



**Politechnika
Śląska**

**DYSCYPLINA NAUKOWA
INŻYNIERIA LĄDOWA,
GEODEZJA I TRANSPORT**

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Katarzyna Gawlak

Opracowanie i wdrożenie mapy wydarzeń kolejowych oraz modelu ich predykcji
jako narzędzi wykorzystywanych w systemie zarządzania bezpieczeństwem przewoźników
kolejowych

Study and implementation of a map of railway occurrences and its prediction model
as tool used in the safety management system of railway undertakings

Promotor główny:

dr hab. inż. Jarosław Konieczny, prof. PŚ

Promotor pomocniczy:

dr inż. Wojciech Gamon

Katowice, lipiec 2024 r.

Spis treści

Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń.....	4
1. Wprowadzenie do tematyki rozprawy doktorskiej.....	6
1.1. Bezpieczeństwo i jego definicje.....	6
1.2. Charakterystyka regionalnego kolejowego transportu pasażerskiego.....	7
1.3. Czynniki ludzkie w transporcie kolejowym.....	11
1.4. Kultura bezpieczeństwa w transporcie kolejowym.....	14
2. Bezpieczeństwo w transporcie kolejowym w aspekcie przewoźnika kolejowego.....	19
2.1. Przegląd regulacji prawnych związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa przez przewoźnika kolejowego.....	19
2.2. Obowiązki przewoźnika kolejowego w aspekcie wydarzeń kolejowych.....	21
3. Metody oceny bezpieczeństwa i predykcji wydarzeń kolejowych powiązanych z transportem kolejowym.....	26
3.1. Przegląd metod oceny bezpieczeństwa kolejowego.....	26
3.2. Przegląd metod predykcji wydarzeń kolejowych.....	29
4. Przegląd map powiązanych z bezpieczeństwem transportu kolejowego.....	33
4.1. Interaktywność map elektronicznych.....	33
4.2. Przegląd map elektronicznych powiązanych z transportem kolejowym.....	36
5. Cel i teza pracy.....	48
5.1. Zasadność podjęcia tematu.....	48
5.2. Cel, zakres pracy i teza.....	49
6. Model predykcji kolizji pociągów ze zwierzyną.....	52
6.1. Wstępne założenia modelu.....	52
6.2. Opis danych dotyczących kolizji ze zwierzyną w Kolejach Śląskich sp. z o.o. ..	53
6.3. Opis danych dotyczących kolizji ze zwierzyną w Kolejach Wielkopolskich sp. z o.o.....	60
6.4. Opis modelu predykcyjnego.....	66

6.5. Implementacja i weryfikacja modelu na przykładzie Kolei Śląskich i Kolei Wielkopolskich.....	69
7. Mapa wydarzeń kolejowych.....	86
7.1. Podsumowanie pierwszej edycji mapy wydarzeń kolejowych	86
7.2. Druga edycja mapy wydarzeń kolejowych – prezentacja wyników modelu predykcji potrąceń zwierzyny	86
8. Podsumowanie	92
9. Wnioski	97
Bibliografia.....	99
Spis załączników	109
Spis rysunków.....	110
Spis tabel.....	113

Wykaz najważniejszych skrótów i oznaczeń

ERA – Agencja Kolejowa Unii Europejskiej (ang. European Union Agency for Railways)

ERADIS – baza danych interoperacyjności i bezpieczeństwa Agencji Kolejowej Unii Europejskiej (ang. European Railway Agency Database of Interoperability and Safety)

CSI – wspólne wskaźniki bezpieczeństwa (ang. Common Safety Indicators)

GAMM – uogólnione modele addytywne mieszane (ang. Generalized Additive Mixed Models)

GIS – system informacji geograficznej (ang. Geographic Information System)

GUI – graficzny interfejs użytkownika (ang. Graphical User Interface)

GFTS – międzynarodowy format zapisu informacji o rozkładach jazdy i lokalizacji przystanków (ang. General Transit Feed Specification)

GPS – system nawigacji satelitarnej (ang. Global Positioning System)

HFACS – System Analizy i Kwalifikacji Czynnika Ludzkiego (ang. Human Factor Analysis and Classification System)

Koleje Śląskie – Koleje Śląskie sp. z o.o.

Koleje Wielkopolskie – Koleje Wielkopolskie sp. z o.o.

NIB – krajowy organ dochodzeniowy (ang. National Investigation Body)

NSA – krajowa władza bezpieczeństwa (ang. National Safety Authority)

OSCM – Wielokierunkowy Model Kultury Bezpieczeństwa (ang. Omnidirectional Safety Culture Model)

PKBWK – Państwowa Komisja Badania Wypadków Kolejowych

PKP – Polskie Koleje Państwowe

PKP PLK S.A. – PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.

p_{pt} – wartość prawdopodobieństwa, że pociąg weźmie udział w kolizji ze zwierzyną

$p_{progowe}$ – wartość progowa prawdopodobieństwa, dla którego wydawane jest ostrzeżenie

Rozporządzenie (UE) 1158/2010 – Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1158/2010 z dnia 9 grudnia 2010 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do zgodności z wymogami dotyczącymi uzyskania kolejowych certyfikatów bezpieczeństwa

Rozporządzenia (UE) 2018/762 - Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2018/762 z dnia 8 marca 2018 r. ustanawiające wspólne metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do wymogów dotyczących systemu zarządzania bezpieczeństwem na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 oraz uchylające rozporządzenia Komisji (UE) nr 1158/2010 i (UE) nr 1169/2010

RSSB – Rada Bezpieczeństwa i Norm Kolejowych (ang. Rail Safety and Standards Board)

SMS – system zarządzania bezpieczeństwem (ang. Safety Management System)

SPAD – niezatrzymanie pociągu w miejscu wyznaczonym (ang. Signal Passed at Danger)

SQL – strukturalny język zapytań (ang. Structured Query Language)

TSI – techniczne specyfikacje interoperacyjności (ang. Technical Specification for Interoperability)

UE – Unia Europejska

UIC – Międzynarodowy Związek Kolei (ang. International Union of Railways)

UOZ – Urządzenia Ochrony Zwierząt

UITP – Międzynarodowa Unia Transportu Publicznego (ang. The International Association of Public Transport)

UTK – Urząd Transportu Kolejowego

1. Wprowadzenie do tematyki rozprawy doktorskiej

1.1. Bezpieczeństwo i jego definicje

Transport jest integralną częścią życia człowieka. Możliwość sprawnego poruszania się za pomocą różnych środków transportu pozwala na spełnianie potrzeb o charakterze obligatoryjnym oraz fakultatywnym. Niemniej na wybór konkretnego środka transportu wpływ mają różne czynniki. Podstawowym z nich jest dostępność, stwarzająca jednocześnie konieczność podjęcia decyzji o wyborze najbardziej satysfakcjonującej metody przemieszczania się. Literatura wskazuje, że bezpieczeństwo – obok komfortu, czasu podróży, punktualności, cykliczności czy dostępności informacji pasażerskiej – jest jednym z istotnych parametrów oceny transportu publicznego, w tym kolejowego [1-5]. Mając na uwadze, że bezpieczeństwo jest podstawowym parametrem oceny usług transportowych, konieczne jest dalsze rozważenie tego terminu.

Definicja słownikowa terminu bezpieczeństwo wskazuje, że jest to „*stan niezagrożenia*” [6], z kolei samo zagrożenie definiowane jest jako „*sytuacja lub stan, które komuś zagrażają lub w których ktoś czuje się zagrożony*” [7]. Etymologia rzeczownika bezpieczeństwo została objaśniona w [8].

Przeanalizowano również objaśnienia terminu bezpieczeństwa znajdujące się w literaturze specjalistycznej. Przez autorów wywodzących się z różnych dyscyplin naukowych definicja ta jest przedstawiana w różnych kontekstach. Niemniej wszystkie mają wspólny fundament, który powiązany jest z poniższymi elementami:

- a. stan niezagrożenia, spokoju, pewności, braku zagrożeń, ochrony przed zagrożeniami, niebezpieczeństwami,
- b. stan, który zapewnia poczucie stabilności, możliwości w zakresie doskonalenia i rozwoju,
- c. stan dający poczucie pewności, jak również gwarancję jego zachowania, szansę na doskonalenie, brak zagrożenia utraty czegoś, co człowiek w szczególny sposób ceni oraz chroni np. zdrowia, szacunku, dóbr materialnych itp.,
- d. teoria i praktyka zapewnienia możliwości przetrwania (egzystencji) i realizacji własnych interesów przez dany podmiot, przy czym szczególnie ważne jest wykorzystywanie okoliczności sprzyjających (szans), podejmowanie wyzwań, ograniczanie poziomu ryzyka oraz zapobieganie i przeciwstawianie się wszelkim możliwym zagrożeniom, które dotyczą podmiotu i jego interesów,

- e. nadrzędna potrzeba państw i systemów międzynarodowych, która jest gwarancją stabilizacji i rozwoju życia na różnych płaszczyznach – politycznej, ekonomicznej i społecznej [9-11].

Ponadto należy zwrócić uwagę, że termin bezpieczeństwo jest bardzo często dookreślany przez dodatkowy przymiotnik skupiając się na konkretnym wymiarze funkcjonowania człowieka czy systemów. Takie podejście pozwala na doprecyzowanie obszaru, dla którego definicja bezpieczeństwa jest charakteryzowana. Mając na uwadze tematykę pracy powiązaną bezpośrednio z problematyką transportu, poniżej wskazano przykładowe definicje związane z szeroko pojętym bezpieczeństwem transportu:

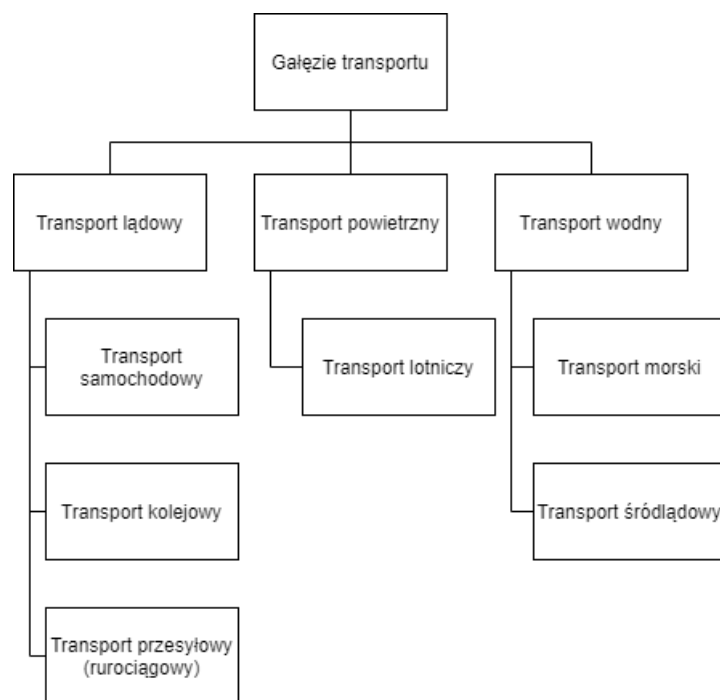
- a. bezpieczeństwo komunikacyjne (z ang. Safety) – „[...] *bezpieczeństwo komunikacyjne w znaczeniu transportowym oznacza ocenę ryzyka utraty zdrowia lub życia na skutek zdarzeń komunikacyjnych (wypadki) związanych z realizacją procesu przewozowego*” [12],
- b. bezpieczeństwo osobiste (z ang. Security) – „[...] *bezpieczeństwo osobiste w znaczeniu transportowym oznacza ocenę ryzyka utraty zdrowia lub życia na skutek zdarzeń typu przestępczego (napad, rabunek) następujących w czasie realizacji procesu przewozowego*” [12],
- c. bezpieczeństwo komunikacyjne „*odnosi się do postrzegania przez uczestników ruchu ustalonych norm i reguł mających na celu zapobieganie niebezpiecznym sytuacjom (kolizjom, wypadkom) oraz ich niekorzystnym skutkom, przejawiającym się zakłóceniem potoków ruchu i generowaniem innych kosztów społecznych (utrata życia lub zdrowia, starty materialne itp.)*” [13].

1.2. Charakterystyka regionalnego kolejowego transportu pasażerskiego

Obszar badawczy niniejszej rozprawy doktorskiej skupia się wokół kolejowego transportu pasażerskiego. W związku z tym należy odpowiednio zrozumieć ten termin i umiejscowić w strukturze transportowej. Literatura przedstawia różniące się od siebie definicje transportu [14-16]. Jednak pomimo różnorodnego podejścia w zakresie podkreślenia czynników ekonomicznych, społecznych czy organizacyjnych (wykorzystanych środków technicznych) wszystkie wskazują, że podstawą tego procesu jest przemieszczenie, najczęściej celowe, określonego podmiotu (ładunków czy osób). Oprócz słowa transport powszechnie wykorzystywane jest również pojęcie komunikacji, które w mowie potocznej często jest używane jako synonim słowa transport. Zgodnie z przedstawionymi w [16] definicjami pojęcie

komunikacji może wydawać się szersze znaczeniowo, ponieważ oprócz przewozu ładunków i osób uwzględnia także tzw. łączność, która rozumiana jest jako przesyłanie informacji za pośrednictwem dostępnych w danym momencie rozwoju cywilizacyjnego środków przekazu.

Transport może być klasyfikowany poprzez zastosowanie różnych kryteriów podziału. Najczęściej dokonuje się systematyzacji transportu w układzie pionowym oraz poziomym. Pionowa klasyfikacja odnosi się do środowiska, w którym odbywa się transport wyróżniając transport lądowy, do którego jako gałąź transportu zaliczany jest transport kolejowy (Rysunek 1) [15, 17].



Rysunek 1 Pionowa klasyfikacja transportu [15]

Bardziej skomplikowana jest klasyfikacja pozioma, ponieważ przedstawia podział według różnych kryteriów powiązanych z odległością pomiędzy punktem początkowym i końcowym, przedmiotem transportu, systemem organizacji, dostępnością dla potencjalnego użytkownika, formą własności itd. Mając to na uwadze, klasyfikacja pozioma nie jest tak jednoznaczna jak pionowy podział transportu i przez różnych autorów mogą być uwzględniane różne kryteria podziału [15-19].

Znając zakres rozprawy konieczna jest głębsza analiza regionalnego transportu, który w literaturze jest często charakteryzowany jako transport wewnątrz regionu lub w sposób bardziej rozbudowany: trzema podstawowymi płaszczyznami funkcjonowania tj. pomiędzy

stolicą a regionem, sąsiadującymi regionami oraz wewnątrz regionu [17]. Bardziej precyzyjna definicja, która odnosi się tylko do kolei regionalnej została utworzona pod koniec XX wieku przez Międzynarodową Unię Transportu Publicznego (UITP, ang. The International Association of Public Transport). Definicja przedstawiona w [20] wskazuje, że kolej regionalna opiera się na regularnych (nieturystycznych) usługach pasażerskich, które realizowane są w ramach średniej wielkości jednostki terytorialnej i politycznej, przy czym jest ona większa niż miasto, ale mniejsza niż kraj. Taka definicja pozwala na odmienne, a zarazem elastyczne rozumienie transportu regionalnego w różnych państwach, w zależności od warunków lokalnych czy historycznych. Mając na uwadze zapisy [21] odnoszące się między innymi do realizacji transportu w jasno określonym systemie organizacyjno-prawnym oraz zapisy publikacji [17, 22] można określić, że w Polsce ramy przestrzenne dla kompleksowego transportu regionalnego, w tym także kolejowego są ograniczone przez obszar województw. Przy czym zgodnie z [21] w przypadku kolejowych linii komunikacyjnych obszar funkcjonowania jest rozszerzony o najbliższą stację w województwie sąsiednim celem umożliwienia przesiadki na dalszą podróż lub z przyczyn technicznych, które pozwalają na odwrócenie biegu pociągu, a tym samym organizację przewozu powrotnego pasażerów.

Powyższe rozważania dotyczyły przede wszystkim określenia ram terytorialnych odnoszących się do przewozu regionalnego. Kolejnym elementem, który powinien zostać rozpatrzony, jest sposób organizacji. Transport regionalny jest tworzony zarówno poprzez transport indywidualny np. samochodowy, jak również publiczny. Do transportu publicznego, który jest istotny w kontekście dalszych etapów pracy, zaliczono transport kolejowy.

Polskie prawo definiuje publiczny transport zbiorowy w [21]. Określając go jako *„powszechnie dostępny regularny przewóz osób wykonywany w określonych odstępach czasu i po określonej linii komunikacyjnej, liniach komunikacyjnych lub sieci komunikacyjnej”*. Taka definicja jest zgodna z europejskim podejściem, które zostało zaprezentowane w [17].

Regionalny transport kolejowy spełnia powyższą definicję, ponieważ jest dostępny dla wszystkich przy jednoczesnym wskazaniu przez organizatorów transportu taryfy i innych wytycznych dotyczących kosztów i sposobu płatności za realizację konkretnej usługi dla różnych grup odbiorców. Rozkłady jazdy dla zdefiniowanych tras pociągów są publicznie dostępne z wykorzystaniem różnych środków komunikacji, takich jak tablice na dworcach, strony internetowe, aplikacje na urządzenia mobilne.

Jak już wcześniej wspomniano, w definicji kolei regionalnej zawartej w [20] podkreślono, że nie dotyczy ona ruchu turystycznego. Niemniej w obecnych czasach coraz więcej uwagi skupia się na tym, że transport regionalny oprócz realizacji obligatoryjnych potrzeb transportowych społeczeństwa zaspokaja również potrzeby o charakterze fakultatywnym, których rozbudowany opis wskazano w [17, 23, 24].

Za realizację procesu przewozowego odpowiada przewoźnik kolejowy, którego definicja została określona w [12, 25]. Przewoźnikiem kolejowym jest przedsiębiorca, który w ramach działalności jest uprawniony do wykonywania przewozów kolejowych pasażerskich i/lub towarowych, w tym do świadczenia wyłącznie usługi trakcyjnej. Potwierdzeniem spełnienia wymagań prawnych dla przewoźników poruszających się po infrastrukturze publicznej jest uzyskanie licencji przewozowej i jednolitego certyfikatu bezpieczeństwa [26].

W Polsce kolej od 1926 r. była w całości zarządzana przez Polskie Koleje Państwowe (PKP), które w sposób autonomiczny kreowały ofertę przewozową. Po przyjęciu ustawy [27] rozpoczął się podział państwowego podmiotu na mniejsze jednostki organizacyjne, które odpowiadały za wyodrębniony zakres zadań i odpowiedzialności powiązanych z obszarami infrastruktury, przewozów towarowych, przewozów pasażerskich czy zaplecza technicznego. W aspekcie przewozów pasażerskich utworzono spółki PKP Intercity sp. z o.o., PKP Przewozy Regionalne sp. z o.o., PKP Warszawska Kolej Dojazdowa sp. z o.o., PKP Szybka Kolej Miejska sp. z o.o. Lokalne władze samorządowe miały w dalszym ciągu minimalny wpływ na organizację przewozów pasażerskich. Dopiero po uchwaleniu w 2003 roku aktów prawnych w sprawie transportu kolejowego [25] oraz dochodów jednostek samorządu terytorialnego [28] rozpoczął się powolny proces usamorzędowania rozumianego jako regionalizacja pasażerskiego transportu kolejowego. Kolejne strategie przyjmowane na rzecz rozwoju i regionalizacji transportu kolejowego doprowadziły do powstania spółek samorządowych, przy czym pierwszą z nich powołaną poniekąd pilotażowo w 2004 roku były Koleje Mazowieckie - KM sp. z o. o. [17, 22] Obecnie w Polsce za przewozy o charakterze regionalnym odpowiadają przede wszystkim:

- a. Koleje Dolnośląskie S. A.
- b. Arriva RP sp. z o. o.
- c. Łódzka Kolej Aglomeracyjna sp. z o. o.
- d. POLREGIO S. A.
- e. Koleje Małopolskie sp. z o. o.
- f. Koleje Śląskie sp. z o. o.

g. Koleje Mazowieckie – KM sp. z o. o.

h. Koleje Wielkopolskie sp. z o. o.

1.3. Czynniki ludzkie w transporcie kolejowym

W kontekście niniejszej rozprawy istotnym elementem mającym wpływ na bezpieczeństwo realizacji przewozów jest odpowiednie zarządzanie czynnikiem ludzkim. Człowiek w transporcie kolejowym ma istotny wpływ na zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa. Stopniowa implementacja rozwiązań technicznych ma zminimalizować udział decyzji człowieka w prowadzeniu ruchu kolejowego. Wprowadzenie takich rozwiązań nie jest jednak proste i wiąże się z dążeniem do zapewnienia interoperacyjności tj. uzyskania zdolności systemu kolei do zagwarantowania bezpiecznego i nieprzerwanego ruchu pociągów poprzez zapewnienie spełnienia zasadniczych wymagań zgodności technicznej, prawnej, eksploatacyjnej na terenie całej UE (Unii Europejskiej). Niemniej jednak należy wziąć pod uwagę czasochłonność procesu migracji funkcjonujących systemów kolejowych do rozwiązań w pełni interoperacyjnych. W tym zakresie konieczne jest uwzględnienie kapitałochłonności oraz czasochłonności tego procesu, długi okres budowy i eksploatacji, a co z tym związane – długi cykl życia produktów tj. infrastruktury i taboru kolejowego, co znacząco wydłuża proces zmian w obrębie systemu transportu kolejowego. Ponadto w różnych państwach, które posiadają odmienne przepisy prawne oraz doświadczenia w zakresie funkcjonowania transportu szynowego, pojawiają się problemy na poziomie technicznym, legislacyjnym, finansowym czy organizacyjnym w zakresie skutecznego wdrażania rozwiązań w pełni interoperacyjnych [29].

Zważywszy na wskazane aspekty, czynnik ludzki ma i w ciągu następnych lat będzie w dalszym ciągu miał istotny wpływ na poziom bezpieczeństwa kolei i należy go w kompleksowy sposób wspierać. Dla przewoźnika kolejowego zasadniczym obiektem zainteresowania jest stanowisko maszynisty, który odpowiada bezpośrednio za prowadzenie i bezpieczeństwo ruchu kolejowego. W tym zakresie kluczowa jest odpowiednia analiza interfejsu człowiek-maszyna, jak również otoczenia zewnętrznego. Temat ergonomicznego stanowiska pracy maszynisty został opisany w technicznych specyfikacjach interoperacyjności (TSI, ang. Technical Specifications for Interoperability) odnoszących się do podsystemu tabor m. in. w zakresie układu wnętrza kabiny dopasowanego do wymiarów antropometrycznych maszynisty, fotela maszynisty, pulpitu maszynisty czy widoczności przedpola jazdy [30]. Dodatkowo karta Międzynarodowego Związku Kolei (UIC, ang. International Union of Railways) [31] oraz grupa Norm Europejskich PN-EN 16186 [32-35] również przedstawiają

wymagania w aspekcie kształtowania stanowiska pracy maszynisty pojazdów kolejowych. Temat ergonomii stanowiska pracy maszynisty jest omawiany w wielu pracach naukowych i jest istotnym elementem fazy projektowania pojazdów. W pracy [36] zwrócono uwagę na ergonomię miejsca pracy maszynisty w aspekcie skutków automatyzacji, czujności i monotonii. Problemy diagnozowania ergonomicznego układu człowiek (operator) – maszyna (pojazd szynowy) – otoczenie opisano w [37]. W publikacji wskazano, że kondycja psychofizyczna, przystosowanie do pracy, obciążenie psychiczne, staż pracy, wysiłek fizyczny są priorytetowymi cechami w zakresie czynnika ludzkiego, które powinny być brane pod uwagę przy ocenie ergonomicznego stanowiska pracy. Publikacja koncentruje się na identyfikacji oczekiwań obsługi pociągu w zakresie wyposażenia kabiny maszynisty w rozwiązania technologiczne, które ułatwią komunikację i współpracę w układzie człowiek-maszyna. Badania wskazują, że technologia haptyczna i polecenia głosowe to najbardziej cenione, innowacyjne interfejsy. Ponadto zwrócono uwagę na wyświetlacze typu Head-Up Display, które bez zasłaniania widoku przedpoła jazdy, mogą przedstawiać istotne informacje np. alerty o miejscach niebezpiecznych [38].

Bardzo ważnym źródłem wiedzy w zakresie czynnika ludzkiego jest analiza przyczyn i okoliczności zdarzeń kolejowych, która z jednej strony pozwala na wykazanie tych z nich, które odnoszą się do błędów człowieka, a z drugiej umożliwia wskazanie na jakie okoliczności zewnętrzne należy przygotować prowadzącego pojazd szynowy, aby odpowiednio zareagował w danej sytuacji. W pracy [39] wskazuje się, że analiza wypadków kolejowych wyróżnia dwie główne grupy ryzyka związane z czynnikiem ludzkim. W pierwszej z nich znajdują się wypadki pracownicze, do których zaliczono sytuacje spowodowane przez pracowników, a których przyczyny są związane z naruszeniem podstawowych zasad prowadzenia ruchu pociągów lub innych odpowiednich regulacji wewnętrznych i przyjętych norm oraz wypadki powstałe z winy jednostek spoza systemu transportu kolejowego tj. kierujących pojazdami drogowymi w obrębie przejazdów kolejowo-drogowych czy osób postronnych przebywających na obszarze kolejowym.

Opracowano wiele metod umożliwiających badanie przyczyn wypadków, które dotyczą identyfikacji i analizy czynnika ludzkiego. Wiele z nich ma swoje korzenie w transporcie lotniczym, gdzie czynnik ludzki był analizowany znacznie wcześniej niż w transporcie kolejowym i gdzie wnioski z analiz odnoszących się do zachowania i błędów ludzkich są dokładniej rozpoznane niż w transporcie kolejowym [40]. Wykorzystanie metod systemowego podejścia do analizy wypadków w transporcie kolejowym przedstawiono między

innymi w [41]. Często wykorzystywaną metodą jest System Analizy i Klasyfikacji Czynnika Ludzkiego (HFACS, Human Factor Analysis and Classification System) [42] i jej wariacje dopasowane do specyfiki transportu kolejowego [43, 44]. Badania metodą HFACS są prowadzone na całym świecie. W Chinach przeprowadzono analizę HFACS dla 407 przypadków zdarzeń kolejowych. Rozważając błędy utajone i aktywne wykryto, że błędy ludzkie, które najczęściej występują w systemie kolejowym, zgodnie z terminologią HFACS, powiązane są z procesem organizacyjnym, nieodpowiednim nadzorem, błędami opartymi na umiejętnościach, gotowością osobistą [45]. Z kolei badania w Wielkiej Brytanii, które objęły 78 sprawozdań końcowych ze zdarzeń, wykazały, że błędy utajone nie są wystarczająco dobrze analizowane, przez co błędy na poziomie organizacyjnym i nadzorczym nie są wykazywane w prawidłowy sposób. Mając na uwadze polski rynek kolejowy w pracy [46] została przedstawiona analiza czynnika ludzkiego metodą HFACS. Analiza 148 zdarzeń, podobnie jak w przypadku badań przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii, wykazała, że przyczyny zdarzeń na poziomie organizacyjnym nie są odpowiednio badane w raportach końcowych, przez co niemożliwe jest późniejsze przeprowadzenie kompleksowej analizy przyczyn zdarzeń kolejowych. Takie sformułowanie jest potwierdzone również w [41], przykłady wykorzystania metod analizy czynnika ludzkiego w kontekście zdarzeń kolejowych zostały przedstawione również w innych pracach [47-50].

Metody analiz czynnika ludzkiego oparte na sieciach neuronowych i sztucznej inteligencji dają możliwości analizy bardziej skomplikowanych systemów. W pracy [51] przedstawiono możliwości zastosowania sieci bayesowskich i sieci Petriego do kompleksowej analizy złożonych systemów bezpieczeństwa, do których zaliczany jest także transport kolejowy. W przedmiotowych analizach uwzględnia się zależności funkcjonalne między komponentami, czasowego zachowania systemów, różnorodności trybów, stanów awarii dla poszczególnych komponentów i całego systemu, jak również niepewności w zachowaniu systemu oraz danych dotyczących awarii. W badaniu przedstawionym w [52] przy pomocy sieci bayesowskich rozpatrzono wpływ systemów zarządzania bezpieczeństwem (SMS, ang. Safety Management System) funkcjonujących w Wielkiej Brytanii oraz we Włoszech na faktyczny poziom bezpieczeństwa. W pracy uwzględniono kwestię zdarzeń kolejowych w aspekcie analizy i określania prawdopodobieństwa zidentyfikowania w raporcie końcowym przyczyn zdarzeń, takich jak zarządzanie zmęczeniem, ergonomią miejsca pracy, przywództwo i monitorowanie. Innym przykładem wykorzystania sieci bayesowskich jest analiza 176 raportów końcowych

zdarzeń kolejowych zaistniałych w Wielkiej Brytanii celem wykrycia korelacji pomiędzy wypadkami i zagrożeniami [53].

1.4. Kultura bezpieczeństwa w transporcie kolejowym

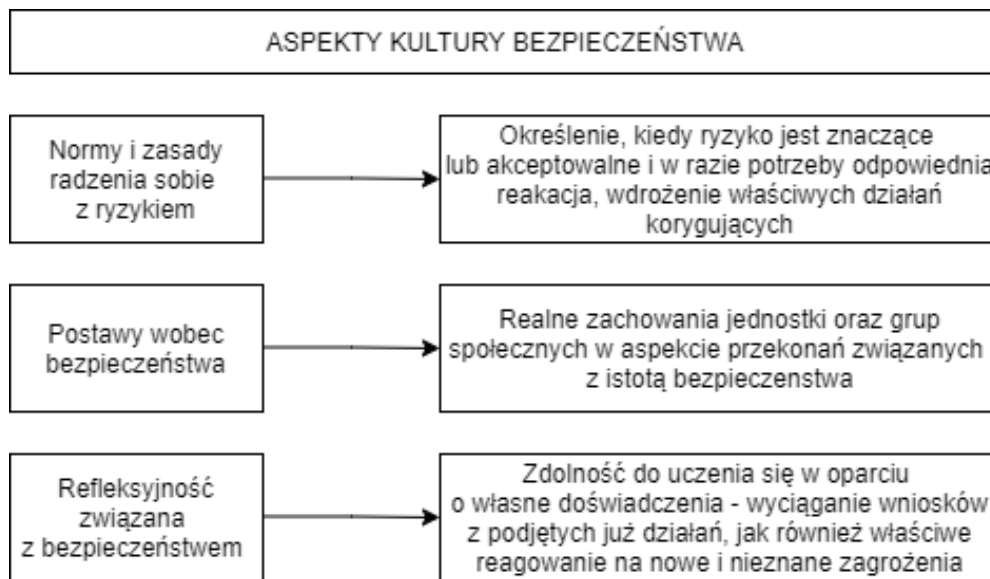
Pojęcie kultury bezpieczeństwa po raz pierwszy pojawiło się w trakcie badań przyczyn wystąpienia awarii reaktora w Czarnobylu, w roku 1986. W końcowym raporcie odwołano się do kultury bezpieczeństwa mając na uwadze, że wystąpienie katastrofy było spowodowane brakiem odpowiedniej troski, wiedzy, znajomości zagrożenia oraz zaniedbaniami istniejących procedur bezpieczeństwa. Termin kultury bezpieczeństwa poprzez wykorzystanie w badaniu innych katastrof i wypadków transportowych, budowlanych czy w przemyśle ciężkim, nabralo dużego znaczenia. Sam termin kultury bezpieczeństwa może być różnie definiowany w ujęciu klasycznym, jak również bardziej sprecyzowany w zależności od zainteresowań i doświadczeń autora definicji, branży przemysłowej. Analiza przykładowych definicji oraz opinii w zakresie kultury bezpieczeństwa znajduje się w pracach [54-57].

Analizując powyżej wskazane źródła w zakresie rozumienia terminu kultury bezpieczeństwa można wskazać wspólne elementy określające cechy charakterystyczne terminu:

- a. jest elementem wyodrębnionym z szerszej kultury organizacyjnej,
- b. obejmuje wszystkich członków danej organizacji,
- c. jej rozwój powinien leżeć w szczególności w gestii zainteresowania kierownictwa najwyższego szczebla,
- d. jej celem jest minimalizacja ekspozycji na wszelkie zagrożenia i warunki, które są niekorzystne dla wszystkich członków organizacji, a nawet jej otoczenia,
- e. jest wynikiem postaw, przekonań, przyzwyczajzeń, podejścia prezentowanego przez każdego uczestnika procesów,
- f. jest powiązana z osobistą odpowiedzialnością, która wpływa na całokształt działalności,
- g. jest uzależniona od środowiska, w którym funkcjonuje cała organizacja.

Kulturę bezpieczeństwa przedstawia się jako element organizacji, którego nie da się nabyć poprzez jednorazowe działanie. Powinna być zawsze utożsamiana z długotrwałym podejściem, które w członkach organizacji buduje świadomość w zakresie osobistego wpływu w budowanie bezpieczeństwa własnego, jak i współpracowników oraz otoczenia. Należy zawsze mieć na uwadze, że nawet najlepiej przemyślane i zaprojektowane urządzenia, procesy, regulacje wewnętrzne i inne elementy niezbędne do wykonywania obowiązków przez pracownika nie są gwarancją pełnego sukcesu, gdyż człowiek stanowi podstawowe ogniwo oczekiwanego

działania organizacji. W pracy [58] wyróżniono trzy aspekty kultury bezpieczeństwa, które zostały przedstawione na Rysunku 2.



Rysunek 2 Aspekty kultury bezpieczeństwa, opracowanie własne na podstawie [58]

Proces doskonalenia kultury, w tym bezpieczeństwa, opiera się na powtarzalności czynności związanych z wpływem czynników wewnętrznych i zewnętrznych na organizację oraz ich późniejszym przetwarzaniem na rzeczywiste postawy, wartości i zachowania. Model obrazujący tę zależność, a który bezpośrednio nawiązuje do wcześniej wskazanych aspektów kultury bezpieczeństwa, został przedstawiony na Rysunku 3 [59].



Rysunek 3 Doskonalenie kultury bezpieczeństwa, opracowanie własne na podstawie [59]

Nieustana realizacja powyższego procesu umożliwi zbudowanie kultury bezpieczeństwa, która oceniana jest, jako będąca na wysokim poziomie. Elementami charakterystycznymi takiej kultury bezpieczeństwa są przede wszystkim:

- a. przypisywanie dużej wartości zdrowiu i życiu ludzkiemu,
- b. zaangażowanie członków organizacji na każdym jej szczeblu, w tym widoczna aktywność kadry kierowniczej,
- c. sformułowanie polityki bezpieczeństwa, która jest istotnym elementem uwzględnianym podczas planowanych zmian i rozwoju organizacji,
- d. priorytetowe podejście do bezpieczeństwa w zakresie stałego zainteresowania sprawami, które mają wpływ na bezpieczeństwo organizacji,
- e. świadome postępowanie pracowników, otwartość i wiarygodność w zakresie informacji i danych powiązanych z bezpieczeństwem,
- f. atmosfera zaufania i swobody wypowiedzenia się,
- g. konsekwentne szkolenia oraz wspieranie wszystkich członków organizacji w obszarze twardych i miękkich kompetencji,
- h. motywowanie i nagradzanie,
- i. promowanie bezpiecznych zachowań i postaw.

