zwierząt w poprzek torów na 22–23 km linii c) ślady racic dzikich zwierząt (najprawdopodobniej dzika) zarejestrowane bezpośrednio przy torach na wysokości 22 km – liczne, głębokie tropy na miękkim podłożu oraz obecność ścieżek wskazują na intensywną obecność fauny kopytnej w analizowanym obszarze



Rys. 9.6. Przepust hydrauliczny nad ciekim, prawdopodobnie koryto boczne rzeki Gostyńki

Na wysokości km 22–23, gdzie tory są lepiej widoczne, odnotowano mniejszą liczbę kolizji, co może wskazywać na znaczenie widoczności jako czynnika ograniczającego ryzyko. Dodatkowo, na 23,5 km zidentyfikowano przepust hydrauliczny (przedstawiony na rysunku 9.6) o wystarczającej szerokości i wysokości, który może być wykorzystywany jako alternatywna trasa przekraczania torów przez zwierzęta.

9.4. Propozycja działania mitygującego

Z uwagi na analizowane uwarunkowania środowiskowe i techniczne:

- brak możliwości budowy przejść podziemnych (brak nasypów)
- ograniczone warunki do budowy przejść nadziemnych (płaski teren, długi pas migracyjny, wysokie koszty),

- duża przepustowość linii kolejowej
- potwierdzone liczne kolizje z udziałem stad zwierząt kopytnych, głównie dzików
- ograniczona widoczność torów z otaczającego terenu

proponuje się wdrożenie systemu ochrony biernej w postaci urządzeń odstrasżających zwierzęta (np. UOZ-1), aktywowanych sygnałem nadjeżdżającego pociągu. Rekomenduje się zastosowanie takiego rozwiązania na odcinku 21–24 km, w szczególności na fragmencie 21–22 km, a także przeprowadzenie zabiegów zarządzania roślinnością, polegających na przycinaniu krzewów i niskiej roślinności wzdłuż torowiska, w celu poprawy widoczności i zwiększenia świadomości przestrzennej zwierząt. Choć wymagają lokalnej ingerencji w infrastrukturę torową oraz obszary otaczające, mogą skutecznie ograniczyć obecność zwierząt na torowisku w momencie przejazdu pociągu. Wybór tej metody wynika z jej technicznej wykonalności oraz braku konieczności długofalowego planowania przestrzennego, jak w przypadku budowy przejść ekologicznych.

Nie przeprowadzono szczegółowej analizy skuteczności ani oceny ekonomicznej – przedstawione rozwiązania mają charakter orientacyjny i wpisują się w adaptacyjne zastosowanie opracowanej ramy WILD-RAIL.

9.5. Podsumowanie rozdziału

Przedstawiony przypadek stanowi przykład działania ad hoc, przeprowadzonego w odpowiedzi na zidentyfikowaną koncentrację kolizji na linii 139. Choć nie obejmował pełnego wdrożenia ramy WILD-RAIL, potwierdził możliwość zastosowania jej kluczowych elementów także w uproszczonych warunkach, bez konieczności pełnej analizy eksperckiej.

Badania terenowe i dane statystyczne wykazały, że nawet na odcinkach bez statusu ochrony przyrody, ale o wyraźnej funkcji migracyjnej, istnieje potrzeba podejmowania działań minimalizujących wpływ kolei na dzikie zwierzęta. Ograniczona widoczność torowiska, brak barier oraz lokalna liczna obecność gatunków ssaków kopytnych stwarzają warunki wysokiego ryzyka kolizji. Zaproponowane rozwiązania – urządzenia odstrasżające oraz zarządzanie roślinnością – stanowią praktyczne, technicznie wykonalne środki, możliwe do wdrożenia przy ograniczonych nakładach.

Studium to podkreśla znaczenie uwzględniania lokalnych kontekstów ekologicznych, także poza formalnymi obszarami chronionymi, w planowaniu rozwiązań dla zrównoważonego transportu kolejowego.

10. Szanse i wyzwania – rekomendacje środowiskowe w ramach panelu eksperckiego

Celem niniejszego rozdziału jest przedstawienie kluczowych wniosków i rekomendacji wynikających z przeprowadzonych pogłębionych, półstrukturyzowanych wywiadów eksperckich dotyczących praktycznych aspektów wdrażania działań środowiskowych w sektorze kolejowym. Wypowiedzi zebrane od przedstawicieli różnych środowisk – naukowego, instytucjonalnego, operacyjnego i biznesowego – zostały pogrupowane tematycznie, co pozwala na wyodrębnienie głównych obszarów problemowych oraz wskazanie możliwych kierunków usprawnień.

W omawianym zestawieniu uwzględniono opinie ekspertów i przedstawicieli instytucji zaangażowanych w ochronę środowiska w sektorze kolejowym:

- prof. dr hab. inż. Andrzeja Czerniaka z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, specjalisty w zakresie ekoinżynierii,
- dr inż. Andrzeja Massela – Dyrektora Instytutu Kolejnictwa
- dr inż. Katarzyny Gawlak – Naczelnik Działu Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem Kolei Śląskich Sp. z o.o.
- przedstawiciele Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o., reprezentujących stanowisko spółki
- Marka Stolarskiego – prezesa firmy NEEL Automatyka Przemysłowa Sp. z o.o., współpomysłodawcy i producenta systemów ochrony zwierząt UOZ-1.

Wypowiedzi ekspertów zawarte w tym rozdziale koncentrują się na aspektach przekrojowych i rekomendacyjnych – dotyczących zarówno szans, jak i barier we wdrażaniu skutecznych rozwiązań środowiskowych. Mają one charakter syntetyczny i stanowią próbę uchwycenia wspólnych obserwacji wynikających z praktyki zawodowej rozmówców. Warto zaznaczyć, że inne – bardziej szczegółowe i specjalistyczne – fragmenty wywiadów zostały wykorzystane we wcześniejszych rozdziałach pracy, m.in. w aspektów wdrażania oraz oceny efektywności konkretnych rozwiązań technicznych.

Poniższe zestawienie podzielono na pięć obszarów tematycznych, których wspólnym mianownikiem jest potrzeba skuteczniejszej integracji aspektów środowiskowych z planowaniem, projektowaniem i eksploatacją infrastruktury kolejowej.

10.1. Planowanie i procedury

Skuteczne wdrażanie działań minimalizujących negatywny wpływ kolei na środowisko przyrodnicze wymaga uwzględnienia ich już na etapie planowania inwestycji. Eksperci podkreślają znaczenie jakości raportów OOS, potencjału modernizacji jako okazji do integracji rozwiązań ochronnych oraz potrzebę rozwoju bardziej precyzyjnych modeli prognostycznych i dokumentacji projektowej.

Jednym z głównych wyzwań w realizacji inwestycji kolejowych są skomplikowane i czasochłonne procedury środowiskowe. W przypadku modernizacji istniejących linii obowiązek uzyskania decyzji środowiskowej może znacząco wydłużyć czas przygotowania projektu. Jednocześnie podkreślono, że postępowania środowiskowe nie powinny być traktowane jedynie jako wymóg formalny. Dla uzyskania rzeczywistych efektów przyrodniczych istotna jest staranność i adekwatność projektowanych działań, a nie wyłącznie ich zgodność proceduralna.

W warunkach polskich działania ochronne są znacznie łatwiej realizowane jako część większych inwestycji infrastrukturalnych (np. elektryfikacji linii) niż jako samodzielne zadania. Wynika to z dysproporcji między dostępnością środków inwestycyjnych a utrzymaniowych. Z tego względu rekomenduje się, aby rozwiązania przyrodnicze planować na etapie przygotowywania projektów modernizacyjnych, gdzie można je łatwiej włączyć w zakres prac, choć nie jest to niemożliwe także w innych przypadkach.

Jednym z istotnych problemów identyfikowanych w praktyce inwestycyjnej jest niedoskonałość modeli prognostycznych wykorzystywanych do oceny oddziaływań środowiskowych. Przykłady zastosowania nadmiarowych środków ochrony hałasowej wskazują, że prognozy nie zawsze odzwierciedlają rzeczywiste uwarunkowania terenowe, co prowadzi do nieoptymalnych decyzji projektowych. Wskazano potrzebę rozwoju bardziej precyzyjnych modeli, opartych na lokalnych danych oraz weryfikowalnych pomiarach porealizacyjnych [194].

W przypadku infrastruktury kolejowej trudność wdrażania przejść dla zwierząt występuje zwłaszcza wtedy, gdy linia nie podlega modernizacji, ponieważ podstawą ich realizacji jest potrzeba wynikająca z raportu OOS, opracowywanego przed inwestycją – modernizacją lub budową nowej linii. Modernizacja stanowi natomiast dogodny moment do integracji działań środowiskowych, pod warunkiem wcześniejszego uwzględnienia tej potrzeby w procesie planistycznym i konsultacyjnym [220].

Podkreśla się konieczność zwiększenia świadomości wśród instytucji odpowiedzialnych za infrastrukturę oraz stworzenia mechanizmów umożliwiających szybsze wdrażanie rozwiązań również poza projektami modernizacyjnymi. Zarekomendowano m.in. rozwijanie systemów skalowalnych i elastycznych technologicznie oraz poprawę przepływu informacji pomiędzy wykonawcami, projektantami a jednostkami ochrony środowiska.

Zachodzi potrzeba opracowania jednolitych wytycznych projektowych dotyczących systemów ochrony zwierząt na terenach kolejowych – zarówno w zakresie ich planowania, jak i wdrażania oraz oceny skuteczności. Dokument taki powinien obejmować m.in. minimalną długość chronionego odcinka, zasady monitoringu oraz integracji z systemami sterowania ruchem kolejowym [222].

Dodatkowym aspektem jest koordynacja działań międzysektorowych – niezbędne jest prowadzenie spójnej polityki ochrony środowiska w transporcie, obejmującej zarówno kolej, jak i infrastrukturę drogową. W przypadkach, gdy linia kolejowa przebiega równolegle do autostrady, a jedynie droga jest wyposażona w ciągłe wygrozdzenia, powstają sytuacje, w których zwierzęta zawracają na tory po napotkaniu bariery, co zwiększa ryzyko kolizji. Brak koordynacji rozwiązań infrastrukturalnych może zatem prowadzić do efektów odwrotnych od zamierzonych [157].

10.2. Współpraca między instytucjami i odpowiedzialność

Wielowymiarowy charakter ochrony środowiska w sektorze kolejowym wymaga zaangażowania wielu podmiotów: zarządców infrastruktury, przewoźników, instytucji ochrony przyrody i administracji publicznej. Eksperti zwracają uwagę na brak wyraźnego przypisania odpowiedzialności, potrzebę koordynacji działań oraz budowy stabilnych i przejrzystych modeli współpracy międzysektorowej.

Z perspektywy przewoźników dostrzegalny jest brak jednolitego podejścia do przeciwdziałania kolizjom ze zwierzętami na poziomie systemowym. Oczekuje się, że

infrastruktura udostępniana odpłatnie do realizacji przewozów będzie zarządzana w sposób zapewniający możliwie wysoką ciągłość i bezpieczeństwo ruchu. Brak jednoznacznego impulsu lub decyzyjności w tym zakresie skutkuje ograniczoną skutecznością i powtarzalnością problemu [157].

Tymczasem wdrażanie rozwiązań w zakresie ograniczania kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami wiąże się z szeregiem wyzwań organizacyjnych i systemowych. Do najczęściej wskazywanych należą ograniczona interoperacyjność systemów informatycznych, rozproszenie kompetencji pomiędzy różne podmioty (zarządców infrastruktury, przewoźników i instytucje ochrony środowiska) oraz niedobór dedykowanych środków finansowych. Jednocześnie zauważalna jest potrzeba przejścia od podejścia reaktywnego, koncentrującego się na reagowaniu na zdarzenia, do planowania zintegrowanego, opartego na danych i długofalowej analizie. Choć formalnie za środowiskowy aspekt infrastruktury odpowiada jej zarządca, to niektóre działania zaradcze, takie jak montaż urządzeń odstraszających, bywają kierowane do przewoźników – przy braku jasnych ram współodpowiedzialności, mechanizmów finansowania i przypisania skutków zdarzeń. Z perspektywy rozwoju systemu ochrony środowiska w transporcie kolejowym wskazane byłoby stworzenie przejrzystego modelu współpracy między instytucjami, który obejmowałby zarówno planowanie i realizację działań prewencyjnych, jak i wspólne korzystanie z danych oraz zasobów organizacyjnych i finansowych [156].

Efektywność działań zależy również od jakości współpracy pomiędzy różnymi instytucjami: zarządcami infrastruktury, nadleśnictwami, parkami narodowymi i krajobrazowymi, kołami łowieckimi oraz jednostkami samorządu terytorialnego. Tylko spójne planowanie przestrzenne – z uwzględnieniem istniejących i planowanych przejść – może zapewnić trwałość i funkcjonalność tych obiektów. Konieczna jest współpraca z instytucjami zarządzającymi terenami przyrodniczymi, prowadzenie interdyscyplinarnych konsultacji oraz odpowiednie zaplanowanie parametrów technicznych [220]. Wdrażanie skutecznych rozwiązań powinno odbywać się w ramach wspólnych analiz, projektów badawczych oraz spotkań konsultacyjnych. Tego typu podejście mogłoby umożliwić lepsze rozpoznanie lokalnych uwarunkowań, wybór adekwatnych środków technicznych oraz skuteczne ich zakotwiczenie w realiach operacyjnych i środowiskowych [157].

Dodatkowym problemem jest brak wyraźnego przypisania odpowiedzialności za przeciwdziałanie kolizjom ze zwierzętami. Koszty związane z wypadkami ponoszą przewoźnicy, podczas gdy działania prewencyjne leżą po stronie zarządcy infrastruktury [222]. W dokumentach zarządcy infrastruktury pojawiają się zapisy ograniczające jego formalną odpowiedzialność w przypadku zdarzeń z udziałem zwierząt. Powoduje to trudności w jednoznacznym określeniu podmiotu odpowiedzialnego za realizację działań prewencyjnych, co może osłabiać skuteczność podejmowanych interwencji [157].

10.3. Dane, monitoring i zarządzanie wiedzą

Podejmowanie skutecznych decyzji środowiskowych powinno być oparte na rzetelnych danych przestrzennych i funkcjonalnych. Eksperti rekomendują rozwijanie nowoczesnych systemów monitoringu (również wspieranych przez sztuczną inteligencję), centralnych baz danych o kolizjach oraz narzędzi umożliwiających analizę ryzyka środowiskowego także poza formalną procedurą OOS.

Wśród kluczowych rekomendacji znajduje się potrzeba utworzenia centralnej bazy danych zdarzeń z udziałem dzikich zwierząt na drogach i torach, co umożliwiłoby prowadzenie analiz przestrzennych i wsparcie zarządzania populacjami [220].

Skuteczną podstawą do planowania działań ochronnych powinna być statystyczna analiza miejsc kolizji pojazdów z udziałem zwierząt. Sugeruje się wykorzystanie takich danych jako narzędzia do planowania rozmieszczenia środków mitygacyjnych, przy uwzględnieniu lokalnych warunków środowiskowych i funkcjonalnych [222].

Podkreśla się konieczność rozwijania narzędzi identyfikujących problemy środowiskowe niezależnie od formalnej procedury OOŚ. Takie narzędzia mogą w przyszłości wspierać nie tylko planowanie, ale i operacyjne zarządzanie ryzykiem środowiskowym [194].

10.4. Wyzwania wdrożeniowe i bariery systemowe

Mimo rosnącej świadomości ekologicznej, wciąż istnieją liczne bariery organizacyjne, prawne i proceduralne utrudniające skuteczne wdrażanie rozwiązań środowiskowych. Eksperti wskazują m.in. na problem traktowania kolizji ze zwierzętami jako zdarzeń nadzwyczajnych, niedopasowanie rozwiązań do praktyki operacyjnej oraz brak spójnego podejścia do ich implementacji poza projektami modernizacyjnymi.