Przegląd literatury wskazuje, że dotychczas powstało wiele modeli kultury bezpieczeństwa funkcjonujących w różnych branżach, do których zaliczono między innymi: Model Kultury Bezpieczeństwa Międzynarodowej Agencji Energii Atomowej [60], Model Dojrzałości Kultury Bezpieczeństwa [61], Wielokierunkowy Model Kultury Bezpieczeństwa (OSCM, ang. Omnidirectional Safety Culture Model) [62]. Więcej informacji w zakresie modeli dotyczących kultury bezpieczeństwa i ich implementacji znajduje się w pracach [63-65].

Agencja Kolejowa Unii Europejskiej (ERA, European Union Agency for Railways) wskazuje, że kultura bezpieczeństwa odnosi się do interakcji pomiędzy wymaganiami systemu zarządzania bezpieczeństwem, sposobem w jaki ludzie je rozumieją mając na uwadze ich postawy, wartości i przekonania, a tym, co faktycznie robią, co przejawia się w ich decyzjach i zachowaniach [66]. Nacisk, a zarazem obowiązek budowania kultury bezpieczeństwa wśród przewoźników kolejowych i zarządców infrastruktury został przedstawiony w rozporządzeniu delegowanym Komisji (UE) 2018/762 z dnia 8 marca 2018 r. ustanawiającym wspólne metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do wymogów dotyczących systemu zarządzania bezpieczeństwem na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 oraz uchylającym rozporządzenia Komisji (UE) nr 1158/2010 i (UE) nr 1169/2010 [67]

(Rozporządzenia (UE) 2018/762) odnoszącym się do wymogów budowania systemów zarządzania bezpieczeństwem. Oprócz samego zobowiązania podmiotów, ERA podejmuje również działania na rzecz edukacji i propagowania kultury bezpieczeństwa w transporcie kolejowym. Przykładem tego jest Europejski Kolejowy Model Kultury Bezpieczeństwa, którego zadaniem jest wsparcie podmiotów rynku kolejowego w identyfikacji mocnych i słabych stron z zakresu kultury bezpieczeństwa, celem wprowadzenia odpowiedniej strategii w zakresie działań doskonalących. Model został zbudowany w oparciu o trzy składniki, które pozwalają na identyfikację atrybutów kultury bezpieczeństwa:

1. uwarunkowania kulturowe – stymulatory dzięki którym rozwija się kultura bezpieczeństwa,
2. wzorce zachowań – wspólne postawy i działania, które przedstawiają kulturę organizacji.
3. fundamenty bezpieczeństwa kolejowego – podstawowe zasady, które muszą być odzwierciedlone we wzorcach zachowań, aby osiągnąć zrównoważone wyniki w zakresie bezpieczeństwa, jak i doskonałości organizacyjnej [68].

Wśród istotnych elementów, które pozwalają budować kulturę bezpieczeństwa według standardów Unii Europejskiej, są wskazane już wcześniej aspekty pozytywnej kultury bezpieczeństwa. Dodatkowo ERA zwraca uwagę na proces zarządzania głównymi ryzykami w zakresie świadomości pracowników, budowania zdolności do bezpiecznego funkcjonowania w niespodziewanych sytuacjach, raportowania wszelkich odchyłeń od zaplanowanych wyników czy aktywnego podejścia do szukania dobrych praktyk na rynku. Prezes Urzędu Transportu Kolejowego (Prezes UTK) zwraca również szczególną uwagę na promowanie kultury bezpieczeństwa kolejowego, z jego inicjatywy wdrożono projekt o nazwie Deklaracja w sprawie rozwoju kultury bezpieczeństwa w transporcie kolejowym zraszający podmioty krajowego rynku, dla których bezpieczeństwo organizacji, jak i całego systemu kolejowego stanowi priorytet [69].

Waga kultury bezpieczeństwa kolejowego jest podkreślana nie tylko w Unii Europejskiej. Rada Bezpieczeństwa i Norm Kolejowych (RSSB, ang. Rail Safety and Standards Board), będąca niezależną jednostką wspierającą usprawnienie systemu transportu kolejowego w Wielkiej Brytanii, utworzyło Safety Culture Toolkit, który stanowi przewodnik dla przedsiębiorstw kolejowych w zakresie rozwiązań, dobrych praktyk, jak również umożliwia przeprowadzenie samooceny w zakresie poziomu kultury bezpieczeństwa [70]. Ponadto organizacja wskazuje także na istotę włączenia kultury bezpieczeństwa w system zarządzania

bezpieczeństwem podmiotów rynku kolejowego [71]. Kultura bezpieczeństwa transportu kolejowego jest promowana w wielu innych krajach, czego przykładem są opracowania przygotowane w Kanadzie [72], Australii [73], Japonii i Indiach [74].

2. Bezpieczeństwo w transporcie kolejowym w aspekcie przewoźnika kolejowego

2.1. Przegląd regulacji prawnych związanych z zapewnieniem bezpieczeństwa przez przewoźnika kolejowego

Mając na uwadze obiekt badawczy, którym są regionalni przewoźnicy pasażerscy funkcjonujący na polskim rynku kolejowym, analiza regulacji prawnych związanych z bezpieczeństwem, a w szczególności poruszających kwestię wydarzeń kolejowych i czynnika ludzkiego, skupi się na niezbędnych wymaganiach na poziomie europejskim oraz krajowym.

Kluczowym momentem w aspekcie standaryzacji wymagań w zakresie bezpiecznego zarządzania i prowadzenia działalności przez podmioty rynku kolejowego było wprowadzenie obowiązku opracowania i wdrożenia przez przewoźników kolejowych oraz zarządców infrastruktury systemów zarządzania bezpieczeństwem. Obowiązek ten został początkowo nakreślony w zapisach artykułu 9 Dyrektywy 2004/49/WE Parlamentu i Rady Europejskiej w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych [75], która określiła podstawowe wymagania i elementy SMS. Szczegółowe kryteria oceny systemów przewoźników kolejowych zostały przedstawione w rozporządzeniu wykonawczym Komisji (UE) nr 1158/2010 z dnia 9 grudnia 2010 r. (rozporządzenie (UE) 1158/2010) [76]. Zgodnie z przedmiotowym aktem prawnym obowiązek funkcjonowania certyfikowanych SMS wszedł w życie w 2011 r. Obecnie obowiązującymi aktami prawnymi, które uchylili powyżej wskazane dokumenty, są dyrektywa i rozporządzenia przedstawione w Tabeli 1 na pozycjach 1-2. Przy czym należy zwrócić uwagę, że celem przyjęcia nowych regulacji prawnych w zakresie SMS było doskonalenie dotychczas wdrożonych systemów. Fundamenty funkcjonujących systemów zostały zachowane, a jedynie uwzględniono dodatkowe elementy mające pozytywnie wpływać na zaangażowanie podmiotów rynku kolejowego w zakresie kompleksowego podejścia do bezpieczeństwa. W porównaniu z rozporządzeniem (UE) 1158/2010 [76] w rozporządzeniu (UE) 2018/762 [67] zwrócono większą uwagę na kwestię zarządzania ryzykiem, które powinno być traktowane jako nieodłączny element monitorowania i podejmowania działań doskonalących o charakterze korygującym i zapobiegawczym. Rozbudowane podejście dostrzega się również w zakresie czynników ludzkich i organizacyjnych. Charakter tych elementów, często indywidualny dla danego przedsiębiorstwa lub nawet w dokładnej analizie dla poszczególnych pracowników, powinien być uwzględniany na właściwych poziomach realizowanych procesów, co powiązane jest bezpośrednio z omawianą w podrozdziale 1.4 koncepcją kultury bezpieczeństwa

kolejowego [77]. W Tabeli 1 przedstawiono regulacje prawne oraz ich przedmiot, które ze względu na powiązanie z obszarem wydarzeń kolejowych oraz kultury bezpieczeństwa kolejowego są istotne w aspekcie niniejszej pracy.

Tabela 1 Regulacje prawne powiązane z bezpieczeństwem w aspekcie przewoźników kolejowych

Nazwa regulacji	Obszar obowiązywania	Przedmiot regulacji
Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa kolei [78]	Unia Europejska	rozwijanie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa, do której zaliczane są wymagania w zakresie systemów zarządzania bezpieczeństwem, określenie wspólnych zasad zarządzania bezpieczeństwem kolei, sposobu regulacji i nadzoru, w szczególności w kontekście ograniczenia przepisów krajowych na rzecz przepisów wspólnotowych
Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2018/762 ustanawiające wspólne metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do wymogów dotyczących systemu zarządzania bezpieczeństwem na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 oraz uchylające rozporządzenia Komisji (UE) nr 1158/2010 i (UE) nr 1169/2010 [67]	Unia Europejska	przedstawienie wymogów dotyczących systemu zarządzania bezpieczeństwem, których spełnienie umożliwi przewoźnikowi kolejowemu uzyskać jednolity certyfikat bezpieczeństwa
Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) nr 402/2013 z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w zakresie wyceny i oceny ryzyka i uchylające rozporządzenie (WE) nr 352/2009 [79]	Unia Europejska	przedstawienie procesu zarządzania ryzykiem w aspekcie zmian mających wpływ na bezpieczeństwo i zachowania zgodności z wymaganiami w zakresie bezpieczeństwa, jak również obiegu informacji pomiędzy przedsiębiorstwami rynku kolejowego, a które mogą być istotne w zakresie zarządzania bezpieczeństwem
Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1078/2012 z dnia 16 listopada 2012 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do monitorowania, która ma być stosowana przez przedsiębiorstwa kolejowe i zarządców infrastruktury po otrzymaniu certyfikatu bezpieczeństwa lub autoryzacji bezpieczeństwa oraz przez podmioty odpowiedzialne za utrzymanie [80]	Unia Europejska	określenie wymagań w zakresie monitorowania systemów zarządzania, w tym bezpieczeństwem w aspekcie uzyskania oczekiwanych wyników w trakcie ich funkcjonowania, zobowiązanie do wprowadzania działań doskonalących w razie wystąpienia odchyleń od prawidłowego funkcjonowania systemu
Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2020/572 z dnia 24 kwietnia 2020 r. dotyczące struktury sprawozdań stosowanej na potrzeby sprawozdań z dochodzeń w sprawie wypadków i incydentów kolejowych [81]	Unia Europejska	określenie wytycznych dotyczących sprawozdań z dochodzeń w sprawie zdarzeń kolejowych sporządzanych przez krajowe organy dochodzeniowe, które mogą być również stosowane przez pozostałe podmioty rynku kolejowego

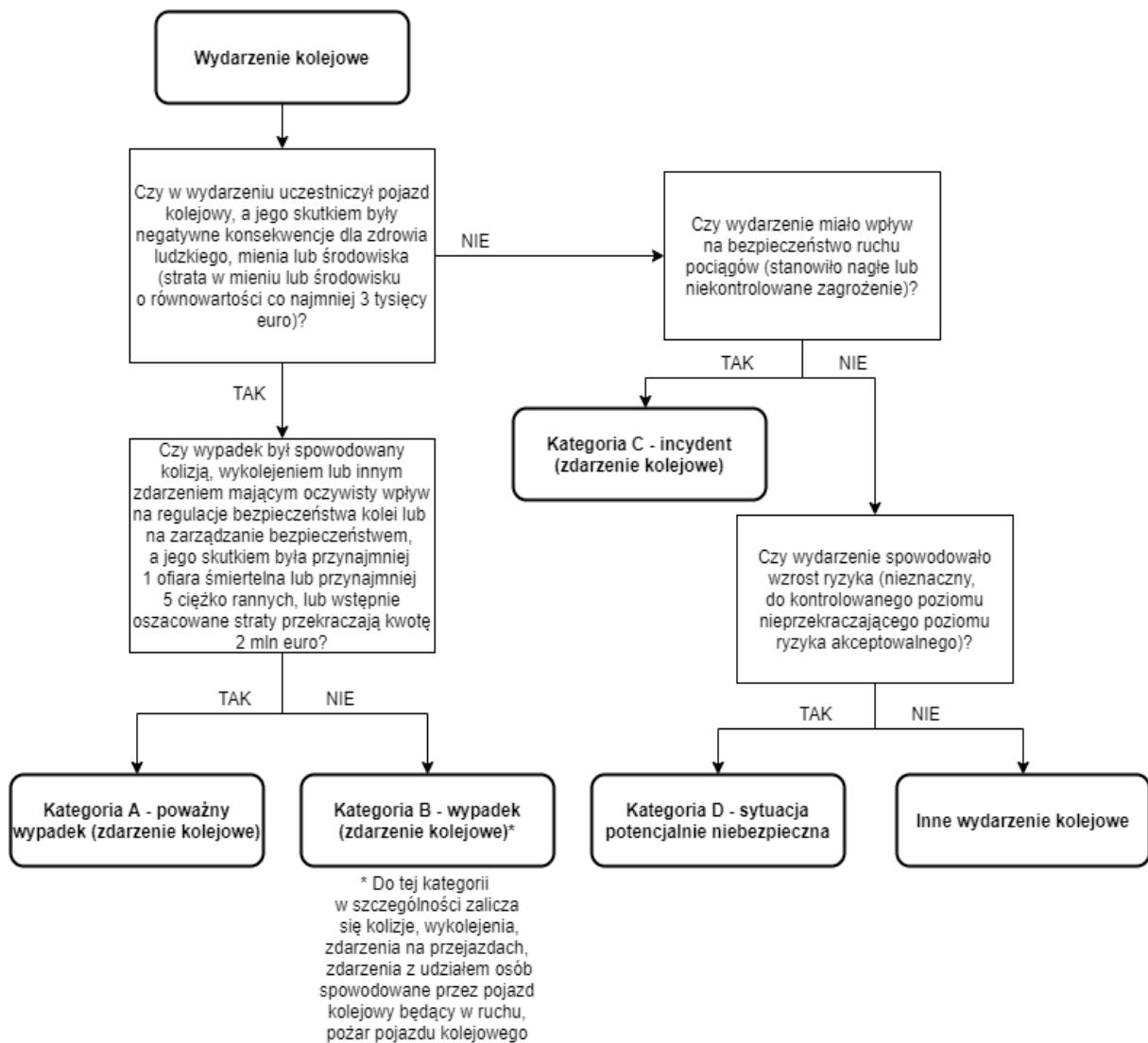
Nazwa regulacji	Obszar obowiązywania	Przedmiot regulacji
Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym [25]	Polska	przedstawienie definicji związanych z transportem kolejowym, określenie zasad prowadzenia ruchu kolejowego i wykonywania przewozów kolejowych, zasad i instrumentów regulacji transportu kolejowego
Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 16 marca 2016 r. w sprawie poważnych wypadków, wypadków i incydentów w transporcie kolejowym [82]	Polska	przedstawienie wytycznych dotyczących powiadamiania o zdarzeniu kolejowym, powoływania i prowadzenia w tej sprawie postępowania przez komisję kolejową, jak również klasyfikacji zdarzeń
Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 11 czerwca 2021 r. w sprawie wspólnych wskaźników bezpieczeństwa (CSI) [83]	Polska	wskazanie wytycznych dla zarządców infrastruktury i przewoźników kolejowych w zakresie sposobu prezentowania wyników osiągniętych dla wspólnych wskaźników bezpieczeństwa, które obejmują m.in. obszar zdarzeń kolejowych

Rys historyczny związany z kształtowaniem regulacji prawnych związanych z bezpieczeństwem kolejowym na poziomie krajowym i europejskim został omówiony w następujących publikacjach [84, 85].

2.2. Obowiązki przewoźnika kolejowego w aspekcie wydarzeń kolejowych

Regulacje prawne przedstawione w Tabeli 1 nakładają na przewoźników kolejowych obowiązki w zakresie odpowiedniego postępowania po zidentyfikowaniu wydarzeń kolejowych oraz procesu ich analizowania i wyciągania wniosków.

Aby poprawnie rozumieć kwestię obowiązków przewoźnika w obszarze wydarzeń kolejowych należy rozpocząć od zapoznania z odpowiednią terminologią. Na Rysunku 4 przedstawiono klasyfikację wydarzeń wraz ze wstępną metodyką ich identyfikacji, która obowiązuje na sieci kolejowej narodowego zarządcy infrastruktury PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (PKP PLK S.A.), przy czym należy zaznaczyć, że termin zdarzeń kolejowych tj. kategorii A, B i C jest wskazany i objaśniony w prawie krajowym [25], pozostała klasyfikacja została ustalona przez zarządcę w wewnętrznej instrukcji [86], która obowiązuje wszystkich przewoźników kolejowych korzystających z linii kolejowych administrowanych przez PKP PLK S.A. Przez innych zarządców infrastruktury, poza wspomnianą powyżej wymaganą prawnie terminologią, mogą być stosowane inne podziały wydarzeń kolejowych. Jednak z uwagi na zakres pracy związany z danymi dostępnymi od regionalnych przewoźników pasażerskich wykorzystujących infrastrukturę narodowego zarządcy przedstawiony na Rysunku 4 podział jest wystarczający.



Rysunek 4 Struktura wydarzeń kolejowych wraz ze wstępną metodyką ich kwalifikacji [86]

Wydarzenia kolejowe są rozumiane jako niepożądane sytuacje mające swoje źródła w różnych obszarach zagrożeń. Zgodnie z definicją zagrożenia wykorzystywaną do oceny ryzyka w transporcie kolejowym oznacza ono „*stan, który może prowadzić do wypadku*” [79]. Zagrożenia mogą mieć różne źródła, które wynikają z funkcjonowania systemu transportu kolejowego tj. badanego systemu lub ze źródeł zewnętrznych, które powiązane są z bliższym oraz dalszym otoczeniem. Kompleksowy podział zagrożeń powiązanych z funkcjonowaniem systemów transportowych, który przyjmuje dwuetapowe podejście, gdzie pierwszym krokiem jest wyznaczenie kilku podstawowych grup zagrożeń, a następnie określenie dokładniejszych kategorii zagrożeń, został zawarty w [87]. W pracy nawiązano do zagrożeń, które wynikają z czterech różnych grup:

1. oddziaływania środowiska naturalnego,
2. otoczenia systemu transportowego,

3. wewnętrznego funkcjonowania samego systemu,
4. wpływów terrorystycznych.

Zmaterializowanie się zagrożeń o różnych przyczynach i poziomie ryzyka skutkuje odchyleniami w normalnym funkcjonowaniu systemu transportowego objawiając się jako wspomniane wcześniej wydarzenia kolejowe. Zgodnie z literaturą [39, 88, 89] oraz analizami statystycznymi [90, 91] niepożądane sytuacje na sieci kolejowej występują najczęściej z poniższych przyczyn:

1. w zakresie infrastruktury kolejowej:
 - a. zły stan torów, rozjazdów, podtorza, podkładów, mostów i wiaduktów, w tym nagłych awaryjnych uszkodzeń tych elementów,
 - b. prowadzenie zaplanowanych robót torowych,
 - c. uszkodzenia urządzeń przejazdowych, ograniczona widoczność w punktach styku pomiędzy transportem kolejowym i drogowym,
 - d. usterki sieci trakcyjnej, brak zasilania na sieciach zelektryfikowanych,
2. defekty pojazdów w trakcie realizacji procesu przewozowego,
3. czynniki atmosferyczne i środowiskowe takie jak wyboczenie szyn z powodu wysokich temperatur, intensywne opady deszczu, mgła, oszronienie, przebieg linii kolejowej przez tereny leśne, niezurbanizowane,
4. czynnik ludzki wewnątrz systemu transportu kolejowego, w tym brak obsługi urządzeń przejazdowych,
5. czynnik ludzki spoza systemu transportu kolejowego tj. celowa, lekkomyślna, chuligańska ingerencja w funkcjonowanie systemu.

Zgodnie z rozporządzeniem (UE) 2018/762 [67] system zarządzania bezpieczeństwem kolejowym przewoźników musi składać się z opisu procesów, które zapewnią zgłaszanie, rejestrowanie, badanie oraz analizowane zdarzeń kolejowych, nie pomijając przy tym innych niebezpiecznych sytuacji, które mogą mieć wyraźny wpływ na bezpieczeństwo. Mając na uwadze europejskie ramy prawne, jako cel prowadzonego postępowania w sprawie zdarzeń kolejowych wskazuje się wprowadzenie działań doskonalących umożliwiających kontrolę poziomu ryzyka zagrożeń zarejestrowanych przez przedsiębiorstwo lub identyfikację nowych. Przedsiębiorstwu nie wskazuje się konkretnego toku postępowania w tym zakresie, pozostawiając dowolność w spełnieniu kryteriów rozporządzenia. Z kolei polskie rozporządzenie dedykowane obszarowi zdarzeń kolejowych [82] wskazuje obligatoryjne wytyczne w zakresie postępowania prowadzonego po zaistnieniu zdarzenia na polskiej sieci

kolejowej przez powoływane do tego celu komisje kolejowe, przy czym należy zwrócić uwagę, że badaniem wybranych zdarzeń kolejowych, w szczególności poważnych wypadków, może zajmować się również Państwowa Komisja Badania Wypadków Kolejowych (PKBWK), o czym więcej informacji znajduje się w [25]. Wynikiem prowadzonego postępowania przez komisje kolejowe jest protokół ustaleń końcowych, który wskazuje między innymi opis i okoliczności zdarzenia, kluczowe informacje w zakresie pojazdu kolejowego, infrastruktury czy pracowników, przyczyny zdarzenia, w tym kwalifikację do odpowiedniej kategorii, jak również zalecenia, które stanowią wytyczne do wprowadzenia działania doskonalących. Niemniej spełnienie wymagań prawnych wynikających z polskich aktów prawnych nie powinno być utożsamiane z podjęciem wystarczających działań związanych z badaniem i analizą wydarzeń kolejowych. W [46] wskazano, że protokoły ustaleń końcowych często nie zawierają kluczowych informacji z punktu widzenia analizy czynników ludzkich i organizacyjnych. Ponadto Prezes UTK zwraca również uwagę na konieczność analizowania szerszych danych w przedmiotowym zakresie [90, 92], a w przewodniku ERA [93] zachęca się przedsiębiorstwa kolejowe do wykorzystania standardów analizy wskazanych w [81]. Rozporządzenie [81] wskazuje strukturę sprawozdania ze zdarzeń kolejowych uwzględniając analizę różnych czynników przyczyniających się do zaistnienia zdarzeń, w tym czynnika ludzkiego czy mechanizmu przepływu informacji. Z tego względu poszukiwanie nowych metod i narzędzi do analizy wydarzeń kolejowych leży w gestii przedsiębiorstw kolejowych. Dodatkowo, jak już wcześniej wspomniano, polskie rozporządzenie kwalifikuje jedynie enumeratywnie wymienione kategorie zdarzeń kolejowych, ale proaktywne podejście w analizie powinno też być widoczne dla sytuacji potencjalnie niebezpiecznych czy innych wydarzeń wskazanych na Rysunku 4, a do których zaliczono np. większość zarejestrowanych na sieci kolejowej potrąceń zwierzyny przez pociągi.

Wewnętrzne badanie i analiza wydarzeń kolejowych są elementem kluczowym w aspekcie promowania kultury bezpieczeństwa. Z jednej strony istotna jest analiza pracy człowieka i podejmowanych przez niego działań przyczyniających się do występowania sytuacji niepożądanych, a następnie wprowadzanie indywidualnych lub systemowych działań doskonalących, co zostało przedstawione w podrozdziale 1.4. Drugim ważnym aspektem jest budowanie świadomości pracowników o zagrożeniach, których zaistnienie wynika z czynników poza systemem kolejowym, nie mieszczących się w zakresie bezpośredniej odpowiedzialności podmiotu kolejowego. W nawiązaniu do tego analiza powinna poszukiwać i grupować wydarzenia o zbieżnej charakterystyce. Przygotowywanie pracowników

na możliwość wystąpienia konkretnych sytuacji, w ustalonych lokalizacjach, przedziałach czasowych czy warunkach atmosferycznych, stanowi również formę doskonalenia kultury bezpieczeństwa kolejowego wewnątrz organizacji.

3. Metody oceny bezpieczeństwa i predykcji wydarzeń kolejowych powiązanych z transportem kolejowym

3.1. Przegląd metod oceny bezpieczeństwa kolejowego

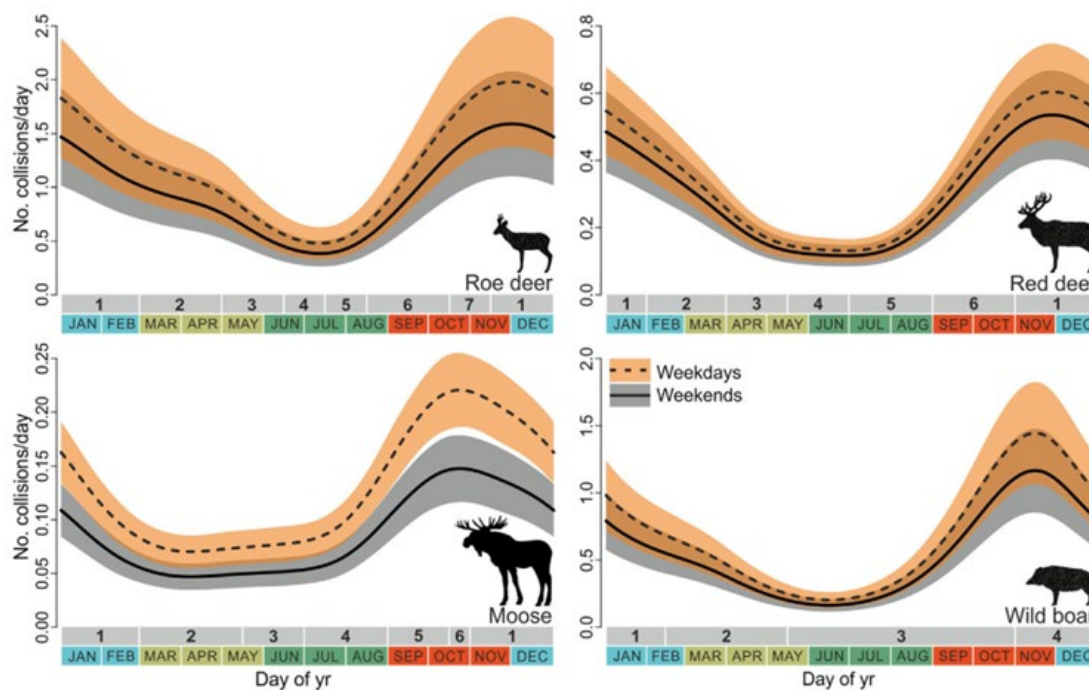
Ocenę stanu bezpieczeństwa na sieci kolejowej można przeprowadzić na podstawie danych gromadzonych przez podmioty rynku kolejowego. Informacje w zakresie wszystkich wydarzeń kolejowych rejestrowane są przez przewoźników kolejowych i zarządców infrastruktury. Na stopniu centralnym gromadzone są dane w zakresie zdarzeń kolejowych oraz w razie potrzeby innych wskazanych wydarzeń mających znaczący wpływ na bezpieczeństwo realizowanych przewozów. W przypadku państw należących do wspólnoty europejskiej są to krajowa władza bezpieczeństwa (NSA, ang. National Safety Authority) oraz krajowy organ dochodzeniowy (NIB, National Investigation Body), w Polsce odpowiednio Prezes UTK oraz PKBWK. Dane pozyskane z całego rynku kolejowego są przekazywane do Agencji Kolejowej Unii Europejskiej, która określa spójne wskaźniki oraz cele w zakresie bezpieczeństwa dla całej wspólnoty europejskiej [25, 94].

Prezes UTK oraz PKBWK sporządzają roczne raporty dotyczące stanu bezpieczeństwa. Wskazują one przede wszystkim częstość i tendencje w zakresie występowania poszczególnych kategorii zdarzeń kolejowych, analizę przyczyn i skutków, zalecenia dla podmiotów rynku kolejowego. Ponadto w raportach Prezesa UTK wskazywane są wskaźniki wypadkowości odnoszące się między innymi do zdarzeń kolejowych na przejazdach kolejowych poszczególnych kategorii, śmiertelności wypadków [95, 96]. Dodatkowo Prezes UTK na dedykowanym portalu internetowym udostępnia wybrane bieżące statystyki w zakresie zdarzeń kolejowych [91]. Raporty organów nadzorujących bezpieczeństwo w innych państwach należących do wspólnoty UE można znaleźć w bazie danych interoperacyjności i bezpieczeństwa Agencji Kolejowej Unii Europejskiej (ERADIS, ang. European Railway Agency Database of Interoperability and Safety) [97]. W krajach spoza UE w tym Wielkiej Brytanii [98], Australii [99] i Kanadzie [100] również powszechnie sporządzane są okresowe raporty. Publikacje naukowe także analizują trendy w zakresie wydarzeń kolejowych oraz współczynników bezpieczeństwa. Przykładem takim są między innymi analizy przeprowadzone dla regionu południowowschodniej Azji [101], Chin i Japonii [102], Stanów Zjednoczonych [103], ale również badania prowadzone w skali globalnej [104].

Analiza raportów organizacji rządowych wskazała, że na stopniu centralnym nie są analizowane sytuacje związane z potrąceniami zwierzyny. Niemniej problem kolizji

pociągów ze zwierzyną dotyczy przewozów kolejowych realizowanych na całym świecie i zgodnie z [105-107] nie jest on tak szeroko rozpoznany i analizowany jak kolizje pojazdów drogowych ze zwierzyną. Wzorce przestrzenne i czasowe potrąceń zwierzyny przez pojazdy kolejowe są badane w publikacjach naukowych w różnych regionach globu charakteryzujących się odmiennym klimatem i gatunkami występującej zwierzyny. W publikacjach [108, 109] autorzy poruszają kwestię śmiertelności słoń i krokodyli na obszarze wybranych państw azjatyckich. W przypadku Ameryki Północnej w [106, 110] przedstawiono analizy korelacji przestrzennej i czasowej potrąceń zwierzyny zarejestrowanych na terenie parków narodowych oraz miejskich rezerwatów przyrody. Przy czym w [110] rozważano także kwestię powiązania kolizji z prędkością pociągów oraz krzywizną toru. W artykule [111] została poruszona śmiertelność ssaków na linii kolejowej o długości 750 km, przebiegającej przez brazylijską sawannę. W Europie temat analizy przestrzennej i czasowej potrąceń zwierzyny jest również przedstawiany. Analiza kolizji pociągów w Portugalii w aspekcie wybranych obiektów inżynierskich przebiegających przez naturalne siedliska zwierząt została zaprezentowana w pracy [112]. Z kolei powiązanie punktów o największej liczbie potrąceń ze specyfiką zachowań konkretnego gatunku żółwi na linii kolejowej w południowo-wschodniej Rumunii przedstawiono w [113]. W aspekcie tematyki rozprawy doktorskiej istotne są prace, które analizują potrącenia gatunków, które również rejestrowane są przez polskich przewoźników. Podejście wzorców przestrzennych zostało zastosowane do analizy potrąceń pociągów z łosiami w Norwegii [114]. Ponadto w pracach [115-117] dotyczących odpowiednio Szwecji, Rumuni i Węgier badano potrącenia właściwych miejscowo zwierząt kopytnych, do których zaliczono między innymi jelenie, daniela, sarny czy dziki. Analizę „czarnych punktów” tzw. hot-spotów określonych przez 100 m odcinki linii kolejowych, na których zaistniały kolizje pociągów z dziką zwierzyną, przeprowadzono w Czechach. Dane z 9 lat wskazały, że ponad 50% hot-spotów, to lokalizacje, w których doszło jedynie do 2 kolizji w badanym okresie [118].

W Polsce jedna z analiz kolizji pociągów z dzikimi zwierzętami została przeprowadzona na podstawie danych udostępnionych przez narodowego zarządcę infrastruktury PKP PLK S.A. W publikacji na podstawie analizy danych obejmujących lata 2012-2015, w których zarejestrowano ponad 3,5 tys. kolizji, przedstawiono rozkład przestrzenny i czasowy (dzienny i roczny) kolizji oraz porównano go z wzorcem cyklu życia poszczególnych gatunków zwierzyny, do którego zaliczono między innymi okres migracji i opieki nad potomstwem (Rysunek 5). Do analizy danych wykorzystano uogólnione modele addytywne mieszane (GAMM, ang. Generalized Additive Mixed Models) [119].



Rysunek 5 Średnia liczba kolizji z sarnami, jeleniami, łosiami i dzikami przypadająca na dzień (z rozróżnieniem na dni robocze i weekend) wyznaczona modelem GAMM. Liczby na dole każdego podwykresu odnoszą się do cyklu życia gatunku [119]

Z kolei w artykule [120] z wykorzystaniem otwartego systemu informacji geograficznej (GIS, ang. Geographic Information System) wykonano analizy przestrzenne dla wybranych linii kolejowych położonych w województwie wielkopolskim. Analizowane dane pochodziły z lat 2007-2017. Potrącenia zwierząt takich jak dziki, sarny czy jelenie były badane w aspekcie przestrzeni, w których zostały zarejestrowane różniąc tym samym tereny leśne, wodne, zabudowane i grunty rolne. Jeden z wniosków wskazywał różnice w zachowaniu zwierzyny na wyszczególnionych wcześniej terenach. Ponadto w publikacji [121] przeprowadzono przestrzenną analizę kolizji pojazdów drogowych i pociągów z żubrami, pomimo, że częstość tych zdarzeń nie jest duża w porównaniu z potrąceniami z inną dziką zwierzyną, to lokalnie jest istotną przyczyną śmierci tych zwierząt, która w roku 2020 przekroczyła naturalny współczynnik śmiertelności.

Głównym celem powyżej przedstawionych publikacji związanych z potrąceniem zwierzyny było wskazanie „czarnych punktów”, w których dochodzi do największej liczby wydarzeń, co jest istotnym krokiem w możliwości wprowadzania działań mających na celu łagodzenie skutków takich kolizji, których przykłady zaproponowano w [122]. Należy zaznaczyć, że opisywane kolizje mają istotny wpływ nie tylko na środowisko naturalne, ale również na transport kolejowy. Z jednej strony jest to zadowolenie pasażerów bezpośrednio związane

z jakością otrzymanej usługi, a co z tym związane konkurencyjnością wśród innych środków transportu [123-125]. Z drugiej strony kosztami po stronie podmiotów rynku kolejowego związanymi z uszkodzeniami pojazdów kolejowych, a często nawet koniecznością ich tymczasowego wyłączenia z ruchu na czas naprawy czy nawarstwiającymi się opóźnieniami w przypadku chociażby chwilowej konieczności zatrzymania pociągu biorącego udział w wydarzeniu [107, 126, 127].

3.2. Przegląd metod predykcji wydarzeń kolejowych

Przewidywanie wydarzeń kolejowych polega na określeniu prawdopodobieństwa samego ich wystąpienia lub ich liczby w określonym miejscu w przyszłości. Modele, które nie szacują liczby wypadków, a jedynie przewidują, czy wypadki się zdarzą, nazywane są modelami przewidywania ryzyka [128].

W publikacji [129] przedstawiono predykcję liczby zdarzeń kolejowych w odniesieniu do ogólnej liczby sytuacji nadzwyczajnych na sieci kolejowej chorwackiego zarządcy infrastruktury. Początkowa analiza opierała się o metody statystyki opisowej (średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe), a następnie oceniony został stopień korelacji. Uzyskanie statystycznie silnego związku między całkowitą liczbą wypadków oraz poważnych wypadków a całkowitą liczbą sytuacji nadzwyczajnych pozwoliło na wykorzystanie prawa Heinricha celem określenia przewidywanej całkowitej liczby wypadków i poważnych wypadków na sieci do 2027 r. Do analizy danych pochodzących z Chin wykorzystano bardziej skomplikowane metody wykorzystujące sieci neuronowe oraz wnioskowanie bayesowskie [130, 131]. W publikacji [132] w oparciu o wnioskowanie bayesowskie, drzewo decyzyjne i sieci Petriego przeprowadzono analizę porównawczą przewidywanego ryzyka wystąpienia zdarzeń na sieciach kolejowych państw z różnych regionów świata. Estymacja samej możliwości zaistnienia zdarzeń kolejowych jest istotna z punktu widzenia wprowadzania rozwiązań na poziomie systemowym, ale nie podejmuje problemów lokalnych, które są kluczowe dla konkretnych przedsiębiorstw kolejowych.

Analizy uwzględniające przewidywanie miejsca wystąpienia zdarzenia są przeprowadzane dla wypadków na przejazdach kolejowo-drogowych. Jest to powiązane z możliwością zebrania danych i analizy konkretnego punktu na sieci kolejowej wraz z najbliższym otoczeniem, a nie jak w przypadku innych typów zdarzeń np. wykolejeń czy pożarów w całkowicie odmiennych lokalizacjach, dla których utrudnione jest wskazanie wspólnych parametrów do analizy.

Departament Transportu Stanów Zjednoczonych podejmuje już od lat 80. XX wieku proaktywne działania w zakresie zdarzeń kolejowych na przejazdach kolejowo-drogowych. W tym okresie powstał pierwszy model predykcji zdarzeń na przejazdach kolejowo-drogowych, który ulegał stopniowemu doskonaleniu. W 2020 r. zatwierdzono obecny model wykorzystujący koncepcję Bayesa, a w tym między innymi zmienne powiązane z ruchem pociągów (gęstością i prędkością), pojazdów drogowych, typem nawierzchni drogowej, lokalizacją przejazdu na terenie zurbanizowanym lub wiejskim [133]. Przedmiotowe podejście, którego rozwój związany jest z metodami próbkowania oraz generowania łańcuchów Markowa zaliczanych do technik numerycznych, jest uważane za trudniejsze koncepcyjnie oraz bardziej wymagające obliczeniowo niż metody statystyki klasycznej. Wnioskowanie Bayesa uwzględnia dane historyczne nazywane danymi uczącymi, które pozwalają na poznanie badanego zjawiska i budowanie założeń do modelu, w tym z wykorzystaniem podejścia klasycznego, jak również nowe dane, które mogą wzmacniać lub osłabiać daną predykcję [134]. Ponadto Departament Transportu Stanów Zjednoczonych na podstawie opisanego modelu utworzył narzędzie, które umożliwi każdemu użytkownikowi weryfikację prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia na wybranym przejeździe kolejowo-drogowym [135]. Takie podejście ma kształtować świadomość w zakresie niebezpieczeństwa w obszarze kolejowym lokalnych użytkowników i tym samym promować kulturę bezpieczeństwa kolejowego.

Modele predykcji zdarzeń w obrębie przejazdów kolejowo-drogowych zostały również utworzone na podstawie danych pochodzących z Francji. W prowadzonych symulacjach zastosowano różne metody i ich łączenia celem uzyskania wyników najbardziej zbliżonych do rzeczywistości. Do oszacowania współczynników zmiennych w modelach prognostycznych zastosowano liniowe i nieliniowe metody najmniejszych kwadratów. W artykułach [136, 137] przeprowadzono szczegółową analizę statystyczną jakości modeli oraz porównano ich dokładność predykcyjną w połączeniu z rozkładem Poissona i rozkładem Pascala. Ponadto szczegółowo omówiono udział różnych parametrów mogących wpływać na występowanie wypadków na przejazdach kolejowo-drogowych.

Inny model dotyczący zdarzeń na przejazdach kolejowo-drogowych został zaproponowany na podstawie analizy zdarzeń zaistniałych w Korei Południowej w latach 1998-2002. Model bazujący na rozkładzie gamma, ze względu na wytypowanie 56 zmiennych objaśniających dotyczących między innymi informacji o usytuowaniu znaków ostrzegawczych, szerokości drogi dojazdowej, widoczności czy obecności systemów ostrzegających i czasu ich pracy przed nadjeżdżającym pociągiem, które były gromadzone przez oględziny obszaru przejazdów

kolejowo-drogowych, obejmuje jedynie 10% skrzyżowań zlokalizowanych na terenie badanego obszaru [138].

Informacje w zakresie innych funkcjonujących metod predykcji zdarzeń na przejazdach kolejowo-drogowych zostały zaprezentowane w [138-140]. Podczas studiowania danych literaturowych do niniejszej pracy zidentyfikowano również nieliczne publikacje dotyczące predykcji innych wydarzeń kolejowych tj. kradzieży ładunków pociągów towarowych w Polsce [141], wykolejeń pociągów w ustalonych segmentach linii kolejowych [142] czy zdarzeń z towarami niebezpiecznymi [143], dwa ostatnie wskazane modele dotyczyły państw Ameryki Północnej.

Modele predykcyjne w zakresie kolizji pociągów ze zwierzyną nie są tak powszechne, pomimo wysokiej liczby zarejestrowanych przypadków tego typu wydarzeń. Model estymacji potrażeń z kangurami, uwzględniający 404 sytuacje, został opracowany w Australii. Uwzględnia on naturalne zachowanie zwierzyny, liczbę pociągów oraz ich prędkość w korelacji do konkretnej pory dnia, miesiąca. Estymacja jest wykonywana dla siatki podzielonej na komórki o powierzchni 1 km². Analiza ilościowego ryzyka wykonana klasycznymi metodami uogólnionego modelu liniowego została przeprowadzona z wykorzystaniem oprogramowania R Project (wersja 3.4.1). Wnioski wskazują, że prędkość pociągów jest istotnym predyktorem ryzyka kolizji, wraz ze wzrostem prędkości ryzyko kolizji znacząco wzrastało, aż do typowej prędkości maksymalnej 160 km/h [144]. Podobne podejście zastosowano w przypadku estymacji kolizji pociągów ze słoniami, gdzie wykorzystano siatkę kwadratów o powierzchni 10 km². W modelu geograficznie ważonej regresji wykorzystano obliczone dla każdej z komórek zagęszczenie słońi oraz ruchu kolejowego (uwzględniając przedziały czasowe). Analizowane w tym przypadku dane z Indii obejmowały okres 29 lat [145].

Mając na uwadze powyżej przedstawiony przegląd literatury należy stwierdzić, że tematyka zdarzeń kolejowych na przejazdach kolejowo-drogowych jest najczęściej obejmowaną w modelach predykcyjnych dotyczących bezpieczeństwa na sieci kolejowej. Obszar potrażeń zwierzyny, który jest również istotny dla transportu kolejowego, a który np. ze względu na wykorzystywanie nowoczesnych pojazdów kolejowych emitujących mniejszy poziom hałasu może wzrastać [146], nie jest wystarczająco analizowany. Ponadto należy zwrócić uwagę na bardzo ograniczoną implementację modeli predykcyjnych przez podmioty rynku kolejowego, a aspekt ten jest kluczowy dla rzeczywistego podniesienia poziomu bezpieczeństwa kolejowego. Podmioty rynku kolejowego powinny dysponować modelem na dopasowanym poziomie złożoności, który przede wszystkim uwzględnia wykorzystanie

danych samodzielnie przez nie gromadzonych. Modele predykcyjne opierające się na danych z zakresu nauk przyrodniczych (np. migracji zwierzyny, indywidualnej charakterystyki gatunków zwierząt) wymagają zaangażowania podmiotów zewnętrznych, co może niekorzystanie wpływać na aktualność danych.

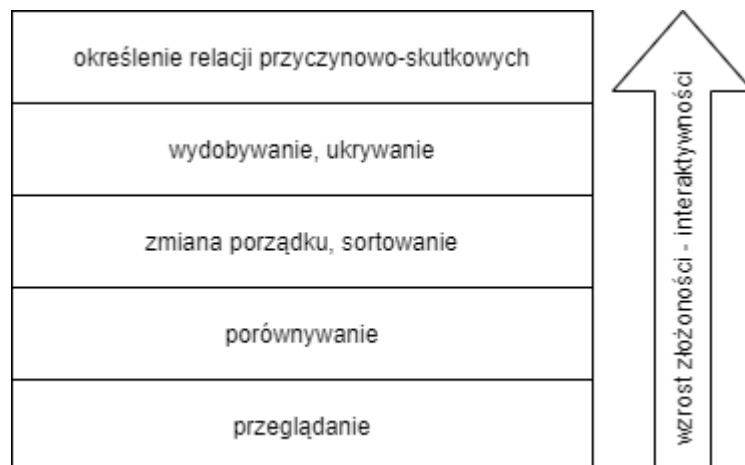
4. Przegląd map powiązanych z bezpieczeństwem transportu kolejowego

4.1. Interaktywność map elektronicznych

Mapa pozwala badaczowi na zwizualizowanie zebranych danych w konkretnej przestrzeni, dzięki temu daje możliwość wskazania obszarów, w których znajdują się istotne skupiska badanych obiektów, jak również rozpoznania miejsc, w których one nie występują, lub w których stopień ich rozproszenia odbiega od przyjętego bądź przewidywanego wzorca [147]. Kwestia ta dotyczy również wcześniej omówionych analiz przestrzennych wydarzeń kolejowych.

Definicja mapy w ostatnich stuleciach rozwijała się, a jej kształtowanie jest związane przede wszystkim ze stopniowym zwiększaniem zakresu treści znajdujących się na mapach – począwszy od zjawisk fizycznych, poprzez botaniczne, zoologiczne, geologiczne, etnograficzne aż po mapy prezentujące zagadnienia gospodarcze oraz różnego rodzaju dane statystyczne [148]. Nawiązując do powyższej przedstawionego zakresu prezentowanych danych mapy można podzielić na ogólnogeograficzne oraz tematyczne, których celem jest przedstawienie *„obiektów i zjawisk oraz procesów fizycznych i abstrakcyjnych, związanych z wybranymi elementami środowiska geograficznego, występującymi na, nad i pod powierzchnią Ziemi”*. Przedmiotowe mapy pozostawiając w tle główne elementy krajobrazu tworzą z nich podkład do zaprezentowania treści zasadniczej [149, 150].

Format i sposób przedstawiania danych na mapach może mieć charakter statycznego odwzorowania rzeczywistości umożliwiający wyłącznie przeglądanie lub bardziej interaktywny, pozwalający użytkownikowi na dodatkowe przetwarzanie danych przy pomocy dedykowanych narzędzi. Interaktywność w tym przypadku nawiązuje do relacji pomiędzy użytkownikiem a mapą tzn. możliwością oddziaływania odbiorcy na zakres i formę informacji prezentowanych na mapie [151]. Na Rysunku 6 zaprezentowano pięciostopniową skalę zadań utworzoną przez J.W. Cramptona, która stanowi wsparcie do określania poziomu interaktywności map. W publikacji [152] autor wyraźnie zaznacza, że wysoki poziom geowizualizacji, przez który rozumiana jest interaktywność map, nie wynika tylko z rodzajów czynności, które można w ramach niej wykonać, ale z ich połączenia pozwalającego użytkownikowi na prowadzenie bardziej sprecyzowanych oraz złożonych analiz.



Rysunek 6 Wzrost złożoności zadań w ramach interaktywności mapy [152]

W Tabeli 2 przedstawiono podział interaktywności map, który bazuje na powyższych założeniach J.W. Cramptona. Przedmiotowa kwalifikacja wskazuje, że interaktywność na poziomie niskim charakteryzuje się jedynie możliwością przekształcenia graficznej prezentacji danych np. poprzez zmianę koloru, oświetlenia, kształtu czy wielkości symboli graficznych. Z kolei typ 2 interaktywności zakłada m.in. tworzenie przez użytkownika algorytmów pozwalających na wyświetlenie tylko interesujących obiektów czy podejmowania działań w zakresie generalizacji kartograficznej. Najbardziej zaawansowany poziom interaktywności tj. typ 3 określany jest przez możliwości tworzenia zapytań do bazy danych za pomocą strukturalnego języka zapytań (SQL, ang. Structured Query Language). Takie podejście stwarza dużą dowolność analiz przez odbiorcę i tym samym poszerza możliwości przeszukiwania danych i poszukiwania nieznanymi dotąd prawidłowości. Do dalszej analizy poziomów interaktywności map można wykorzystać [153].

Tabela 2 Typy interaktywności map [151]

Typ interaktywności	Poziom interaktywności	Opis interaktywności
1	niski	interakcja z formą prezentacji
2	średni	interakcja z metodą prezentacji
3	wysoki	interakcja z danymi – zapytania do baz danych

Opisywana interaktywność jest nieodłącznie związana z wykorzystaniem technologii cyfrowych, które, jak już powyżej wspomniano, pozwalają na łączenie obrazu z bazami danych, a następnie przy pomocy narzędzi informatycznych umożliwiają użytkownikowi dobrane

odpowiedniego zakresu treści informacji, jak również formy ich prezentacji. Z punktu widzenia wykorzystania map elektronicznych istotne jest zapewnienie odpowiedniego graficznego interfejsu użytkownika (GUI, ang. Graphical User Interface). Głównym celem jest udostępnienie odbiorcy narzędzi, które w sposób kompleksowy i zrozumiały pozwolą mu na komunikację z systemem. Z tego względu narzędzia tworzone w ramach interfejsu powinny mieć jasno określone zasady działania i być intuicyjne. Ponadto tworząc mapę elektroniczną należy kierować się poniższymi wskazówkami w zakresie tworzenia GUI:

- a. poznanie użytkownika oraz dostosowanie do posiadanych kompetencji, oczekiwań,
- b. zminimalizowanie krótkotrwałego obciążenia pamięci użytkowników,
- c. zachowanie prostoty i spójności,
- d. postępowanie zgodnie ze standardami prezentacji danych,
- e. wyraźne określenie aktualnego stanu systemu,
- f. zapewnienie użytkownikowi poczucia kontroli [151, 154].

Istotnym elementem jest przedstawienie funkcji map interaktywnych. W [151] dokonano porównania różnych systemów klasyfikacji, jednak na potrzeby niniejszej pracy zdecydowano się na zaprezentowanie jednego, który jest najbardziej kompletnym zestawieniem (Tabela 3).

Tabela 3 Podgrupy, grupy i funkcje interaktywne [151, 154]

Grupy funkcji	Podgrupy funkcji	Funkcje interaktywne
Funkcje ogólne	-	wybór trybu, wybór języka, importowanie danych, eksportowanie danych, drukowanie, umieszczanie zakładki, etykiety, naprzód/wstecz, ustawienia, wskazówki narzędziowe, pokaz stanu systemu, pomoc, informacje wydawnicze, strona główna, wyjście
Funkcje nawigacyjne	Nawigacja przestrzenna	wybór obiektów przestrzennych, zbliżenie/oddalenie mapy, przesuwanie mapy, mapa/globus odniesienia, obracanie mapy, współrzędna, wysokość położenia, kierunek spojrzenia, położenie i zasięg widzenia, położenie punktów identyfikacyjnych, indeks obiektów geograficznych, wyszukiwanie obiektów (po nazwie), śledzenie pozycji
	Nawigacja tematyczna	wybór i zmiana treści tematycznie, indeks tematów, wyszukiwarka tematów, ulubiony temat (najczęściej wybierany)
	Nawigacja czasowa	wybór czasu (okresu lub punktu na osi czasu), animacja (rozpoczęcie/zatrzymanie itp.)
Funkcje dydaktyczne	Funkcje objaśniające	prowadzenie tras, podgląd, teksty objaśniające, ilustracje, dźwięki, filmy
	Funkcje edukacyjne	quize, gry

Grupy funkcji	Podgrupy funkcji	Funkcje interaktywne
Funkcje kartograficzne i wizualizacyjne	Zmiany na mapie	włączanie/wyłączanie warstw, włączanie/wyłączanie składników legendy, modyfikacja symboli, zmiana projekcji/rzutowania (np. z mapy na globus)
	Wyróżnianie	dodawanie własnych elementów na mapę, dodawanie etykiet/opisów
	Eksploatacja danych	modyfikacja klas, modyfikacja wyglądu/formy graficznej (np. rozjaśnianie, zmiana kierunku oświetlenia), porównywanie map, wybór danych
Funkcje GIS	Funkcje zapytań przestrzennych i obiektowych	zapytania o lokalizację (współrzędne i wysokość położenia), pomiar odległości i powierzchni, generowanie profili terenu
	Funkcje zapytań tematycznych	zapytania tematyczne/o cechy, dostęp do tabeli z danymi statystycznymi
	Funkcje analityczne	generowanie stref, przycinanie obiektów (określanie części wspólnych), łączenie obiektów, analizy dotyczące ukształtowania terenu (nachylenie, ekspozycja stoków itp.)

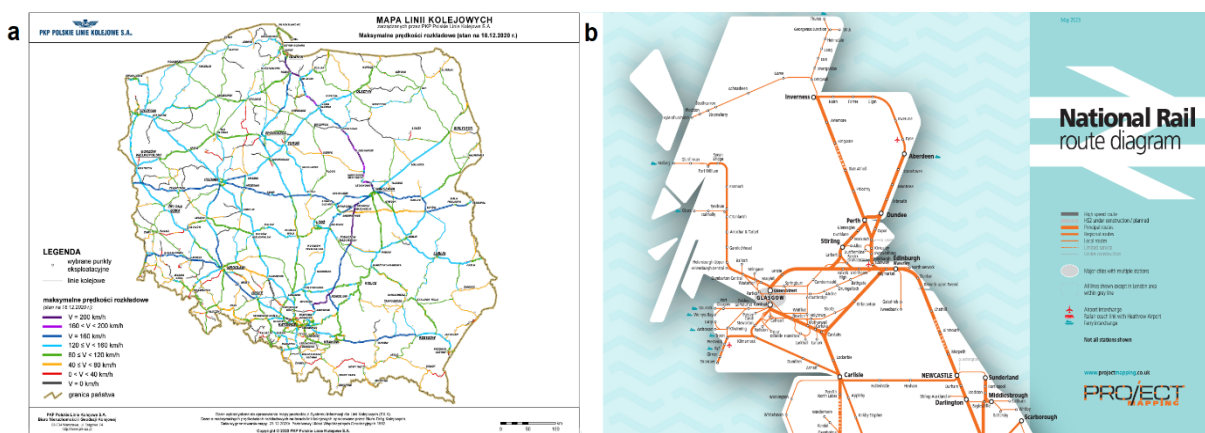
Współczesny rozwój dyscypliny geoinformatyki, a w tym geowizualizacji i geoinformacji, wykorzystującej Internet jako medium transferu danych pozwala na ciągły rozwój map elektronicznych, do których zaliczono przede wszystkim geoprzeglądarki, geoportale, jak również oparte na współtworzeniu przez różnych użytkowników systemy informacji geograficznej, które rozumiane są jako platforma do gromadzenia, zarządzania i analizowania danych [155].

4.2. Przegląd map elektronicznych powiązanych z transportem kolejowym

Mapy powiązane z transportem kolejowym mogą mieć różny charakter interaktywności, który powiązany jest z formą prezentacji i możliwościami wykonywanych operacji przez użytkownika. Mając na uwadze informacje zawarte w Tabeli 2 oraz Tabeli 3 poniżej zaprezentowane zostaną elektroniczne mapy kolejowe, które charakteryzują się różnym poziomem złożoności. W zestawieniu przedstawione zostaną ogólnodostępne mapy, ze szczególnym zwróceniem uwagi na mapy udostępniane przez podmioty rynku kolejowego.

Analizując mapy elektroniczne należy rozpocząć od najprostszych map, z których można korzystać w trybie online tj. ze stałym dostępem do sieci Internet lub po uprzednim pobraniu w trybie offline tj. bez stałego dostępu do sieci internetowej, a których funkcjonalność pozwala na przeglądanie mapy jedynie z możliwością przybliżania oraz oddalania. Takim przykładem są udostępnione przez zarządcę infrastruktury PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. mapy przedstawiające infrastrukturę liniową oraz punktową, a także (poprzez zastosowanie

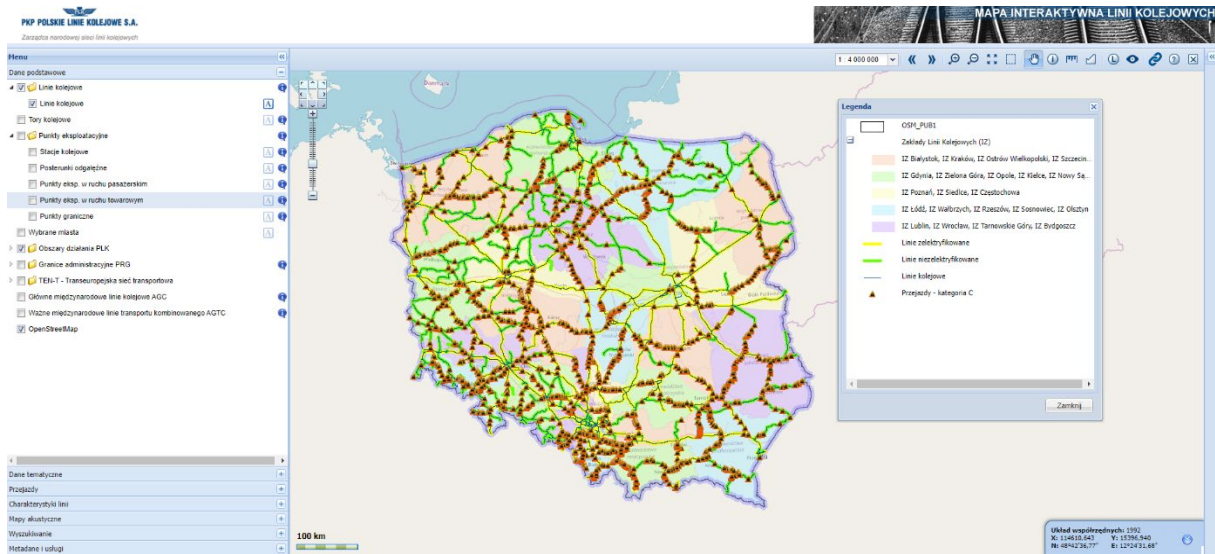
rozróżnienia kolorystycznego czy różnych symboli) dodatkowe elementy takie jak maksymalne prędkości rozkładowe (Rysunek 7a), ogólnodostępną infrastrukturę ładunkową, punkty eksploatacyjne czy elektryfikację linii kolejowych [156]. Podobnym przykładem są oferowane mapy innych zarządców infrastruktury oraz przewoźników kolejowych: Indian Railway (Indie) [157], SNCF Réseau (Francja) [158], Burlington Northern Santa Fe (Stany Zjednoczone) [159]. Na Rysunku 7b przedstawiono wycinek schematycznej sieci kolejowej National Rail (Wielka Brytania) [160]. Niemiecki zarządca infrastruktury kolejowej DB InfraGO wykorzystuje opisany rodzaj map do prezentacji priorytetyzacji tras kolejowych w przypadku poważnych zakłóceń na sieci kolejowej [161].



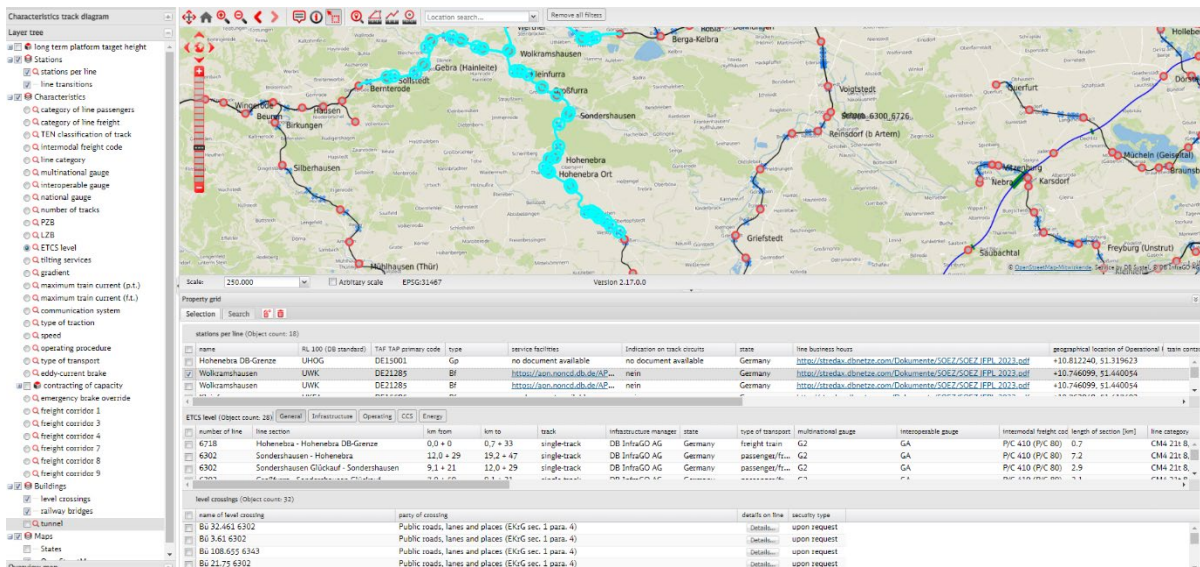
Rysunek 7 Mapa sieci kolejowej PKP PLK S.A. - maksymalne prędkości rozkładowe (a) [156], wycinek schematu sieci kolejowej w Wielkiej Brytanii (b) [160]

Mapami cechującymi się wyższym stopniem interaktywności są mapy, w których funkcje nawigacyjne oraz kartograficzne i wizualizacyjne są bardziej rozbudowane (Tabela 3), cechując się np. możliwością włączania i wyłączania warstw, składników legendy, filtrowania danych. Pozostając w dalszym ciągu przy prezentacji sieci transportowej przykładem takich map udostępnianych na oficjalnych stronach zarządców infrastruktury mogą być interaktywne mapy linii kolejowych PKP PLK S.A. (Polska) oraz DB InfraGo (Niemcy) prezentowane odpowiednio na Rysunku 8 i Rysunku 9. Mapy te charakteryzują się dużą złożonością posiadając tożsame, jak i wyróżniające się dla danej aplikacji funkcje. W kwestii wspólnego zastosowania mającego wpływ na dużą interaktywność map – jest to możliwość wyszukiwania i wyróżniania dowolnego punktu poprzez nazwę (np. w przypadku stacji i przystanków kolejowych), lokalizację (nr i km linii kolejowej) czy współrzędne geograficzne oraz przybliżanie i oddalanie wraz z uwzględnianiem odpowiedniego poziomu szczegółowości mapy. Mapa DB InfraGO posiada bardziej rozbudowaną funkcjonalność związaną z możliwością zaznaczania grupy obiektów, dla których wyświetlane są kluczowe informacje

identyfikacyjne (Rysunek 9), eksportowaniem grafiki z układem torowym poszczególnych punktów eksploatacyjnych czy przygotowaniem dowolnego układu mapy wraz z własnymi komentarzami i oznaczeniami do druku. Mapa polskiego zarządcy infrastruktury z kolei umożliwia pomiar odległości pomiędzy dwoma dowolnie wybranymi punktami i charakteryzuje się łatwiejszą dostępnością do legendy symboli zawartych na mapie, które w przypadku niemieckiej mapy wyświetlają się w pełni dopiero w momencie przygotowania mapy do wydruku [162, 163].



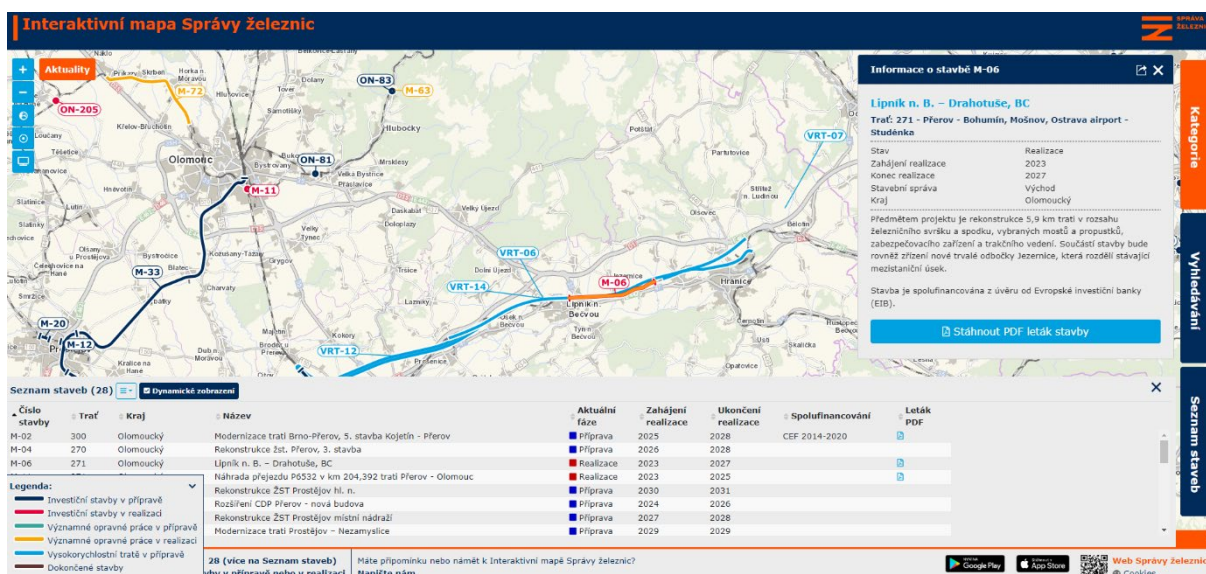
Rysunek 8 PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. - mapa interaktywna linii kolejowych [162]



Rysunek 9 DB InfraGo - mapa interaktywna linii kolejowych (po lewej stronie nazwy warstw możliwych do wyświetlenia, tabele pod mapą pokazują szczegóły elementów tj. przejazdów kolejowo-drogowych, punktów eksploatacyjnych, odcinków linii kolejowych wyróżnionych jasnoniebieskim kolorem na mapie) [163]

Oprócz opisanych map na rynku dostępne są też mniej skomplikowane rozwiązania, które pozwalają przede wszystkim na włączanie i wyłączanie poszczególnych warstw tematycznych. Takim przykładem jest mapa zarządcy infrastruktury Adif (Hiszpania) [164], natomiast Departament Transportu Stanów Zjednoczonych prezentuje sieć kolejową poszczególnych zarządców infrastruktury funkcjonujących nie tylko na terytorium kraju, ale również w sąsiednich państwach [165]. Występują również rozwiązania stricte komercyjne, jak mapa firmy oferującej usługi transportowe i logistyczne na terenie Ameryki Północnej, na której oprócz sieci kolejowej oznaczone są centra dystrybucji, elewatory zbożowe i inne punkty istotne w aspekcie przewozów towarowych [166].

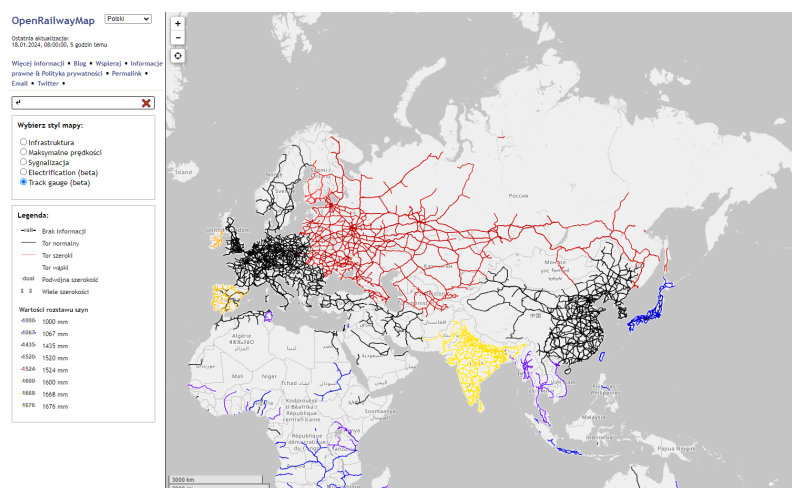
Innym typem są interaktywne mapy prezentujące inwestycje kolejowe. Celem przedmiotowych map jest przedstawienie realizowanych i planowanych inwestycji, często nie tylko związanych z kompleksową budową nowych czy modernizacją istniejących linii kolejowych, ale również pojedynczych obiektów takich jak wiadukty drogowe, przejścia podziemne czy przejazdy kolejowo-drogowe. W przypadku państw europejskich prezentowanie inwestycji na mapach kolejowych często jest związane z przedstawieniem informacji o zaangażowaniu funduszy europejskich czy krajowych w rozwój transportu kolejowego.



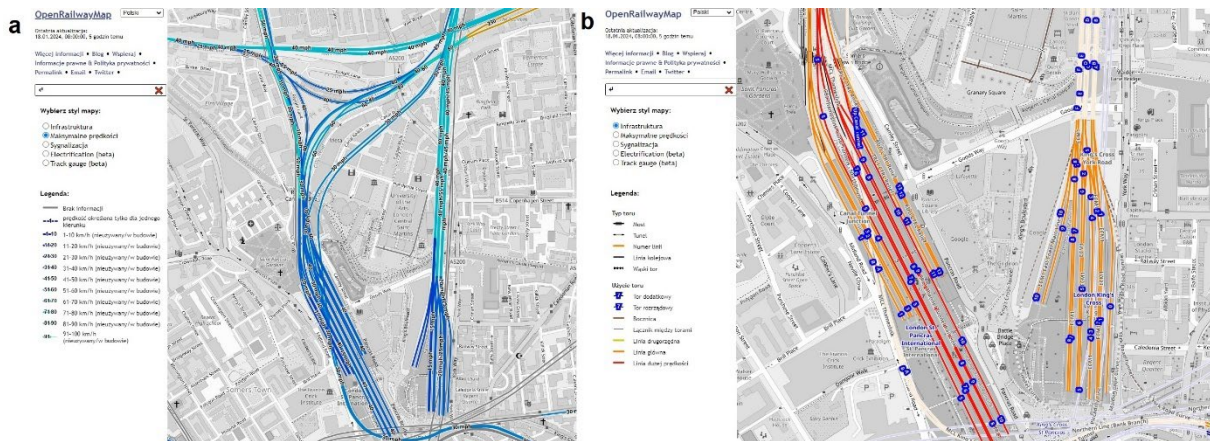
Rysunek 10 Správa železnic – interaktywna mapa inwestycji kolejowych (na mapie oznaczone są kolorem inwestycje oraz prace remontowe wraz z ich stanem realizacji, które wyjaśnione są w legendzie np. kolor czerwony projekt inwestycyjny w realizacji, w prawym górnym rogu znajduje się etykieta wybranej inwestycji wraz z informacjami o roku rozpoczęcia i zakończenia inwestycji, opisem oraz możliwością pobrania broszury, na dole w formie tabelarycznej podsumowanie wszystkich inwestycji [167])

Przykładem takiej aplikacji jest przedstawiona na Rysunku 10 mapa czeskiego zarządcy infrastruktury (Správa železnic), która prezentuje szczegółowe dane w zakresie prac na liniach kolejowych. Zarządca w menu aktualności przedstawia najnowsze informacje w zakresie prowadzonych prac, a w etykiecie każdej inwestycji opis, stan, planowane rozpoczęcie i zakończenie czy odnośnik umożliwiający pobranie broszury inwestycji. Ponadto użytkownik z wykorzystaniem tabeli pomocniczej może lokalizować na mapie wybrane inwestycje [167]. Innym przykładem interaktywnych map prezentujących inwestycje kolejowe są mapa PKP PLK S.A. [168] oraz mapa stanu Illinois (Stany Zjednoczone) przedstawiająca plany w zakresie zwiększenia bezpieczeństwa w obszarze przejazdów kolejowo-drogowych [169].