Ograniczenie liczby kolizji ze zwierzętami wymaga wdrożenia rozwiązań, które zagwarantują, że linia kolejowa pozostaje wolna od przeszkód. Z perspektywy przewoźnika każde zdarzenie tego typu generuje opóźnienia, uszkodzenia taboru i problemy operacyjne, dlatego istotne jest, aby infrastruktura była odpowiednio zabezpieczona [157].

Kolizje ze zwierzętami wciąż bywają traktowane jako „zdarzenie nadzwyczajne” (zgodnie z Instrukcją Ruchu nr 8, czyli jednego z normatywnych dokumentów PKP PLK), a nie element operacyjnego zarządzania, choć jak wskazują statystyki, nie zdarzają się aż tak rzadko, i nie do końca wpisane są w główne nurty zarządzania infrastrukturą czy planowania przewozów. W praktyce może to ograniczać możliwość skutecznego reagowania, a także utrudniać identyfikację podmiotów odpowiedzialnych za wdrażanie środków zaradczych [156].

Podkreśla się konieczność zwiększenia świadomości wśród instytucji odpowiedzialnych za infrastrukturę oraz stworzenia mechanizmów umożliwiających szybsze wdrażanie rozwiązań również poza projektami modernizacyjnymi. Zarekomendowano m.in. rozwijanie systemów skalowalnych i elastycznych technologicznie oraz poprawę przepływu informacji pomiędzy wykonawcami, projektantami a jednostkami ochrony środowiska [222].

Motywacja do wdrażania rozwiązań środowiskowych przez zarządcę infrastruktury kolejowej uzależniona jest w dużej mierze od struktury celów operacyjnych, które są definiowane przez właściciela – w tym przypadku Skarb Państwa. Jeżeli w ramach celów zaradczych wskazana zostanie konieczność poprawy punktualności pociągów lub ograniczenia zakłóceń w ruchu, a kolizje ze zwierzętami zostaną uznane za istotny czynnik wpływający na te parametry, możliwe staje się skuteczniejsze wdrażanie działań minimalizujących ryzyko takich zdarzeń [194].

10.5. Argumenty ekonomiczne i potencjał integracji z celami strategicznymi

Ekologiczne podejście do rozwoju infrastruktury kolejowej nie musi pozostawać w sprzeczności z celami operacyjnymi i finansowymi. Eksperti podkreślają znaczenie integracji rozwiązań ochronnych z celami niezawodności i punktualności przewozów oraz wskazują na potrzebę pełniejszego uwzględnienia kosztów społecznych i ekonomicznych

kolizji. W dłuższej perspektywie narzędzia ESG mogą stać się impulsem do większego zaangażowania inwestycyjnego w ochronę przyrody.

Choć transport kolejowy generuje mniej kolizji niż drogowy, to skutki społeczne i ekologiczne są realne i powinny być uwzględniane w procesie decyzyjnym. Koszty związane ze zdarzeniami (koszty odszkodowań, leczenia, rehabilitacji pasażerów w wyniku wypadku kolejowego, w dalszej kolejności koszty napraw, opóźnień, wyłączenia uszkodzonego taboru z eksploatacji, koszty utylizacji padłej zwierzyny itd.) mogą być porównywalne z kosztami budowy kilku przejść dla zwierząt. Polska jako państwo rozwinięte gospodarczo i społecznie, inwestuje w rozwiązania proekologiczne. Kluczowe jest zachowanie rozsądnej równowagi między potrzebami ochrony przyrody a potrzebami transportowymi [220].

Kolizje z dzikimi zwierzętami generują konkretne konsekwencje operacyjne, takie jak opóźnienia, konieczność wyłączenia taboru z eksploatacji, dodatkowe koszty logistyczne oraz utrudnienia w organizacji przewozów. Wskazuje się, że skuteczność działań ochronnych może wzrosnąć, jeśli będą one postrzegane nie tylko jako instrumenty ochrony przyrody, ale również jako element wspierający niezawodność i ciągłość realizacji usług przewozowych. Integracja celów środowiskowych z celami operacyjnymi może ułatwić ich wdrażanie w praktyce, zwłaszcza w ramach planowania inwestycji infrastrukturalnych lub modernizacji linii kolejowych. Choć obecnie kwestie środowiskowe często ustępują celom technicznym i finansowym, to w perspektywie długoterminowej zauważono potencjał polityk ESG (ang. *Environmental, Social, Governance*) jako czynnika wspierającego rozwój ekologicznego podejścia i możliwość skutecznego wdrażania działań ochrony przyrody w sektorze kolejowym [194].

Zrównoważony rozwój, choć często wykorzystywany jako hasło, został oceniony jako koncepcja wymagająca całościowego i interdyscyplinarnego podejścia. Powinien on obejmować zarówno kwestie środowiskowe, jak i społeczne oraz ekonomiczne, przy czym konieczne jest unikanie dominacji krótkoterminowego podejścia komercyjnego, opartego wyłącznie na zysku. Środowisko przyrodnicze stanowi pierwotny kontekst funkcjonowania wszelkiej infrastruktury, w tym transportowej. Zwrócono uwagę, że działania człowieka powinny być prowadzone z pełnym zrozumieniem istniejących procesów przyrodniczych i relacji pomiędzy środowiskiem a infrastrukturą. Działania modernizacyjne i inwestycyjne powinny być podejmowane z uwzględnieniem tych zależności, aby nie zaburzać dynamicznej równowagi ekologicznej [222].

11. Podsumowanie i wnioski

Zrównoważony transport kolejowy stanowi jeden z elementów realizacji globalnych i europejskich strategii środowiskowych, w tym Agendy 2030 Organizacji Narodów Zjednoczonych. Jednak pomimo wielu zalet, rozwój i eksploatacja infrastruktury kolejowej generują istotne oddziaływania na ekosystemy. Do najpoważniejszych należą: fragmentacja siedlisk, powstawanie barier migracyjnych oraz zwiększona śmiertelność dzikich zwierząt wskutek kolizji z pojazdami szynowymi. Ochrona bioróżnorodności w tym kontekście wymaga interdyscyplinarnego podejścia, łączącego wiedzę przyrodniczą, techniczną i operacyjną. Szczególnie ważne jest uwzględnianie działań ekologicznych już na etapie przygotowywania inwestycji oraz w projektach modernizacyjnych, kiedy integracja rozwiązań ochronnych jest organizacyjnie i finansowo najbardziej dogodna. Równocześnie należy tworzyć mechanizmy umożliwiające wdrażanie działań ochronnych w fazie eksploatacji, także poza dużymi projektami inwestycyjnymi.

Analiza strategii i aktów prawnych dotyczących ochrony środowiska, w tym bioróżnorodności, zapewniła solidny kontekst dla prowadzonych rozważań. Polityka Unii Europejskiej, nastawiona na przewidywanie i reagowanie na dynamiczne zmiany, odgrywa w tym procesie kluczową rolę. Można przewidywać, że w niedalekiej przyszłości dotychczasowe wymagania okażą się niewystarczające, co stworzy potrzebę wdrożenia nowych narzędzi oceny oddziaływania na środowisko oraz bardziej efektywnych metod zapobiegania i łagodzenia skutków działalności transportowej.

W kontekście ochrony bioróżnorodność ekosystemów związanej z transportem kolejowym szczególnego znaczenia nabiera problem kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami. Wyniki analizy danych statystycznych dotyczących kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w Polsce potwierdzają, że zjawisko to ma istotną skalę zarówno pod względem liczby zdarzeń, jak i ich konsekwencji dla środowiska, przewoźników oraz całego sektora transportowego. Trend wzrostowy liczby zdarzeń w analizowanym okresie wskazuje, że obecne środki zapobiegawcze są niewystarczające. Działania podejmowane przez zarządcę infrastruktury często mają charakter zachowawczy, wynikający z zapisów raportów oceny oddziaływania na środowisko, co może ograniczać uwzględnianie perspektywy długofalowej. Priorytetowe traktowanie drożności korytarzy migracyjnych sprzyja ograniczonemu stosowaniu ogrodzeń, jednak istnieje przestrzeń do szerszego wykorzystania rozwiązań alternatywnych, takich jak urządzenia odstrasżające czy adaptacja istniejących przepustów jako przejścia dla zwierząt. Warto podkreślić, że wiele z tych rozwiązań nie było wcześniej szeroko wdrażanych, ponieważ przy niższych prędkościach pociągów zwierzęta miały większe szanse na uniknięcie zderzenia. Obecnie, gdy na wielu zmodernizowanych liniach prędkości eksploatacyjne wynoszą 120–160 km/h, a na wybranych odcinkach magistralnych osiągają 200 km/h, czas reakcji zwierzęcia jest znacząco skrócony, co zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji. W przypadku braku wdrożenia skutecznych środków zapobiegawczych zjawisko to może utrzymywać się na wysokim poziomie lub wykazywać tendencję do intensyfikacji w przyszłości. Zarówno dane statystyczne, jak i opinie przewoźników wskazują, że choć problem kolizji nie jest obecnie traktowany jako priorytetowy w polityce transportowej, to stopniowo zyskuje na znaczeniu i powinien być uznany za jedno z istotnych wyzwań wymagających reakcji systemowej.

Przyjęta w pracy teza zakładała, że opracowanie systemowej, adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej do planowania i wdrażania działań łagodzących negatywny wpływ transportu kolejowego na dzikie zwierzęta – uwzględniającej aspekty przestrzenne, przyrodnicze i operacyjne – stanowi rozwiązanie wspierające proces decyzyjny na rzecz ochrony bioróżnorodności i ograniczania kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami.

Adaptacyjna rama WILD-RAIL (ang. *Wildlife-Impact Limitation & Decision framework for Rail transport*) została opracowana w oparciu o aktualny stan wiedzy, obejmujący rozwiązania stosowane od przełomu XX i XXI wieku po najnowsze technologie z 2025 r., obowiązujące przepisy i konwencje prawa krajowego i międzynarodowego oraz cele strategiczne sektora kolejowego w zakresie ochrony środowiska i zrównoważonego rozwoju.

Integralnym elementem ramy jest wprowadzenie wskaźnika W_{KP1000} (liczba kolizji na 1000 przejazdów), który zapewnia obiektywną ocenę skali zjawiska i pozwala na porównanie między odcinkami linii kolejowych. Dodatkowo zastosowanie 75. percentyla jako proggu klasyfikacyjnego umożliwia jednoznaczne i oparte na danych statystycznych wyznaczanie hotspotów kolizji. Oba elementy stanowią innowację metodologiczną w zakresie badań nad wpływem transportu na ekosystemy.

Rama WILD-RAIL została ponadto wzbogacona o wykorzystanie matrycy SWOT i elementów PESTEL, które posłużyły do identyfikacji czynników przyrodniczych, technicznych, społecznych i regulacyjnych, oraz metody FMEA, umożliwiające hierarchizację i ocenę ryzyka związanego z proponowanymi działaniami mitygacyjnymi. Zastosowanie tych podejść nadaje proponowanemu rozwiązaniu charakter weryfikowalnego narzędzia inżynierskiego, łączącego klasyczne metody zarządzania ryzykiem z problematyką ochrony środowiska.

Rozwiązanie zostało zweryfikowane w studium przypadku dotyczącym linii kolejowej nr 356, na odcinku km 12,0–13,0, przebiegającym przez kluczowy korytarz migracyjny łączący Park Krajobrazowy Puszcza Zielonka z obszarem Natura 2000 Biedrusko. Efektem zastosowania było sformułowanie spójnych rekomendacji wdrożenia środków mitygacyjnych obejmujących m.in. adaptację istniejących przepustów oraz montaż urządzeń ochrony zwierząt typu UOZ-1. Wyniki przeprowadzonych analiz potwierdziły spójność logiczną między doбором adekwatnych rozwiązań a minimalizacją wpływu transportu kolejowego na bioróżnorodność. Opracowane rozwiązanie stanowi praktyczne uzupełnienie dotychczasowych strategii środowiskowych, odpowiadając na lukę w zakresie reagowania na zjawiska zwiększonej liczby kolizji, w tym potencjalnie z udziałem gatunków chronionych.

Jego struktura umożliwia przekształcenie w praktyczne narzędzie decyzyjne – od prostego interaktywnego arkusza kalkulacyjnego, przez stronę WWW po aplikację informatyczną – wskazujące wymagane kroki, odpowiedzialne podmioty oraz podstawy wdrożenia rozwiązań mitygacyjnych. W pracy został zaprezentowany prototyp takiego narzędzia w formie interaktywnego formularza stworzonego w języku Python w środowisku Jupyter Notebook, którego działanie zilustrowano na przykładowym ekranie aplikacji. Prototyp ten dowodzi, że koncepcja jak i forma ramy WILD-RAIL ma charakter uniwersalny i elastyczny, zachowując przy tym logikę procesu analityczno-decyzyjnego i zorientowanie na lokalną specyfikę. Jednocześnie rozwiązanie charakteryzuje się łatwością wdrożenia i dalszego rozwijania, dzięki czemu może być integrowane z istniejącymi systemami zarządzania infrastrukturą kolejową.

Potwierdzona spójność, skuteczność i potencjał innowacyjny uzasadniają spełnienie kryteriów przyjęcia tezy pracy.

Szczególną wartością przeprowadzonych badań było opracowanie innowacyjnego katalogu rozwiązań służących ograniczeniu negatywnego wpływu transportu kolejowego na dzikie zwierzęta, obejmującego ocenę dotychczasowych doświadczeń opisanych w rozproszonych publikacjach naukowych i dokumentach branżowych. Każde z ujętych w nim działań zostało opisane wraz z oceną skuteczności, wskazaniem warunków optymalnego zastosowania oraz potencjalnych ograniczeń. Integralną część katalogu stanowią także metody monitoringu i ewaluacji, umożliwiające weryfikację efektywności wdrożonych rozwiązań. Tym samym katalog z klasyfikacją rozwiązań staje się integralną elementem autorskiej propozycji ramy działania w celu ochrony bioróżnorodności w transporcie kolejowym.

W przeprowadzonych wywiadach eksperci z różnych środowisk – naukowego, instytucjonalnego, operacyjnego i biznesowego podkreślają konieczność lepszej koordynacji działań mitygacyjnych. Potrzebne są jednolite, krajowe wytyczne określające parametry techniczne zabezpieczeń, minimalną długość chronionych odcinków, zasady monitoringu oraz możliwości integracji z innymi systemami. Jednym z największych wyzwań pozostaje niejednoznaczne przypisanie odpowiedzialności za wdrażanie środków mitygacyjnych oraz ponoszenie kosztów kolizji. Brak klarownych ram współodpowiedzialności ogranicza skuteczność działań i utrudnia ich finansowanie. Problem ten łączy się z potrzebą stworzenia centralnej bazy danych o kolizjach oraz rozwoju nowoczesnych systemów monitoringu, które pozwoliłyby na szybką identyfikację problemów i lepsze planowanie działań prewencyjnych. Istotnym postulatem jest także zmiana klasyfikacji kolizji ze zwierzętami – z „zdarzeń nadzwyczajnych” na zdarzenia wymagające działań systemowych. W efekcie działania ekologiczne byłyby postrzegane nie tylko jako obowiązek ochrony przyrody, lecz także jako element wspierający efektywność operacyjną kolei. Wdrożenie powyższych rekomendacji wymaga interdyscyplinarnej współpracy pomiędzy zarządcami infrastruktury, przewoźnikami, instytucjami ochrony przyrody, nadleśnictwami, samorządami oraz kołami łowieckimi. Rozwiązania powinny być dostosowywane do lokalnych warunków, oparte na wspólnych analizach i konsultacjach, tak aby jednocześnie chronić środowisko naturalne i zapewniać sprawne funkcjonowanie transportu kolejowego.

Wyniki analiz jednoznacznie wskazują na potrzebę stworzenia zintegrowanego systemu zarządzania oddziaływaniem na ekosystemy w transporcie kolejowym – analogicznego do istniejących systemów zarządzania bezpieczeństwem (SMS). Taki system powinien obejmować zarówno jednolite standardy techniczne i proceduralne, jak i centralną bazę danych o kolizjach, co umożliwiłoby skuteczne planowanie i finansowanie działań prewencyjnych.