Oprócz przedstawionych powyżej map sieci kolejowych prezentowanych na oficjalnych stronach podmiotów kolejowych, w sieci internetowej dostępne są również mapy, które tworzone są przez otwarte i dobrowolne współuczestnictwo. Mapy te nie są tworzone w celach komercyjnych, a motywem ich tworzenia jest często zamiłowanie do kolejnictwa czy chęć dzielenia się posiadaną wiedzą na bazie otwartego dostępu dla użytkowników [170]. Przykładem takiej mapy jest OpenRailwayMap [171], która prezentuje dane obejmujące cały świat (wycinek mapy zaprezentowano na Rysunku 11). Aktywny udział użytkowników z wiedzą lokalną pozwala na uzyskanie bardzo szczegółowych oraz aktualnych danych dotyczących np. numerów torów, rozjazdów, prędkości na poszczególnych odcinkach, czego przykład przedstawiono na Rysunku 12 [170].

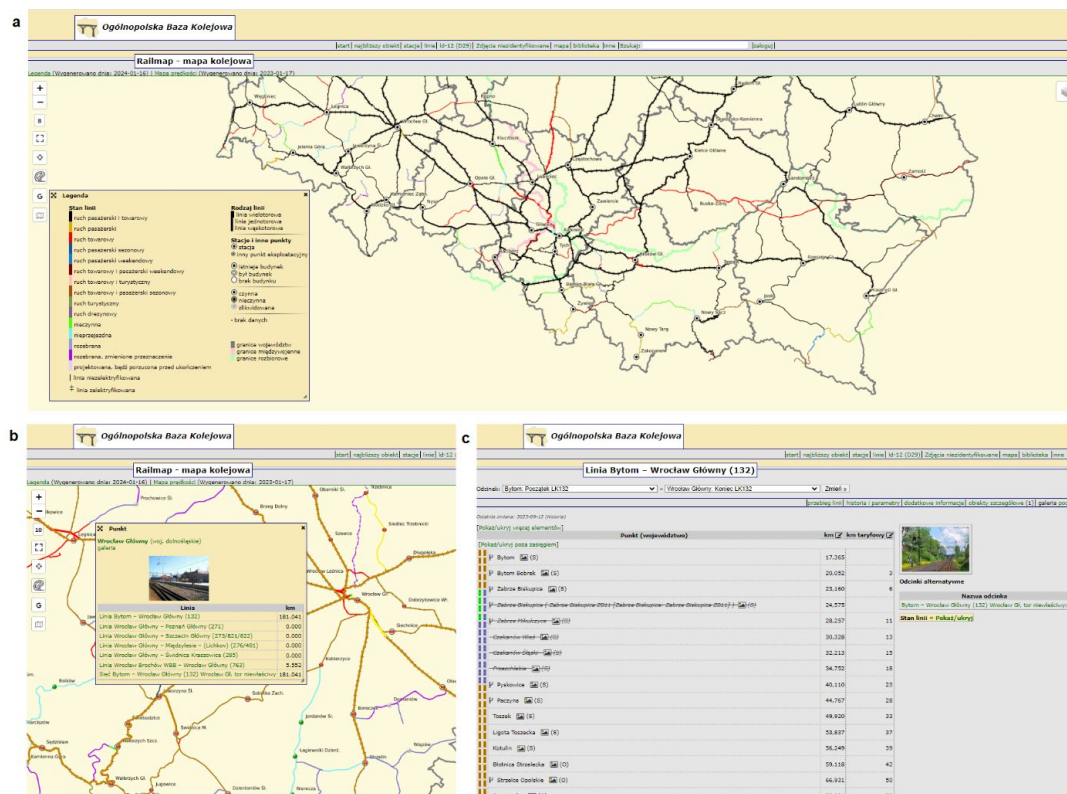


Rysunek 11 OpenRailwayMap prezentująca rozstaw torów (widok na Europę, Azję oraz północną i środkową Afrykę)[171]



Rysunek 12 OpenRailwayMap - wycinek na stację London St. Pancras International i London King's Cross. Maksymalne prędkości (a), infrastruktura (kategoria linii i numer toru) (b) [171]

Mapą o podobnym ogólnodostępnym charakterze, której złożoność wynika z zaangażowania szerszej społeczności jest mapa polskiej sieci kolejowej udostępniona na stronie [172], a zaprezentowana na Rysunku 13.

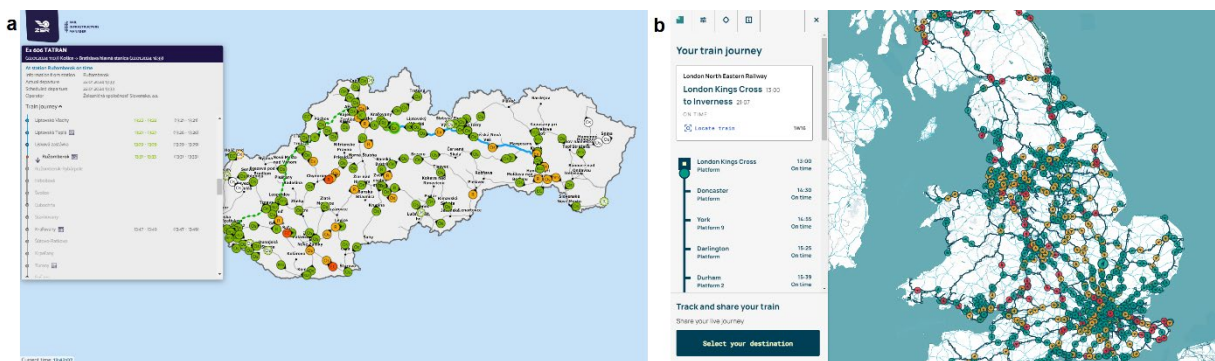


Rysunek 13 Ogólnopolska Baza Kolejowa – mapa z widokiem na południową Polskę (a), etykieta stacji Wrocław Główny (b), przekierowanie z odnośnika Linia Bytom – Wrocław Główny (132) (c) [172]

Przedmiotowa mapa oprócz możliwości prezentacji warstw związanych z maksymalną dozwoloną prędkością czy stanem i typem obsługiwanego ruchu (towarowy, pasażerski)

posiada połączenie z bazą danych, która pozwala na wyświetlanie etykiet z informacjami o poszczególnych punktach eksploatacyjnych, liniach kolejowych, jak również aktualnych i historycznych zdjęć wykonanych w wybranej przez użytkownika lokalizacji. Dodatkowo wyświetlane na mapie etykiety są połączone odnośnikami ze stronami, które prezentują szersze źródłowe informacje, cały czas pozostając w Ogólnopolskiej Bazie Kolejowej. Opisane powyżej funkcje mapy zostały przedstawione na Rysunku 13.

Z punktu widzenia podróżnych istotna jest możliwość bieżącego śledzenia lokalizacji pociągów oraz odchyłeń od rozkładu jazdy. Podmioty rynku kolejowego własnymi zasobami lub poprzez współpracę z przedsiębiorstwami zewnętrznymi mogą tworzyć dedykowane narzędzia w tym zakresie, czego przykładem są przedstawione na Rysunku 14 mapa słowackiego zarządcy infrastruktury Železnice Slovenskej Republiky [173] oraz sieci kolejowej w Wielkiej Brytanii [174]. W obu mapach wykorzystano rozróżnienie kolorystyczne w kontekście aktualnej punktualności pociągu w stosunku do rozkładu jazdy. Ponadto oba narzędzia pozwalają na otwarcie etykiety konkretnego pociągu z informacji o rozkładzie jazdy oraz faktycznej realizacji, jak również stwarzają możliwość wyszukania konkretnego pociągu poprzez informacje o numerze czy relacji. Aplikacja dla podróżnych z Wielkiej Brytanii na podstawie danych lokalizacyjnych wykorzystywanego urządzenia pozwala na identyfikację pociągu, w którym aktualnie znajduje się pasażer. Z kolei aplikacja słowackiego zarządcy infrastruktury po wybraniu konkretnego pociągu podświetla trasę różniąc przy tym trasę już przebytą oraz pozostałą do realizacji.



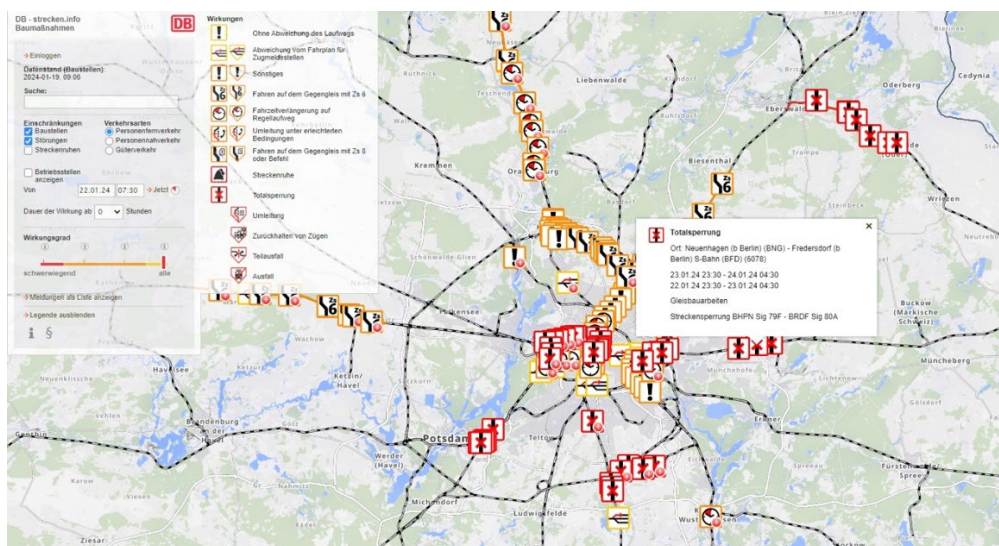
Rysunek 14 Mapy do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyłeń od rozkładu jazdy: Słowacja (po lewej stronie etykieta wybranego pociągu, na niebiesko oznaczona zrealizowana już trasa) (a) [175], Wielka Brytania (po lewej stronie informacje o trasie wybranego pociągu) (b) [174]

Innymi mapami o podobnej funkcjonalności jest aplikacja polskiego zarządcy infrastruktury PKP PLK S.A. [176], amerykańskiego przewoźnika kolejowego AMTRAK [177] czy kanadyjskiego przewoźnika Via Rail Canada [178], jak również mapy łączące dane różnych

przewoźników kolejowych na obszarze więcej niż jednego państwa: [179, 180]. Przy okazji przedstawienia narzędzi do weryfikacji rozkładu jazdy pociągów nie można pominąć rozwiązań, które nie są dedykowane tylko kolejowemu transportowi, ale poprzez zasilanie danymi przewoźników kolejowych tworzą również użyteczne narzędzia do planowania i monitorowania podróży. Do takich aplikacji, o zasięgu międzynarodowym, należą Google Maps, Mapy Apple, Transit – wykorzystują one dane pozyskane od przewoźników w standardzie międzynarodowego formatu zapisu informacji o rozkładach jazdy i lokalizacji przystanków (GFTS, ang. General Transit Feed Specification) [181].

Mając na uwadze, że tematyka niniejszej rozprawy doktorskiej jest skoncentrowana na bezpieczeństwie systemu transportu kolejowego, poniżej zaprezentowano dostępne publicznie interaktywne mapy, które powiązane są z przedmiotowym aspektem.

Z punktu widzenia bezpieczeństwa istotnym jest bieżące przekazywanie informacji związanych z utrudnieniami na szlakach kolejowych. Wspomniany już wcześniej niemiecki zarządca infrastruktury kolejowej DB InfraGO udostępnia publicznie mapę (Rysunek 15), na której oznaczone są zakłócenia związane z ruchem, a które leżą po stronie zarządcy infrastruktury [182].



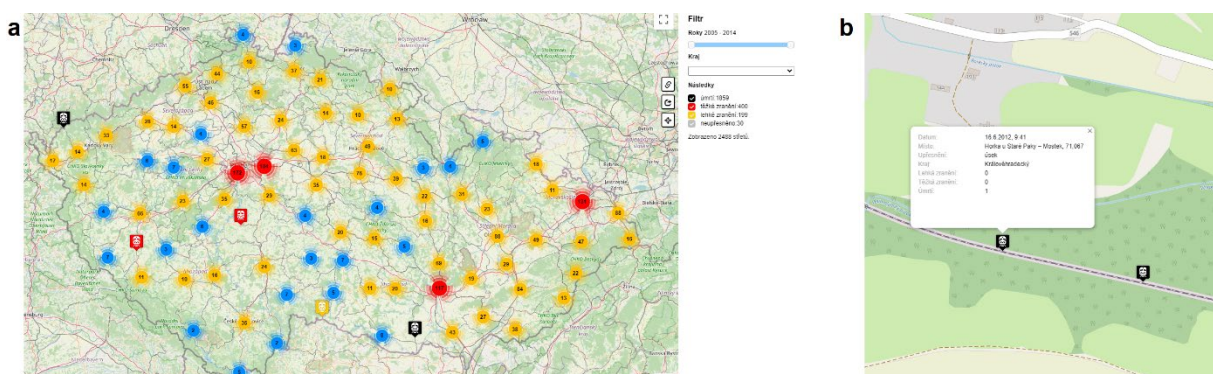
Rysunek 15 DB InfraGO - mapa zakłóceń w ruchu kolejowym (po lewej stronie menu użytkownika, z którego wybiera interesujące utrudnienia oraz czas, obok znajduje się legenda tłumacząca symbole przedstawione na mapie, w centralnej części mapy etykieta dla wybranego całkowitego zamknięcia linii, w którym znajduje się m.in. okres obowiązywania) [182]

Mapa przedstawia między innymi informacje dotyczące wykonywanych prac torowych, utrzymaniowych na obiektach inżynierskich i skutki z tym związane w postaci tymczasowego

zamknięcia ruchu kolejowego, ograniczenia do jazdy po jednym torze czy zmniejszenia maksymalnej dozwolonej prędkości. Informacje mogą być filtrowane z uwzględnieniem rodzaju ruchu (pasażerski dalekobieżny, lokalny oraz towarowy), typu ograniczeń czy ich istotności. Ponadto użytkownik ma możliwość wskazania konkretnego przedziału czasowego interesujących go utrudnień w ruchu kolejowym, w tym uwzględniając długość ich obowiązywania. Po kliknięciu w symbol danego zakłócenia wyświetla się etykieta przedstawiająca szczegółowe informacje [182].

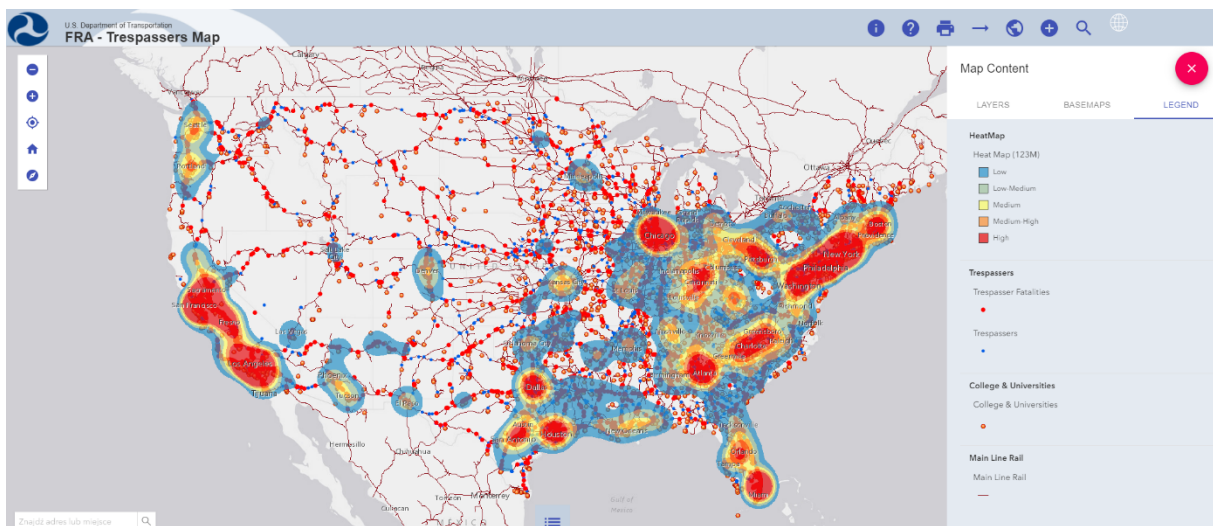
Innymi przykładami map zakłóceń kolejowych jest mapa ScotRail (szkockiego przewoźnika kolejowego). Mapa o mniej skomplikowanym charakterze, ze względu na schematyczny charakter oraz mniej rozległą infrastrukturę przedstawia informacje o utrudnieniach (w tym zdarzeniach kolejowych) w czasie rzeczywistym. Głównym celem mapy jest możliwość weryfikacji przez użytkownika utrudnień na interesującej trasie [175].

Na Rysunku 16 przedstawiono mapę zrealizowaną w ramach projektu badawczego „Amelia” mającego na celu analizę sytuacji związanych z wtargnięciem osób postronnych na teren kolejowy oraz propozycję środków zapobiegania i łagodzenia ich skutków. Mapa poprzez przybliżanie i oddalanie umożliwia generalizację danych tworząc graficzne odwzorowania klastrów, w których zarejestrowano największą liczbę zdarzeń. Oprócz tego graficznie (zróżnicowana kolorystyka symboli) przedstawione zostały skutki poszczególnych potrąceń wiążące się z utratą życia, ciężkimi lub lekkimi obrażeniami. Mapa zawiera funkcje nawigacji czasowej oraz tematycznej, które użytkownikowi pozwalają na prezentację danych zgodnie z indywidualnymi preferencjami. Kompleksowe omówienie wyników realizowanego projektu znajduje się w [183, 184].



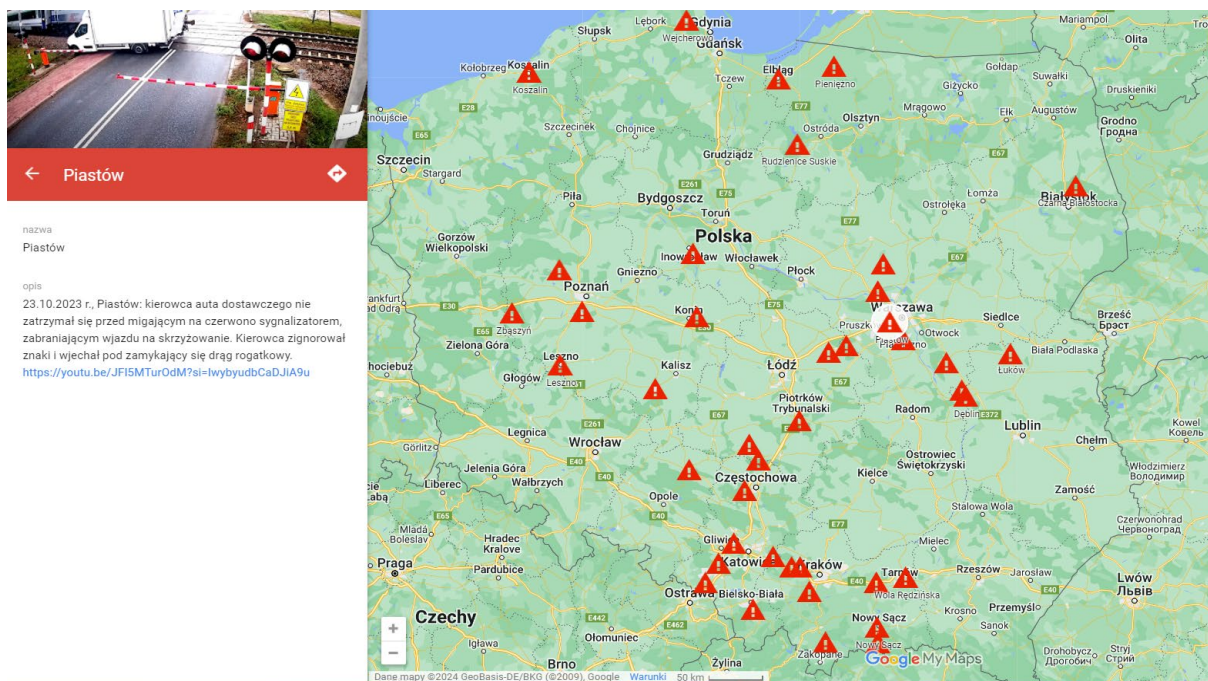
Rysunek 16 Projekt „Amelia” - mapa kolizji pociągów z osobami postronnymi (a), zbliżenie na etykietę z informacjami o zdarzeniu (b) [184]

Mapą o tym samym zakresie tematycznym i zbliżonej wizualizacji jest narzędzie opublikowane przez Departament Transportu Stanów Zjednoczonych. Zgodnie z opisem zamieszczonym na [165] celem utworzenia mapy jest budowanie świadomości wśród społeczeństwa w zakresie niebezpieczeństwa przebywania w obszarze kolejowym poprzez udostępnienie całokształtu danych związanych z potrąceniami osób postronnych przez pociągi. Dane, począwszy od 2011 r., zostały przedstawione z wykorzystaniem tak zwanej mapy ciepłej (Rysunek 17), która wskazuje kolorami obszary o różnej liczbie zarejestrowanych wypadków. Tak samo jak na mapie przedstawionej na Rysunku 16 kolor obrazujący pojedyncze zdarzenie wskazuje powiązane skutki. Inną mapą ciepłą prezentującą dane statystyczne zarejestrowane przez centralną administrację kolejową USA w zakresie zdarzeń kolejowych jest mapa przedstawiająca lokalizację wykolejeń oraz ich skutki [165].



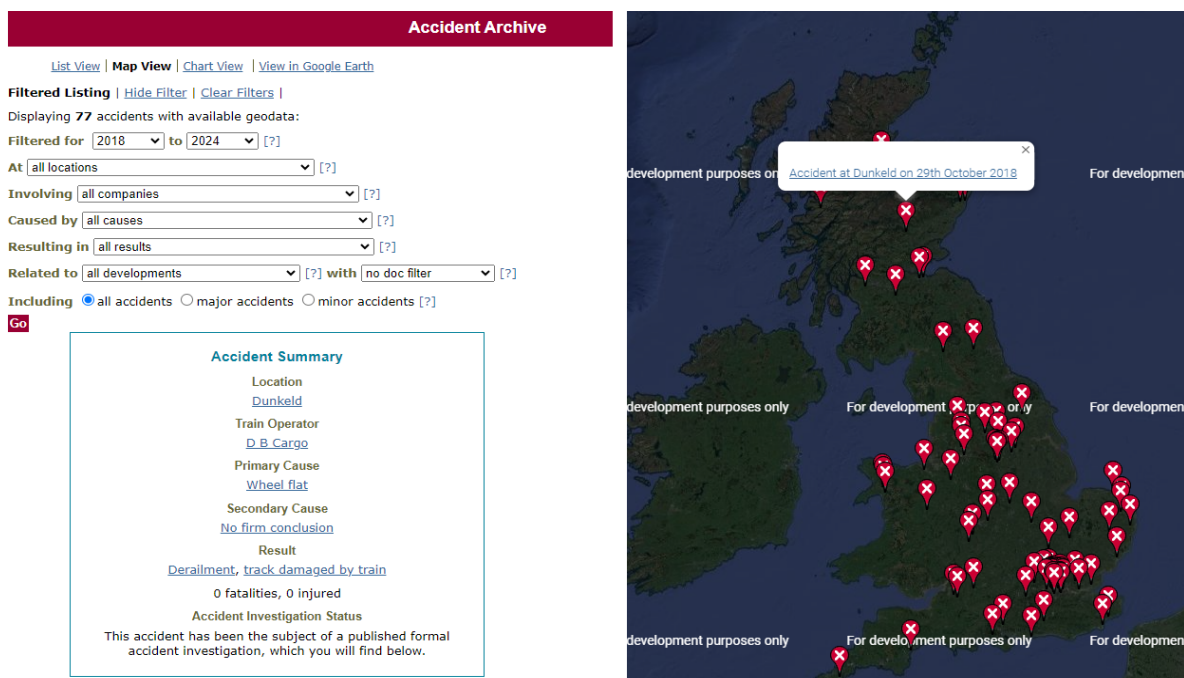
Rysunek 17 Departament Transportu Stanów Zjednoczonych - mapa kolizji pociągów z osobami postronnymi (po prawej stronie legenda) [165]

Polski zarządca infrastruktury PKP PLK S.A. prowadzi ogólnokrajową kampanię Bezpieczny przejazd, której celem jest edukowanie kierowców pojazdów drogowych w zakresie funkcjonowania urządzeń przejazdowych czy niebezpiecznych sytuacji, które mogą wystąpić w obszarze przejazdów kolejowo-drogowych. Jednym z narzędzi prowadzonej kampanii jest mapa wybranych zdarzeń kolejowych na przejazdach, do których podpięte są etykiety przedstawiające krótki opis zdarzenia, jak również hiperłącze przekierowujące do materiału filmowego ze zdarzenia Rysunku 18 [185].



Rysunek 18 Bezpieczny przejazd – mapa zdarzeń kolejowych na wybranych przejazdach kolejowo-drogowych w Polsce [185]

Z kolei baza danych oparta na ciągłym rozwoju poprzez zaangażowanie użytkowników pozwoliła na utworzenie oraz bieżące uzupełnianie mapy zdarzeń kolejowych zaistniałych w Wielkiej Brytanii, która została przedstawiona na Rysunku 19.



Rysunek 19 The Railways Archive - mapa zdarzeń kolejowych w Wielkiej Brytanii (w lewym górnym rogu narzędzie do filtrowania zdarzeń na mapie – obecne ustawienie przedstawia zdarzenia z okresu 2018-2024, w lewym dolnym rogu rozszerzenie etykiety wybranego zdarzenia oznaczonego na mapie) [186]

Dane przedstawione na mapie nie dotyczą tylko zdarzeń z czasów współczesnych, ale również historycznych (pierwsze zdarzenie na mapie z roku 1815), które identyfikowane są poprzez poszukiwania i analizę szeroko pojętej dokumentacji kolejowej. Dane na mapie mogą być filtrowane z użyciem nawigacji czasowej oraz tematycznej, w tym w zakresie rodzaju, przyczyn i skutków wypadków. Etykiety poszczególnych zdarzeń zawierają odnośnik do stron, które przedstawiają opis zaistniałej sytuacji, a nawet oficjalne raporty sporządzane przez państwowe komisje [186].

Przedstawione powyżej przykłady interaktywnych map kolejowych wskazują na możliwość prezentacji szerokiego zakresu danych przy wykorzystaniu graficznego interfejsu użytkownika o różnym poziomie złożoności. Omówione mapy mają charakter publiczny, ale podobne aplikacje mogą być wykorzystywane w formie zamkniętej dedykowanej dla danego przedsiębiorstwa czy nawet grupy pracowniczej. W takim przypadku zakres udostępnianych informacji oraz graficzny interfejs użytkownika powinien być dokładnie nakierowany na osiągnięcie wyznaczonego celu.

5. Cel i teza pracy

5.1. Zasadność podjęcia tematu

Zainteresowanie autorki niniejszej rozprawy tematyką wydarzeń kolejowych jest powiązane z wcześniejszymi pracami badawczymi w obszarze wypadkowości rejestrowanej w ruchu pociągów, do których zalicza się między innymi porównanie stanu bezpieczeństwa w wybranych państwach UE, czy opracowanie w ramach pracy magisterskiej pierwszej edycji mapy wydarzeń kolejowych dla regionalnego przewoźnika pasażerskiego Kolei Śląskich sp. z o.o. [187-189]. Przedmiotowa Mapa wydarzeń kolejowych otrzymała w 2022 r. nagrodę w konkursie Kultury Bezpieczeństwa w transporcie kolejowym organizowanym przez Prezesa UTK w kategorii „Rozwiązania systemowe”. Dodatkową motywacją do kontynuacji badań związanych z zagadnieniami wydarzeń na sieci kolejowej jest praca zawodowa, w której na co dzień autorka spotyka się z problemami bezpieczeństwa w transporcie kolejowym.

Na podstawie przeglądu literatury można stwierdzić, że temat wydarzeń kolejowych, a w tym trendów ich występowania, jest poruszany w publikacjach na całym świecie [106, 108-114, 117-121]. Pod szczególnym nadzorem są zdarzenia kolejowe, które są raportowane i analizowane przez wyznaczone organy, zarówno na poziomie krajowym, jak i europejskim [95-98]. Chociaż dane dotyczące potrąceń zwierzyny przez pociągi nie są rejestrowane przez organy centralne, to znajduje się liczne analizy przestrzenne i czasowe takich wydarzeń [105-116, 118-121]. Niemniej w opinii autorki nie wpływają one realnie na podniesienie poziomu bezpieczeństwa kolejowego, ponieważ publikacje nie wskazują wyraźnie sposobu możliwości ich wykorzystania przez przewoźników kolejowych. W związku z tym wyciąganie trafnych wniosków oraz wprowadzanie działań zapobiegawczych w dalszym ciągu stanowi duże wyzwanie, i jednocześnie dużą potrzebę, dla podmiotów rynku kolejowego.

Modele predykcyjne analizują wydarzenia kolejowe z udziałem czynników zewnętrznych, które w istotny sposób wpływają na bezpieczeństwo transportu kolejowego. Modele zdarzeń kolejowych na przejazdach kolejowo-drogowych są szeroko przedstawione w literaturze, jak również stosuje się już narzędzia o otwartym dostępie do ich obsługi [133-136, 138-140]. W przypadku zdecydowanie mniej licznych modeli predykcji potrąceń zwierzyny przez pojazdy kolejowe [144, 145] dostrzega się możliwość ich rozwoju w Polsce, przede wszystkim z uwagi na relatywnie dużą liczbę rejestrowanych przypadków w porównaniu z innymi wydarzeniami kolejowymi, a zarazem ich negatywnym wpływem na funkcjonowanie działalności przewozowej. Ponadto przegląd literatury wykazał, że modele predykcyjne

potrażeń zwierzyny przez pojazdy kolejowe charakteryzują się wysoką złożonością niezbędnych danych do ich wykorzystania. Dla przewoźnika kolejowego dużym wyzwaniem jest uzyskanie informacji związanych z obszarem przyrodniczym tj. liczebnością zwierzyny na danym obszarze oraz charakterystyką jej zachowań bez wsparcia podmiotów zewnętrznych. Z tego względu rozpoznaje się lukę jaką jest opracowanie modelu opartego na danych, które przewoźnik samodzielnie rejestruje. Takie podejście pozytywnie wpływa na aktualizację modelu o dane bieżąco rejestrowane.

Zaprezentowane interaktywne mapy o tematyce kolejowej mają szeroki zakres tematyczny i posiadają różne funkcjonalności [156-186]. Z tego względu dostrzega się możliwości rozwoju Mapy wydarzeń kolejowych, która została przez autorkę utworzona na wcześniejszym etapie pracy naukowej. W tym zakresie istotne jest dopracowanie dedykowanego dla pracowników kolejowych graficznego interfejsu użytkownika oraz rozszerzenie mapy o obszary innych regionalnych przewoźników pasażerskich. Na mapie powinny znajdować się istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa informacje, które podniosą świadomość pracowników spółki kolejowej o występujących zagrożeniach na obsługiwanej linii kolejowej. Uwzględnienie wyników modelu predykcyjnego potrażeń zwierzyny na mapie umożliwi przekazywanie maszynistom ostrzeżenia o niebezpiecznych odcinkach linii kolejowych.

Niniejsza praca wpisuje się w trend promowania kultury bezpieczeństwa wśród pracowników bezpośrednio odpowiedzialnych za prowadzenie pojazdów kolejowych. Wykorzystanie danych dotyczących wydarzeń do utworzenia modelu predykcyjnego oraz mapy dedykowanej dla konkretnego przewoźnika kolejowego jest przykładem proaktywnego podejścia do spełnienia wymagań prawnych w zakresie kształtowania systemów zarządzania bezpieczeństwem, a które dotyczą m.in. obszaru analizy i wyciągania wniosków z wydarzeń kolejowych.

5.2. Cel, zakres pracy i teza

Mając na uwadze przeprowadzony przegląd literatury oraz analizę rozwiązań w zakresie prezentacji danych na mapach sformułowano cel główny pracy jako:

Opracowanie mapy wydarzeń kolejowych oraz modelu ich predykcji na podstawie wybranych danych regionalnych przewoźników pasażerskich.

Celami naukowymi pracy są:

- a. analiza przestrzenna i czasowa wydarzeń kolejowych związanych z potrąceniem zwierzyny przez pojazdy kolejowe,
- b. wyznaczenie na podstawie analizy „czarnych punktów” tzw. hot-spotów na sieci kolejowej obsługiwanej przez regionalnych przewoźników kolejowych,
- c. wyznaczenie odcinków linii kolejowych, na podstawie wyników modelu predykcyjnego, o których ze względu na zagrożenie potrąceniem zwierzyny powinien być ostrzegany maszynista.

Celem użytkowym pracy jest wdrożenie opracowanej mapy wydarzeń kolejowych oraz modelu ich predykcji u wybranego regionalnego przewoźnika pasażerskiego oraz wykazanie, że wdrożone narzędzia mogą być wykorzystane w funkcjonujących systemach zarządzania bezpieczeństwem.

Zrealizowanie wybranego tematu rozprawy doktorskiej, a co z tym związane osiągnięcie celów naukowych i użytkowych, wymagało zrealizowania poniżej wskazanych działań:

- a. analizy zasadności podjęcia tematu w aspekcie aktualnie stosowanych rozwiązań oraz literatury,
- b. rozpoznania potrzeb regionalnych przewoźników pasażerskich,
- c. pozyskania danych w zakresie wydarzeń kolejowych od regionalnych przewoźników pasażerskich, UTK oraz PKBWK,
- d. analizy otrzymanych danych i ich parametrów w zakresie możliwości ich dalszego wykorzystania,
- e. adaptacji danych oraz opracowanie modeli predykcyjnych potrąceń zwierzyny przez pojazdy kolejowe dla Kolei Śląskich sp. z o.o. oraz Kolei Wielkopolskich sp. z o.o.,
- f. wdrożenia modelu predykcyjnego oraz mapy wydarzeń kolejowych u wybranych regionalnych przewoźników pasażerskich,
- g. adaptacji danych oraz opracowanie mapy wydarzeń kolejowych dla wybranych regionalnych przewoźników pasażerskich,
- h. oceny przydatności modelu predykcyjnego oraz mapy wydarzeń kolejowych jako narzędzi wspierających system zarządzania bezpieczeństwem przewoźnika,
- i. wskazania wniosków końcowych oraz rekomendacji w zakresie dalszych badań.

W oparciu o przedstawione cele oraz zakres rozprawy doktorskiej, jak również własne doświadczenia, uzasadnione jest sformułowanie następującej tezy:

Zasadnym jest opracowanie mapy wydarzeń kolejowych oraz modelu ich predykcji jako narzędzi wykorzystywanych w systemie zarządzania bezpieczeństwem przewoźników kolejowych.

6. Model predykcji kolizji pociągów ze zwierzyną

6.1. Wstępne założenia modelu

Mechanizm związany z występowaniem kolizji pociągów ze zwierzyną jest złożony i należy wziąć pod uwagę wiele parametrów przy budowaniu modelu, aby dokładnie odzwierciedlał symulowane warunki rzeczywiste i stał się wiarygodnym źródłem informacji. W tym zakresie należy zaznaczyć, że model przedstawiony w niniejszej rozprawie ma uwzględniać dane, które są rejestrowane przez przewoźników kolejowych tak, aby bez konieczności zaangażowania stron trzecich mogli implementować dane i korzystać z wyników analiz. Z tego względu zrezygnowano z uwzględnienia czynników związanych z liczebnością zwierzyny w rejonach otaczających linie kolejowe, jak zrealizowano to w [144, 145] czy rozróżnienia reakcji poszczególnych gatunków zwierzyny na sygnały świetlne czy dźwiękowe, co staje się jeszcze bardziej złożone, kiedy uwzględnia się również prędkość zbliżania się pociągu, emitowany przez niego hałas czy geometrię układu torowego [146, 190]. Niemniej z perspektywy opracowywanego modelu dostrzega się znaczenie światła dziennego, które bez konieczności przeprowadzania dodatkowych analiz behawioralnych warunkuje zakres pola widzenia maszynisty, jak również zwierzyny [191].