Zgromadzony materiał badawczy oraz wyniki analiz i studiów przypadku pozwoliły na sformułowanie wniosków poznawczych, odnoszących się do charakteru, skali i uwarunkowań oddziaływania transportu kolejowego na bioróżnorodność:

- transport kolejowy oddziałuje na bioróżnorodność ekosystemów m.in. poprzez fragmentację siedlisk, tworzenie barier migracyjnych oraz zwiększoną śmiertelność zwierząt wynikającą z kolizji z pojazdami szynowym
- problem kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami jest zauważalny i szczególnie nasilony w miejscach, gdzie linie kolejowe przecinają aktywne korytarze

migracyjne w warunkach terenowych sprzyjających wtargnięciu zwierząt na tory kolejowe

- kolizje z udziałem gatunków rzadkich lub objętych ochroną prawną mają szczególnie negatywne konsekwencje, gdyż mogą prowadzić do trwałych strat w lokalnych populacjach oraz zakłócenia funkcjonowania całych ekosystemów
- zdarzenia z udziałem zwierząt powodują dla przewoźników kolejowych opóźnienia w ruchu pociągów oraz uszkodzenia taboru, generując istotne koszty operacyjne, co czyni je problemem zarówno środowiskowym, jak i ekonomicznym
- adaptacyjna rama analityczno-decyzyjna do wdrażania rozwiązań mitygujących wpływ transportu kolejowego na dzikie zwierzęta (WILD-RAIL) ma na celu ochronę bioróżnorodności i łączy aspekty przyrodnicze, techniczne i operacyjne w spójny proces decyzyjny, możliwy do zastosowania zarówno na etapie przedinwestycyjnym, jak i w trakcie eksploatacji linii kolejowej w odpowiedzi na zidentyfikowane potrzeby
- zastosowanie wskaźników W_{KP1000} i 75. percentyla wskazującego potencjalne hotspoty oraz metod SWOT, PESTEL i FMEA stanowi oryginalny wkład metodologiczny, zapewniający mierzalność, porównywalność i hierarchizację działań
- wyniki wywiadów eksperckich potwierdziły potrzebę rozwijania i wdrażania rozwiązań ograniczających wpływ transportu na środowisko, lepszej integracji wiedzy naukowej z doświadczeniami eksploatacyjnymi oraz ujednoczenia procedur dotyczących zapobiegania kolizjom pojazdów szynowych ze zwierzętami i reagowania na ich skutki
- ujęcie problemu w kontekście strategii zrównoważonego rozwoju pokazuje, że skuteczna ochrona bioróżnorodności w transporcie kolejowym wymaga integracji działań międzysektorowych oraz długoterminowego monitoringu efektów.

Wyniki badań oraz opinie ekspertów umożliwiły także opracowanie wniosków utylitarnych, wskazujących praktyczne możliwości wykorzystania zaproponowanych rozwiązań w planowaniu, eksploatacji i zarządzaniu infrastrukturą kolejową:

- adaptacyjna rama analityczno-decyzyjna WILD-RAIL powinna być wdrożona przez zarządców infrastruktury kolejowej oraz przewoźników jako narzędzie wspierające proces decyzyjny w zakresie doboru, lokalizacji i wdrażania działań mitygujących
- wprowadzenie jednolitego systemu raportowania i monitoringu zdarzeń z udziałem zwierząt, z wykorzystaniem wskaźników W_{KP1000} i 75. percentyla pozwoli na tworzenie rzetelnych baz danych wspierających proces decyzyjny w ochronie bioróżnorodności na liniach kolejowych rozwiązanie stanowi uzupełnieniem dotychczasowo stosowanych ocen oddziaływania na środowisko i dokumentów strategicznych
- rama WILD-RAIL może być rozwijane w formie otwartej aplikacji, co zwiększa jej użyteczność, adaptacyjność i potencjał wdrożeniowy
- wnioski z wywiadów eksperckich stanowią punkt wyjścia do aktualizacji wytycznych projektowych i eksploatacyjnych w zakresie minimalizacji liczby kolizji pojazdów szynowych z dzikimi zwierzętami oraz zachowania ciągłości siedlisk
- usprawnienie komunikacji i przepływu informacji między sektorem kolejowym a podmiotami odpowiedzialnymi za ochronę przyrody sprzyja lepszemu rozumieniu uwarunkowań środowiskowych i dostosowywaniu działań do lokalnych potrzeb

- metodyka może być adaptowana do innych rodzajów infrastruktury liniowej, co sprzyja wdrażaniu spójnych rozwiązań ochrony bioróżnorodności w skali regionalnej, krajowej i międzynarodowej.

W perspektywie dalszych badań wyraźnie pojawia się potrzeba rozwoju narzędzi i procedur wspierających podejmowanie decyzji środowiskowych w sektorze kolejowym. Szczególne znaczenie ma dostosowanie ich do nowych wyzwań, takich jak zmiany klimatyczne, postępująca urbanizacja oraz rosnąca presja cywilizacyjna. Ważne jest, aby procedury te obejmowały wszystkie etapy cyklu życia infrastruktury – od planowania i projektowania, przez realizację i modernizację, po eksploatację. Kierunki rozwoju obejmują m.in.:

- przekształcenie adaptacyjnej ramy analityczno-decyzyjnej WILD-RAIL w konkretne narzędzie operacyjne – procedurę lub mapę drogową – w formie arkusza kalkulacyjnego lub aplikacji w wybranym środowisku programistycznym, dostosowanej do potrzeb użytkownika
- zapewnienie funkcjonowania ramy w formule otwartego dostępu, umożliwiającej jej powszechne wykorzystanie
- rozwinięcie narzędzia o integrację z systemami GIS, modułami mapowymi, modelami rejestracji i predykcji kolizji w czasie rzeczywistym oraz algorytmami sztucznej inteligencji
- wykorzystanie zintegrowanego rozwiązania do zaawansowanej analizy wzorców danych i optymalizacji doboru środków ograniczających wpływ transportu kolejowego na ekosystemy
- adaptację wypracowanego modelu do innych form transportu i wykorzystanie go jako wzorca wdrażania działań ekologicznych wpisując się w założenia strategii Unii Europejskiej w zakresie ochrony bioróżnorodności oraz Celu 9 i Celu 15 Zrównoważonego Rozwoju.

Przedstawione w pracy rozwiązanie stanowi odpowiedź na aktualne wyzwania w zakresie ochrony środowiska i bezpieczeństwa transportu kolejowego. Inspiruje do podejmowania przyszłych inicjatyw służących minimalizacji presji transportu na przyrodę oraz zwiększaniu poziomu bezpieczeństwa ruchu. Wyniki badań pokazują, jak istotne jest zintegrowane, kompleksowe podejście do problemu, łączące działania na różnych płaszczyznach – technicznej, środowiskowej, organizacyjnej i prawnej. Opracowana rama WILD-RAIL jest zarówno koncepcją, jak i uporządkowanym procesem, który może być dostosowywany do potrzeb oraz uwarunkowań lokalnych.

Rama analityczno-decyzyjna WILD-RAIL dla ochrony bioróżnorodności w transporcie kolejowym stanowi nowatorskie, autorskie rozwiązanie, które nie występuje dotąd w literaturze przedmiotu. W odróżnieniu od dotychczasowych podejść, ograniczających się do opisowych ocen oddziaływania na środowisko oraz reaktywnych ekspertyz, zapewnia interdyscyplinarną, systemową i adaptacyjną perspektywę. Integruje wiedzę inżynierską i przyrodniczą, a jej struktura pozwala na przekształcenie w narzędzie informatyczne wspierające proces decyzyjny. Tym samym stanowi ona spójne i metodycznie ugruntowane rozwiązanie, przewyższające obecnie stosowane praktyki pod względem kompleksowości i potencjału rozwojowego i implementacyjnego.

Integracja wiedzy technicznej i przyrodniczej jest nie tylko możliwa, lecz także powinna stać się jednym z istotnych elementów realizacji celów zrównoważonego rozwoju w sektorze kolejowym, co potwierdzają wyniki przedstawione w dysertacji.

Oświadczenia

1. Oświadczenie dotyczące wykorzystania danych udostępnionych przez instytucje zewnętrzne

Oświadczam, że dane udostępnione przez następujące podmioty: PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o., Koleje Śląskie Sp. z o.o., Koleje Małopolskie Sp. z o.o., Koleje Dolnośląskie S.A., Arriva RP Sp. z o.o., dotyczące kolizji pojazdów kolejowych ze zwierzętami, związanych z tym uszkodzeń technicznych, opóźnień w ruchu oraz kosztów napraw, zostały wykorzystane wyłącznie na potrzeby realizacji niniejszej rozprawy doktorskiej. Każdorazowo w treści pracy wskazano źródło pochodzenia danych zgodnie z zasadami rzetelności naukowej oraz poszanowania praw właścicieli informacji. Dane te nie były i nie będą wykorzystywane w żadnym innym celu bez uprzedniej zgody podmiotów, które je udostępniły.

2. Oświadczenie dotyczące wywiadów eksperckich

Oświadczam, że wszystkie informacje pozyskane w ramach przeprowadzonych wywiadów eksperckich zostały uzyskane w sposób etyczny, za świadomą zgodą rozmówców. Treści te zostały następnie autoryzowane przez osoby udzielające wypowiedzi, a ich wykorzystanie w niniejszej rozprawie doktorskiej odbyło się za ich wiedzą i zgodą.

3. Oświadczenie dotyczące wykorzystania narzędzi generatywnej sztucznej inteligencji

W związku z przygotowaniem niniejszej rozprawy doktorskiej, zgodnie z dokumentem „Zasady wykorzystywania AI w działalności akademickiej Politechniki Poznańskiej” z dnia 24 kwietnia 2024 r., oświadczam, że na etapie opracowywania pracy korzystałam z narzędzi generatywnej sztucznej inteligencji wyłącznie w sposób pomocniczy, zgodny z zasadami rzetelności akademickiej. Narzędzia te zostały wykorzystane do korekty językowej, stylistycznej i edytorskiej wybranych fragmentów tekstu; wsparcia w porządkowaniu i ujednocnianiu treści przeglądowych, w tym w zakresie zachowania spójności terminologicznej i klarowności wypowiedzi, wspomagającego opracowywania i porządkowania zestawień tabelarycznych, wygenerowania wykresów (rys. 5.1, rys. 5.3 – 5.5, rys. 6.1, rys. 8.5, rys. 9.2) na podstawie danych pochodzących z otrzymanych zewnętrznych źródeł. Dla zapewnienia poprawności i przejrzystości prezentowanych wyników, wszystkie dane zostały zweryfikowane i opracowane końcowo przy użyciu środowisk obliczeniowych Python i Excel, zgodnie z przyjętą metodyką.

Podkreślam, że narzędzia generatywnej sztucznej inteligencji nie były wykorzystywane do tworzenia treści merytorycznych, formułowania wniosków badawczych ani analizy wyników. Całość pracy – w tym struktura rozprawy, opracowanie materiału empirycznego, interpretacja danych oraz sformułowane wnioski – stanowi rezultat samodzielnej pracy autorki.

Bibliografia

- [1] G.H. Brundtland, Our common future – call for action, *Environ. Conserv.* 14 (1987) 291–294. <https://doi.org/10.1017/s0376892900016805>.
- [2] A. Królikowska-Tomeczak, Sustainable Development Indicators: Origin and Types, in: W. Leal Filho, A.M. Azul, L. Brandli, A. Lange Salvia, T. Wall (Eds.), *Encycl. UN Sustain. Dev. Goals*, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2021: pp. 1049–1059. https://doi.org/10.1007/978-3-319-95873-6_108.
- [3] United Nations, Johannesburg Declaration on Sustainable Development, World Summit Sustain. Dev. (2002). <http://www.un-documents.net/jburgdec.htm>.
- [4] A.G.M. La Vina, G. Hoff, A.M. DeRose, The Outcomes of Johannesburg: Assessing the World Summit on Sustainable Development, *SAIS Rev.* 23 (2003) 53–70. <https://doi.org/10.1353/SAIS.2003.0022>.
- [5] M.A. Rosen, Sustainability: Concepts, Definitions, and Applications, in: A. Alvarez-Risco, M.A. Rosen, S. Del-Aguila-Arcentales, D. Marinova (Eds.), *Build. Sustain. Cities Soc. Econ. Environ. Factors*, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2020: pp. 15–26. https://doi.org/10.1007/978-3-030-45533-0_2.
- [6] K. Murphy, The social pillar of sustainable development: a literature review and framework for policy analysis, *Sustain. Sci. Pract. Policy.* 8 (2012) 15–29. <https://doi.org/10.1080/15487733.2012.11908081>.
- [7] E. Rachel, The Concept of Sustainable Development: Definition and Defining Principles | Scinapse, *Florida Int. Univ.* 2015 (2015) 10–13140. <https://www.scinapse.io/papers/2184349672>.
- [8] United Nations, Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development, (2015). <https://doi.org/10.5040/9781509934058.0025>.
- [9] E. Jain, A Review Study On sustainable Development Goals: UN 2030 Agenda, *Our Herit.* 68 (2020) 1–13.
- [10] N.F. Shayan, N. Mohabbati-Kalejahi, S. Alavi, M.A. Zahed, Sustainable Development Goals (SDGs) as a Framework for Corporate Social Responsibility (CSR), *Sustain.* 14 (2022) 1222. <https://doi.org/10.3390/su14031222>.
- [11] Agenda 2030 | Kampania 17 Celów. <https://kampania17celow.pl/agenda-2030/> (dostęp 11 stycznia 2025).
- [12] D.J. Griggs, M. Nilsson, A. Stevance, D. McCollum, A guide to SDG interactions: from science to implementation, International Council for Science, Paris, 2017.
- [13] M. Kok, B. Metz, J. Verhagen, S. Van Rooijen, Integrating development and climate policies: National and international benefits, *Clim. Policy.* 8 (2008) 103–118. <https://doi.org/10.3763/cpol.2007.0436>.
- [14] M.R.W. Rands, W.M. Adams, L. Bennun, S.H.M. Butchart, A. Clements, D. Coomes, A. Entwistle, I. Hodge, V. Kapos, J.P.W. Scharlemann, W.J. Sutherland, B. Vira, Biodiversity Conservation: Challenges Beyond 2010, *Science* 329 (2010) 1298–1303. <https://doi.org/10.1126/science.1189138>.
- [15] A. Zanella, Foreste nel futuro - No forest, no future, *For. - Riv. Di Selvic. Ed Ecol. For.* 21 (2024) 82–92. <https://doi.org/10.3832/efor4729-021>.
- [16] R. Sayre, C. Frye, S. Breyer, P.R. Roehrdanz, P.R. Elsen, K. Butler, C. Brown, J. Cress, D. Karagulle, M. Martin, F. Sangermano, R.L. Smyth, T.L. Sohl, N.H. Wolff, D.J. Wright, Z. Wu, Potential 2050 distributions of World Terrestrial Ecosystems from projections of changes in World Climate Regions and Global Land Cover, *Glob. Ecol. Conserv.* 57 (2025) e03370. <https://doi.org/10.1016/J.GECCO.2024.E03370>.
- [17] Convention on Biological Diversity:, Strategic plan for biodiversity 2011-2020 and the Aichi targets, (2010) 6–13. <https://www.cbd.int/doc/strategic-plan/2011-2020/Aichi-Targets-EN.pdf> (dostęp 11 maja 2024).
- [18] IPBES Plenary at its seventh session, Summary for policymakers of the global assessment report on biodiversity and ecosystem services, (2019). <https://www.ipbes.net/global-assessment> (dostęp 3 czerwca 2024).
- [19] WWF, Living Planet Report 2020-Bending the curve of biodiversity loss, Gland, Switzerland, 2020.