Opracowany model oparty na podejściu bayesowskim uwzględnia następujące dane gromadzone przez przewoźnika kolejowego w zakresie potrąceń zwierzyny przez pojazdy kolejowe: numer linii kolejowej i jej kilometraż, datę i godzinę wydarzenia. Na etapie doboru podmiotów rynku kolejowego zdecydowano się na analizę regionalnych przewoźników pasażerskich, których przewozy charakteryzują się większą dobową częstotliwością niż w przypadku pociągów dalekobieżnych, odbywają się stale po tych samych liniach kolejowych danego regionu, a zmiany w realizowanych połączeniach wynikają przede wszystkim z otwarcia nowych linii kolejowych lub tymczasowych prac inwestycyjnych. Dane dotyczące kolizji, zgodnie z systemami zarządzania bezpieczeństwem, zbierane są na podstawie bezpośrednich zgłoszeń pracowników drużyn pociągowych do pracowników dyspozytury rejestrujących bieżącą sytuację ruchową. W przypadku przewoźników kolejowych zgłaszanie zakłóceń i wszelkich nietypowych wydarzeń w trakcie prowadzenia pociągów jest obowiązkiem pracowników obsługujących dany pojazd. Następnie dane te przekazywane są dedykowanym jednostkom organizacyjnym spółki, które w uporządkowany sposób je ewidencjonują i analizują. Informacje te pozwalają przede wszystkim na opracowanie profili przestrzennych i czasowych, które zostaną wykorzystane w modelu. Ponadto jako dane wejściowe modelu wykorzystuje się natężenie ruchu kolejowego na poszczególnych odcinkach

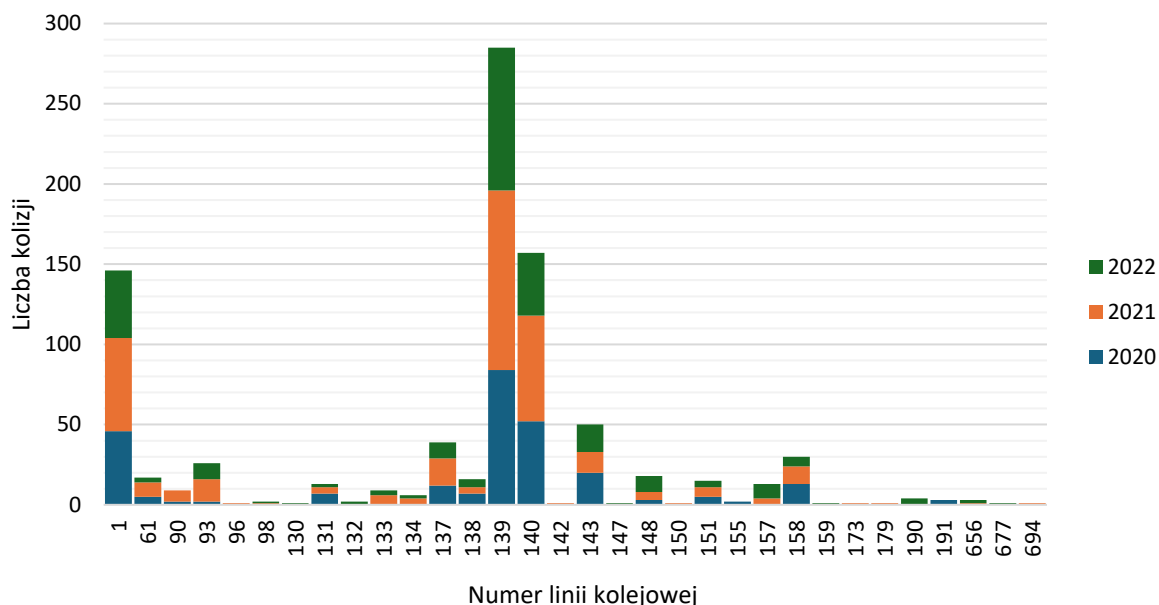
linii kolejowych. Informacje wynikające z rzeczywistych rozkładów jazdy obowiązujących u przewoźników pozwoliły również na opracowanie dziennych profili ruchu pociągów. W modelu uwzględnia się numerację linii kolejowych prowadzoną przez zarządcę infrastruktury kolejowej PKP PLK S.A. W badaniu brane są pod uwagę tylko linie kolejowe, które w trakcie zbierania danych o potrąceniach zwierzyny, nie były wyposażone w Urządzenia Ochrony Zwierząt UOZ-1, których celem jest ostrzeżenie zwierzyny przed zbliżającym się pociągiem [192, 193]. Pociągi analizowanych przewoźników nie są również wyposażone w urządzenia o takim charakterze.

Analiza danych dotyczących kolizji pociągów ze zwierzyną oraz późniejsza implementacja modelu została przedstawiona na przykładzie regionalnych przewoźników pasażerskich: Kolei Śląskich sp. z o.o. (Koleje Śląskie) i Kolei Wielkopolskich sp. z o.o. (Koleje Wielkopolskie) Dane uzyskane od przewoźników pochodzą z tego samego okresu tj. lat 2020-2022 (dane do analiz statystycznych oraz dane uczące dla modelu) oraz styczeń – kwiecień 2023 r. (dane testowe modelu pozwalające na weryfikację jego działania). W rozprawie przedstawiono implementację modelu dla linii kolejowych, dla których analiza statystyczna wskazuje największą powtarzalność takich sytuacji, a co z tym związane wysokie prawdopodobieństwo ich wystąpienia. W tym zakresie należy jednak zaznaczyć, że głównym celem modelu jest jego uniwersalność, przekładająca się na możliwość jego zastosowania na całej sieci kolejowej tj. niezależnie od długości linii kolejowej, liczby występujących tam wydarzeń czy natężenia ruchu. Gatunek zwierzyny, która brała udział w poszczególnych kolizjach, nie ma wpływu na model. Analiza tego obszaru wśród obu przewoźników wskazuje, że najczęściej potrąceń jest rejestrowanych z dzikimi, roślinożernymi ssakami kopytnymi takimi jak sarny, dziki, jelenie czy łosie. Przy czym kolizje z łosiami stanowią najmniejszy udział kolizji niosący jednocześnie za sobą największe jednostkowe straty związane z uszkodzeniem pojazdów kolejowych.

6.2. Opis danych dotyczących kolizji ze zwierzyną w Kolejach Śląskich sp. z o.o.

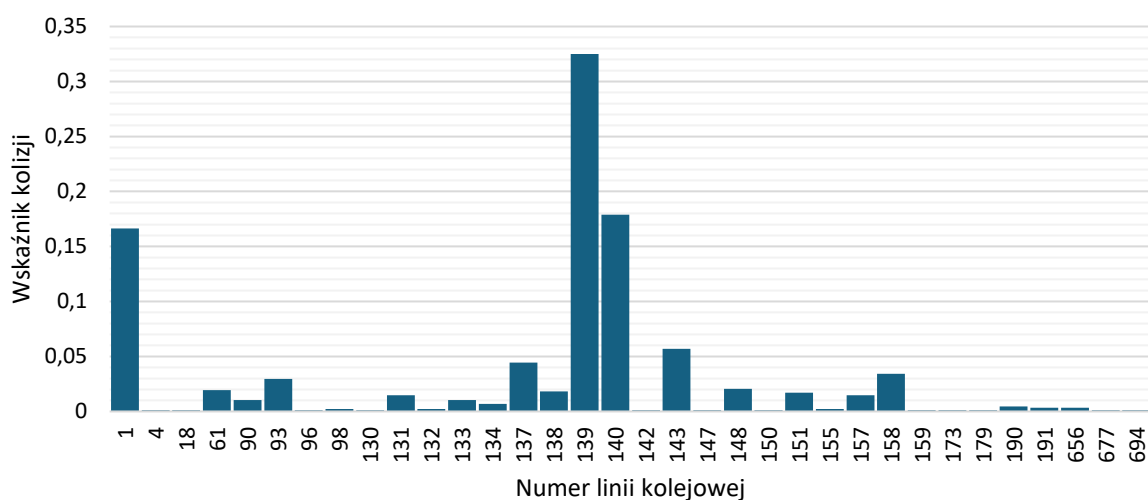
Koleje Śląskie są regionalnym przewoźnikiem kolejowym w ruchu pasażerskim, którego działalność przewozowa skupia się na obszarze województwa śląskiego. Przewoźnik realizuje przewozy jedynie z wykorzystaniem elektrycznych zespołów trakcyjnych. Jak już wcześniej wspomniano, obsługiwane trasy wykorzystują infrastrukturę kolejową zarządzaną przez PKP PLK S.A. i przebiegają przez tereny zurbanizowane, do których zaliczane są między innymi miasta aglomeracji katowickiej, jak również regiony leśne, w tym w rejonie górskim.

W okresie 2020-2022 zarejestrowano 877 kolizji ze zwierzyną, które w rozkładzie na poszczególne linie kolejowe zostały przedstawione na Rysunku 20. Na wykresie pominięto linie kolejowe, na których nie są realizowane cykliczne przewozy, a wydarzenia zostały zarejestrowane np. w trakcie przejazdów do miejsc wykonywania czynności utrzymaniowych.



Rysunek 20 Liczba kolizji pociągów Kolei Śląskich ze zwierzyną na poszczególnych liniach kolejowych w latach 2020-2022

Mając na uwadze powyższe obliczono wskaźnik (uwzględniający liczbę kolizji na danej linii kolejowej w odniesieniu do całkowitej liczby kolizji w latach 2020-2022) wystąpienia kolizji na danej linii kolejowej. Wyniki zostały przedstawione na Rysunku 21.



Rysunek 21 Wskaźnik kolizji ze zwierzyną na liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Śląskie na podstawie danych z lat 2020-2022

Na etapie wyboru linii kolejowych do prezentacji modelu nie jest uwzględniana liczba wyprawianych pociągów na danej linii kolejowej. Wybór linii kolejowych z dużą liczbą potrąceń, niezależnie od ich statystycznej przyczyny, pozwala na przedstawienie najbardziej interesujących wyników modelu, które mogą zostać zweryfikowane na danych testowych z późniejszego okresu. Zgodnie z Rysunkiem 20 i Rysunkiem 21 szczególna uwaga powinna zostać skierowana na linie nr 139, 140 oraz 1, na których występuje największa liczba wydarzeń związanych z kolizją ze zwierzyną, a co z tym związane najwyższy wskaźnik wystąpienia takich sytuacji. Zasadność wyboru tych linii zostanie również zweryfikowana w aspekcie liczby wydarzeń odniesionych do długości odcinka linii kolejowych, na których poruszają się pociągi Kolei Śląskich. Takie podejście może mieć również istotny wpływ na wskazanie linii kolejowych, które powinny zostać poddane szczególnej analizie w modelu predykcyjnym. W Tabeli 4 przedstawiono przedmiotową analizę, przy czym pominięte zostały linie kolejowe, na których spółka Koleje Śląskie nie prowadzi regularnych przewozów (wydarzenia zarejestrowano w trakcie przejazdu do warsztatów utrzymaniowych), linie będące łącznicami kolejowymi (poniżej 5 km) oraz linie kolejowe, dla których niezależnie od długości zarejestrowano poniżej 10 kolizji w analizowanym okresie. Pomimo tego, że model będzie mógł być wykorzystany dla każdej linii kolejowej, weryfikacja wyników powinna odbyć się na liniach najbardziej narażonych na niebezpieczeństwo związane z potrąceniem zwierzyny.

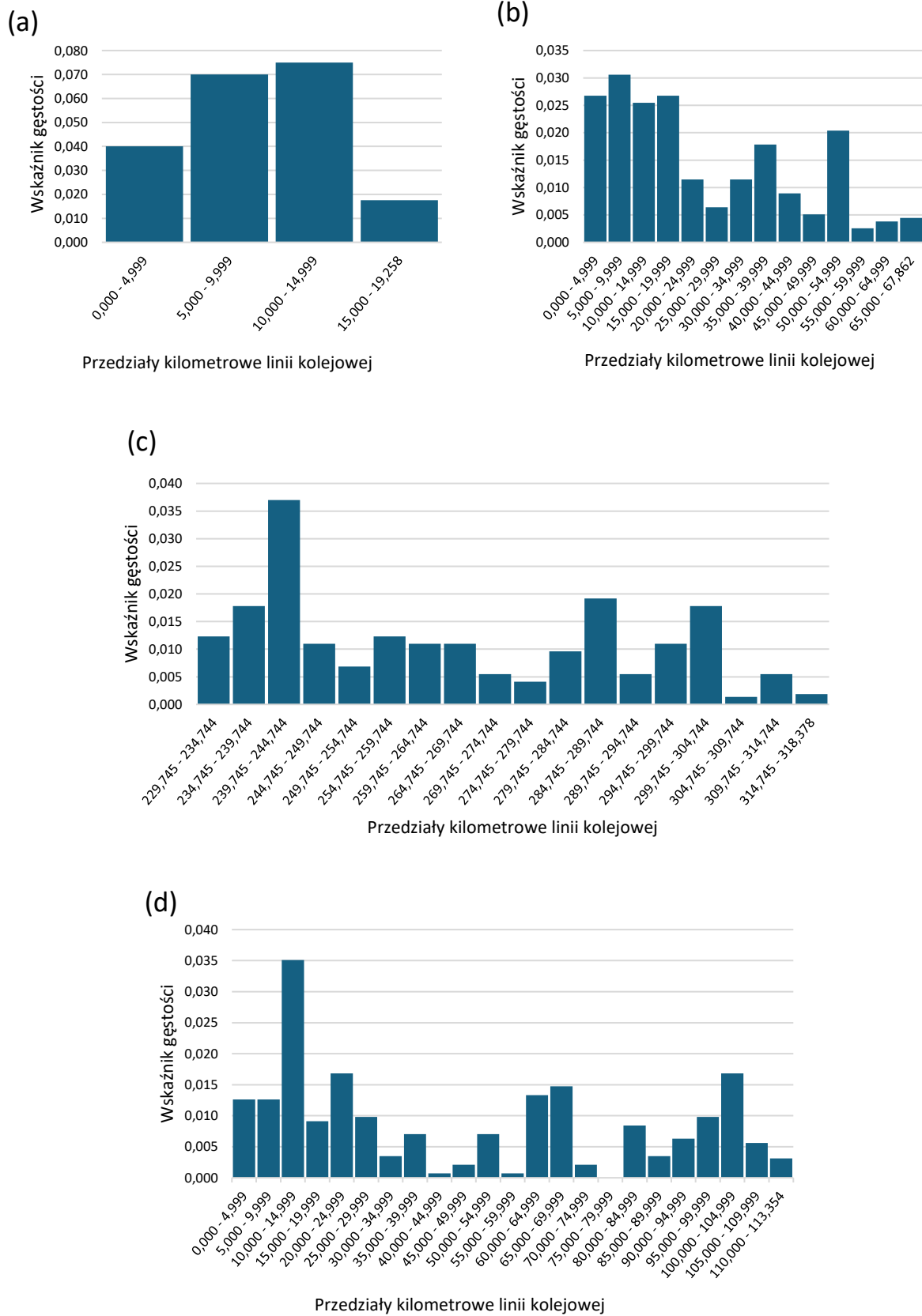
Tabela 4 Analiza występowania kolizji ze zwierzyną na poszczególnych liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Śląskie

Nr linii kolejowej	Punkt początkowy odcinka linii kolejowej [km]	Punkt końcowy odcinka linii kolejowej [km]	Długość odcinka linii kolejowej [km]	Liczba kolizji na odcinku linii kolejowej	Wskaźnik liczby kolizji na 1 km linii kolejowej [liczba kolizji na 1 km linii]
1	229,745	318,378	88,633	146	1,65
61	117,223	152,231	35,008	17	0,49
93	46,664	76,374	29,71	26	0,88
131	5,9	47,966	42,066	13	0,31
137	0	27,1	27,100	39	1,44
138	0	32,97	32,970	16	0,49
139	0	113,354	113,354	285	2,51

Nr linii kolejowej	Punkt początkowy odcinka linii kolejowej [km]	Punkt końcowy odcinka linii kolejowej [km]	Długość odcinka linii kolejowej [km]	Liczba kolizji na odcinku linii kolejowej	Wskaźnik liczby kolizji na 1 km linii kolejowej [liczba kolizji na 1 km linii]
140	0	67,862	67,862	157	2,31
143*	0	19,258	19,258	41	2,13
148	0	35,98	35,980	18	0,50
151	22,982	52,568	29,586	15	0,51
157	11,279	23,745	12,466	13	1,04
158	0	25,68	25,680	30	1,17

*Jako stację końcową uwzględniono Lubliniec, na dłuższej trasie tj. do Kluczborka pociągi kursowały do 13.12.2020 r. Liczba kolizji ze zwierzyną obejmuje tylko wskazany odcinek.

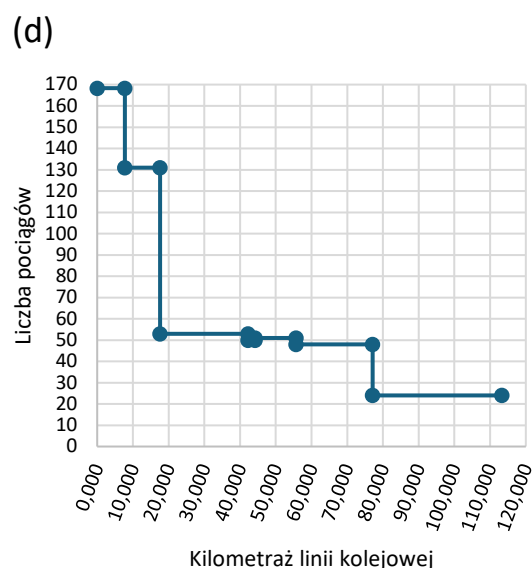
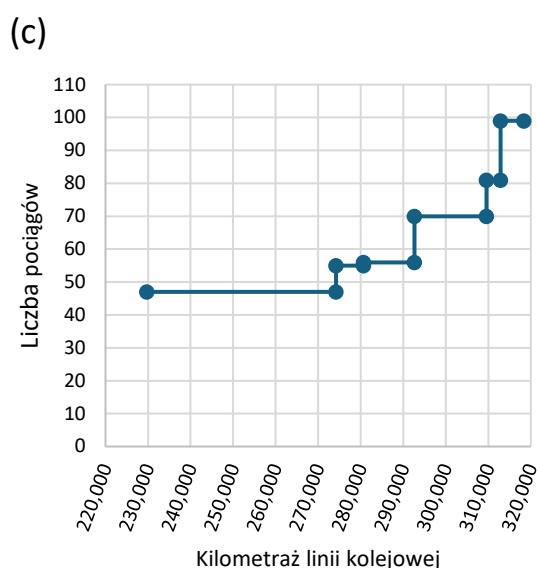
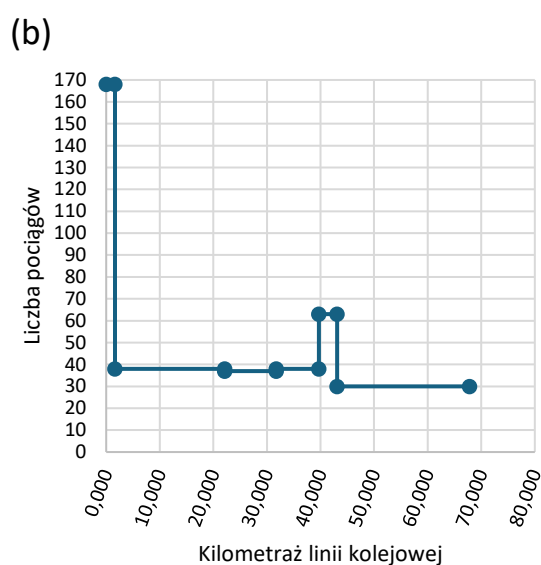
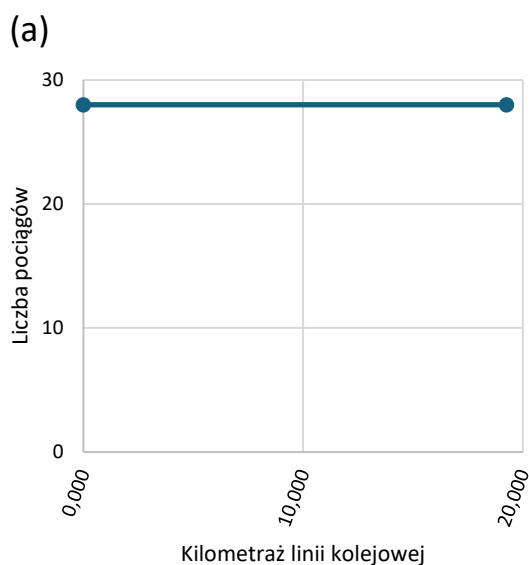
W Tabeli 4 kolorem niebieskim oznaczono 4 linie kolejowe o najwyższym wskaźniku liczby kolizji na 1 km linii kolejowej. Z tabeli wynika, że oprócz wskazanych wcześniej linii kolejowych (na podstawie wartości wskaźnika z Rysunku 21) tj. nr 1 (odcinek Częstochowa – Katowice), 139 (Katowice – Zwardoń), 140 (Katowice Ligota – Nędza) również linia kolejowa nr 143 (odcinek Kalety – Lubliniec), na której wskaźnik liczby zdarzeń na 1 km linii kolejowej jest równy 2,13, powinna zostać szerzej przeanalizowana w modelu predykcyjnym. Dla czterech omawianych linii kolejowych obliczono wskaźnik gęstości wystąpienia kolizji na pięciokilometrowych odcinkach linii, co przedstawiono na Rysunku 22. Wskaźnik ten stanowi iloraz liczby kolizji na pojedynczym odcinku oraz całkowitej liczby kolizji zarejestrowanych na danej linii kolejowej, który następnie podzielony jest przez długość pojedynczego odcinka. Tak jak w przypadku Kolei Śląskich odcinek o długości 5 km jest każdorazowo obliczany począwszy od stacji początkowej obsługiwanej przez Koleje Śląskie na danej linii kolejowej, mając na uwadze jej rosnący kilometraż. W związku z przyjęciem takiego sposobu podziału linii kolejowej ostatni odcinek każdej linii stanowi resztę z podziału i jego długość jest mniejsza niż 5 km, co również zostało ujęte na Rysunku 22.



Rysunek 22 Wskaźnik gęstości kolizji ze zwierzyną na pięciokilometrowych odcinkach linii nr 143 (a), 140 (b), 1 (c), 139 (d)

Najwyższy wskaźnik gęstości kolizji tj. 0,075 zaobserwowano na linii nr 143. Dla pozostałych linii kolejowych maksymalna wartość jest zbliżona i mieści się w granicach 0,030 – 0,035. Na wykresach można zaobserwować, że nie na całej długości linii kolejowych występuje taka sama wartość wskaźnika gęstości kolizji ze zwierzyną. Odcinki, na których częściej dochodzi do kolizji ze zwierzyną, mają większy wskaźnik gęstości, więc możliwa będzie późniejsza weryfikacja tych odcinków z wynikami modelu. Wartości wskaźników mogą być uzależnione częściowo od intensywności ruchu kolejowego na poszczególnych odcinkach linii kolejowych, co jest uwzględnione w budowanym modelu, ale również od warunków lokalnych przebiegu danego odcinka np. przez tereny leśne, rolnicze czy zurbanizowane. Niemniej dokładne objaśnienie wartości wskaźnika gęstości potrąceń zwierzyny na poszczególnych odcinkach nie jest przedmiotem niniejszej pracy, ponieważ określenie dokładnych czynników wpływających na liczbę występujących sytuacji związanych z potrąceniem zwierzyny wykracza poza dane rejestrowane przez przewoźników, a co z tym związane nie wpływa na opracowywany model.

W rocznym rozkładzie jazdy tj. od 12 grudnia 2021 r. do 9 grudnia 2022 r. przewoźnik obsługiwał średnio 415 pociągów dziennie. Natężenie ruchu na poszczególnych odcinkach linii kolejowych ujęte w modelu zostało przeanalizowane na podstawie rzeczywistego rozkładu jazdy przewoźnika (dla dni roboczych) z okresu 2020-2022 oraz przedstawione na Rysunku 23. Średnia liczba pociągów na poszczególnych odcinkach uwzględnia równoległy przebieg linii kolejowych, jak to ma miejsce np. w przypadku linii kolejowej nr 139 oraz 140. W takim przypadku, kiedy tory dwóch różnych linii biegną obok siebie, liczba pociągów jest dla nich sumowana, ponieważ zwierzyna zmuszona jest przekroczyć obie linie kolejowe, aby dostać się na przeciwległą stronę torowiska. W związku z tym na początkowym przebiegu obu linii kolejowych zarejestrowano identyczną, a zarazem największą wśród wszystkich prezentowanych odcinków, liczbę pociągów tj. 170. Innym przypadkiem, który wpływa na rozbieżność liczby pociągów na poszczególnych odcinkach danej linii kolejowej, są różne punkty handlowe, w których rozpoczyna i kończy się bieg danego pociągu, co uzależnione jest od kreowanych przez przewoźników rozkładów jazdy. Nie każdy wyprawiony pociąg kursuje na całym obsługiwanym odcinku linii kolejowej, jak to ma miejsce w przypadku linii nr 143, kiedy liczba pociągów pozostaje niezmienna w całym kilometrażu linii kolejowej.



Rysunek 23 Średnia liczba pociągów w dni robocze na poszczególnych liniach kolejowych: 143 (a), 140 (b), 1 (c), 139 (d)

Ponadto należy zwrócić uwagę, że rozkład liczby pociągów nie jest jednolity w profilu dnia. Na przykład między godziną 00:00 a 4:00 przewoźnik nie obsługuje prawie żadnych pociągów. Największe zagęszczenie pociągów Kolei Śląskich ma miejsce w godzinach porannego i popołudniowego szczytu tj. 6:00 – 9:00 oraz 15:00 – 18:00, z tego względu model będzie uwzględniał również niejednorodny dzienny profil pociągów. Element ten zostanie dokładniej omówiony w rozdziale dotyczącym implementacji modelu.

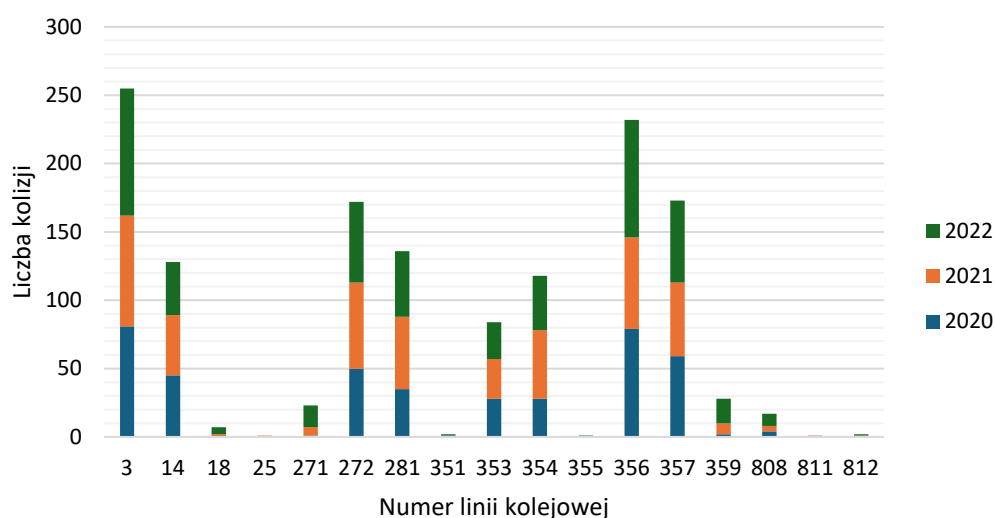
Należy również zwrócić uwagę, że wskazany okres analizy tj. lata 2020-2022 częściowo pokrywa się z okresem pandemii koronawirusa SARS-CoV-2. Przewoźnik na skutek obostrzeń

związanych z ograniczeniem przemieszczania zmniejszył liczbę pociągów od marca 2020 r. do sierpnia 2020 r. o około 16%. Po tym okresie rozkład jazdy realizowano zgodnie z założeniami, główną przyczyną takiego postępowania był fakt, że pomimo zmniejszenia liczby pasażerów obowiązywały restrykcyjne zasady dotyczące zachowania bezpiecznej odległości pomiędzy osobami znajdującymi się w pojeździe, co skutkowało znacznym ograniczeniem możliwości zagęszczenia pasażerów w środkach transportu publicznego [194]. W modelu nie zostały ujęte przedmiotowe ograniczenia w ruchu pociągów, które zostały potraktowane jako sytuacja nadzwyczajna.

6.3. Opis danych dotyczących kolizji ze zwierzyną w Kolejach Wielkopolskich sp. z o.o.

Koleje Wielkopolskie to regionalny przewoźnik pasażerski, którego działalność koncentruje się na obszarze województwa wielkopolskiego. Obsługa pasażerów jest realizowana z wykorzystaniem elektrycznych i spalinowych pojazdów trakcyjnych, jak również w wybranych okresach roku lokomotywy parowej zestawionej z wagonami, co stanowi atrakcję turystyczną regionu. Większość realizowanych pociągów rozpoczyna lub kończy swój bieg w Poznaniu. Połączenia rozchodzące się od stolicy województwa wielkopolskiego biegną przez tereny o wysokiej wartości przyrodniczej jak lasy, ale również obszary rolnicze czy zurbanizowane.

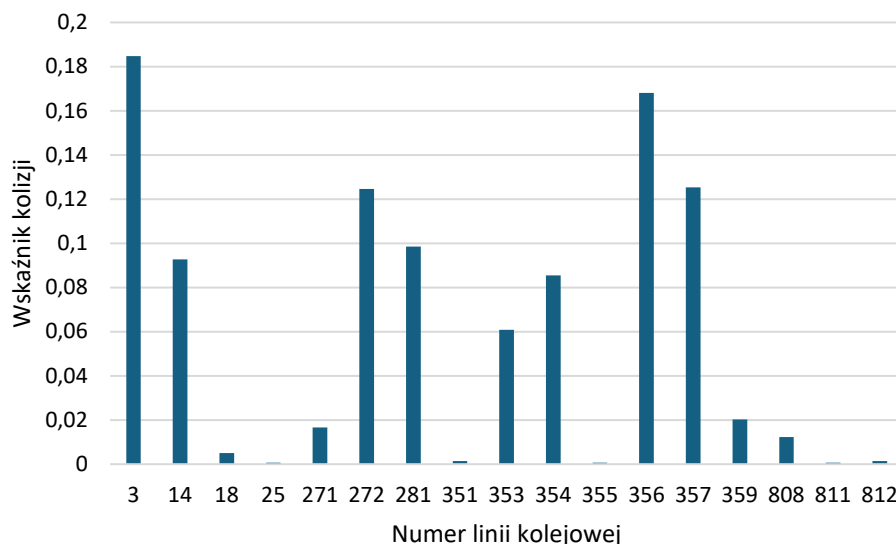
Analizowane dane, tak jak w przypadku Kolei Śląskich, obejmują lata 2020-2022. W omawianym przedziale czasowym zarejestrowano 1380 przypadków potrącenia zwierzyny.



Rysunek 24 Liczba kolizji ze zwierzyną na liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Wielkopolskie w latach 2020-2022

Na Rysunku 24 przedstawiono liczbę zdarzeń zaistniałych na poszczególnych liniach kolejowych obsługiwanych przez przewoźnika. Wykres przedstawia tylko linie kolejowe, po których przewozy prowadzone są w ramach realizacji rozkładu jazdy obsługującego podróżnych. Najwięcej zdarzeń, ponad 250, miało miejsce na linii kolejowej nr 3.

Na podstawie powyższych danych obliczono wskaźnik wystąpienia kolizji na poszczególnych liniach kolejowych, co przedstawiono na Rysunku 25. Tak jak w przypadku Kolei Śląskich na tym etapie pomijany jest aspekt liczby wyprawianych pociągów na poszczególnych liniach kolejowych. Takie podejście jest argumentowane wyborem najbardziej interesujących linii do prezentacji wyników modelu, czyli tych, na których rejestrowana jest największa liczba potrąceń, niezależnie od statystycznej przyczyny, w tym liczby obsługiwanych pociągów.



Rysunek 25 Wskaźnik kolizji ze zwierzyną dla poszczególnych linii kolejowych na podstawie danych z lat 2020-2022

Porównując wyniki uzyskane dla Kolei Wielkopolskich (Rysunek 24 i Rysunek 25) oraz Kolei Śląskich (Rysunek 20 i Rysunek 21) można zauważyć, że liczba kolizji, a co z tym związane wskaźnik ich wystąpienia na liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Wielkopolskie ma bardziej równomierny rozkład pomiędzy liniami niż w przypadku Kolei Śląskich. W Kolejach Wielkopolskich maksymalna wartość wskaźnika wynosi 0,18, a w Kolejach Śląskich 0,33. Niemniej wartość wskaźnika powyżej 0,05 wykazano dla 8 linii użytkowanych przez Koleje Wielkopolskie i tylko 4 wykorzystywanych przez Koleje Śląskie. Mając na uwadze wartość wskaźnika kolizji, liniami kolejowymi, które podlegałyby szczegółowej analizie w modelu predykcyjnym byłyby linie nr 3, 356, 357 oraz 272.