- [20] IPBES, Global assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES Secr. (2019).
- [21] D.J. Beare, E.M. Bennett, J.M. Hall-Spencer, J.S. I Ingram, F. Jaramillo, R. Ortiz, N. Ramankutty, J.A. Sayer, D. Shindell, B.M. Campbell, Agriculture production as a major driver of the Earth system exceeding planetary boundaries, *Ecol. Soc. Publ.* 22 (2017). <https://doi.org/10.5751/ES-09595-220408>.
- [22] European Environmental Agency, State of nature in the EU — Results from reporting under the nature directives 2007–2012, Publication Office, 2009. <https://doi.org/10.2800/705440>.
- [23] J. Ekstrom, L. Bennun, R. Mitchel, A cross-sector guide for implementing the mitigation hierarchy, Cross Sector Biodiversity Initiative, Cambridge, 2015. <http://www.csbi.org.uk/our-work/mitigation-hierarchy-guide> (dostęp 16 kwietnia 2024)
- [24] Planetary Boundaries Science, Potsdam Institute for Climate Impact Research, Planetary Health Check 2024. <https://www.planetaryhealthcheck.org/planetary-science> (dostęp 10 lutego 2025).
- [25] The convention on wetlands of international importance especially as waterfowl habitat, (1971). [https://doi.org/10.1016/S0378-777X\(83\)80165-6](https://doi.org/10.1016/S0378-777X(83)80165-6).
- [26] G.V.T. Matthews, The Ramsar Convention on Wetlands: its History and Development, Ramsar Convention Bureau, Gland, Switzerland, 2013. <http://www.ramsar.org>. (dostęp 18 czerwca 2024).
- [27] P. Luică, Implementation of the Danube Strategy improves rail transport, (2011). <https://www.railwaypro.com/wp/implementation-of-the-danube-strategy-improves-rail-transport/> (dostęp 2 sierpnia 2024).
- [28] Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals, (1979). <https://www.cms.int/en/convention-text> (dostęp 18 czerwca 2024).
- [29] A. Trouwborst, Transboundary wildlife conservation in a changing climate: Adaptation of the bonn convention on migratory species and its daughter instruments to climate change, *Diversity*. 4 (2012) 258–300. <https://doi.org/10.3390/d4030258>.
- [30] Central Asian Mammals Initiative, Conv. Conserv. Migr. Species Wild Anim. <https://www.cms.int/en/legalinstrument/central-asian-mammals-initiative-0> (dostęp 2 sierpnia 2024).
- [31] A. Trouwborst, Conserving European biodiversity in a changing climate: The Bern convention, the European Union Birds and Habitats Directives and the adaptation of nature to climate change, *Rev. Eur. Community Int. Environ. Law*. 20 (2011) 62–77.
- [32] P. Genovesi, C. Shine, European strategy on invasive alien species: Convention on the Conservation of European Wildlife and Habitats (Bern Convention), Council of Europe, 2004.
- [33] Emerald network of Areas of Special Conservation Interest, Conv. Conserv. Eur. Wildl. Nat. Habitats. (2014). <https://www.coe.int/en/web/bern-convention/emerald-network> (dostęp 2 sierpnia 2024).
- [34] Rewilding Europe | Making Europe a Wilder Place, (2021). <https://rewildingeurope.com/> (dostęp 2 sierpnia 2024).
- [35] Convention on biological diversity: Text and Annexes, 6 (1992) 193–233. <https://www.cbd.int/convention/text> (dostęp 3 sierpnia 2024).
- [36] GEF, Climate adaptation in Bhutan (2024). <https://www.thegef.org/newsroom/multimedia/climate-adaptation-bhutan> (dostęp 3 sierpnia 2024).
- [37] R. Ament, A. Clevenger, R. Van Der Ree, Addressing ecological connectivity in the development of roads, railways and canals, IUCN WCPA technical report series, 2023. <https://doi.org/10.53847/IUCN.CH.2023.PATRS.5.en>.
- [38] S. Löfgren, K.L. Nilsson, C.M. Johansson, Considering landscape in strategic transport planning, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 65 (2018) 396–408. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.09.001>.
- [39] European Environmental Agency, Briefing no. 05/2020 Building a coherent Trans-European Nature Network, 2020.
- [40] LIFE Karpaty Łączę, Zielona Infrastruktura. <https://zielonainfrastruktura.karpatylacza.pl/life-networking> (dostęp 29 marca 2025).
- [41] C.J. Bastmeijer, T. Koivurova, Theory and Practice of Transboundary Environmental Impact Assessment, Brill | Nijhoff, Leiden, The Netherlands, 2007. <https://doi.org/>

- 10.1163/ej.9789004164796.i-400.
- [42] C.-R. Papp, I. Dostál, V. Hlaváč, G.M. Berchi, D. Romportl, Rapid linear transport infrastructure development in the Carpathians: A major threat to the integrity of ecological connectivity for large carnivores, *Nat. Conserv.* 47 (2022) 35–63. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.47.71807>.
- [43] Dyrektywa 2001/42/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 czerwca 2001 r. w sprawie oceny wpływu niektórych planów i programów na środowisko, (2001). <https://eur-lex.europa.eu/PL/legal-content/summary/assessment-of-the-certain-effects-of-plans-and-programmes-on-the-environment-sea.html> (dostęp 24 stycznia 2025).
- [44] B.B. Cupiał, Strategiczna Ocena Oddziaływania na Środowisko jako ewaluacja ex ante, *Zarządzanie Publiczne*. 18 (2012) 61–73.
- [45] A. Liubchenko, General Principles of target designation of agricultural lands, *Three Seas Econ. J.* 5 (2024) 86–90. <https://doi.org/10.30525/2661-5150/2024-5-13>.
- [46] L. Lazar, A. Spinu, L. Boicenco, A. Oros, D. Nicoleta, E. Bisinicu, V. Abaza, F. Adrian, H. George, O. Marin, E. Pantea, F. Timofte, O. Vlas, S. Korpinen, Methodology for prioritizing marine environmental pressures under various management scenarios in the Black Sea, *Front. Mar. Sci.* 11 (2024). <https://doi.org/10.3389/fmars.2024.1388877>.
- [47] Ł. Szkudlarek, Prognoza oddziaływania na środowisko dla projektu dokumentu „PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. – zamierzenia inwestycyjne na lata 2021-2030 z perspektywą do 2040 roku”, Wrocław, 2021.
- [48] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Zamierzenia inwestycyjne na lata 2021-2030 z perspektywą do 2040 roku, Warszawa, 2021.
- [49] Assessment of the effects of projects on the environment (EIA), (2022). <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/assessment-of-the-effects-of-projects-on-the-environment-eia.html> (dostęp 3 sierpnia 2024).
- [50] H.J. Byron, J.R. Treweek, W.R. Sheate, S. Thompson, Road developments in the UK: An analysis of ecological assessment in environmental impact statements produced between 1993 and 1997, *J. Environ. Plan. Manag.* 43 (2000) 71–97. <https://doi.org/10.1080/09640560010775>.
- [51] A. Jordan, The implementation of EU environmental policy: A policy problem without a political solution?, *Environ. Plan. C Gov. Policy*. 17 (1999) 69–90. <https://doi.org/10.1068/c170069>.
- [52] The Habitats Directive - EU measures to conserve Europe's wild flora and fauna, *Dir. Environ. Eur. Union.* (2023). https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/habitats-directive_en (dostęp 3 sierpnia 2024).
- [53] D. Evans, The habitats of European Union Habitats Directive, *Biol. Environ. Proc. R. Irish Acad.* 106B (2006) 167–173.
- [54] C.L. Diaz, The EC Habitats Directive Approaches its Tenth Anniversary: An Overview, *Rev. Eur. Comp. Int. Environ. Law.* 10 (2001). <https://doi.org/10.1111/1467-9388.00288>.
- [55] I. Ramirez, M. Tarzia, M.P. Dias, I.J. Burfield, J.A. Ramos, S. Garthe, V.H. Paiva, How well is the EU protecting its seabirds? Progress in implementing the Birds Directive at sea, *Mar. Policy*. 81 (2017) 179–184.
- [56] J. Rodrigo-Illarri, L. González-González, M.E. Rodrigo-Clavero, E. Cassiraga, Advances in implementing strategic environmental assessment (sea) techniques in Central America and the Caribbean, *Sustain.* 12 (2020) 4039. <https://doi.org/10.3390/SU12104039>.
- [57] D. Evans, Building the European Union's Natura 2000 network, *Nat. Conserv.* 1 (2012) 11–26. <https://doi.org/10.3897/natureconservation.1.1808>.
- [58] Inwestycja na Obszarze Natura 2000. <https://legalnabudowa.pl/inwestycja-na-obszarze-natura-2000> (dostęp 4 czerwca 2024).
- [59] Pracownia na rzecz Wszystkich Istot, Mapa korytarzy ekologicznych w Polsce, Insytut Biol. Ssaków Pol. Akad. Nauk. <https://mapa.korytarze.pl/> (dostęp 3 lutego 2025).
- [60] Komisja Europejska, Unijna strategia na rzecz bioróżnorodności 2030. Przywracanie przyrody do naszego życia, 2020.
- [61] S. Atapattu, *Emerging principles of international environmental law*, Brill | Nijhoff, Leiden, The Netherlands, 2007.
- [62] N. Chornopyska, K. Stasiuk, Logistics potential of the railway as a key for sustainable and

- secure transport development, *Transport Means*. 25 (2020), 421-425.
- [63] J. Milewicz, D. Mokrzan, G.M. Szymański, Environmental Impact Evaluation as a Key Element in Ensuring Sustainable Development of Rail Transport, *Sustain*. 15 (2023). <https://doi.org/10.3390/su151813754>.
- [64] M. Vilotijević, M. Vukićević, L. Lazarević, Z. Popović, Sustainable railway infrastructure and specific environmental issues in the republic of Serbia, *Teh. Vjesn*. 25 (2018) 516–523. <https://doi.org/10.17559/TV-20171019124644>.
- [65] H. Rau, J. Scheiner, Sustainable mobility: Interdisciplinary approaches, *Sustain*. 12 (2020) 1–6. <https://doi.org/10.3390/su12239995>.
- [66] M. Jacyna, M. Wasiak, K. Lewczuk, M. Kłodawski, Simulation model of transport system of Poland as a tool for developing sustainable transport, *Arch. Transp*. 31 (2014) 23–35. <https://doi.org/10.5604/08669546.1146982>.
- [67] S. Behrends, The Significance of the Urban Context for the Sustainability Performance of Intermodal Road-rail Transport, *Procedia - Soc. Behav. Sci*. 54 (2012) 375–386. <https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2012.09.757>.
- [68] International Union of Railways, Community of European Railway and Infrastructure, Rail Transport and Environment Facts & Figures, 2008.
- [69] B. Dorsey, M. Olsson, L.J. Rew, Ecological Effects of Railways on Wildlife, *Handb. Road Ecol*. (2015) 219–227. <https://doi.org/10.1002/9781118568170.ch26>.
- [70] A. Heinold, Comparing emission estimation models for rail freight transportation, *Transp. Res. Part D Transp. Environ*. 86 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102468>.
- [71] T. Ito, L. Badamjav, A. Tsunekawa, M. Shinoda, Habitat Fragmentation by Railways as a Barrier to Great Migrations of Ungulates in Mongolia, in: L. Borda-de-Água, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira (Eds.), *Railw. Ecol.*, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017: pp. 229–246. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_14.
- [72] P.S. Gilhooly, S.E. Nielsen, J. Whittington, C.C. St. Clair, Wildlife mortality on roads and railways following highway mitigation, *Ecosphere*. 10 (2019). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2597>.
- [73] S.M. Santos, F. Carvalho, A. Mira, Current knowledge on wildlife mortality in railways, in: L. Borda-de-Água, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira (Eds.), *Railw. Ecol.*, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017: pp. 11–22. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_2.
- [74] W. Babisch, W. Swart, D. Houthuijs, J. Selander, G. Bluhm, G. Pershagen, K. Dimakopoulou, A.S. Haralabidis, K. Katsouyanni, E. Davou, P. Sourtzi, E. Cadum, F. Vigna-Taglianti, S. Floud, A.L. Hansell, Exposure modifiers of the relationships of transportation noise with high blood pressure and noise annoyance, *J. Acoust. Soc. Am*. 132 (2012) 3788–3808. <https://doi.org/10.1121/1.4764881>.
- [75] M.G. Smith, I. Croy, M. Ögren, O. Hammar, E. Lindberg, K. Persson Waye, Physiological effects of railway vibration and noise on sleep, *J. Acoust. Soc. Am*. 141 (2017) 3262–3269. <https://doi.org/10.1121/1.4983302>.
- [76] L. Goines, L. Hagler, Noise pollution: A modern plague, *South. Med. J*. 100 (2007) 287–294. <https://doi.org/10.1097/SMJ.0B013E3180318BE5>.
- [77] J. Selander, M.E. Nilsson, G. Bluhm, M. Rosenlund, M. Lindqvist, G. Nise, G. Pershagen, Long-Term Exposure to Road Traffic Noise and Myocardial Infarction, *Epidemiology*. 20 (2009). <https://doi.org/10.1097/EDE.0b013e31819463bd>.
- [78] R. Palacin, J. Correia, M. Zdziech, T. Cassese, T. Chitakova, Rail environmental impact: Energy consumption and noise pollution assessment of different transport modes connecting Big Ben (London, UK) and Eiffel Tower (Paris, Fr), *Transp. Probl*. 9 (2014) 9–27.
- [79] Nuisance and Health Impacts of Railway Noise - Noise and Vibration Technical Advice (NOVITA) Project, 2022.
- [80] M. Dittrich, F. Letourneaux, C. Jones, H. Brammer, C. Gerbig, G. Dinhl, E. Verheijen, A. Kuijpers, F. Aubin, A New Standard for the Measurement of Source Terms for Railway Noise Prediction Models, in: *INTER-NOISE NOISE-CON Congr. Conf. Proc.*, Institute of Noise Control Engineering, 2019: pp. 7316–7327.
- [81] D. V Matijević, V.M. Popović, Overview of Modern Contributions in Vehicle Noise and Vibration Refinement with Special Emphasis on Diagnostics., *FME Trans*. 45 (2017).

- [82] D. Thompson, C. Jones, Noise and vibration from the wheel–rail interface, in: *Wheel. Interface Handb.*, Elsevier, 2009: pp. 477–509.
- [83] P. Komorski, G.M. Szymanski, T. Nowakowski, M. Orczyk, Advanced acoustic signal analysis used for wheel-flat detection, *Lat. Am. J. Solids Struct.* 18 (2021) e338.
- [84] S. Ouakka, O. Verlinden, G. Kouroussis, Railway ground vibration and mitigation measures: benchmarking of best practices, *Railw. Eng. Sci.* 30 (2022) 1–22.
- [85] I. Croy, M.G. Smith, K.P. Waye, Effects of train noise and vibration on human heart rate during sleep: an experimental study, *BMJ Open.* 3 (2013) e002655.
- [86] C.L. Brown, A.R. Hardy, J.R. Barber, K.M. Fristrup, K.R. Crooks, L.M. Angeloni, The effect of human activities and their associated noise on ungulate behavior, *PLoS One.* 7 (2012) e40505. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040505>.
- [87] B.M. Siemers, A. Schaub, Hunting at the highway: traffic noise reduces foraging efficiency in acoustic predators, *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 278 (2011) 1646–1652. <https://doi.org/10.1098/RSPB.2010.2262>.
- [88] C.D. Francis, J.R. Barber, A framework for understanding noise impacts on wildlife: an urgent conservation priority, *Front. Ecol. Environ.* 11 (2013) 305–313. <https://doi.org/10.1890/120183>.
- [89] R. Barrientos, L. Borda-de-Água, Railways as barriers for wildlife: current knowledge, in: L. Borda-de-Água, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira (Eds.), *Railw. Ecol.*, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017: pp. 43–64.
- [90] G. Shannon, M.F. McKenna, L.M. Angeloni, K.R. Crooks, K.M. Fristrup, E. Brown, K.A. Warner, M.D. Nelson, C. White, J. Briggs, S. McFarland, G. Wittemyer, A synthesis of two decades of research documenting the effects of noise on wildlife, *Biol. Rev.* 91 (2016) 982–1005. <https://doi.org/10.1111/brv.12207>.
- [91] J. Wiącek, M. Polak, M. Filipiuk, M. Kucharczyk, Does railway noise affect forest birds during the winter?, *Eur. J. For. Res.* 138 (2019) 907–915. <https://doi.org/10.1007/s10342-019-01212-3>.
- [92] J. Wiącek, M. Kucharczyk, Do birds avoid railroads as has been found for roads, *Environmental Manag.* (2015).
- [93] E. Bergamini, S. Prandelli, F. Minelli, R.C. Gatti, Impacts of noise pollution from high-speed rail and road on bird diversity: a case study in a protected area of Italy, *Environ. Sci. Pollut. Res.* (2024). <https://doi.org/10.1007/S11356-024-33372-0>.
- [94] L. Falcão Rodrigues, C. Mata Estacio, J. Herranz Barrera, A.E. Santamaría Figueroa, J.E. Malo Arrázola, High-speed railway infrastructure leads to species-specific changes and biotic homogenisation in surrounding bird community, *PLoS One.* 19 (2024) e0301899. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0301899>.
- [95] P.S. Lucas, R.G. de Carvalho, C. Grilo, Railway Disturbances on Wildlife: Types, Effects, and Mitigation Measures, in: L. Borda-de-Água, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira (Eds.), *Railw. Ecol.*, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017: pp. 81–99. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_6.
- [96] J.L. Blickley, G.L. Patricelli, Impacts of Anthropogenic Noise on Wildlife: Research Priorities for the Development of Standards and Mitigation, *J. Int. Wildl. Law Policy.* 13 (2010) 274–292. <https://doi.org/10.1080/13880292.2010.524564>.
- [97] J. Korzeb, Analiza drgań komunikacyjnych z zastosowaniem teorii falek, *Pr. Nauk. Politechniki Warsz.* 77 (2011) 45–56.
- [98] J. Milewicz, D. Mokrzan, T. Nowakowski, G.M. Szymański, Using the MIMO Method to Evaluate the Modal Properties of the Elements of a Wheelset in an Active Experiment, *Vib. Phys. Syst.* 33 (2022).
- [99] H. Tallis, C.M. Kennedy, M. Ruckelshaus, J. Goldstein, J.M. Kiesecker, Mitigation for one & all: An integrated framework for mitigation of development impacts on biodiversity and ecosystem services, *Environ. Impact Assess. Rev.* 55 (2015) 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.06.005>.
- [100] Y. Hao, H. Qi, S. Liu, V. Nian, Z. Zhang, Study of Noise and Vibration Impacts to Buildings Due to Urban Rail Transit and Mitigation Measures, *Sustainability.* 14 (2022). <https://doi.org/10.3390/su14053119>.
- [101] D.P. Connolly, G.P. Marecki, G. Kouroussis, I. Thalassinakis, P.K. Woodward, The growth of

- railway ground vibration problems — A review, *Sci. Total Environ.* 568 (2016) 1276–1282. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.09.101>.
- [102] C. Zuo, M. Birkin, G. Clarke, F. McEvoy, A. Bloodworth, Reducing carbon emissions related to the transportation of aggregates: Is road or rail the solution?, *Transp. Res. Part A Policy Pract.* 117 (2018) 26–38. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.08.006>.
- [103] International Union of Railways, 2022 Global Rail Sustainability Report, Paris, France, 2023.
- [104] M. Lawrence, R. Bullock, The role of rail in decarbonizing transport in developing countries, World Bank Washington, DC, USA, 2022.
- [105] S. Abbasi, A. Jansson, U. Sellgren, U. Olofsson, Particle Emissions From Rail Traffic: A Literature Review, *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 43 (2013) 2511–2544. <https://doi.org/10.1080/10643389.2012.685348>.
- [106] M.K. Kim, D. Park, M. Kim, J. Heo, S. Park, H. Chong, A study on characteristic emission factors of exhaust gas from diesel locomotives, *Int. J. Environ. Res. Public Health.* 17 (2020) 1–12. <https://doi.org/10.3390/ijerph17113788>.
- [107] C. Mulley, D.A. Hensher, D. Cosgrove, Is rail cleaner and greener than bus?, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 51 (2017) 14–28. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.12.004>.
- [108] M. Kamińska, Ł. Rymaniak, P. Lijewski, N. Szymlet, P. Daszkiewicz, R. Grzeszczyk, Investigations of Exhaust Emissions from Rail Machinery during Track Maintenance Operations, *Energies.* 14 (2021). <https://doi.org/10.3390/en14113141>.
- [109] E. John, Z.S. Bungwa, J.R. Mwangi, D.S. Silayo, Effects of Standard-gauge Railway Development on Biodiversity and Forest Conservation, CABI Books. (2024) 9–20. <https://doi.org/10.1079/9781800626942.0002>.
- [110] J.N. Galloway, Acid deposition: Perspectives in time and space, *Water. Air. Soil Pollut.* 85 (1995) 15–24. <https://doi.org/10.1007/BF00483685>.
- [111] S. Roy, Ecological Consequences of Railway Infrastructure Development: A Case Study of the Belgrade–Novi Sad Corridor, *Oppor. Challenges Sustain.* 2 (2023) 116–129. <https://doi.org/10.56578/ocs020301>.
- [112] M. Kamińska, D. Kołodziejek, N. Szymlet, P. Fuć, R. Grzeszczyk, Measurement of rail vehicles exhaust emissions, *Combust. Engines.* 61 (2022).
- [113] K.G. Logan, J.D. Nelson, B.C. McLellan, A. Hastings, Electric and hydrogen rail: Potential contribution to net zero in the UK, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 87 (2020) 102523. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102523>.
- [114] A. González-Gil, R. Palacin, P. Batty, J.P. Powell, A systems approach to reduce urban rail energy consumption, *Energy Convers. Manag.* 80 (2014) 509–524. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.01.060>.
- [115] M. Szkoda, Ocena efektywności modernizacji lokomotywy spalinowej serii SM42 w oparciu o analizę LCC, *Rail Veh.* (2012) 35–39. <https://doi.org/10.53502/rail-139421>.
- [116] M. Ćwil, W. Bartnik, S. Jarzębowski, Railway vehicle energy efficiency as a key factor in creating sustainable transportation systems, *Energies.* 14 (2021) 1–13. <https://doi.org/10.3390/en14165211>.
- [117] H.L. Chen, J.L. Koprowski, Barrier effects of roads on an endangered forest obligate: influences of traffic, road edges, and gaps, *Biol. Conserv.* 199 (2016) 33–40.
- [118] J.N. Popp, J. Hamr, Seasonal use of railways by wildlife, *Diversity.* 10 (2018) 104.
- [119] A. Benítez-López, R. Alkemade, P.A. Verweij, The impacts of roads and other infrastructure on mammal and bird populations: a meta-analysis, *Biol. Conserv.* 143 (2010) 1307–1316.
- [120] A.W. Coffin, From roadkill to road ecology: A review of the ecological effects of roads, *J. Transp. Geogr.* 15 (2007) 396–406.
- [121] N. Balkenhol, L.P. Waits, Molecular road ecology: exploring the potential of genetics for investigating transportation impacts on wildlife, *Mol. Ecol.* 18 (2009) 4151–4164.
- [122] M. D’Amico, F. Ascensão, M. Fabrizio, R. Barrientos, C. Gortázar, Twenty years of road ecology: a topical collection looking forward for new perspectives, *Eur. J. Wildl. Res.* 64 (2018) 1–2.
- [123] R. Barrientos, F. Ascensão, P. Beja, H.M. Pereira, L. Borda-de-Água, Railway ecology vs. road ecology: similarities and differences, *Eur. J. Wildl. Res.* 65 (2019) 0–9. <https://doi.org/10.1007/s10344-018-1248-0>.
- [124] J. Romanowski, Korytarze i łączność siedlisk w ekologii i ochronie przyrody, *Wiadomości*

- Ekol. 2 (2008) 67–78.
- [125] Infra Eco Network Europe (IENE), Biodiversity & Infrastructure Handbook, 2023. <https://www.biodiversityinfrastructure.org/> (dostęp 24 stycznia 2025).
- [126] B. Iuell, H.G.J. Bekker, R. Cuperus, J. Dufek, G. Fry, C. Hicks, V. Hlaváč, V. Keller, C. Rosell, T. Sangwine, N. Tørsløv, B. le M. Wandall, Wildlife and traffic: a European handbook for identifying conflicts and designing solutions, KNNV Publ., 2003.
- [127] T.Y. Ito, B. Lhagvasuren, A. Tsunekawa, M. Shinoda, S. Takatsuki, B. Buuveibaatar, B. Chimeddorj, Fragmentation of the Habitat of Wild Ungulates by Anthropogenic Barriers in Mongolia, *PLoS One*. 8 (2013) e56995. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0056995>.
- [128] R.A.S. Cerboncini, J.J. Roper, F.C. Passos, Edge effects without habitat fragmentation? Small mammals and a railway in the Atlantic Forest of southern Brazil, *Oryx*. 50 (2016) 460–467. <https://doi.org/10.1017/S0030605314001070>.
- [129] M. Bhattacharya, R.B. Primack, J. Gerwein, Are roads and railroads barriers to bumblebee movement in a temperate suburban conservation area?, *Biol. Conserv.* 109 (2003) 37–45.
- [130] Y. V Kornilev, S.J. Price, M.E. Dorcas, Between a rock and hard place: responses of Eastern Box Turtles (*Terrapene carolina*) when trapped between railroad tracks, *Herpetol. Rev.* 37 (2006) 145–148.
- [131] L. Fahrig, Effects of Habitat Fragmentation on Biodiversity, *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 34 (2003) 487–515. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.34.011802.132419>.
- [132] D.-Y. Ouédraogo, A. Villemey, S. Vanpeene, A. Coulon, V. Azambourg, M. Hulard, E. Guinard, Y. Bertheau, F. Flamerie De Lachapelle, V. Ruel, E. Le Mitouard, A. Jeusset, M. Vargac, I. Witté, H. Jactel, J. Touroult, Y. Reyjol, R. Sordello, Can linear transportation infrastructure verges constitute a habitat and/or a corridor for vertebrates in temperate ecosystems? A systematic review, *Environ. Evid.* 9 (2020) 13. <https://doi.org/10.1186/s13750-020-00196-7>.
- [133] R. Kuehn, K.E. Hindenlang, O. Holzgang, J. Senn, B. Stoeckle, C. Sperisen, Genetic Effect of Transportation Infrastructure on Roe Deer Populations (*Capreolus capreolus*), *J. Hered.* 98 (2007) 13–22. <https://doi.org/10.1093/jhered/esl056>.
- [134] J.A.G. Jaeger, L. Fahrig, Effects of road fencing on population persistence, *Conserv. Biol.* 18 (2004) 1651–1657. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2004.00304.x>.
- [135] J.A.G. Jaeger, J. Bowman, J. Brennan, L. Fahrig, D. Bert, J. Bouchard, N. Charbonneau, K. Frank, B. Gruber, K.T. Von Toschanowitz, Predicting when animal populations are at risk from roads: an interactive model of road avoidance behavior, *Ecol. Modell.* 185 (2005) 329–348.
- [136] J.S. Waller, C. Servheen, Effects of transportation infrastructure on grizzly bears in northwestern Montana, *J. Wildl. Manage.* 69 (2005) 985–1000.
- [137] T. Kušta, M. Ježek, Z. Keken, Mortality of large mammals on railway tracks, *Sci. Agric. Bohem.* 42 (2011) 12–18.
- [138] J.L. Belant, Moose collisions with vehicles and trains in northeastern Minnesota, *Alces A J. Devoted to Biol. Manag. Moose.* 31 (1995) 45–52.
- [139] D. Krauze-Gryz, M. Żmihorski, K. Jasińska, Ł. Kwaśny, J. Werka, Temporal Pattern of Wildlife-Train Collisions in Poland, *J. Wildl. Manage.* 81 (2017) 1513–1519. <https://doi.org/10.1002/jwmg.21311>.
- [140] K.D. Jasińska, S. Bijak, K.N. Child, R. V Rea, Temporal patterns of moose-train collisions in British Columbia - Implications for mitigation, *Sylwan.* 164 (2020) 32–40. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2019135>.
- [141] B.P. Dorsey, Factors affecting bear and ungulate mortalities along the Canadian Pacific railroad through Banff and Yoho National Parks. Doctoral thesis, Montana State University-Bozeman, 2011. <https://scholarworks.montana.edu/handle/1/1190> (dostęp 11 maja 2024).
- [142] M. Roy, R. Sukumar, Railways and wildlife: A case study of train-elephant collisions in Northern West Bengal, India, in: L. Borda-de-água, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira (Eds.), *Railw. Ecol.*, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017: pp. 157–177. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_10.
- [143] P.S. Gilhooly, S.E. Nielsen, J. Whittington, C.C. St. Clair, Wildlife mortality on roads and railways following highway mitigation, *Ecosphere.* 10 (2019). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2597>.
- [144] K.N. Child, S.P. Barry, D.A. Aitken, Moose Mortality on Highways and Railways in British Columbia, *Alces.* 27 (1991) 41–49. <http://flash.lakeheadu.ca/~arodgers/Alces/Vol27>

- /Alces27_41.pdf.
- [145] J.E. Malo, E.L. García de la Morena, I. Hervás, C. Mata, J. Herranz, Uncapped tubular poles along high-speed railway lines act as pitfall traps for cavity nesting birds, *Eur. J. Wildl. Res.* 62 (2016) 483–489.
- [146] T.O. Nyumba, C.C. Sang, D.O. Olago, R. Marcaant, L. Waruingi, Y. Githiora, F. Kago, M. Mwangi, G. Owira, R. Barasa, S. Omangi, Assessing the ecological impacts of transportation infrastructure development: A reconnaissance study of the Standard Gauge Railway in Kenya, *PLoS One*. 16 (2021) e0246248. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0246248>.
- [147] F. Ascensão, C. Capinha, Aliens on the Move: Transportation Networks and Non-native Species, in: L. Borda-de-Água, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira (Eds.), *Railw. Ecol.*, Springer International Publishing, Cham, Switzerland, 2017: pp. 65–80. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_5.
- [148] D. Bartoszek, M. Stolarski, Kolizje pojazdów szynowych a bezpieczeństwo ruchu pojazdów, *Pr. Nauk. Politech. Warsz. Transp.* 96 (2013) 49–58.
- [149] M. Stolarski, Kolizje ze zwierzętami zagrożeniem dla bezpieczeństwa ruchu pociągów, *Mag. Kult. Bezpieczeństwa Urzędu Transp. Kolejowego* (2020).
- [150] Pociąg wykolejony po zderzeniu z dzikim zwierzęciem, *Agropolska*. (2023). <https://www.agropolska.pl/aktualnosci/polska/pociag-wykolejony-po-zderzeniu-z-dzikim-zwierzeciem,14167.html> (dostęp 12 sierpnia 2025).
- [151] A. Withnall, Speeding train kills at least seven elephants and injures 10 others in India, *Indep.* (2013). <http://www.independent.co.uk/news/world/asia/speeding-train-kills-at-least-seven-elephants-and-injures-10-others-in-india-8939117.html> (dostęp 12 sierpnia 2025).
- [152] Koleje Dolnośląskie Sp. z o.o., Dane dotyczące kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w latach 2020-2022, 2022.
- [153] Koleje Wielkopolskie Sp. z o.o., Dane dotyczące kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w latach 2018-2022, 2022.
- [154] Koleje Małopolskie Sp. z o.o., Dane dotyczące kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w latach 2016-2022, 2022.
- [155] Arriva RP Sp. z o.o., Dane dotyczące kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w latach 2016-2022, 2022.
- [156] J. Milewicz, Wywiad ekspercki z Naczelnik Działu Systemu Zarządzania Bezpieczeństwem Kolei Śląskich Sp. z o.o. dr inż. Katarzyną Gawlak, 04.04.2025 r., 2025.
- [157] J. Milewicz, Wywiad ekspercki z przedstawicielami Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o., 09.07.2025 r., 2025.
- [158] Koleje Śląskie Sp. z o.o., Dane dotyczące kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w latach 2020-2024, 2024.
- [159] M. Malawska, B. Wiłkomirski, An analysis of soil and plant (*Taraxacum officinale*) contamination with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the area of the railway junction Iława Główna, Poland, *Water. Air. Soil Pollut.* 127 (2001) 339–349. <https://doi.org/10.1023/A:1005236016074>.
- [160] B. Wiłkomirski, B. Sudnik-Wójcikowska, H. Galera, M. Wierzbicka, M. Malawska, Railway transportation as a serious source of organic and inorganic pollution, *Water. Air. Soil Pollut.* 218 (2011) 333–345. <https://doi.org/10.1007/s11270-010-0645-0>.
- [161] Z. Chen, Y. Ai, C. Fang, K. Wang, W. Li, S. Liu, C. Li, J. Xiao, Z. Huang, Distribution and phytoavailability of heavy metal chemical fractions in artificial soil on rock cut slopes alongside railways, *J. Hazard. Mater.* 273 (2014) 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.03.042>.
- [162] Z. Chen, R. Luo, Z. Huang, W. Tu, J. Chen, W. Li, S. Chen, J. Xiao, Y. Ai, Effects of different backfill soils on artificial soil quality for cut slope revegetation: Soil structure, soil erosion, moisture retention and soil C stock, *Ecol. Eng.* 83 (2015) 5–12.
- [163] E.G. Gregorich, K.J. Greer, D.W. Anderson, B.C. Liang, Carbon distribution and losses: erosion and deposition effects, *Soil Tillage Res.* 47 (1998) 291–302.
- [164] J.M. Levengood, E.J. Heske, P.M. Wilkins, J.W. Scott, Polyaromatic hydrocarbons and elements in sediments associated with a suburban railway, *Environ. Monit. Assess.* 187 (2015) 1–12.
- [165] P.T. Vo, H.H. Ngo, W. Guo, J.L. Zhou, A. Listowski, B. Du, Q. Wei, X.T. Bui, Stormwater