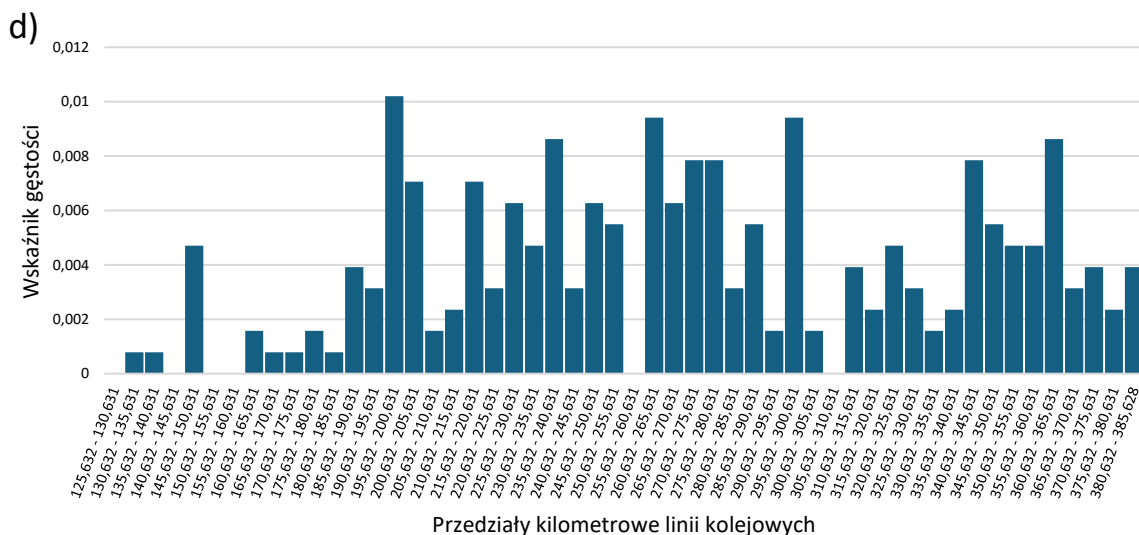
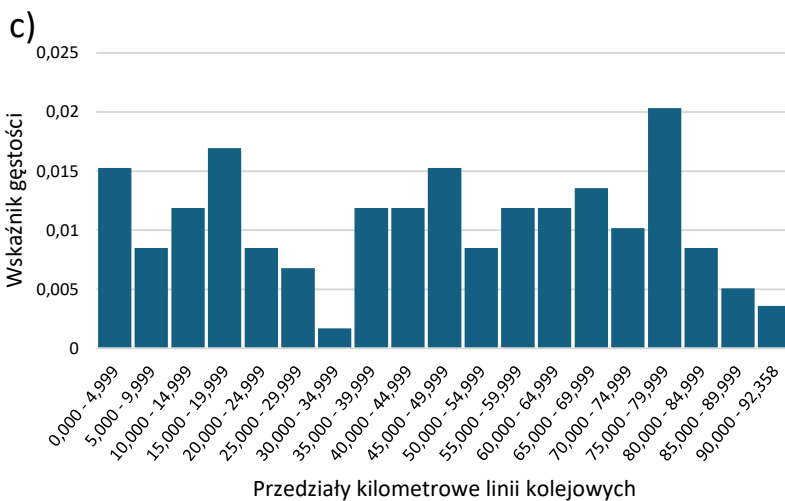
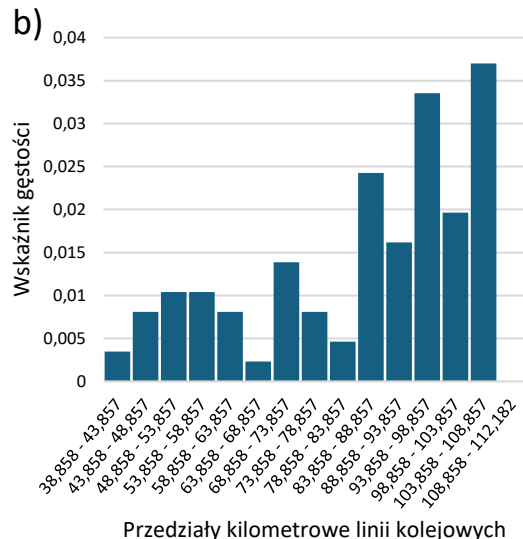
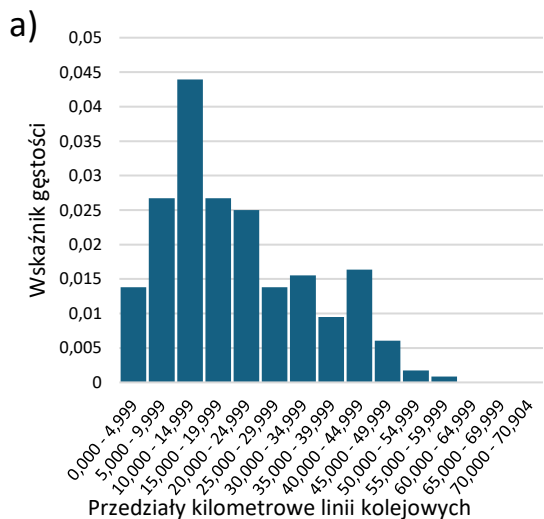
Wybór linii kolejowych, na które powinna zostać zwrócona największa uwaga w trakcie weryfikacji modelu predykcyjnego, powinien uwzględniać też stosunek liczby potrąceń zwierzyny do długości linii kolejowej. W tym zakresie zastosowano identyczne kryteria wstępnej selekcji linii kolejowych, jak w przypadku Kolei Śląskich, tj. brak prowadzenia regularnych przewozów, linie będące łącznicami kolejowymi (poniżej 5 km), linie, dla których niezależnie od długości zarejestrowano mniej niż 10 kolizji w analizowanym okresie. Wyniki zostały przedstawione w Tabeli 5. W tabeli należy zwrócić uwagę na linie kolejowe, które składają się z dwóch odcinków tj. nr 3 i 14. Przyczyną takiego podziału linii kolejowych jest to, że zgodnie z rozkładem jazdy, pociąg zjeżdża z głównej linii kolejowej na łącznicę kolejową celem obsługi przystanku handlowego, a następnie inną łącznicą kolejową wraca na główną linię, pomijając jej krótki odcinek.

Tabela 5 Analiza występowania kolizji ze zwierzyną na poszczególnych liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Wielkopolskie

Nr linii kolejowej	Punkt początkowy odcinka linii kolejowej [km]	Punkt końcowy odcinka linii kolejowej [km]	Długość odcinka linii kolejowej [km]	Liczba kolizji na odcinku linii kolejowej	Wskaźnik liczby kolizji na 1 km linii kolejowej [liczba kolizji na 1 km linii]
3	125,632	252,953	259,996	256	1,02
	263,087	385,628			
14	112,133	162,602	123,735	128	1,08
	167,736	235,868			
271	63,062	157,933	94,871	23	0,23
272	40,917	200,903	159,986	173	1,08
281	41,877	160,056	65,456	136	1,15
353	0,000	74,382	74,382	84	1,13
354	0,000	92,538	92,538	118	1,28
356	0,000	70,904	70,904	232	3,27
357	38,858	112,182	73,324	173	2,36
359	0,000	69,654	69,654	28	0,40

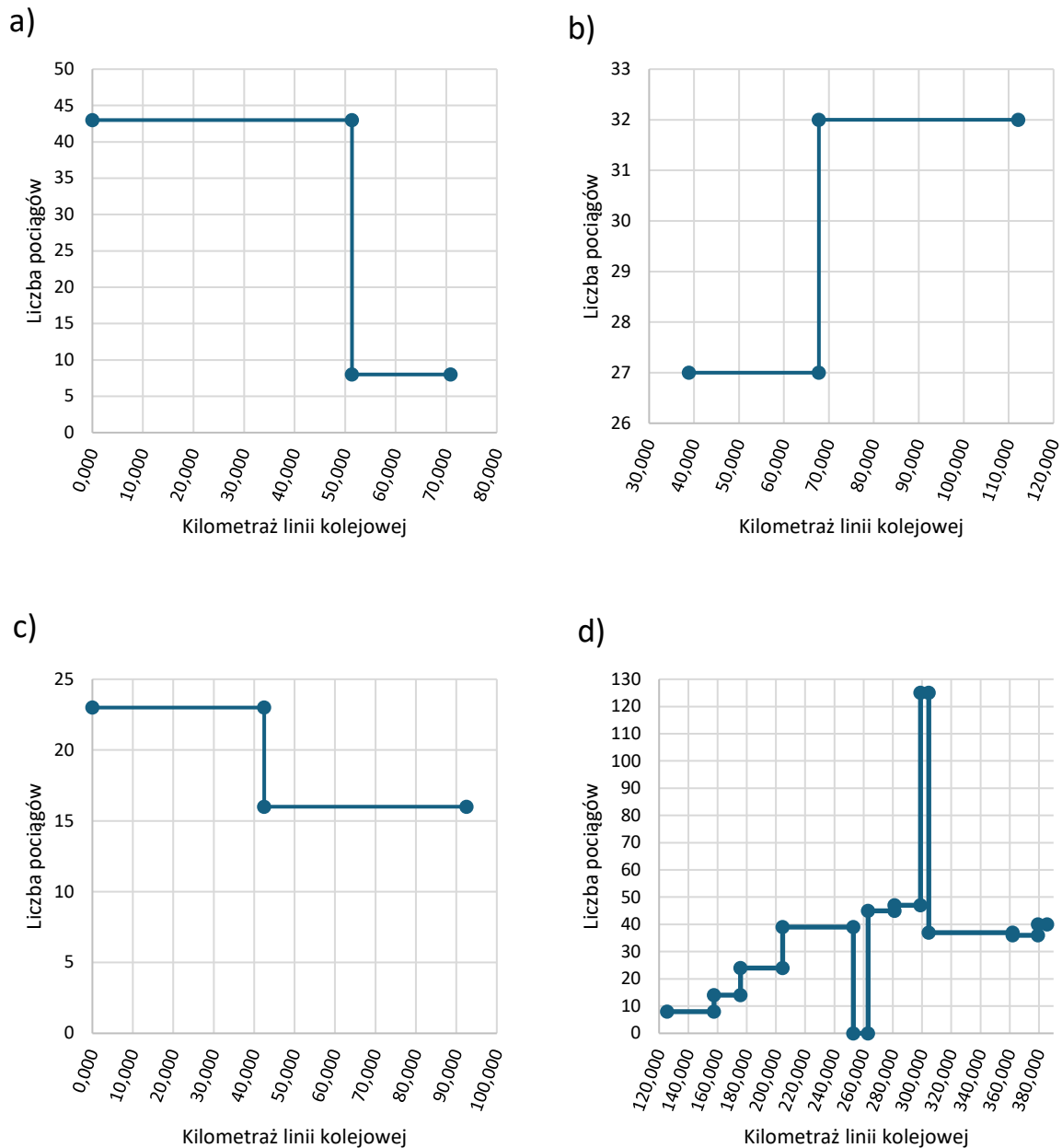
W przypadku Kolei Śląskich analiza danych dotyczących ogólnego wskaźnika kolizji dla poszczególnych linii i wskaźnika występowania kolizji na jednym km linii kolejowej pozwoliła na jednoznaczne wskazanie linii kolejowych, które powinny zostać poddane szczególnej analizie w modelu predykcyjnym. W przypadku Kolei Wielkopolskich zauważa się bardziej zbliżony, niż to miało miejsce w Kolejach Śląskich, rozkład ogólnego wskaźnika kolizji dla poszczególnych linii kolejowych (Rysunek 25) i wspomnianego wcześniej wskaźnika kolizji na 1 km linii kolejowej (Tabela 5). Do dalszych analiz wybrano linie kolejowe nr 356 i 357, które plasują się w pierwszej czwórce mając na uwadze oba wskaźniki oraz linie kolejowe nr 3 i 354, które zajęły najwyższe lokaty (nie uwzględniając wcześniej wybranych linii kolejowych nr 356 i 357) odpowiednio uwzględniając ogólny wskaźnik wystąpienia kolizji oraz wskaźnik kolizji na 1 km linii kolejowej.

Na Rysunku 26 przedstawiono wskaźnik gęstości kolizji dla poszczególnych linii kolejowych obsługiwanych przez Koleje Wielkopolskie. Tak jak w przypadku analizy wskaźnika gęstości dla Kolei Śląskich, każda linia kolejowa została podzielona na odcinki pięciokilometrowe, przy czym za punkt początkowy podziału na odcinki uznaje się punkt handlowy, w którym rozpoczyna się bieg pociągu, mając jednocześnie na uwadze rosnący kilometraż linii kolejowej oraz fakt, że ostatni odcinek stanowiący resztę podziału, jest krótszy. Najwyższy wskaźnik gęstości tj. 0,044 zarejestrowano na linii kolejowej nr 356 w kilometrach od 10,000 do 14,999. Niemniej jest to zdecydowanie mniejsza maksymalna wartość niż w przypadku Kolei Śląskich, gdzie wykazano ją na poziomie 0,075 dla linii kolejowej nr 143. Najmniejsza wartość wskaźnika gęstości ze zwierzyną na poszczególnych pięciokilometrowych odcinkach linii kolejowych występuje na linii nr 3, gdzie nie przekracza wartości 0,011. Rozkład wskaźnika gęstości kolizji z najmniejszymi odchyleniami występuje na linii nr 354. Jak wskazano w przypadku Kolei Śląskich wartości wskaźników na poszczególnych odcinkach linii kolejowych mogłyby być dodatkowo analizowane indywidualnie z uwzględnieniem warunków lokalnych tj. występowania terenów leśnych, rolniczych, zbiorników wodnych itd. Taka analiza nie jest jednak przedmiotem rozprawy doktorskiej, a jedynie pozwala na przybliżenie miejsc, które powinny być wykazane jako niebezpieczne w wynikach modelu predykcyjnego.



Rysunek 26 Wskaźnik gęstości kolizji ze zwierzyną na pięciokilometrowych odcinkach linii nr 356 (a), 357 (b), 354 (c), 3 (d)

Spółka Koleje Wielkopolskie obsługiwała około 300 pociągów dziennie w rozkładzie jazdy obejmującym okres od grudnia 2021 do grudnia 2022. Średnią liczbą pociągów, która była obsługiwana w dniu roboczym (biorąc pod uwagę okres 2020-2022) na poszczególnych odcinkach analizowanych linii kolejowych przedstawiono na Rysunku 27.



Rysunek 27 Liczba pociągów w dni robocze na poszczególnych liniach kolejowych: 356 (a), 357 (b), 354 (c), 3 (d)

Największym zróżnicowaniem pojazdów wyprawianych na poszczególne odcinki linii kolejowych charakteryzowała się linia nr 3. Szczytowa liczba pociągów tj. 125 miała miejsce w obrębie miasta Poznań, gdzie pociągi z różnych linii wjeżdżają na linię nr 3 przebiegającą

przez stację Poznań Główny. Z kolei chwilowy spadek liczby pociągów do zera był związany z pominięciem odcinka linii nr 3 poprzez łącznice kolejowe celem obsługi dodatkowego punktu handlowego, co przedstawione zostało w Tabeli 5.

Model uwzględnia rozkład pociągów w profilu dobowym. Wstępna weryfikacja danych wykazała, że w godzinach od 0:00 do 4:00 obsługiwana jest niewielka liczba pociągów stanowiąca około 2% wszystkich realizowanych połączeń. Dodatkowo zauważalne jest zwiększenie natężenia pociągów w godzinach porannego i popołudniowego szczytu, w których głównym celem przejazdów jest miejsce pracy czy kształcenia dzieci i młodzieży. Aspekt ten został szerzej opisany w podrozdziale 6.4 przedstawiającym opis modelu predykcyjnego.

Dane Kolei Wielkopolskich wykorzystane do analizy obejmują okres pandemii koronawirusa SARS-CoV-2. W czasie największych obostrzeń dotyczących swobody przemieszczania się przez osoby znajdujące się na terytorium Polski przewoźnik ograniczył częściowo realizację rozkładu jazdy. W latach 2020 i 2021 przewoźnik łącznie wyprawił odpowiednio 71 051 i 89 311 pociągów, a odwołał 11 954 i 20 133 pociągów. Liczba zawieszonych połączeń stanowiła odpowiednio ok. 17 i 23% procent obsługiwanych pociągów. Model predykcyjny nie ujmuje przedmiotowych ograniczeń w ruchu pociągów traktując je jako sytuacje nadzwyczajne.

6.4. Opis modelu predykcyjnego

W niniejszym rozdziale przedstawiono opis modelu predykcyjnego opartego o wnioskowanie bayesowskie, który został zbudowany w oparciu o konkretne dane przewoźników kolejowych tj. Kolei Śląskich oraz Kolei Wielkopolskich. Celem modelu, opracowanego przy współpracy z Instytutem Informatyki Teoretycznej i Stosowanej Polskiej Akademii Nauk, jest wyznaczenie miejsc na sieci kolejowej obsługiwanej przez przewoźników, w których prawdopodobieństwo zaistnienia kolizji ze zwierzyną osiąga wyznaczoną wartość progową. Informacja o przekroczeniu ustalonej wartości generuje ostrzeżenie, które powinno zostać wykorzystane w systemach zarządzania bezpieczeństwem np. poprzez przekazywanie ich maszynistom pojazdów trakcyjnych. Opis próbnego zastosowania modelu, na przykładzie Kolei Śląskich, został przedstawiony także w [195].

Poniższy opis przedstawia ogólne postępowanie w zakresie modelu predykcyjnego, niezależnie od sieci kolejowej czy zakresu czasowego posiadanych danych przez przewoźnika. Niemniej niektóre założenia wynikają z charakterystyki danych analizowanych przez autorkę rozprawy, na co każdorazowo zwrócona została uwaga oraz przedstawione zostały możliwości

wprowadzania zmian. Dodatkowo należy zwrócić uwagę, że do modelu można włączać nowe dane uczące, na podstawie których model będzie się uczył, a tym samym stawał się dokładniejszy i bardziej aktualny.

W nawiązaniu do powyższego na podstawie posiadanych danych z przeszłości szacowane jest prawdopodobieństwo, że dla danego dnia i danego pociągu, kolizja ze zwierzyną wydarzy się w kilometrach od x do $x + \Delta x$ linii nr l o danej porze dnia (w szczególności w przedziale czasowym od t do $t + \Delta t$), biorąc pod uwagę τ część roku (np. miesiąc).

W modelu wykorzystuje się następujące parametry:

- a. $\mu(\tau)$ – oczekiwana liczba wypadków w danym dniu, w miesiącu oznaczonym przez τ ; formalnie $\mu(\tau) = \sum k kp(k, \tau)$ gdzie k oznacza liczbę wypadków w jednym dniu, a $p(k, \tau)$ jest prawdopodobieństwem, że k wypadków wystąpi w danym dniu miesiąca τ ; jednak w omawianym przypadku, nawet jeżeli $k > 1$ różne kolizje zdarzają się zwykle w różnych odstępach czasu i zakłada się, że są one od siebie niezależne;
- b. $p(t, \Delta t | \tau)$ – prawdopodobieństwo warunkowe biorące pod uwagę, że kolizja w danym dniu miesiąca τ wystąpi w przedziale czasowym $t, t + \Delta t$;
- c. $p(l | \tau, t, \Delta t)$ – prawdopodobieństwo warunkowe zakładające, że kolizja wystąpi w danym dniu miesiąca τ , w przedziale czasu $t, t + \Delta t$, na linii nr l ;
- d. $p(x, \Delta x | \tau, t, \Delta t, l)$ – prawdopodobieństwo warunkowe, że kolizja wystąpi w danym dniu miesiąca τ , w przedziale czasu $t, t + \Delta t$, na linii kolejowej nr l , w kilometrze od x do $x + \Delta x$ tej linii.

Mając na uwadze powyżej przedstawione parametry oraz zakładając, że wypadki są od siebie niezależne, prawdopodobieństwo wypadku w danym miesiącu τ , w przedziale czasu $t, t + \Delta t$, na linii kolejowej nr l w kilometrze $x, x + \Delta x$ zostało oznaczone poniższym równaniem:

$$p(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x) = p(x, x, \Delta x | \tau, t, \Delta t, l) p(l | \tau, t, \Delta t) p(t, \Delta t | \tau) \mu(\tau) \quad (1)$$

Należy zwrócić uwagę, że model zakłada całkowitą niezależność czasowych i przestrzennych profili kolizji, co oznacza, że poszczególne analizy odbywały się odrębnie, na całym zbiorze danych. Podejście, w którym czasowy i przestrzenny profil kolizji byłby uzależniony od siebie jest możliwy, niemniej mógłby być wykorzystany w sytuacji, w której nie są zauważalne znaczące sezonowe wahania w liczbie kolizji pociągów ze zwierzyną.

Już wstępna analiza danych o potrąceniach wskazuje, że takie założenie nie powinno być przyjęte. Potwierdzenie takiego podejścia jest przedstawione w kolejnych etapach pracy, a dokładnie na Rysunku 28 i Rysunku 29. Założenie niezależności profili przestrzennych i czasowych w opisywanym przypadku modelu powoduje, że został on dodatkowo podzielony na:

- a. część przestrzenną

$$p(l, x, \Delta x) = p(x, \Delta x | l, \tau, t, \Delta t) p(l | \tau, t, \Delta t) = p(x, \Delta x | l) p(l) \quad (2)$$

- b. część czasową

$$p(\tau, t, \Delta t) = p(t, \Delta t | \tau) \mu(\tau) \quad (3)$$

Biorąc pod uwagę powyższe założenia, prawdopodobieństwo, że dany pociąg weźmie udział w kolizji ze zwierzyną to:

$$p_{pt}(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x) = \frac{p(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x)}{m(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x)} = \frac{p(\tau, t, \Delta t) p(l, x, \Delta x)}{m(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x)} \quad (4)$$

Gdzie $m(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x)$ oznacza liczbę pociągów, które przejeżdżają przez odcinek (od x do $x + \Delta x$) linii nr l w przedziale czasowym od t do $t + \Delta t$ w danym miesiącu τ .

W przypadku, w którym:

$$p_{pt}(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x) > p_{(progowe)} \quad (5)$$

zostanie zgłoszona informacja, w wyniku której dany segment linii zostanie oznaczony ostrzeżeniem. Należy zwrócić uwagę, że wartość progowa może zostać indywidualnie wyznaczona przez przewoźnika kolejowego, nawet odrębnie dla konkretnej linii kolejowej. Zwiększanie wartości progowych powoduje ograniczenie liczby ostrzeżeń generowanych przez model. Ma to związek z tym, że prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji, zgodnie z Równaniem (5) musi być wyższe niż wyznaczona wartość progowa.

Ze względu na zakres posiadanych danych uczących, który dla każdej ze spółek obejmuje okres 3 lat, nie zdecydowano się na rozróżnianie w modelu podziału na poszczególne dni miesiąca. W zakresie czasu wykorzystano istotniejszy parametr, jakim jest profil dzienny uzależniony od widoczności w konkretnych porach roku (lato, zima oraz wspólnie wiosna i jesień). Ponadto w przestrzenno-czasowym modelu wypadków przyjęty został określony rozmiar okna czasowego Δt i okna przestrzennego Δx , które również w sposób indywidualny mogą być określane przez użytkowników modelu.

Pseudokod przedstawiający schemat obliczania ostrzeżeń, zgodnie z powyżej wskazanymi założeniami modelu, znajduje się w poniżej opisanej Procedurze nr 1 BayesWarnAnimal. W tym zakresie należy zwrócić uwagę, że procedura umożliwi zarówno obliczanie, jak i aktualizowanie ostrzeżeń poprzez dostarczenie nowych zestawów danych uczących. Pseudokod, utworzony w języku programowania Python, został przedstawiony w oryginalnym języku tj. angielskim, który został wykorzystany do tworzenia modelu.

Procedura nr 1 BayesWarnAnimals do aktualizacji ostrzeżeń na wybranej linii nr l w miesiącu τ , w okresie $[t, t + \Delta t)$. Procedura wymaga wstępnych oszacowań prawdopodobieństw warunkowych, które mogą być aktualizowane za pomocą danych o nowych kolizjach.

Input: probability $p_{progowe}$, line l , month τ , time period $[t, t + \Delta t)$

for $x_i = x_0$ to x_f step Δx **do**

$\mu(\tau) \leftarrow$ calculated from data {Estimate μ for particular day of the given month τ }

$p(\tau, t, \Delta t) \leftarrow$ calculated from data {Estimate p for the particular day of the given month τ and time of the day range $[t, t + \Delta t)$ }

$p(l) \leftarrow$ calculated from data {Estimate p for given line l }

$p(l, x, \Delta x) \leftarrow$ calculated from data {Estimate p for the given kilometre posts on line l }

$m(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x) \leftarrow$ from timetable {Number of trains at particular kilometer posts of line l at the particular day in month τ in time interval $[t, t + \Delta t)$ }

$p_{pt}(\tau, t, \Delta t, x_i, \Delta x) \leftarrow p_{pt}(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x) = \frac{p(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x)}{m(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x)} = \frac{p(\tau, t, \Delta t)p(l, x, \Delta x)}{m(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x)}$

if $p_{pt} > p_{progowe}$ **then**

$w(x_i) \leftarrow 1$

else

$w(x_i) \leftarrow 0$

end if

end for

6.5. Implementacja i weryfikacja modelu na przykładzie Kolei Śląskich i Kolei Wielkopolskich

W niniejszym podrozdziale została przedstawiona implementacja modelu dotyczącego przewidywania miejsca i czasu występowania kolizji pociągów ze zwierzyną. W opisie zawarto przyjęte szczegółowe założenia, jak również kolejne kroki – obliczenia, które należy wykonywać zgodnie z zaprezentowanym w poprzednim podrozdziale opisem modelu. Przeanalizowane zostały również wyniki modelu, które zostały następnie zweryfikowane na podstawie pozyskanych danych testowych obejmujących okres od stycznia do kwietnia 2023 r.

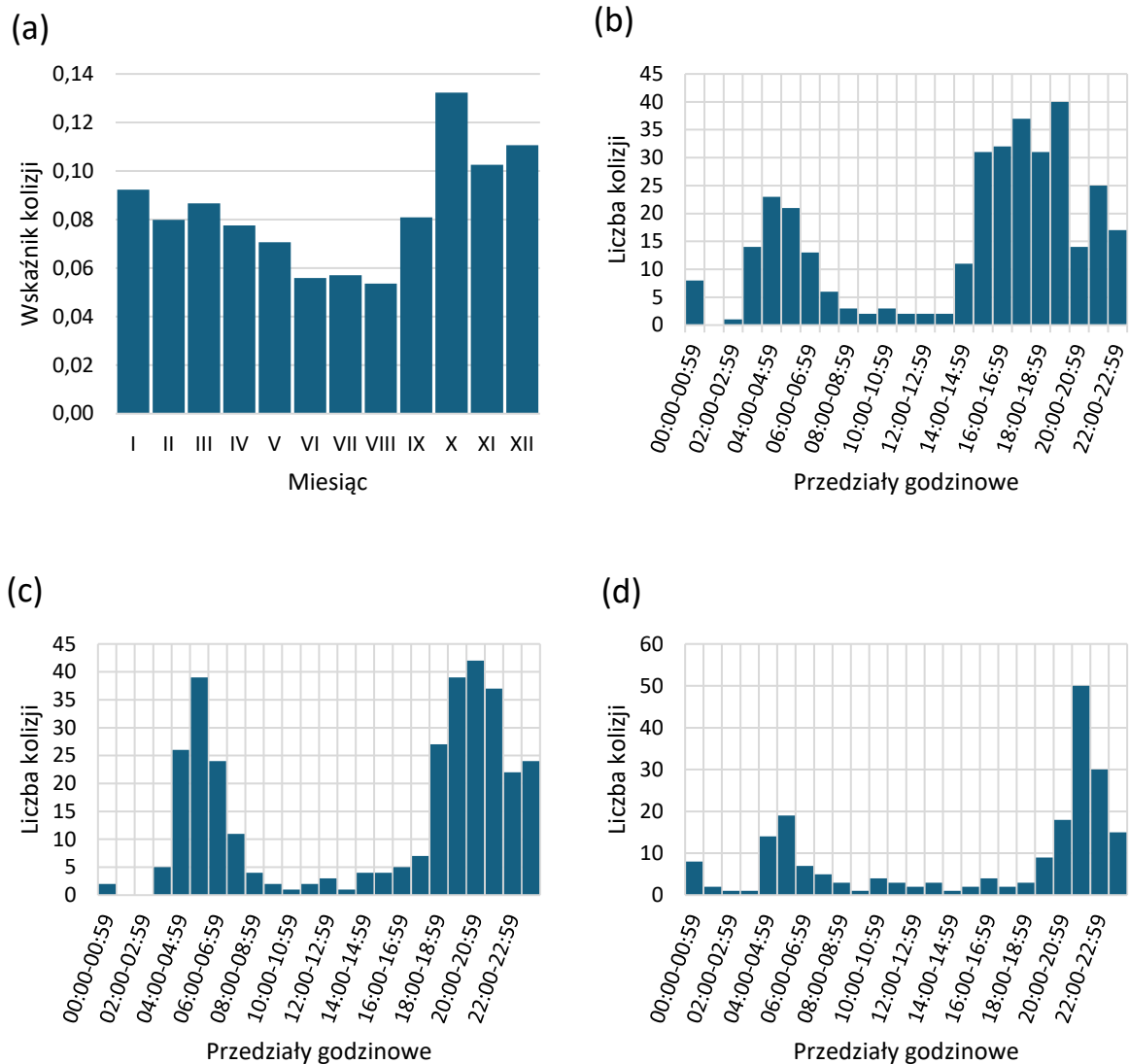
Niech D będzie liczbą dni, w których gromadzone były dane, a N liczbą wypadków w zadanej liczbie dni. Ponadto niech τ określa okres profilu sezonowego, w przypadku

niniejszej analizy miesiąc ($\tau_{total} = 12$ profili miesięcznych). Na tej podstawie możliwe jest oszacowanie $\mu(\tau)$:

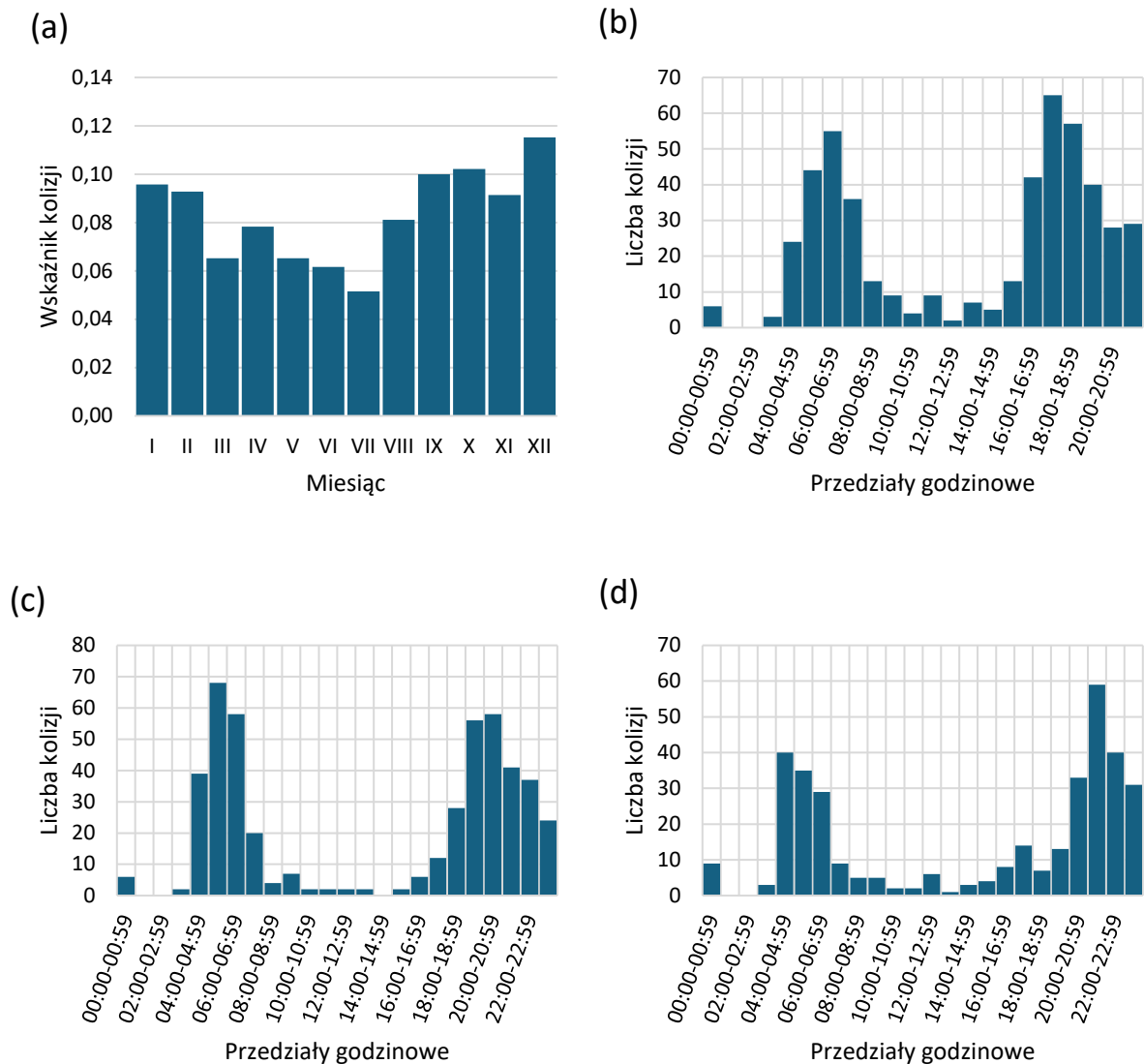
$$\mu(\tau) = \frac{N_{\tau}}{\frac{D}{\tau_{total}}} \quad (6)$$

W przedstawionym powyżej Równaniu (6) N_{τ} jest liczbą wypadków, która zarejestrowana została w miesiącu τ , a $\frac{D}{\tau_{total}}$ jest (przybliżoną) liczbą dni w danym miesiącu, co w przedstawianym modelu kształtuje się w następujący sposób: $D = 365$, a $\frac{D}{\tau_{total}} \approx 30$.

Celem oszacowania $p(\tau, t, \Delta t)$ miesiące grupowane są w sezony określone przez T_i na podstawie profili czasowych kolizji pociągów ze zwierzyną dla Kolei Śląskich (Rysunek 28) i Kolei Wielkopolskich (Rysunek 29).



Rysunek 28 Roczny (a) oraz miesięczny: XI-XII i I-II (b), IX-X i III-IV (c), V-VIII (d) rozkład kolizji pociągów Kolei Śląskich ze zwierzyną w okresie 2020-2022



Rysunek 29 Roczny (a) oraz miesięczny: XI-XII i I-II (b), IX-X i III-IV (c), V-VIII (d) rozkład kolizji pociągów Kolei Wielkopolskich ze zwierzyną w okresie 2020-2022

Profile czasowe są powiązane z długością pory dziennej i nocnej w poszczególnych miesiącach, co przekłada się również na występowanie kolizji pojazdów przewoźników kolejowych ze zwierzyną. Zauważono, że liczba kolizji w porach, w których występuje światło słoneczne, jest mniejsza niż w godzinach w porze wieczornej i nocnej. Wyniki przedstawione na Rysunku 28 i Rysunku 29 potwierdzają również analizę zaprezentowaną w [119] w zakresie większej liczby kolizji w miesiącach późno jesiennych i zimowych niż w okresie letnim. W nawiązaniu do tego wskazano okresy roku, które będą rozróżniane w modelu predykcyjnym:

- a. krótki okres światła dziennego (miesiące: listopad, grudzień, styczeń, luty)
 $T_1 \in \{XI, XII, I, II\}$,

- b. długi okres światła dziennego (miesiące: maj, czerwiec, lipiec, sierpień)
 $T_2 \in \{V, VI, VII, VIII\}$,
- c. średni okres światła dziennego (miesiące: marzec, kwiecień, wrzesień, październik)
 $T_3 \in \{III, IV, IX, X\}$.

Następnie skupiono się na odpowiednim ujęciu profilu godzinnego potrąceń zwierzyny przez pociągi tak, aby model analizował tylko wybrany przez użytkownika przedział godzinowy. Mając to na uwadze przez N^{Ti} oznaczono liczbę wypadków w i -tym sezonie, a przez $N_{t,t+\Delta t}^{Ti}$ liczbę kolizji odnotowanych w i -tym sezonie w przedziale godzinowym od t do $t + \Delta t$. W obliczeniach wykonywanych na potrzeby niniejszej rozprawy doktorskiej zakłada się, że $\Delta t = 1$, więc potrącenia zwierzyny są analizowane w przedziałach 1 godziny. Na podstawie przedstawionych warunków wypracowane zostało poniższe równanie prawdopodobieństwa.

$$p(\tau, t, \Delta t) = \frac{N_{t,t+\Delta t}^{(T)i}}{N^{(T)i}} \text{ przy założeniu, że } \tau \in T_i \quad (7)$$

Podkreślając aspekt, że profile czasowe oraz przestrzenne są od siebie niezależne, można oszacować, że:

$$p(l) = \frac{N_l}{N} \quad (8)$$

gdzie N_l jest liczbą wypadków na linii l . Następnie należy oszacować $p(l, x, \Delta x)$ przez:

$$p(l, x, \Delta x) = \frac{N_{x,\Delta x}^{(l)}}{N_l} \quad (9)$$

gdzie $N_{x,\Delta x}^{(l)}$ to liczba wypadków na linii l między kilometrażem x oraz $x + \Delta x$ linii kolejowej. Tak jak w przypadku wcześniej przedstawionych analiz statystycznych (Rysunek 22 i Rysunek 26) w modelu zakłada się badanie odcinków o długości 5 km. W związku z tym $\Delta x = 5$.