- quality management in rail transportation—Past, present and future, *Sci. Total Environ.* 512 (2015) 353–363.
- [166] M. Wrzesień, B. Denisow, Factors responsible for the distribution of invasive plant species in the surroundings of railway areas. A case study from SE Poland, *Biologia (Bratisl.)* 72 (2017) 1275–1284. <https://doi.org/10.1515/biolog-2017-0146>.
- [167] J. Kutlvašr, S. Turková, M. Hejda, M. Vojík, M. Kadlecová, K.B. Bímová, P. Pyšek, J. Pergl, Railways as a source of alien plants, *Preslia* 96 (2024) 247–266. <https://doi.org/10.23855/preslia.2024.247>.
- [168] Infra Eco Network Europe (IENE), BISON Project – Biodiversity and Infrastructure Synergies and Opportunities for European Transport Networks, 2024. <https://www.iene.info/projects/bison/>.
- [169] European Commission, BISON Project: Biodiversity at centre of transport infrastructure planning. <https://cordis.europa.eu/article/id/451034-biodiversity-at-centre-of-transport-infrastructure-planning> (dostęp 24 stycznia 2025).
- [170] Infra Eco Network Europe (IENE), BISON Deliverables – Key Reports and Findings, 2024. <https://www.iene.info/news/bison-deliverables/> (dostęp 24 stycznia 2025).
- [171] European Union, About Interreg – European Territorial Cooperation, 2024. <https://interreg.eu/about-interreg/> (dostęp 24 stycznia 2025).
- [172] Centrum Unijnych Projektów Transportowych, Instrument Łącząc Europę (CEF) – Fundusze Europejskie, 2024. <https://www.cupt.gov.pl/fundusze-europejskie/instrument-laczac-europe-cef/> (dostęp 24 stycznia 2025).
- [173] M. Janus, Dwa ważne projekty kolejowe z dofinansowaniem unijnym, PKP Pol. Lin. Kolejowe S.A. 2024. <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/dwa-wazne-projekty-kolejowe-z-dofinansowaniem-unijnym-10122> (dostęp 25 stycznia 2025).
- [174] International Union of Railways, REVERSE - Ecological Effects of Railways on wildlife, 2020. <https://uic.org/projects/article/reverse> (dostęp 11 maja 2024).
- [175] International Union of Railways, European Railways: Strategy and Actions for Biodiversity. rEvERsE Final Report, 2022. <https://uic.org/IMG/pdf/uic-reverse-strategy-and-actions-for-biodiversity.pdf>
- [176] International Union of Railways, UIC Guidelines on Managing Railway Assets for Biodiversity, Paris, France, 2023.
- [177] F. Carvalho, S.M. Santos, A. Mira, Methods to Monitor and Mitigate Wildlife Mortality in Railways, in: L. Borda-de-Água, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira (Eds.), *Railw. Ecol.*, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017: pp. 23–42. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7>.
- [178] J. Babińska-Werka, D. Krauze-Gryz, M. Wasilewski, K. Jasińska, Effectiveness of an acoustic wildlife warning device using natural calls to reduce the risk of train collisions with animals, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 38 (2015) 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.021>.
- [179] C.C. St. Clair, J. Backs, A. Friesen, A. Gangadharan, P. Gilhooly, M. Murray, S. Pollock, Animal learning may contribute to both problems and solutions for wildlife-train collisions, *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 374 (2019). <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0050>.
- [180] J.A. Milewicz, D.M. Mokrzan, G.M. Szymański, Methods to reduce wildlife collisions with rail vehicles, *Rail Veh.* 2021 (2021) 30–43. <https://doi.org/10.53502/RAIL-143046>.
- [181] J.A.J. Backs, J.A. Nychka, C.C. St. Clair, Warning systems triggered by trains could reduce collisions with wildlife, *Ecol. Eng.* 106 (2017) 563–569. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2017.06.024>.
- [182] A. Seiler, M. Olsson, Wildlife Deterrent Methods for Railways—An Experimental Study, in: L. Borda-de-Água, R. Barrientos, P. Beja, H.M. Pereira (Eds.), *Railw. Ecol.*, Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2017: pp. 277–291. https://doi.org/10.1007/978-3-319-57496-7_17.
- [183] M. Shimura, T. Ushiyogi, M. Ikehata, Development of an acoustic deterrent to prevent deer-train collisions, *Q. Rep. RTRI (Railw. Tech. Res. Institute)* 59 (2018) 207–211. https://doi.org/10.2219/rtriq.59.3_207.
- [184] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., Mapa interaktywna Linii Kolejowych. <https://mapa.plk-sa.pl/> (dostęp 3 lutego 2025).

- [185] A. Booth, M.-S. James, M. Clowes, A. Sutton, *Systematic approaches to a successful literature review*, SAGE Publications Ltd, London, UK, 2021.
- [186] K.A. Robinson, O. Akinyede, T. Dutta, V.I. Sawin, T. Li, M.R. Spencer, C.M. Turkelson, C. Weston, *Framework for determining research gaps during systematic review: evaluation*, Methods Research Report. Rockville, MD: Agency for Health care Research and Quality, 2013.
- [187] C. Cempel, *Nowoczesne zagadnienia metodologii i filozofii badań: wybrane zagadnienia dla studiów magisterskich, podyplomowych i doktoranckich: poradnik*, Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji-PIB, Radom, 2003.
- [188] B. Hancock, E. Ockleford, K. Windridge, *An introduction to qualitative research*, Trent focus group, London, United Kingdom, 2001.
- [189] M. Meuser, U. Nagel, *The expert interview and changes in knowledge production*, in: In: A. Bogner, B. Littig, W. Menz (Eds) *Interviewing Experts*. Research Methods Series. Palgrave Macmillan, London, UK, 2013. https://doi.org/10.1057/9780230244276_2.
- [190] J. Vaivio, *Interviews—learning the craft of qualitative research interviewing*, *European Accounting Review*, 21(1), 2012, 186–189. <https://doi.org/10.1080/09638180.2012.675165>
- [191] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., *Dane dotyczące kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami w latach 2017-2021*, 2021.
- [192] *Zintegrowana Platforma Edukacyjna Ministerstwa Edukacji Narodowej, Gatunki chronione*, Ministerstwo Edukacji Narodowej, 2024. <https://zpe.gov.pl/a/gatunki-chronione/D129pVaTj> (dostęp 31 stycznia 2025).
- [193] M. Stolarski, J. Żyłkowska, *Ochrona zwierząt jako istotny element procesu inwestycyjnego podczas budowy i modernizacji linii kolejowych*, *Problemy Kolejnictwa*. 153 (2011) 159–175. <https://bibliotekanauki.pl/articles/215054>.
- [194] J. Milewicz, *Wywiad ekspercki z Dyrektorem Instytutu Kolejnictwa dr inż. Andrzejem Masselem*, 03.04.2025 r., 2025.
- [195] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., *Pismo nr ITS11.0292.3.2024.AKr.1 dotyczące udostępnienia danych na potrzeby pracy doktorskiej z dnia 29.05.2024 r.*, 2024.
- [196] D. Beben, *Crossings Construction as a Method of Animal Conservation*, *Transp. Res. Procedia*. 14 (2016) 474–483. <https://doi.org/10.1016/J.TRPRO.2016.05.100>.
- [197] A.P. Clevenger, N. Waltho, *Factors influencing the effectiveness of wildlife underpasses in Banff National Park, Alberta, Canada*, *Conserv. Biol.* 14 (2000) 47–56. <https://doi.org/10.1046/j.1523-1739.2000.00099-085.x>.
- [198] S. Nowak, R.W. Mysłajek, *Propozycja metodyki podstawowego monitoringu użytkowania przejść dla zwierząt przez ssaki naziemne*, *Stud. i Mater. Cent. Edukac. Przyr.* 21 (2019) 14–23.
- [199] *Sejm Rzeczypospolitej Polskiej, Ustawa z 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko*, Warszawa, 2008.
- [200] R.T. Kurek, *Poradnik projektowania przejść dla zwierząt i działań ograniczających śmiertelność fauny przy drogach*, Stowarzyszenie Pracownia na Rzecz Wszystkich Istot, Warszawa, 2010. <https://korytarze.pl/upload/filemanager/Korytarze/Publikacje/Poradnik-projektowania-przejsc-dla-zwierzat-2010.pdf> (dostęp 29 marca 2025).
- [201] A. Wysokowski, C. Machelski, J. Howis, *Ekologiczne obiekty gruntowo-powłokowe w budownictwie komunikacyjnym*, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, 2022.
- [202] E. Håkansson, *Effectivity of road and railway crossing structures for wild animals*. Master thesis, Univeristy of Gothenburg, 2020. https://media1.triekol.se/Effectivity_of_road_and_railway_crossing_structures_for_wild_mammals_EmmaHakansson_2020.pdf (dostęp 16 kwietnia 2024).
- [203] M. Karlson, A. Seiler, U. Mörtberg, *The effect of fauna passages and landscape characteristics on barrier mitigation success*, *Ecol. Eng.* 105 (2017) 211–220. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2017.04.059>.
- [204] D.J. Smith, R. Van Der Ree, C. Rosell, *Wildlife Crossing Structures: An Effective Strategy to Restore or Maintain Wildlife Connectivity Across Roads*, in: R. Van Der Ree, D.J. Smith, C. Grilo (Eds.), *Handb. Road Ecol.*, John Wiley & Sons, Ltd, 2015: pp. 172–183. <https://doi.org/10.1002/9781118568170.ch21>.
- [205] R.T. Kurek, *Przejścia dla zwierząt przy drogach – rozwiązania optymalne oraz doświadczenia*

- i problemy w zakresie projektowania, cz. 1, Nowocz. Bud. Inżynieryjne. (2011) 78–81.
- [206] R. Van Der Ree, J.W. Gagnon, D.J. Smith, Fencing: A Valuable Tool for Reducing Wildlife-Vehicle Collisions and Funneling Fauna to Crossing Structures, in: R. Van Der Ree, D.J. Smith, C. Grilo (Eds.), *Handb. Road Ecol.*, John Wiley & Sons, Oxford, 2015: pp. 159–171. <https://doi.org/10.1002/9781118568170.ch20>.
- [207] T. Rytwinski, K. Soanes, J.A.G. Jaeger, L. Fahrig, C.S. Findlay, J. Houlahan, R. Der Van Ree, E.A. Van Der Grift, How effective is road mitigation at reducing road-kill? A meta-analysis, *PLoS One*. 11 (2016) e0166941. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166941>.
- [208] D.J. Glista, T.L. DeVault, J.A. DeWoody, A review of mitigation measures for reducing wildlife mortality on roadways, *Landsc. Urban Plan.* 91 (2009) 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2008.11.001>.
- [209] A.P. Clevenger, N. Waltho, Performance indices to identify attributes of highway crossing structures facilitating movement of large mammals, *Biol. Conserv.* 121 (2005) 453–464. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2004.04.025>.
- [210] Zwierzęta bezpiecznie wędrują obok pociągów na Rail Baltica, PKP Pol. Lin. Kolejowe S.A., 2020. <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/zwierzeta-bezpiecznie-wedruja-obok-pociagow-na-rail-baltica-4910> (dostęp 10 lutego 2025).
- [211] Zwierzęta mają przejścia przez linię Poznań–Szczecin, *Inżynieria.Com*. 2022. <https://inzynieria.com/fotogalerie/branzy/fotogaleria/6/2419,linia-poznanszczecin-zwierzeta-maja-przejscia-przez-szlak> (dostęp 10 lutego 2025).
- [212] R.T. Kurek, Animal crossings in Poland: A review of applied solutions, good practices, and significant errors and problems, *Prac. Na Rzecz Wszystkich Istot*, 2011. <https://korytarze.pl/upload/filemanager/Korytarze/Prezentacje/pliki/2011-Kurek-Przejscia-dla-zwierzat-w-Polsce.pdf> (dostęp 19 czerwca 2024).
- [213] J. Żyłkowska, M. Stolarski, Problematyka kolizji dzikich zwierząt z pociągami w aspekcie psychologii zwierząt oraz bezpieczeństwa ruchu pociągów, *Logistyka*. 3 (2011) 3184–3193.
- [214] E. Van der Grift, A. de Groot, Genetisch onderzoek hazelworm in Ecocorridor Zwaluwenberg, *Nat. Today*. (2019). <https://www.naturetoday.com/intl/nl/nature-reports/message/?msg=24669> (dostęp 10 sierpnia 2025).
- [215] Natuurbrug Zwaluwenberg, Wikimedia Commons. 2024. https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Natuurbrug_Zwaluwenberg (dostęp 10 sierpnia 2025).
- [216] A. Sims, Japanese rail workers build special tunnels to save turtles from train deaths, *The Independent*, 2015. <https://www.independent.co.uk/news/world/asia/japanese-rail-workers-build-special-tunnels-to-save-turtles-from-train-deaths-a6757466.html> (dostęp 10 sierpnia 2025).
- [217] L. Brenna, Japan builds turtles their tunnels to help them cross rail tracks - LifeGate, *Lifegate*. 2015. <https://www.lifegate.com/japan-tunnels-turtles> (dostęp 10 sierpnia 2025).
- [218] M. Van Gompel, New type of wildlife sleeper crossing installed in Netherlands, *Railtech.Com*. 2019. <https://www.railtech.com/infrastructure/2019/08/27/new-type-of-wildlife-sleeper-crossing-installed-in-netherlands/> (dostęp 10 sierpnia 2025).
- [219] Przejścia dla zwierząt to kosztowny wydatek, *GDDKiA - Serwis Archiwalny*. 2019. <https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/pl/a/36120/Przejscia-dla-zwierzat-to-kosztowny-wydatek> (dostęp 10 sierpnia 2025).
- [220] J. Milewicz, Wywiad ekspercki z prof. dr hab. inż. Andrzejem Czerniakiem z Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 28.03.2025 r., 2025.
- [221] T. Kušta, Z. Keken, M. Ježek, Z. Kůta, Effectiveness and costs of odor repellents in wildlife-vehicle collisions: A case study in Central Bohemia, Czech Republic, *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* 38 (2015) 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.04.017>.
- [222] J. Milewicz, Wywiad ekspercki z Prezesem NEEL Sp. z o.o. Markiem Stolarskim, 02.04.2025 r., 2025.
- [223] P. Kowal, K. Jasińska, J. Babinska-Werka, Active animal protection methods along railway lines on European Ecological Network Natura 2000, *Przegląd Nauk. Inżynieria i Kształtowanie Środowiska*. 22 (2013).
- [224] K. Jasińska, J. Werka, D. Krauze-Gryz, M. Wasilewski, Urządzenia akustyczne UOZ–1 sposobem na ograniczenie kolizji z udziałem zwierząt na liniach kolejowych, *Sylwan*. 158

- (2014) 143–150.
- [225] Przedsiębiorstwo Wdrożeniowo-Produkcyjne „NEEL” Sp. z o. o., UOZ-1 Device, 2021. <https://neel.com.pl/web/?id=1,5> (dostęp 3 sierpnia 2024).
- [226] Technologia w służbie przyrody – 3. odcinek cyklu „Bezpieczeństwo w praktyce” , Urząd Transp. Kolejowego, 2025. <https://utk.gov.pl/pl/aktualnosci/22436,Technologia-w-sluzbie-przyrody-3-odcinek-cyklu-Bezpieczenstwo-w-praktyce.html> (dostęp 9 sierpnia 2025).
- [227] Przedsiębiorstwo Wdrożeniowo-Produkcyjne „NEEL” Sp. z o. o., Catalogue Cart of UOZ-1 Device, 2021. <https://neel.com.pl/web/?id=1,5,45> (dostęp 19 czerwca 2024).
- [228] D. Pyke, Elephants get rail protection with fiber optics and AI, 2024. <https://www.sensonic.com/en/blog/elephants-get-rail-protection-with-fiber-optics-and-ai-3259/> (dostęp 25 czerwca 2024).
- [229] H.P. Andreassen, H. Gundersen, T. Storaas, The effect of scent-marking, forest clearing, and supplemental feeding on moose-train collisions, *J. Wildl. Manage.* 69 (2005) 1125–1132. [https://doi.org/10.2193/0022-541X\(2005\)069\[1125:TEOSFC\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.2193/0022-541X(2005)069[1125:TEOSFC]2.0.CO;2).
- [230] R. V. Rea, Modifying roadside vegetation management practices to reduce vehicular collisions with moose *Alces alces*, *Wildlife Biol.* 9 (2003) 81–91. <https://doi.org/10.2981/wlb.2003.030>.
- [231] A. Hardy, A. Kociolek, A.P. Clevenger, D. Smith, R. Ament, J. Fuller, M.P. Huijser, P. McGowen, *Wildlife-Vehicle Collision Reduction Study: Report to Congress*, 2008. http://www.westerntransportationinstitute.org/documents/reports/4W1612_Report_to_Congress.pdf (dostęp 16 kwietnia 2024).
- [232] L. Balčiauskas, A. Kučas, L. Balčiauskienė, A Review of Wildlife–Vehicle Collisions: A Multidisciplinary Path to Sustainable Transportation and Wildlife Protection, *Sustain.* 17 (2025) 4644. <https://doi.org/10.3390/su17104644>.
- [233] C.C. St. Clair, J. Whittington, A. Forshner, A. Gangadharan, D.N. Laskin, Railway mortality for several mammal species increases with train speed, proximity to water, and track curvature, *Sci. Rep.* 10 (2020) 20476. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-77321-6>.
- [234] K. Gawlak, Opracowanie i wdrożenie mapy wydarzeń kolejowych oraz modelu ich predykcji jako narzędzi wykorzystywanych w systemie zarządzania bezpieczeństwem przewoźników kolejowych, Politechnika Śląska, 2024.
- [235] P. Wood, M.L. Wolfe, Intercept Feeding as a Means of Reducing Deer-Vehicle Collisions, *Wildl. Soc. Bull.* 16 (1988) 376–380. <http://www.jstor.org/stable/3782436>
- [236] J. Sahlsten, N. Bunnefeld, J. Månsson, G. Ericsson, R. Bergström, H. Dettki, Can supplementary feeding be used to redistribute moose *Alces alces*?, *Wildlife Biol.* 16 (2010) 85–92. <https://doi.org/10.2981/08-085>.
- [237] R. Barrientos, J.C. Alonso, C. Ponce, C. Palacín, Meta-Analysis of the Effectiveness of Marked Wire in Reducing Avian Collisions with Power Lines, *Conserv. Biol.* 25 (2011) 893–903. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2011.01699.x>.
- [238] L. Brennan, E. Chow, C. Lamb, Wildlife overpass structure size, distribution, effectiveness, and adherence to expert design recommendations, *PeerJ.* 10 (2022) e14371.
- [239] R. Van Der Ree, E. Van Der Grift, N. Gulle, K. Holland, C. Mata, F. Suarez, Overcoming the barrier effect of roads-how effective are mitigation strategies? An international review of the use and effectiveness of underpasses and overpasses designed to increase the permeability of roads for wildlife, in: *Int. Conf. Ecol. Transp.*, Raleigh, USA: Center for Transportation and the Environment, North Carolina State University, 2007: pp. 423–431.
- [240] C. Grilo, J. Bissonette, P. Cramer, Mitigation measures to reduce impacts on biodiversity, in: S.R. Jones (Eds), *Highways: Construction, Management, Maintenance*, Nova Science Publishers, Incorporated, 2010: pp. 73–114.
- [241] P. Kowal, K. Jasińska, J. Babińska-Werka, Aktywne metody ochrony zwierząt wzdłuż linii kolejowych na obszarach Europejskiej Sieci Ekologicznej Natura 2000, *Sci. Rev. Eng. Environ. Sci.* 22 (2013) 463–471.
- [242] M. Elmeros, J.K. Winbladh, P.N. Andersen, A.B. Madsen, J.T. Christensen, Effectiveness of odour repellents on red deer (*Cervus elaphus*) and roe deer (*Capreolus capreolus*): a field test, *Eur. J. Wildl. Res.* 57 (2011) 1223–1226. <https://doi.org/10.1007/s10344-011-0517-y>.
- [243] T.L. DeVault, T.W. Seamans, B.F. Blackwell, Frontal vehicle illumination via rear-facing lighting reduces potential for collisions with white-tailed deer, *Ecosphere.* 11 (2020). <https://doi.org/10.1002/ecs2.3187>.

- [244] J.A.J. Backs, J.A. Nychka, C.C. St. Clair, Low audibility of trains may contribute to increased collisions with wildlife, *Transp. Res. Interdiscip. Perspect.* 13 (2022) 100516. <https://doi.org/10.1016/J.TRIP.2021.100516>.
- [245] M. Bhardwaj, M. Olsson, E. Håkansson, P. Söderström, A. Seiler, Ungulates and trains – Factors influencing flight responses and detectability, *J. Environ. Manage.* 313 (2022) 114992. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2022.114992>.
- [246] L.L. Mastro, M.R. Conover, S.N. Frey, Deer–vehicle collision prevention techniques, *Human-Wildlife Conflicts.* 2 (2008) 80–92. <http://www.jstor.org/stable/24875108>.
- [247] G.J. D’Angelo, R.J. Warren, K. V Miller, G.R. Gallagher, S.A. Valitzski, Development and evaluation of devices designed to minimize deer-vehicle collisions. Final Project Report, 2007. <https://rosap.nhtl.bts.gov/view/dot/23422>.
- [248] K.K. Knapp, Crash Reduction Factors for Deer-Vehicle Crash Countermeasures: State of the Knowledge and Suggested Safety Research Needs, *Transp. Res. Rec.* 1908 (2005) 172–179. <https://doi.org/10.1177/0361198105190800121>.
- [249] R.N. Handcock, D.L. Swain, G.J. Bishop-Hurley, K.P. Patison, T. Wark, P. Valencia, P. Corke, C.J. O’Neill, Monitoring Animal Behaviour and Environmental Interactions Using Wireless Sensor Networks, GPS Collars and Satellite Remote Sensing, *Sensors.* 9 (2009) 3586–3603. <https://doi.org/10.3390/s90503586>.
- [250] I. Nandutu, M. Atemkeng, P. Okouma, Intelligent Systems Using Sensors and/or Machine Learning to Mitigate Wildlife–Vehicle Collisions: A Review, Challenges, and New Perspectives, *Sensors.* 22 (2022) 2478. <https://doi.org/10.3390/s22072478>.
- [251] R. Steenweg, M. Hebblewhite, R. Kays, J. Ahumada, J.T. Fisher, C. Burton, S.E. Townsend, C. Carbone, J.M. Rowcliffe, J. Whittington, J. Brodie, J.A. Royle, A. Switalski, A.P. Clevenger, N. Heim, L.N. Rich, Scaling-up camera traps: monitoring the planet’s biodiversity with networks of remote sensors, *Front. Ecol. Environ.* 15 (2017) 26–34. <https://doi.org/10.1002/fee.1448>.
- [252] F.J. Sijtsma, E. van der Veen, A. van Hinsberg, R. Pouwels, R. Bekker, R.E. van Dijk, M. Grutters, R. Klaassen, M. Krijn, M. Mouissie, E. Wymenga, Ecological impact and cost-effectiveness of wildlife crossings in a highly fragmented landscape: a multi-method approach, *Landsc. Ecol.* 35 (2020) 1701–1720. <https://doi.org/10.1007/s10980-020-01047-z>.
- [253] A. Boardman, D. Greenberg, A. Vining, D. Weimer, *Cost-Benefit Analysis: Concepts and Practice*, 5th edition, Cambridge University Press, 2018.
- [254] M.P. Huijser, J.W. Duffield, A.P. Clevenger, R.J. Ament, P.T. McGowen, Cost-benefit analyses of mitigation measures aimed at reducing collisions with large ungulates in the united states and canada: A decision support tool, *Ecol. Soc.* 14 (2009). <https://doi.org/10.5751/es-03000-140215>.
- [255] N. Greer, K. Ksaibati, Development of Benefit Cost Analysis Tools for Evaluating Transportation Research Projects, *Transp. Res. Rec.* 2673 (2019) 123–135. <https://doi.org/10.1177/0361198118821675>.
- [256] R. Jain, M. Grabner, E. Onukwugha, Sensitivity Analysis in Cost-Effectiveness Studies, *Pharmacoeconomics.* 29 (2011) 297–314. <https://doi.org/10.2165/11584630-000000000-00000>.
- [257] L. Yang, K.H. van Dam, L. Zhang, Developing Goals and Indicators for the Design of Sustainable and Integrated Transport Infrastructure and Urban Spaces, *Sustainability.* 12 (2020) 1–34. <https://doi.org/10.3390/su12229677>.
- [258] D.H. Nguyen, I.P. Khominich, The measurement of green economic quality in the BRICS countries: Should they prioritize financing for environmental protection, economic growth, or social goals?, *Russ. J. Econ.* 9 (2023) 183–200.
- [259] A. Distaso, Well-being and/or quality of life in EU countries through a multidimensional index of sustainability, *Ecol. Econ.* 64 (2007) 163–180. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.02.025>.
- [260] N. Lior, M. Radovanović, S. Filipović, Comparing sustainable development measurement based on different priorities: sustainable development goals, economics, and human well-being—Southeast Europe case, *Sustain. Sci.* 13 (2018) 973–1000.
- [261] K. Kostetska, N. Khumarova, Y. Umanska, N. Shmygol, V. Koval, Institutional qualities of inclusive environmental management in sustainable economic development, *Manag. Syst.*

- Prod. Eng. 28 (2020) 15–22.
- [262] P. Conceicao, Human Development Report 2023/24. Breaking the Gridlock: Reimagining Cooperation in a Polarized World, 2024.
- [263] D.I. Stern, The environmental Kuznets curve after 25 years, *J. Bioeconomics*. 19 (2017) 7–28. <https://doi.org/10.1007/s10818-017-9243-1>.
- [264] S. Dinda, Environmental Kuznets Curve Hypothesis: A Survey, *Ecol. Econ.* 49 (2004) 431–455. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLECON.2004.02.011>.
- [265] T. Pettinger, Environmental Kuznets Curve, *Econ. Help.* (2019). <https://www.economicshelp.org/blog/14337/environment/environmental-kuznets-curve/> (dostęp 26 maja 2025).
- [266] United Nations, Human Development Insight 2025, 2025. <https://hdr.undp.org/content/human-development-report-2025> (dostęp 1 sierpnia 2025).
- [267] Kolejny duży kontrakt CPK. Cała nowa sieć kolejowa o długości 2000 km w przygotowaniu – Centralny Port Komunikacyjny, 2022. <https://www.cpk.pl/pl/aktualnosci-2/kolejny-duzy-kontrakt-cpk-cala-nowa-siec-kolejowa-o-dlugosci-2000-km-w-przygotowaniu> (dostęp 21 maja 2025).
- [268] Regionalna Dyrekcja Ochrony Środowiska w Warszawie, Decyzja środowiskowa dla Centralnego Portu Komunikacyjnego, Serwis Rzeczypospolitej Polskiej, 2024. <https://www.gov.pl/web/rdos-warszawa/decyzja-srodowiskowa-dla-centralnego-portu-komunikacyjnego> (dostęp 21 maja 2025).
- [269] GDOŚ odsunął rozpatrzenie odwołań od decyzji środowiskowej dla CPK, 2024. <https://www.bankier.pl/wiadomosc/GDOS-odsunal-rozpatrzenie-odwolan-od-decyzji-srodowiskowej-dla-CPK-8789762.html> (dostęp 21 maja 2025).
- [270] Strategiczne Studium Lokalizacyjne – Centralny Port Komunikacyjny. <https://www.cpk.pl/pl/inwestycja/ssl> (dostęp 21 maja 2025).
- [271] Centralny Port Komunikacyjny Sp. z o.o., Raport o oddziaływaniu na środowisko – Tom III: Charakterystyka środowiska, Warszawa, 2022.
- [272] Centralny Port Komunikacyjny Sp. z o.o., Raport o oddziaływaniu na środowisko – Tom IV (cz. 1–3): Ocena oddziaływania na środowisko, Warszawa, 2022.
- [273] Centralny Port Komunikacyjny Sp. z o.o., Raport o oddziaływaniu na środowisko – Tom V: Działania minimalizujące, kompensacyjne, monitoring, podsumowanie, Warszawa, 2022.
- [274] Centralny Port Komunikacyjny Sp. z o.o., Projekt Strategii rozwoju obszaru otoczenia Centralnego Portu Komunikacyjnego do roku 2044. Wersja do konsultacji – marzec 2025, Warszawa, 2025.
- [275] W. Leszek, Fundamentals of Pragmatic Methodology in Technical Sciences (in Polish), Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji-PIB, Radom, 2013.
- [276] A. Tawse, P. Tabesh, Strategy implementation: A review and an introductory framework, *Eur. Manag. J.* 39 (2021) 22–33. <https://doi.org/10.1016/J.EMJ.2020.09.005>.
- [277] M. Friesl, I. Stensaker, H.L. Colman, Strategy implementation: Taking stock and moving forward, *Long Range Plann.* 54 (2021) 102064. <https://doi.org/10.1016/J.LRP.2020.102064>.
- [278] A.E. Bianchi, C. Reichen, L.I. Borges, J.G.R. dos Santos, L. dos Santos Rudek, S.R. Fernandes, O.R. de Morais, A.L.G. Monteiro, Strategic analysis of the sheep milk production chain in Brazil: an approach using the SWOT methodology, *Semin. Agrar.* 44 (2023) 971–988. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2022V44N3P971>.
- [279] S. Brad, E. Brad, Enhancing SWOT Analysis with TRIZ-based Tools to Integrate Systematic Innovation in Early Task Design, *Procedia Eng.* 131 (2015) 616–625. <https://doi.org/10.1016/J.PROENG.2015.12.455>.
- [280] M. Sansa, A. Badreddine, T. Ben Romdhane, A new approach for sustainable design scenarios selection: A case study in a tunisian company, *J. Clean. Prod.* 232 (2019) 587–607. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.299>.
- [281] A. Misztal, G.M. Szymanski, W. Misztal, P. Komorski, Innovative application of quality methods in the homogeneity assessment of the F-16 aircraft group in terms of generated noise, *Ekspluat. i Niezawodn. – Maint. Reliab.* 24 (2022) 187–199. <https://doi.org/10.17531/EIN.2022.2.1>.
- [282] A.P. Clevenger, B. Chruszcz, K.E. Gunson, Spatial patterns and factors influencing small vertebrate fauna road-kill aggregations, *Biol. Conserv.* 109 (2002) 15–26.