Odnosząc się do wcześniej przedstawionego Rysunku 23 (Koleje Śląskie) oraz Rysunku 27 (Koleje Wielkopolskie) liczba wyprawianych pociągów jest zróżnicowana pomiędzy liniami kolejowymi, jak również ich poszczególnymi odcinkami. Z tego względu aspekt ten zostanie również zaimplementowany do modelu. Liczba pociągów na poszczególnych liniach kolejowych oraz w wybranym kilometrażu jest oznaczona jako $m(l, x, \Delta x)$. W tym przypadku zakładany jest brak zmienności sezonowej, jak również przyjęto uproszczenie, w którym nie wskazuje się rozróżnienia w liczbie wyprawianych pociągów w poszczególnych dniach

tygodnia. Jak już wcześniej wspomniano dane dotyczące liczby pociągów odnoszą się do dnia roboczego, a analiza obsługiwanych pociągów brała pod uwagę dzień roboczy z rocznego rozkładu jazdy dla przewoźników, przy czym uwzględniono średnią dla lat 2020-2022. W związku z tym przyjęto poniższe założenie:

$$m(t, \Delta t, l, x, \Delta x) = m(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x) = m(l, x, \Delta x)\alpha(t, \Delta t) \quad (10)$$

gdzie $\alpha(t, \Delta t)$ jest profilem czasowym uwzględniającym godziny szczytu rannego i popołudniowego, godziny mniejszego natężenia ruchu kolejowego oraz nocną, prawie całkowitą przerwę w kursowaniu pociągów.

Mając na uwadze prowadzone odrębne analizy w zakresie rozkładów jazdy dla przewoźników kolejowych opracowano osobne profile czasowe wyprawianych pociągów. Równanie (11) przedstawia wyniki uzyskane dla Kolei Śląskich, a Równanie (12) dla Kolei Wielkopolskich.

$$\alpha(t, \Delta t) \begin{cases} 0,05/(4\Delta t) & \text{jeżeli } 0 \leq t < 4 \\ 0,4/(6\Delta t) & \text{jeżeli } 6 \leq t < 9 \vee 15 \leq t < 18 \\ 0,55/(14\Delta t) & \text{jeżeli } 4 \leq t < 6 \vee 9 \leq t < 15 \vee 18 \leq t < 0 \end{cases} \quad (11)$$

Powyższe założenia wynikają z analizy rozkładu jazdy Kolei Śląskich. W godzinach szczytu porannego i popołudniowego tj. 6:00 – 9:00 oraz 15:00 – 18:00 obsługiwanych jest 40% pociągów przewoźnika. Ponadto analiza wykazała, że w porze nocnej 00:00 do 3:00 realizowanych jest tylko 5% pociągów. Pozostałe pociągi (55%) zostały zaliczone jako inne przypadki w tzw. godzinach pozaszczytowych.

$$\alpha(t, \Delta t) \begin{cases} 0,02/(4\Delta t) & \text{jeżeli } 0 \leq t < 4 \\ 0,38/(6\Delta t) & \text{jeżeli } 6 \leq t < 9 \vee 15 \leq t < 18 \\ 0,60/(14\Delta t) & \text{jeżeli } 4 \leq t < 6 \vee 9 \leq t < 15 \vee 18 \leq t < 0 \end{cases} \quad (12)$$

W przypadku Kolei Wielkopolski przyjęto inny profil czasowy uruchamianych pociągów, co wynika z rozkładów jazdy przewoźnika. W godzinach szczytu porannego i popołudniowego w ruchu znajduje się 38% pociągów, w godzinach nocnych 2%, a pozostałe 60% zostało zakwalifikowanych do grupy określonej przez godziny pozaszczytowe.

Mając na uwadze powyżej przedstawione opisy i założenia, na tym etapie możliwe jest skorzystanie z Równania (4), aby obliczyć prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji pociągu ze zwierzyną biorąc pod uwagę parametry $\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x$.

Poniżej został przedstawiony przykład obliczeniowy dla modelu predycyjnego. Przedstawia on wykorzystanie Procedury nr 1 BayesWarnAnimals do wskazania prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji pociągu ze zwierzyną na linii kolejowej nr 140 obsługiwanej przez Koleje Śląskie w kilometrażu od 15,000 do 19,999. Rozważany przykład dotyczy występowania wydarzeń związanych z potrąceniem zwierzyny w godzinach od 18:00 do 18:59 w styczniu.

Tabela 6 Przykładowe dane wejściowe niezbędne do zastosowania Procedury nr 1 BayesWarnAnimals

Oznaczenie	Opis	Wartość
N	Liczba kolizji zarejestrowanych w okresie 2020-2022	877
$N_{\tau} = I$	Liczba kolizji zarejestrowanych w styczniu (I)	81
$N^{(T_1)}$	Liczba kolizji zarejestrowanych w okresie listopad - luty (XI, XII, I, II)	338
$N_{19,19+1}^{(T_1)}$	Liczba kolizji zarejestrowanych okresie listopad – luty (XI, XII, I, II) w godzinach 18:00 – 18:59	31
$N_{l=140}$	Liczba kolizji zarejestrowanych na linii kolejowej nr 140	157
$N_{15,15+5}^{(l=140)}$	Liczba kolizji zarejestrowanych na linii kolejowej nr 140 w kilometrze od 15,000 do 19,999	21
$m(l = 140, 15, 20)$	Liczba pociągów przejeżdżających w ciągu dnia roboczego przez linię kolejową nr 140 w kilometrze od 15,000 do 19,999	38

Korzystając z danych przedstawionych w Tabeli 6 i wykonując kroki zawarte w Procedurze nr 1 BayesWarnAnimals, ostrzeżenia są obliczane w następujący sposób:

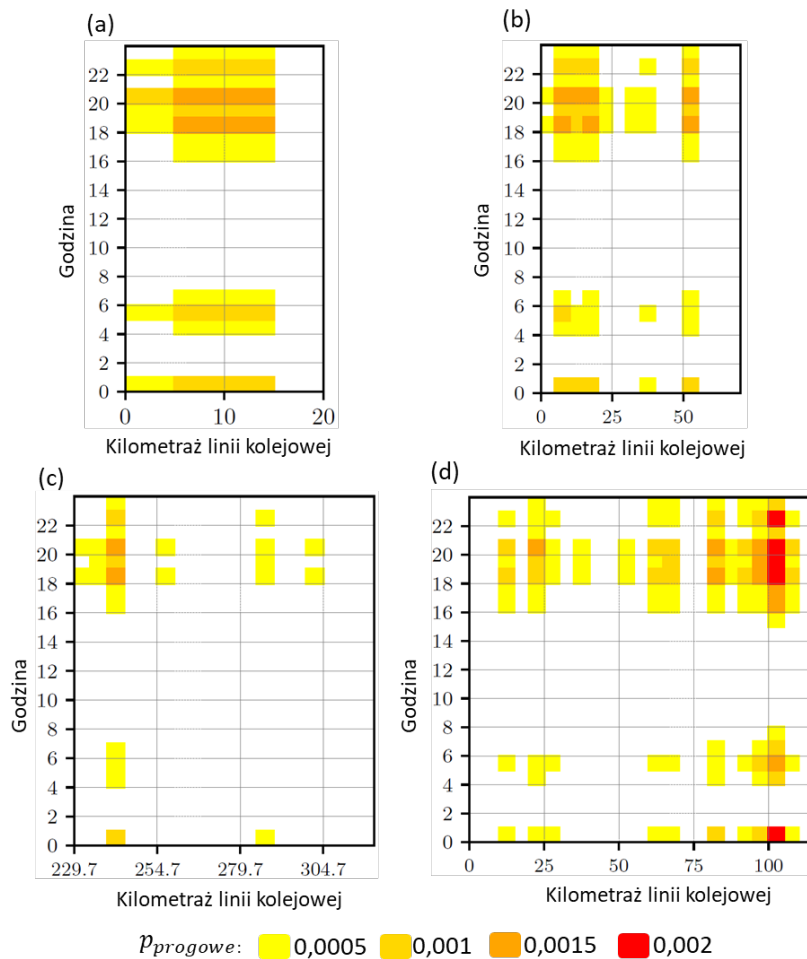
1. Oszacowanie $\mu(\tau)$ przy użyciu Równania (6). Dla stycznia (I) zarejestrowano 89 przypadków kolizji, co wskazuje na prawdopodobieństwo $\mu(\tau) \approx 0,89$.
2. Oszacowanie $p(\tau, t, \Delta t)$ w okresie $T_1 \in \{XI, XII, I, II\}$, w przedziale godzinowym $t = 18$ i $\Delta t = 1$. Z Równania (7) wynika, że $p(t, \Delta t|\tau) \approx 0,092$.
3. Oszacowanie $p(l)$ dla linii kolejowej $l = 140$. Wykorzystując Równanie (8) prawdopodobieństwo $p(l) \approx 1,8$.
4. Oszacowanie $p(l, x, \Delta x)$ dla linii kolejowej $l = 140$ w kilometrażu $x = 15$ i $\Delta x = 5$. Z Równania (9) wynika, że prawdopodobieństwo $p(x, \Delta x|l) \approx 0,133$.

5. Z Równania (2) oraz Równania (3) otrzymujemy odpowiednio prawdopodobieństwo dla części przestrzennej $p(x, \Delta x, l) \approx 0,024$ oraz czasowej $p(\tau, t, \Delta t) \approx 0,081$.
6. Na linii kolejowej $l = 140$ w kilometrażu $x = 15$ i $\Delta x = 5$ w dzień roboczy przejeżdża $m = 38$ pociągów spółki, wykorzystując Równanie (10) oraz warunek zawarty w Równaniu (11) dla godzin pozaszczytowych $m(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x) \approx 38 \cdot \frac{0,55}{14} \approx 1,49$.
7. Z Równania (4) wyliczone zostaje prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji $p_{pt}(\tau, t, \Delta t, l, x, \Delta x) \approx 0,0013$
8. Uwzględniając, że $p_{progowe} = 0,001$ i mając na uwadze Równanie (5) ostrzeżenie o możliwości kolizji zostanie wydane, ponieważ $p_{pt} > p_{progowe}$, a co z tym związane $w(x_i = 15) = 1$.

Należy zwrócić uwagę, że poszczególne kroki z Procedury nr 1 BayesWarnAnimals mogą być zrealizowane bez wsparcia oprogramowania obliczeniowego. Niemniej uruchomienie skryptu przygotowanego w języku programowania Python pozwala na szybsze przetwarzanie danych oraz uzyskanie kompleksowych wyników dla interesujących użytkownika linii kolejowych. Ponadto utworzony model posiada możliwość automatycznego generowania wykresów, które wskazują lokalizacje na liniach kolejowych, w których została przekroczona określona wartość progowa prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji ze zwierzyną.

Poniżej zaprezentowane są wyniki implementacji modelu w postaci wygenerowanych wykresów, dla przykładowo wybranych linii kolejowych omówionych w podrozdziałach 6.2 (Koleje Śląskie) oraz 6.3 (Koleje Wielkopolskie). Mapy ostrzeżeń zostały utworzone na podstawie danych uczących z okresu 2020-2022, z kolei weryfikacja modelu została przeprowadzona z wykorzystaniem zestawu rzeczywistych danych testowych z okresu styczeń – kwiecień 2023 r.

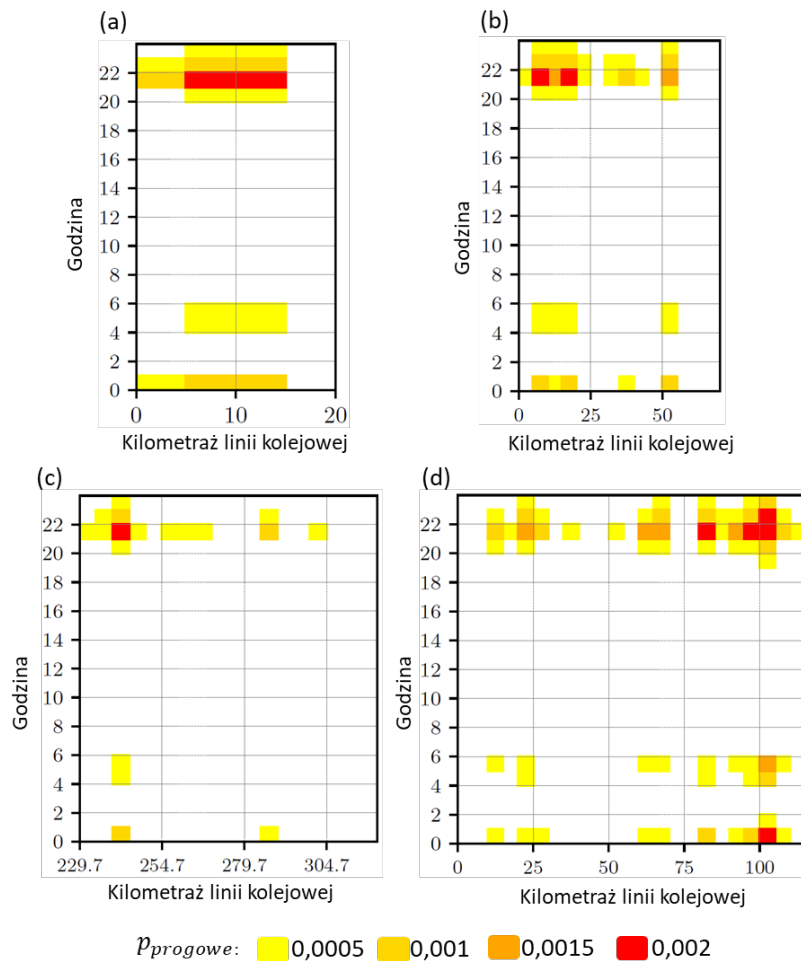
W przypadku Kolei Śląskich szczegółowej analizie poddano linie kolejowej nr 143, 1, 140, 139. Na Rysunku 30 i Rysunku 31 przedstawiono mapy ostrzeżeń utworzone w oparciu o Procedurę nr 1 BayesWarnAnimals dla stycznia (okres T_1 z krótkim okresem światła dziennego) oraz czerwca (okres T_2 z długim okresem światła dziennego). Dla wykresów automatycznie generowanych z wykorzystaniem Procedury nr 1 BayesWarnAnimals powierzchnia pojedynczej figury obejmuje odcinek o długości 5 km w przedziale 1 godziny.



Rysunek 30 Ostrzeżenia w styczniu (I) w zakresie prawdopodobieństwa kolizji pojazdu kolejowego ze zwierzyną przy uwzględnieniu różnych wartości progowych wydawanego ostrzeżenia dla linii kolejowych nr 143 (a), 140 (b), 1 (c), 139 (d)

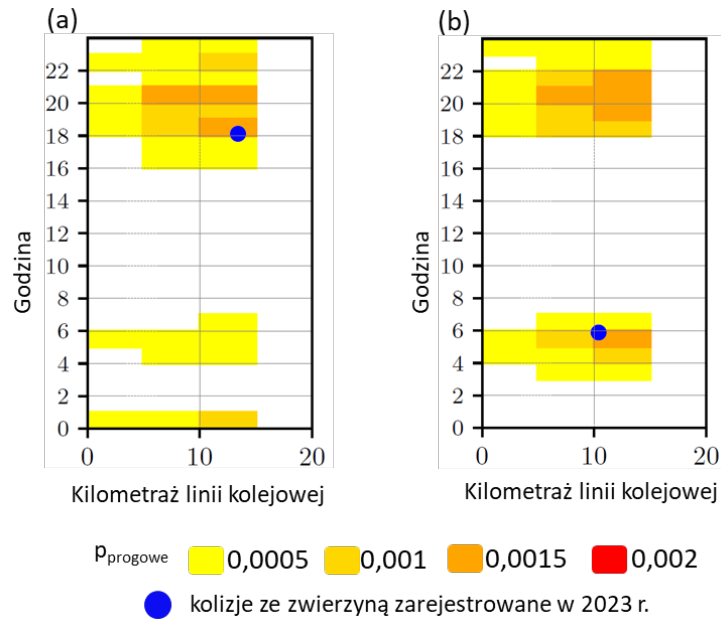
Na podstawie Rysunku 30 i Rysunku 31 można wyraźnie zauważyć, niezależną od miesiąca wybranego do badań, powtarzalność lokalizacji, w których występuje największe prawdopodobieństwo wystąpienia potrącenia zwierzyny. Przy czym zauważa się różnicę w godzinowym rozkładzie wydawanych ostrzeżeń dla stycznia oraz czerwca. Należy zwrócić uwagę na potwierdzenie korelacji potrąceń zwierzyny z długością pory dziennej w poszczególnych miesiącach oraz ruchami migracyjnymi zwierzyny począwszy od godzin, w których zapada zmierzch, aż do godzin wczesnego poranka, kiedy następuje wschód słońca. Przedstawione mapy ostrzeżeń można porównać też z Rysunkiem 22, gdzie przedstawiona jest gęstość kolizji ze zwierzyną na poszczególnych pięciokilometrowych odcinkach linii kolejowych. W tym zakresie obserwuje się pokrycie odcinków o najwyższej gęstości potrąceń z mapami ostrzeżeń. Interesujący jest fragment linii kolejowej nr 139 od kilometra 100,000 do 104,999, gdzie gęstość prawdopodobieństwa kolizji nie jest duża, ale relatywnie niska liczba

pojazdów kolejowych przejeżdżających przez ten punkt (24 pociągi) znacząco wpływa na wydanie ostrzeżenia przez algorytm.

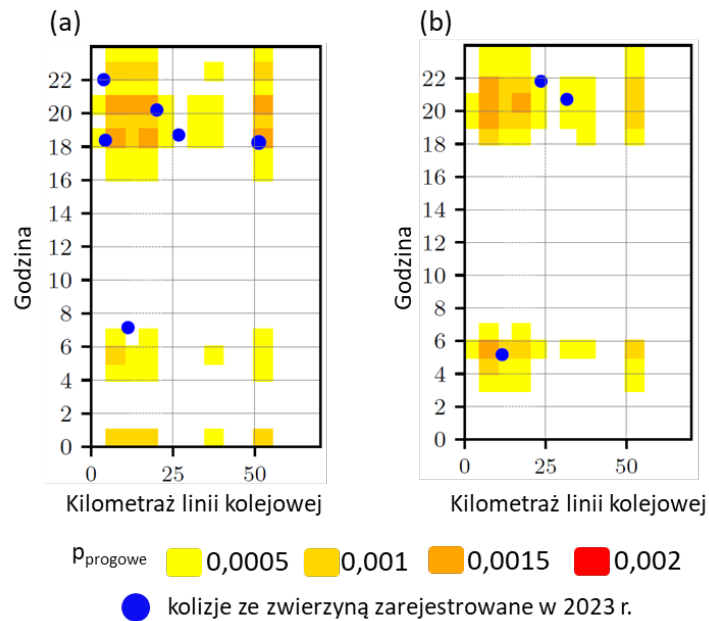


Rysunek 31 Ostrzeżenia w czerwcu (VI) w zakresie prawdopodobieństwa kolizji pojazdu kolejowego ze zwierzyną przy uwzględnieniu różnych wartości progowych wydawanego ostrzeżenia dla linii kolejowych nr 143 (a), 140 (b), 1 (c), 139 (d)

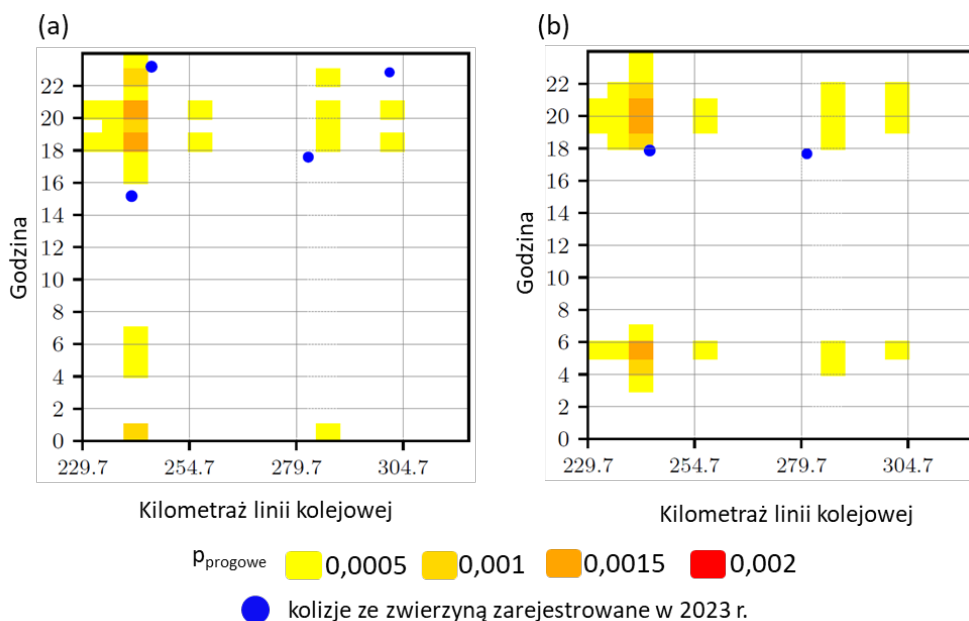
Na Rysunkach 32 – 35 przedstawiono weryfikację modelu dla wybranych linii kolejowych obsługiwanych przez Koleje Śląskie, przy czym dla każdej linii sprawdzenie odbyło się na przykładzie dwóch losowo wybranych miesięcy, dla których posiadano dane testowe tj. z okresu styczeń – kwiecień 2023 r. Lokalizacje potrąceń z roku 2023 r. oznaczane są na mapach ostrzeżeń niebieskim punktem. Przy czym rozmiar punktu jest powiązany z liczbą pociągów przejeżdżających przez daną lokalizację (Rysunek 23) – im mniejsza liczba pociągów, tym większym rozmiar punktu. Celem takiego zobrazowania jest podkreślenie, że im mniejsza jest liczba pociągów, tym bardziej dana kolizja powiązana jest ze specyfiką migracji zwierząt a mniej ze statystyczną prawidłowością.



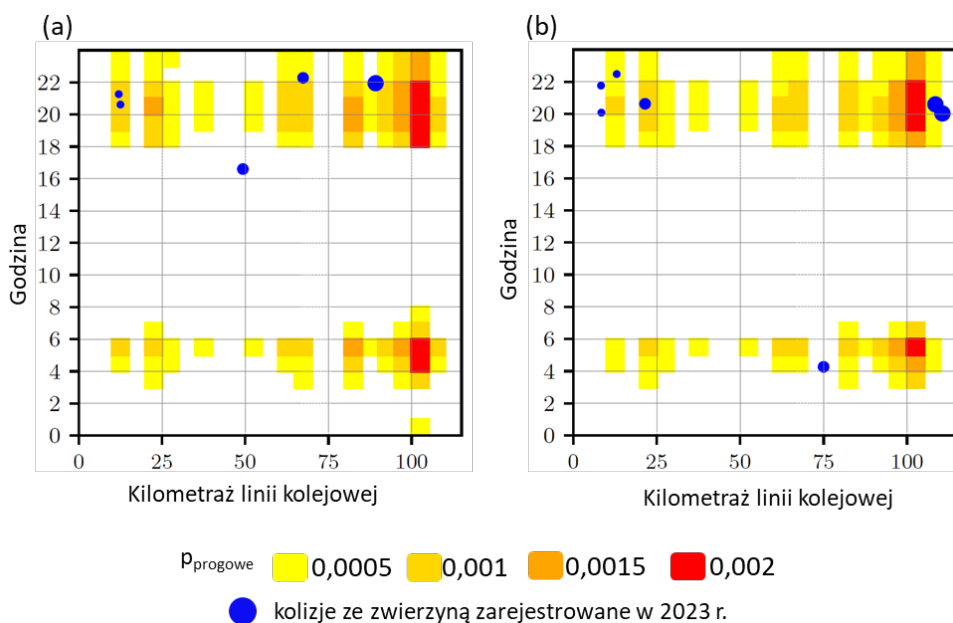
Rysunek 32 Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 143 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w lutym (a) i kwietniu (b)



Rysunek 33 Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 140 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w styczniu (a) i kwietniu (b)



Rysunek 34 Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 1 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w styczniu (a) i marcu (b)

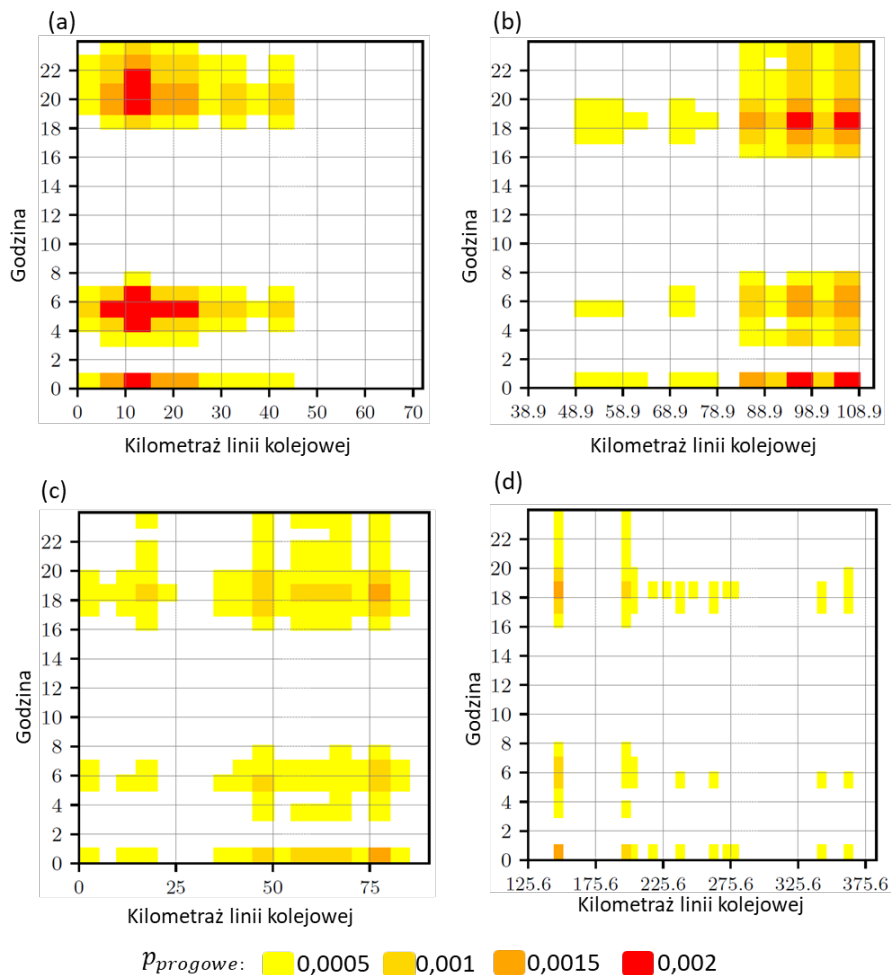


Rysunek 35 Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 139 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w marcu (a) i kwietniu (b)

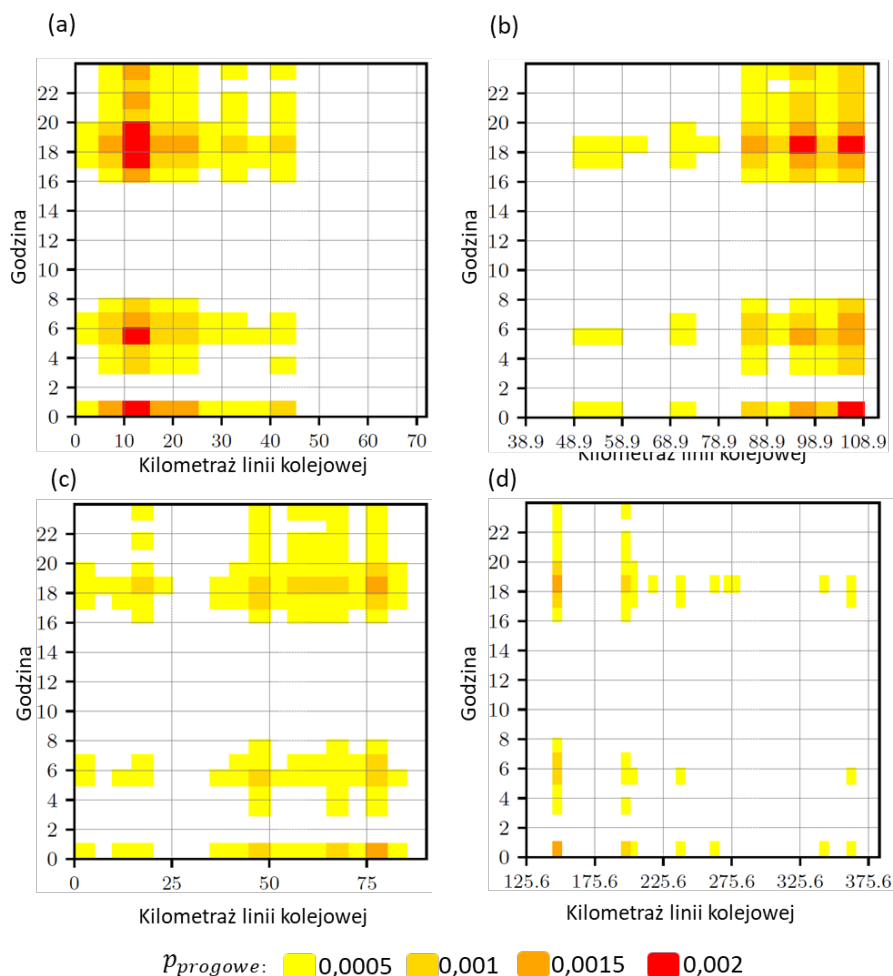
W oparciu o przedstawione mapy ostrzeżeń można stwierdzić, że lokalizacja kolizji z zestawu danych weryfikacyjnych (styczeń – kwiecień 2023 r.) pokrywa się w dużej mierze z lokalizacjami, dla których wydano ostrzeżenie lub znajdują się w ich pobliżu. Takie wyniki

osiągnięto niezależenie od zakłóceń występujących w danych uczących, które obejmują okres pandemii koronawirusa SARS-CoV-2.

Analogiczny proces w zakresie wyznaczenia map ostrzeżeń przeprowadzono dla sieci kolejowej eksploatowanej przez Koleje Wielkopolskie. Na Rysunku 36 i Rysunku 37 przedstawiono ostrzeżenia odpowiednio dla kwietnia (okres T_3 ze średnim okresem światła dziennego) oraz listopada (okres T_2 z długim okresem światła dziennego). Podobnie jak w przypadku Kolei Śląskich, pomiędzy Rysunkiem 36 i Rysunkiem 37 dostrzegalna jest różnica w godzinowym rozkładzie prawdopodobieństwa wystąpienia sytuacji potrącenia zwierzyny, co wynika bezpośrednio z długości pory dziennej i nocnej, która wpływa na rozkład dobowych migracji zwierzyny.

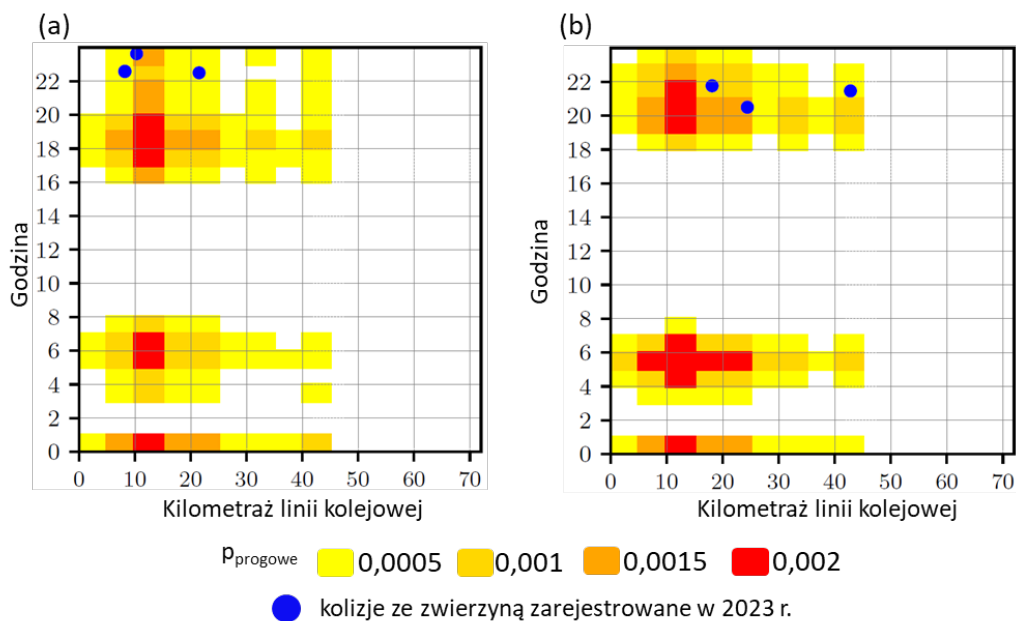


Rysunek 36 Ostrzeżenia w kwietniu (IV) w zakresie prawdopodobieństwa kolizji pojazdu kolejowego ze zwierzyną przy uwzględnieniu różnych wartości progowych wydawanego ostrzeżenia dla linii kolejowych nr 356 (a), 357 (b), 354 (c), 3 (d)

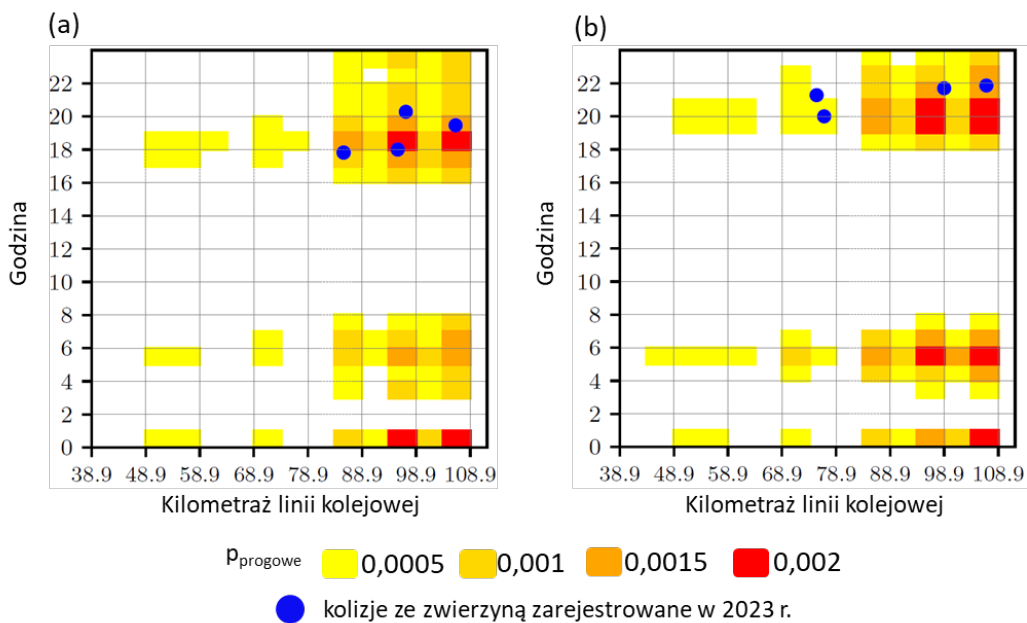


Rysunek 37 Ostrzeżenia w listopadzie (XI) w zakresie prawdopodobieństwa kolizji pojazdu kolejowego ze zwierzyną przy uwzględnieniu różnych wartości progowych wydawanego ostrzeżenia dla linii kolejowych nr 356 (a), 357 (b), 354 (c), 3 (d)

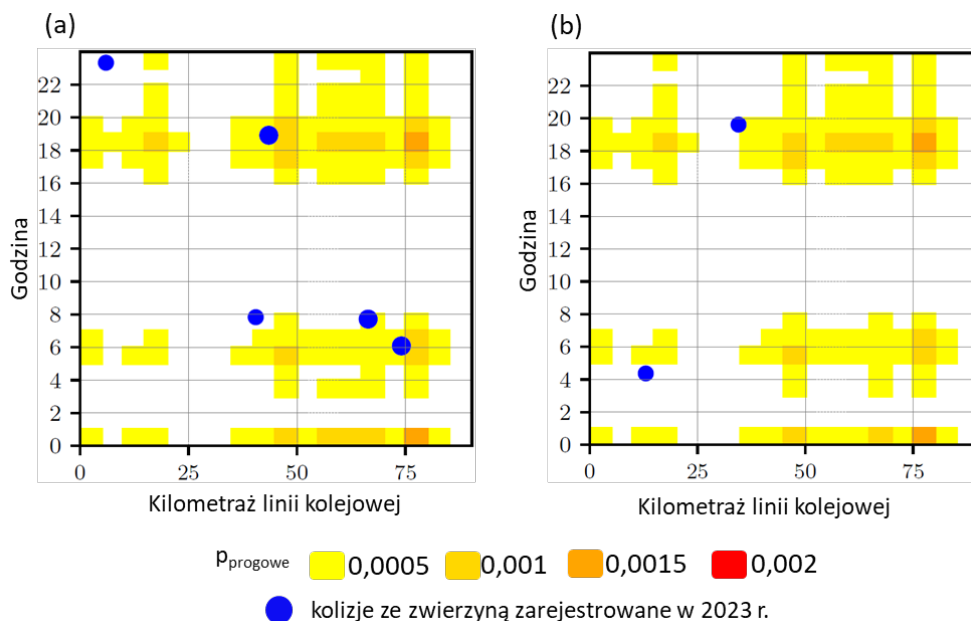
Weryfikacja modelu została zrealizowana na przykładzie czterech linii kolejowych, dla których ostrzeżenia o możliwości wystąpienia kolizji ze zwierzyną zostały już przedstawione na Rysunku 36 i Rysunku 37 tj. linii 356, 357, 354 i 3. Oznaczone kolizje z roku 2023 na Rysunkach 38-41 pokrywają się lub zlokalizowane są w bliskim sąsiedztwie miejsc, dla których wydane zostały ostrzeżenia dla różnych wartości progowych prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji. Wśród omawianych map można zauważyć różnice w wydawanych ostrzeżeniach. Linia kolejowa nr 356 (Rysunek 38) pod względem możliwości wystąpienia kolizji ze zwierzyną jest najbardziej niebezpieczna, ponieważ zarejestrowano tam najwięcej ostrzeżeń w kolorze czerwonym, których wydanie wymaga przekroczenia najwyższej wartości progowej prawdopodobieństwa.