- [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00127-1](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00127-1).
- [283] F. van Langevelde, C.F. Jaarsma, Modeling the effect of traffic calming on local animal population persistence, *Ecol. Soc.* 14 (2009). <https://doi.org/10.5751/ES-03061-140239>.
- [284] A. Seiler, Predicting locations of moose-vehicle collisions in Sweden, *J. Appl. Ecol.* 42 (2005) 371–382. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01013.x>.
- [285] Z. Wolny, Wyższy komfort podróży na trasie Poznań Wschód - Wągrowiec, PKP Pol. Lin. Kolejowe S.A. (2015). <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/wyzszy-komfort-podrozy-na-trasie-poznan-wschod-wagrowiec-2868> (dostęp 1 marca 2025).
- [286] Z. Wolny, Modernizacja linii kolejowej Poznań Wschód – Wągrowiec, ważna inwestycja w Wielkopolsce, PKP Pol. Lin. Kolejowe S.A. (2011). <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/informacje-prasowe/szczegoly/modernizacja-linii-kolejowej-poznan-wschod-wagrowiec-wazna-inwestycja-w-wielkopolsce-1523> (dostęp 1 marca 2025).
- [287] J. Rösler, Wielkopolska. Elektryfikacja linii do Wągrowca do 2028 roku?, *Rynek Kolejowy*. (2025). <https://www.rynek-kolejowy.pl/wiadomosci/wielkopolska-elektryfikacja-linii-do-wagrowca-do-2028-roku-121858.html> (dostęp 1 marca 2025).
- [288] Elektryfikacja linii kolejowej Poznań Wschód - Wągrowiec - Gołańcz, Koleje Wielkop. Sp. z o.o. 2025. <https://koleje-wielkopolskie.com.pl/elektryfikacja-linii-kolejowej-poznan-wschod-wagrowiec-golancz> (dostęp 10 czerwca 2025).
- [289] M. Roik, Poznań: Łosie, borsuki, bobry i dziki mieszkają w mieście, *Głos Wielkopolski*. 2011. <https://gloswielkopolski.pl/poznan-losie-borsuki-bobry-i-dziki-mieszkaja-w-miescie/ar/488438> (dostęp 1 marca 2025).
- [290] J. Ajdysiański, F. Holnicki-Szulc, E. Olkowska, K. Semaniuk, M. Sękiewicz, K. Wielogórska, Monitoring występowania i migracji zwierząt wzdłuż linii kolejowej nr 3 i 356, Warszawa, 2018. https://www.plk-sa.pl/files/public/user_upload/pdf/Ochrona_srodowiska/26.10.2018/RAPORT_KONCOWY_-_ETAP_III_mini.pdf (dostęp 1 marca 2025).
- [291] D.H. Stamatis, Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution, Quality Press, Milwaukee, USA, 2003.
- [292] D.H. Hii, N.A. Muhammad, N. Muhammad, Synergizing FMEA and PDCA for superior risk management and process improvement in the semiconductor industry: a case study, *Int. J. Prod. Manag. Eng.* 12 (2024) 180–194. <https://doi.org/10.4995/ijpme.2024.21469>.
- [293] AIAG & VDA, FMEA Handbook: Failure Mode and Effects Analysis – Design and Process FMEA, Automotive Industry Action Group, Southfield, MI, USA, 2019.
- [294] J.M. De Vos, L.N. Joppa, J.L. Gittleman, P.R. Stephens, S.L. Pimm, Estimating the normal background rate of species extinction, *Conserv. Biol.* 29 (2015) 452–462. <https://doi.org/10.1111/cobi.12380>.
- [295] J. Rockström, W. Steffen, K. Noone, Å. Persson, F.S. Chapin, E.F. Lambin, T.M. Lenton, M. Scheffer, C. Folke, H.J. Schellnhuber, B. Nykvist, C.A. De Wit, T. Hughes, S. Van Der Leeuw, H. Rodhe, S. Sörlin, P.K. Snyder, R. Costanza, U. Svedin, M. Falkenmark, L. Karlberg, R.W. Corell, V.J. Fabry, J. Hansen, B. Walker, D. Liverman, K. Richardson, P. Crutzen, J.A. Foley, Planetary Boundaries: Exploring the Safe Operating Space for Humanity, *Ecol. Soc.* 14 (2009). <https://doi.org/10.1038/461472a>.
- [296] R. Hagan, E. Markey, J. Clancy, M. Keating, A. Donnelly, D.J. O'Connor, L. Morrison, E.J. McGillicuddy, Non-Road Mobile Machinery Emissions and Regulations: A Review, *Air*. 1 (2022) 14–36. <https://doi.org/10.3390/air1010002>.
- [297] S.K. Paul, S. Mazumder, R. Naidu, Herbicidal weed management practices: History and future prospects of nanotechnology in an eco-friendly crop production system, *Heliyon*. 10 (2024). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26527>.
- [298] P. Legendre, L. Legendre, *Numerical Ecology*, Elsevier, 2019. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10595-0>.
- [299] W. Wende, L. Bezombes, M.E. Reinert, Introduction of a European strategy on no net loss of biodiversity, in: *Biodivers. Offsets Eur. Perspect. No Net Loss Biodivers. Ecosyst.*

Serv., Springer International Publishing: Cham, Switzerland, 2018: pp. 5–15.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-72581-9_2.

Spis rysunków

Rys. 1.1. Cele zrównoważonego rozwoju	9
Rys. 2.1. Granice planetarne i stopień ich przekroczenia w roku 2024	12
Rys. 2.2. Hierarchia mitygacji środowiskowej, diagram schematyczny na podstawie	13
Rys. 2.3. Relacje między strategiczną oceną oddziaływania na środowisko (SEA) a oceną oddziaływania środowisko (EIA).....	17
Rys. 2.4. Mapa obszarów chronionych w ramach Sieci Natura 2000	18
Rys. 2.5. Główne źródła hałasu generowanego przez transport szynowy.....	21
Rys. 2.6. Wybrane skutki oddziaływania hałasu i drgań generowanych przez pojazdy szynowe na dzikie zwierzęta i ekosystemy.....	22
Rys. 2.7. Średnie emisje związane dla międzymiastowych podróży pasażerskich według środka transportu	23
Rys. 2.8. Główne czynniki przyczyniające się do efektu bariery infrastruktury dla dzikich zwierząt	25
Rys. 2.9. Śmiertelność niedźwiedzi na obszarze badań między West Glacier a Browning w stanie Montana (USA).....	27
Rys. 2.10. Najważniejsze czynniki wpływające na występowanie kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami	27
Rys. 2.11. System ostrzegania przed dzikimi zwierzętami aktywowany przez pociągi.....	35
Rys. 2.12. Schemat eksperymentalnego przejścia dla zwierząt na poziomie torów	35
Rys. 5.1. Grupy zwierząt uczestniczących w kolizjach z pojazdami	42
Rys. 5.2. Gatunki dzikich zwierząt najczęściej uczestniczących w kolizjach z pojazdami szynowymi	42
Rys. 5.3. Liczba kolizji zwierząt z pojazdami szynowymi w latach 2017–2021	44
Rys. 5.4. Miesięczny rozkład liczby kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami	45
Rys. 5.5. Dobowy rozkład liczby kolizji pojazdów szynowych ze zwierzętami.....	45
Rys. 6.1. Zestawienie szerokości przejść dla zwierząt w zależności od typu obiektu	62
Rys. 6.2. Przejście nadziemne w Rzepin-Kunowice w zachodniej Polsce	63
Rys. 6.3. Przejście nadziemne dla dużych zwierząt niedaleko Hilversum w Niderlandach	63
Rys. 6.4. Monitoring przejścia podziemnego dla małych i średnich ssaków na Rail Baltica	64
Rys. 6.5. Obiekt na linii kolejowej Poznań–Szczecin dostosowany do migracji zwierząt	64
Rys. 6.6. Przejścia pod szynami w prefekturze Nara w Japonii.....	64
Rys. 6.7. Przejście dla zwierząt w podkładach kolejowych	65
Rys. 6.8. Wygląd i rozmieszczenie urządzeń UOZ-1 wzdłuż torów	66
Rys. 6.9. Wizualizacja działania systemu Gajraj.....	67
Rys. 6.10. Model krzywej środowiskowej Kuzneta	73
Rys. 6.11. Kolejowe Liniowe Inwestycje Towarzyszące CPK	76
Rys. 7.1. Graficzne przedstawienie kolejnych etapów ramy WILD-RAIL.....	79
Rys. 7.2. Wersja poglądowa interaktywnego formularza narzędzia WILD-RAIL.....	88
Rys. 8.1. Linia 356 na tle połączeń kolejowych w Polsce	93
Rys. 8.2. Fragment przebiegu linii nr 356	94
Rys. 8.3. Mapa korytarzy ekologicznych 2012 – wycinek dla badanego regionu	94
Rys. 8.4. Obszary chronione w otoczeniu wybranego odcinka linii nr 356	95
Rys. 8.5 Rozkład liczby kolizji na odcinku 10–20 km linii kolejowej nr 356.	97
Rys. 8.6. Oznaczenie punktów kontrolnych na linii nr 356	97
Rys. 8.7. Widok z przejazdu kolejowo-drogowego między Owińskami a Bolechówkiem.....	98
Rys. 8.8. Widok na tory	98
Rys. 8.9. Widok na tory w stronę a) Bolechowa oraz b) Owińsk.....	99
Rys. 8.10. Widok prostopadły na tory z lewej strony z punktu kontrolnego nr 1	99

Rys. 8.11. Widok a) z góry na badany odcinek (w stronę Owińsk) oraz b) prostopadły na tory (na wysokości 12,35 km linii).....	99
Rys. 8.12. Widok w stronę Bolechowa z punktu kontrolnego nr 2	100
Rys. 8.13. Widoki prostopadłe na tory z prawej strony linii – wydeptane przez zwierzęta przejścia przez tory tuż przed granicą lasu, w pobliżu punktu kontrolnego nr 2	100
Rys. 8.14. Schemat poglądowy wdrożenia rozwiązań mitygacyjnych od strony zachodniej odcinka linii nr 356 na długości 12,0 km – 12,6 km.....	105
Rys. 9.1. Porównanie a) mapy kolejowej z oznaczonym kolorem czerwonym badanym odcinkiem oraz punktami dla 10 km, 20 km i 30 km linii oraz b) mapy korytarzy ekologicznych w tym obszarze wraz z miejscem przecięcia przez linię nr 139	114
Rys. 9.2. Rozkład linii kolizji na odcinku 21–30 km linii nr 139 wraz z wartością 75. percentyla ..	114
Rys. 9.3. Widok w kierunku Tychów na wysokości 21,9 km.....	115
Rys. 9.4. Widok na tory w kierunku południowo-zachodnim, 23 km linii	115
Rys. 9.5. a) i b) ścieżki zwierząt w poprzek torów na 22–23 km linii c) ślady racic dzikich zwierząt	116
Rys. 9.6. Przepust hydrauliczny nad ciekim.....	116

Spis tabel

Tabela 2.1. Zależność między natężeniem ruchu drogowego i kolejowego a ryzykiem śmiertelności oraz efektem bariery dla ssaków	25
Tabela 2.2. Obszary oddziaływania na środowisko wybranych aspektów transportu kolejowego	30
Tabela 5.1. Gatunki ssaków chronionych najczęściej uczestniczących w kolizjach.....	43
Tabela 5.2. Gatunki ptaków chronionych najczęściej uczestniczących w kolizjach.....	43
Tabela 5.3. Zestawienie linii z największą całkowitą liczbą i gęstością zdarzeń.....	46
Tabela 5.4. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji na 10-kilometrowych odcinkach.....	47
Tabela 5.5. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji według danych Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o.....	48
Tabela 5.6. Zestawienie linii z największą liczbą uszkodzeń taboru wskutek potrącenia dzikiego zwierzęcia według danych Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o.....	48
Tabela 5.7. Zestawienie opóźnień związanych z kolizjami z dzikimi zwierzętami ze skutkiem uszkodzenia taboru według danych Kolei Wielkopolskich Sp. z o.o.....	49
Tabela 5.8. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji z uszkodzeniem taboru według danych Kolei Dolnośląskich Sp. z o.o.....	50
Tabela 5.9. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji według danych Kolei Małopolskich Sp. z o.o.	51
Tabela 5.10. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji z uszkodzeniem taboru według danych Kolei Małopolskich Sp. z o.o.....	51
Tabela 5.11. Zestawienie opóźnień związanych z kolizjami z dzikimi zwierzętami ze skutkiem uszkodzenia taboru według danych Kolei Małopolskich Sp. z o.o.....	52
Tabela 5.12. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji według danych Arriva RP Sp z o.o.	53
Tabela 5.13. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji z uszkodzeniem taboru według danych Arriva RP Sp. z o.o.	53
Tabela 5.14. Zestawienie opóźnień związanych z kolizjami z dzikimi zwierzętami ze skutkiem uszkodzenia taboru według danych Arriva RP Sp. z o.o.....	54
Tabela 5.15. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji według danych Kolei Śląskich Sp. z o.o..	54
Tabela 5.16. Zestawienie linii z największą liczbą kolizji z uszkodzeniem taboru według danych Kolei Śląskich Sp. z o.o.	55
Tabela 5.17. Zestawienie liczby opóźnionych pociągów związanych z kolizjami z dzikimi zwierzętami ze skutkiem uszkodzenia taboru według danych Koleje Śląskie Sp. z o.o.	55
Tabela 5.18. Zestawienie sumarycznych opóźnień pociągów wskutek uszkodzenia taboru w kolizji z dzikimi zwierzętami według danych Koleje Śląskie Sp. z o.o.....	56
Tabela 5.19. Podsumowanie analizy danych dotyczących kolizji pojazdów ze zwierzętami	57
Tabela 6.1. Klasyfikacja i ocena metod ograniczających śmiertelność zwierząt w wyniku kolizji z pojazdami szynowymi.....	69
Tabela 7.1. Czynniki wpływające na występowanie zwierząt na torach kolejowych, które powodują kolizje z pojazdami	84
Tabela 8.1. Zestawienie 5-kilometrowych odcinków linii kolejowych z największą liczbą zdarzeń .	91
Tabela 8.2. Analiza SWOT dotycząca możliwości ograniczenia negatywnego wpływu transportu kolejowego na środowisko na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356.....	103
Tabela 8.3. Elementy analizy PESTEL dla przypadku oceny możliwości ograniczenia negatywnego wpływu transportu kolejowego na środowisko na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356....	103
Tabela 8.4. Analiza FMEA dla zestawu wskazanych rozwiązań mitygacyjnych na odcinku 12,0–13,0 km linii kolejowej nr 356.....	107
Tabela 8.4. Skala ocen zastosowana w analizie FMEA	106
Tabela 8.5. Przyjęta skala interpretacji wartości RPN w analizie FMEA	107

Tabela 8.7. Propozycja rekomendacji dotyczących wdrożenia rozwiązań mitygacyjnych w studium przypadku linii kolejowej nr 356	107
--	-----