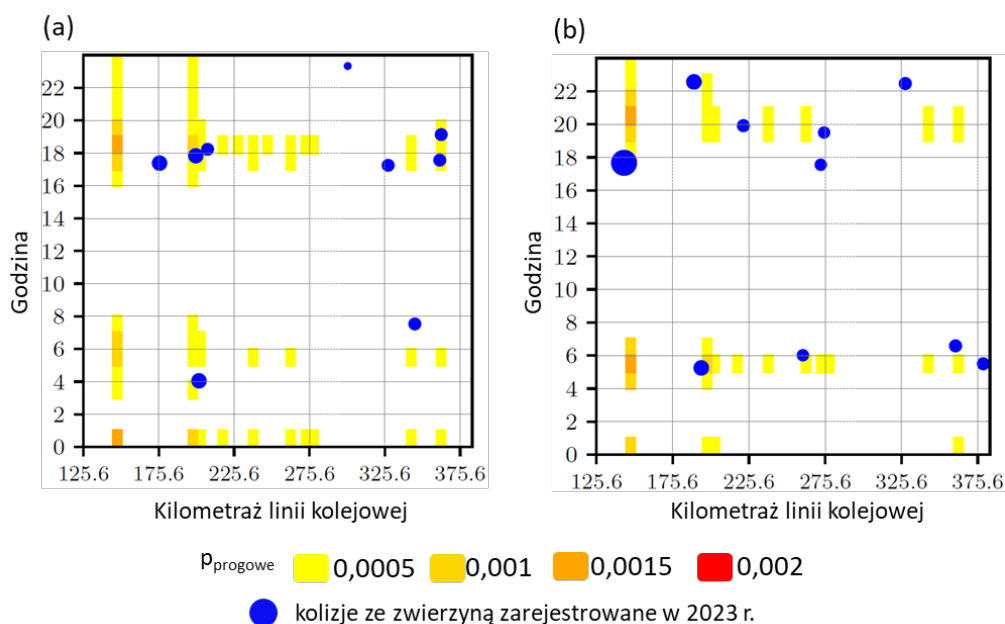
Rysunek 38 Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 356 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w lutym (a) i kwietniu (b)



Rysunek 39 Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 357 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w lutym (a) i kwietniu (b)



Rysunek 40 Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 354 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w styczniu (a) i lutym (b)



Rysunek 41 Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 3 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w styczniu (a) i marcu (b)

Dalsza weryfikacja modelu została przeprowadzona w aspekcie jego skuteczności, przy czym skuteczność ta rozumiana jest jako udział procentowy potrąceń ze zbioru danych testowych w obszarze (uwzględniając czas i lokalizację) zgodnym z wydanymi ostrzeżeniami dla wartości progowej 0,0005. Wyniki przedmiotowej weryfikacji zostały przedstawione w Tabeli 7 i Tabeli 8.

Tabela 7 Weryfikacja modelu predykcji potrąceń zwierzyny przez pociągi (Koleje Śląskie)

		Minuty +/-		
		0	20	40
Kilometry +/-	0	39%	46%	49%
	2	59%	64%	69%
	4	59%	66%	73%

Tabela 8 Weryfikacja modelu predykcji potrąceń zwierzyny przez pociągi (Koleje Wielkopolskie)

		Minuty +/-		
		0	20	40
Kilometry +/-	0	43%	48%	52%
	2	48%	56%	60%
	4	49%	58%	62%

Weryfikacja modelu została wykonana przy założeniu różnych tolerancji zgodności wydanych ostrzeżeń z danymi testowymi. Przy braku wprowadzenia jakiegokolwiek korekty skuteczność modelu wyniosła odpowiednio 39% dla Kolei Śląskich oraz 43% dla Kolei Wielkopolskich. Wprowadzenie już drobnej korekty w zakresie lokalizacji (kilometrażu wydanego ostrzeżenia) powoduje znaczący wzrost skuteczności modelu. W przypadku Kolei Śląskich tolerancja miejsca wykazanego ostrzeżenia o +/- 2 km zwiększa skuteczność modelu o 20 punktów procentowych, w przypadku Kolei Wielkopolskich zmiana ta powoduje wzrost skuteczności modelu o 5 punktów procentowych. Zwiększenie tolerancji o kolejne 2 km nie powoduje aż tak znaczącego wzrostu skuteczności modelu, co dostrzegalne jest w wynikach obu przewoźników. Mając na uwadze znajomość procesu zgłaszania informacji o wystąpieniu sytuacji związanej z potrąceniem zwierzyny przez maszynistów do dyspozytorów spółki, należy mieć na uwadze możliwość wystąpienia błędu ludzkiego na tym etapie. Maszynista lokalizację wydarzenia odczytuje z tabliczek hektometrowych, które na sieci PKP PLK S.A. są usytuowane między sobą w odległości 100 m. W związku z tym codziennością są sytuacje zaokrąglania kilometrażu faktycznej lokalizacji miejsca wydarzenia czy podawania wartości kilometrażu linii kolejowej, w której pojazd kolejowy się zatrzymał, a nie w którym faktycznie doszło do potrącenia zwierzyny. Oznacza to, że wprowadzenie opisanej korekty wydaje się zasadne z punktu widzenia zasad działania modelu predykcyjnego i nie wpływa negatywnie na generowane wyniki. W przypadku wdrożenia modelu do stosowania w praktyce założyć należy, że maszynista i tak musiałby zostać ostrzeżony o zbliżaniu się do miejsca niebezpiecznego

z pewnym wyprzedzeniem. Stąd też odległość 2 km wydaje się optymalną nie tylko ze względu na zapewnienie czasu reakcji dla maszynisty, ale również ze względu na poprawę skuteczności samego modelu.

W aspekcie zmian w obrębie tolerancji czasowej, w przypadku Kolei Śląskich zwiększenie tolerancji wydawania poszczególnych ostrzeżeń wpływa w niewielkim stopniu na skuteczność modelu (tolerancja 20 min. powoduje zmianę o 3 punkty procentowe) w porównaniu ze zwiększeniem tolerancji kilometrażu wydawanych ostrzeżeń (tolerancja 2 km powoduje zmianę aż o 10 punktów procentowych). Weryfikacja danych Kolei Wielkopolskich w kontekście ustalenia tolerancji czasowej na poziomie +/-20 min przedstawia zbieżne wyniki (wzrost skuteczności modelu o 5 punktów procentowych) z określeniem tolerancji kilometrażowej w zakresie +/- 2km. Możliwość wskazania przez maszynistę prawidłowej godziny wydarzenia wydaje się być bardziej prawdopodobna niż określenie jego dokładnej lokalizacji, co wynika chociażby z wyświetlania przez pulpit sterowniczy pojazdu aktualnej godziny.

Mając na uwadze powyżej przedstawione wyniki implementacji modelu predykcyjnego dla dwóch różnych przewoźników kolejowych obsługujących regionalny ruch pasażerski zasadnym jest wskazanie, że opracowany model skutecznie określa lokalizacje oraz czas, w których wysoce prawdopodobne jest zaistnienie kolizji pociągów ze zwierzyną. W związku z tym model może zostać wykorzystany w rutynowych analizach wydarzeń kolejowych prowadzonych przez podmioty rynku kolejowego, których głównym celem jest podejmowanie działań mających ograniczać występowanie i minimalizować skutki niebezpiecznych wydarzeń na sieci kolejowej. Wykorzystanie modelu do przekazywania prowadzącym pojazdy kolejowe bieżących informacji o lokalizacjach i godzinach szczególnie niebezpiecznych w zakresie występowania potrażeń zwierzyny wpisuje się w działania podejmowane w ramach systemów zarządzania bezpieczeństwem.

7. Mapa wydarzeń kolejowych

7.1. Podsumowanie pierwszej edycji mapy wydarzeń kolejowych

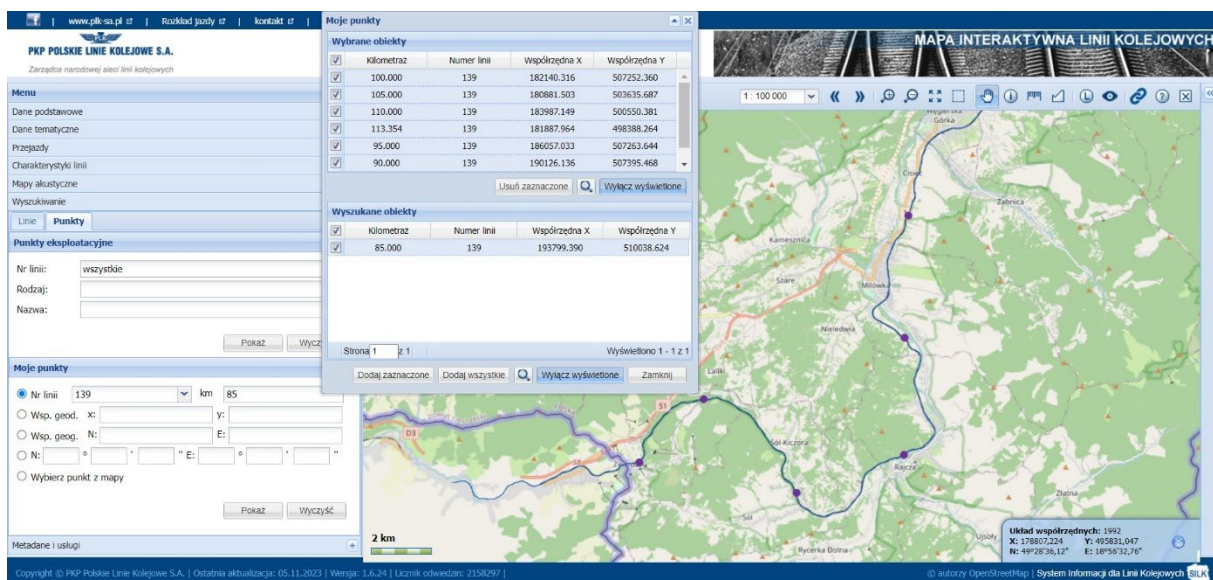
Opis prac podjętych celem utworzenia pierwszej edycji mapy wydarzeń kolejowych, która przedstawia przede wszystkim lokalizację oraz opis zdarzeń kolejowych i potrąceń zwierzyny przez pociągi, został zaprezentowany w [188, 189]. Mapa, której jednym z głównych celów była zmiana formy prezentacji danych gromadzonych w formie tabelarycznej na postać bardziej precyzyjną i użyteczną w odbiorze przez pracowników, została wdrożona w Kolejach Śląskich, gdzie na bieżąco jest aktualizowana danymi o nowych wydarzeniach na sieci kolejowej eksploatowanej przez przewoźnika. Zasadniczą funkcjonalnością mapy jest możliwość zapoznawania się przez pracowników bezpośrednio związanych z prowadzeniem ruchu kolejowego z jej treścią. Przedmiotowa forma przekazywania informacji ważnych z punktu widzenia bezpieczeństwa jest tym bardziej zasadna w przypadku zatrudnienia dużej liczby maszynistów (ponad 250 w Kolejach Śląskich), gdzie ze względu na dużą liczebność grupy zawodowej utrudniona jest bieżąca i rzetelna wymiana informacji o zaistniałych wydarzeniach kolejowych. Poza tym mapa wydarzeń kolejowych może zostać dopasowana do indywidualnych preferencji użytkownika pozwalając na filtrowanie interesujących informacji np. ze względu na linię kolejową, którą obsługuje, czy kategorię wydarzenia. Mapa jest elementem budowania wśród pracowników świadomości na temat możliwych zakłóceń na sieci kolejowej, zarówno dla maszynistów z krótkim stażem pracy, którzy nabierają doświadczenia i poznają charakterystykę poszczególnych szlaków kolejowych, jak i długoletnich pracowników kolejowych, którzy powinni mieć świadomość w zakresie bieżących zagrożeń występujących na sieci eksploatowanej przez przewoźnika. Ponadto jest wykorzystywana przez szerszą grupę pracowników w różnych aspektach funkcjonowania systemu zarządzania bezpieczeństwem przewoźnika, takich jak szkolenia personelu, analizy wypadkowości, wymiana informacji z podmiotami zewnętrznymi.

7.2. Druga edycja mapy wydarzeń kolejowych – prezentacja wyników modelu predykcji potrąceń zwierzyny

Dalszy rozwój mapy wydarzeń kolejowych jest związany z opracowanym modelem predykcji potrąceń zwierzyny przez pociągi przewoźników kolejowych. Graficzne przedstawienie wyników symulacji, które pozwala na identyfikację odcinków o zwiększonym poziomie zagrożenia w aspekcie wystąpienia kolizji pociągu ze zwierzyną, zostało zaprezentowane między innymi na Rysunkach 30 – 41. Niemniej dla maszynistów taka forma prezentacji danych może być zbyt złożona w zakresie konieczności analizy wielu wykresów,

a co z tym związane wydłużać proces pozyskania interesującej, a zarazem istotnej z punktu widzenia bezpieczeństwa informacji. W związku z tym zdecydowano o rozszerzeniu funkcjonalności opisanej w podrozdziale 7.1 mapy wydarzeń kolejowych o warstwy, które prezentują ostrzeżenia o prawdopodobieństwie wystąpienia kolizji ze zwierzyną na poszczególnych odcinkach obsługiwanych linii kolejowych. Poniżej przedstawiono kolejne kroki, które zostały wykonane celem rozszerzenia mapy wydarzeń o wyniki modelu. Należy zwrócić uwagę, że mapa prezentująca całokształt wyników jest złożona z wielu warstw, ponieważ wyniki modelu dla poszczególnych odcinków są zmienne w rozkładzie rocznym i dobowym. Jako przykład przedstawiono proces tworzenia mapy dla linii kolejowych analizowanych w podrozdziale 6.5 tj. nr 140, 143, 1 i 139 w przypadku Kolei Śląskich oraz nr 354, 356, 357, 3 w aspekcie Kolei Wielkopolskich. Zaprezentowane ostrzeżenia dla poszczególnych wartości progowych prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji odnoszą się do stycznia.

W początkowej fazie określono współrzędne geograficzne punktów rozpoczynających i kończących pięciokilometrowe odcinki, które wskazano na Rysunku 22 i Rysunku 26. Zadanie zostało zrealizowane z wykorzystaniem interaktywnej mapy linii kolejowych PKP PLK S.A. [162], która umożliwia wyszukiwanie dowolnego punktu na sieci kolejowej polskiego zarządcy infrastruktury wskazując przy tym dokładne współrzędne geograficzne każdego punktu.

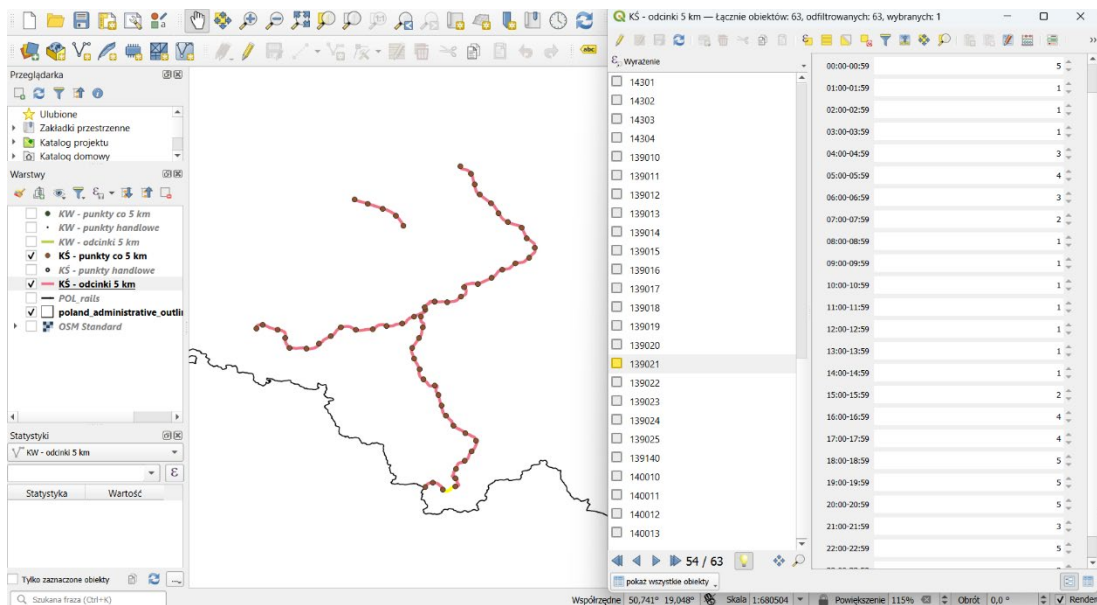


Rysunek 42 Wyznaczanie współrzędnych geograficznych dla wybranych punktów linii kolejowej nr 139 obsługiwanej przez Koleje Śląskie sp. z o.o. na mapie interaktywnej linii kolejowych (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.) [162]

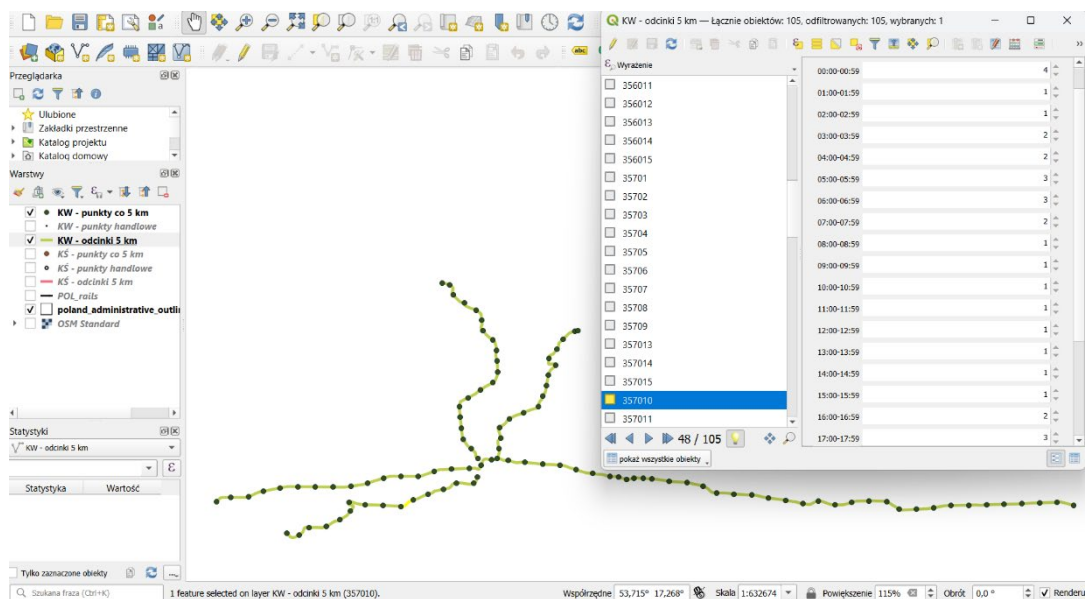
Przykład wyznaczania danych lokalizacyjnych dla końcowego odcinka linii kolejowej nr 139 został zaprezentowany na Rysunku 42. Zebrane dane zostały uporządkowane oraz

zapisane w pliku o formacie csv (ang. comma-separated values), co pozwala na późniejsze przetwarzanie jego zawartości w oprogramowaniu geoinformacyjnym.

Do dalszego etapu prac wykorzystano oprogramowanie geoinformacyjne QGIS (wersja 3.34). W kreatorze map, w oparciu o wcześniej wyznaczone punktów początkowe i końcowe, utworzono siatkę pięciokilometrowych odcinków linii kolejowych odpowiednio dla Kolei Śląskich oraz Kolei Wielkopolskich, co zostało przedstawione na Rysunku 43 i Rysunku 44.



Rysunek 43 Mapa pięciokilometrowych odcinków linii kolejowych nr 140, 143, 1, 139 utworzona dla Kolei Śląskich w oprogramowaniu QGIS, po prawej stronie znajduje się tabela atrybutów z przypisanymi wartościami ostrzeżeń



Rysunek 44 Mapa pięciokilometrowych odcinków linii kolejowych nr 354, 356, 357, 3 utworzona dla Kolei Wielkopolskich w oprogramowaniu QGIS, po prawej stronie znajduje się tabela atrybutów z przypisanymi wartościami ostrzeżeń

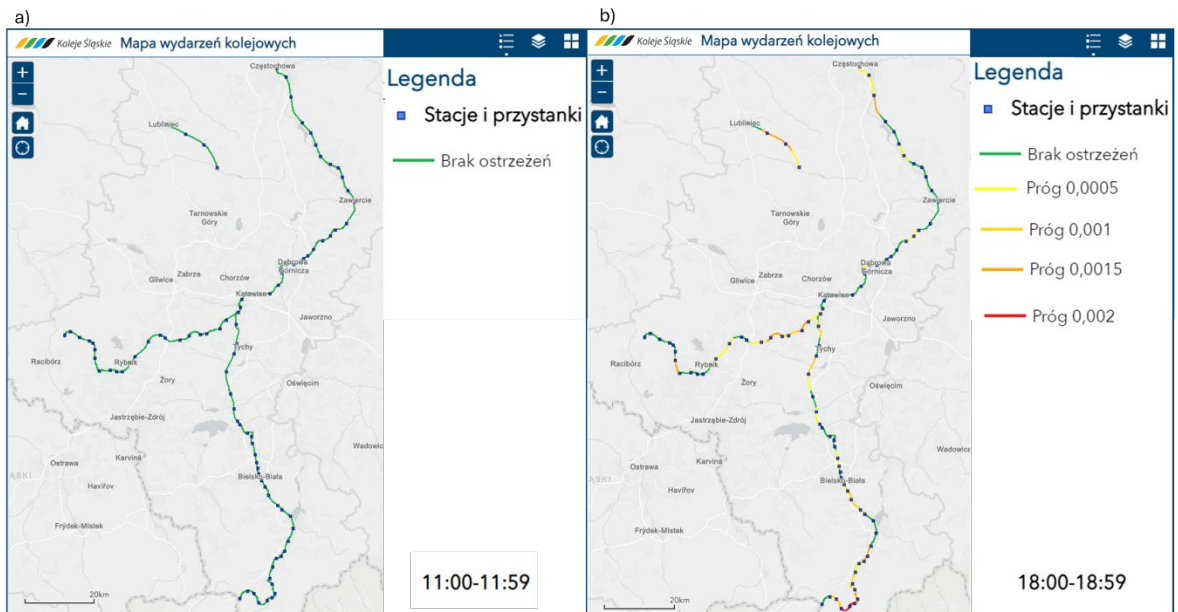
Następnie do każdego odcinka przyporządkowane zostały ostrzeżenia powiązane z przekroczeniem czterech wartości progowych wskazanych w części rozprawy doktorskiej dotyczącej wdrożenia modelu predykcji potrażeń zwierzyny (podrozdział 6.5). W Tabeli 9 przedstawiono wartości prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji ze zwierzyną przypisane poszczególnym ostrzeżeniom znajdującym swoje odzwierciedlenie w tabelach atrybutów, które zostały częściowo przedstawione na Rysunku 43 i Rysunku 44.

Tabela 9 Oznaczenie przedziałów wartości progowych prawdopodobieństwa w tabeli atrybutów

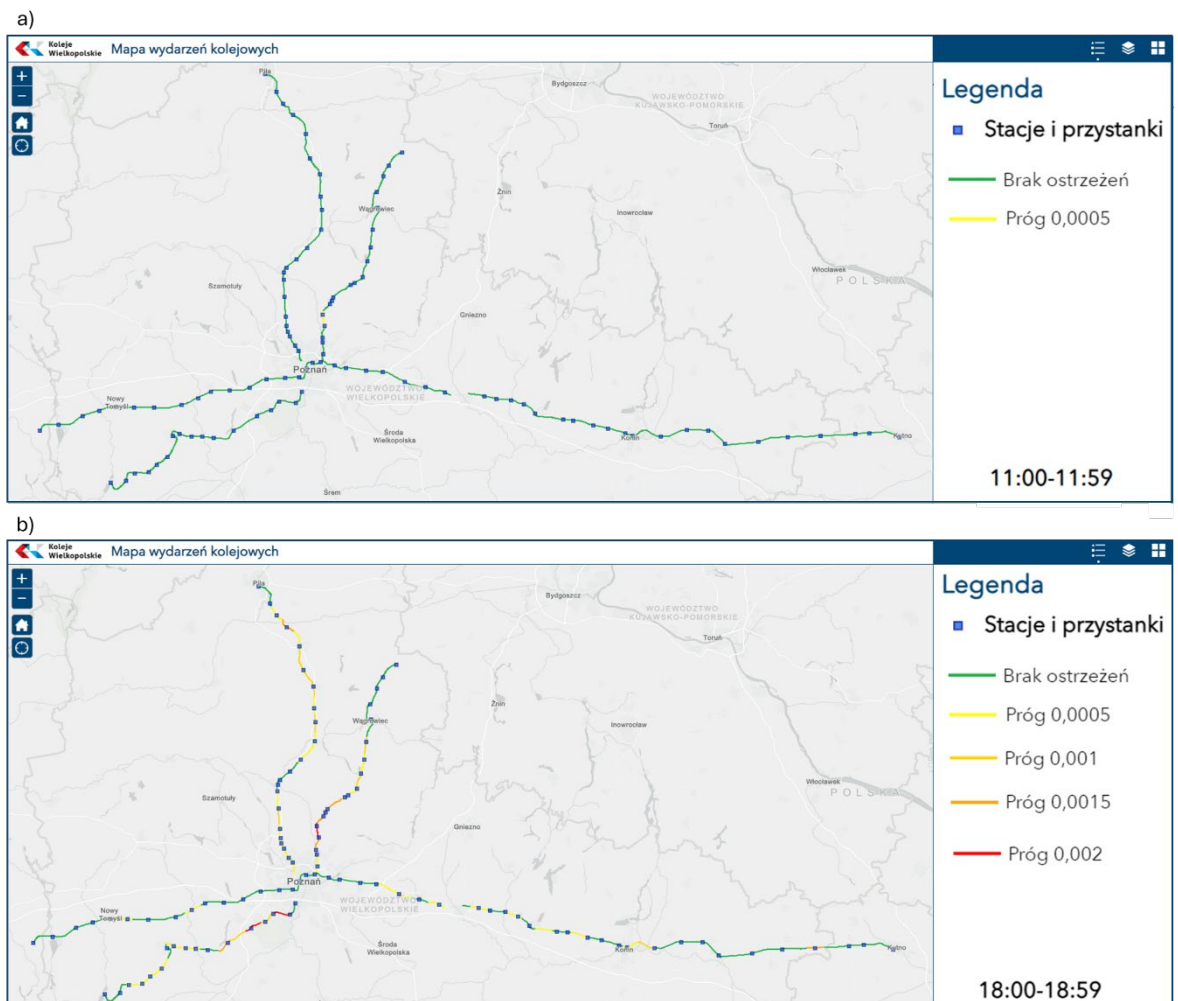
Wartość prawdopodobieństwa p_{pt}	Oznaczenie ostrzeżenia w tabeli atrybutów
$p_{pt} \leq 0,0005$	1
$0,005 < p_{pt} \leq 0,001$	2
$0,001 < p_{pt} \leq 0,0015$	3
$0,0015 < p_{pt} \leq 0,002$	4
$p_{pt} > 0,002$	5

Jak już wspomniano wcześniej, mapa wydarzeń kolejowych wdrożona w Kolejach Śląskich udostępniona jest różnym grupom pracowniczym, w tym przede wszystkim przedstawicielom biura zarządzania bezpieczeństwem czy maszynistom pojazdów trakcyjnych. Takie podejście jest możliwe poprzez wykorzystanie środowiska oprogramowania ArcGIS. Umożliwia ono przeglądanie mapy z wykorzystaniem indywidualnych urządzeń mobilnych pracowników, co zapewnia nieograniczony dostęp do narzędzia, zgodnie z indywidualnym zapotrzebowaniem.

Na Rysunku 45 i Rysunku 46, odpowiednio dla Kolei Śląskich i Kolei Wielkopolskich, zostały przedstawione mapy wydarzeń kolejowych z przykładowymi warstwami dotyczącymi ostrzeżeń wydawanych dla maszynistów z uwagi na zagrożenie kolizją ze zwierzyną. Na mapy nałożone zostały również warstwy przedstawiające punkty handlowe obsługiwane przez przewoźników kolejowych, zaczerpnięte z wcześniejszej edycji mapy. Mając na uwadze niską rozdzielczość omawianych rysunków, zostały one zaprezentowane w większym formacie w załącznikach do niniejszej rozprawy doktorskiej, przy czym Załącznik 1 i 2 prezentuje mapę wydarzeń Kolei Śląskich, a Załącznik 3 i 4 Kolei Wielkopolskich.



Rysunek 45 Mapa wydarzeń kolejowych Kolei Śląskich z warstwami ostrzeżeń dla godzin 11:00-11:59 (a) oraz 18:00-18:59 (b) utworzona w oprogramowaniu ArcGIS



Rysunek 46 Mapa wydarzeń kolejowych Kolei Wielkopolskich z warstwami ostrzeżeń dla godzin 11:00-11:59 (a) oraz 18:00-18:59 (b) utworzona w oprogramowaniu ArcGIS

Mapa wydarzeń kolejowych z warstwami przedstawiającymi ostrzeżenia o prawdopodobieństwie wystąpienia kolizji ze zwierzyną jest stopniowo wdrażana w Kolejach Śląskich. Pierwszy etap wdrożenia polegał na udostępnieniu narzędzia pracownikom biura zarządzania bezpieczeństwem oraz maszynistom-instruktorom, których zadaniem było zapoznanie się z nowymi warstwami oraz wykorzystanie ich w realizacji wybranych procesów systemu zarządzania bezpieczeństwem. Wśród pierwszych przeprowadzanych działań było wykorzystanie narzędzi w trakcie cyklicznie przeprowadzanych pouczeń okresowych dla maszynistów, jak również weryfikacja poziomu ryzyka związanego z występowaniem kolizji ze zwierzyną oraz wdrażanych środków bezpieczeństwa w prowadzonym rejestrze zagrożeń i oceny ryzyka. Kolejne etapy wdrożenia oraz dostosowania mapy wydarzeń kolejowych są uzależnione od wewnętrznych decyzji podejmowanych w spółce.

8. Podsumowanie

W pracy dokonano analizy aktów prawnych, które wyznaczają zakres odpowiedzialności i obowiązków przewoźników kolejowych w zakresie kształtowania bezpieczeństwa przewozów [25, 30, 67, 75, 76, 78-83]. Zgodnie z przeprowadzoną analizą systemy zarządzania bezpieczeństwem przewoźników kolejowych muszą spełniać wymagania prawne przedstawione w Rozporządzeniu (UE) 2018/762 [67]. Niemniej to od podmiotów rynku kolejowego zależy jakie rozwiązania przyjmą celem ich realizacji. Krajowe wymagania prawne dodatkowo regulują kwestie funkcjonowania systemów zarządzania bezpieczeństwem podmiotów kolejowych. Otwartość na poszukiwanie nowych narzędzi wykorzystujących wewnętrznie gromadzone dane jest istotnym elementem doskonalenia systemu zarządzania bezpieczeństwem, w tym w obszarze wsparcia czynnika ludzkiego. Oprócz analizy aktów prawnych przeprowadzono analizę literatury w zakresie czynnika ludzkiego w transporcie kolejowym [37, 39, 40, 42, 44-50] oraz kultury bezpieczeństwa kolejowego [55, 59, 62, 64-66, 68, 70-74], która wykazała, że działania podejmowane przez człowieka stanowią istotną przyczynę zdarzeń kolejowych. W nawiązaniu do tego zapewnienie pracownikom odpowiedniego stanowiska pracy w aspekcie ergonomicznym, jak również zwracanie szczególnej uwagi na przekazywanie rzetelnych informacji mających wpływ na bezpieczeństwo czy zagwarantowanie dodatkowych narzędzi wspierających podejmowanie decyzji, stanowi istotny aspekt w zwiększaniu poziomu bezpieczeństwa transportu kolejowego.

W odrębnym rozdziale przeprowadzono analizę raportów i innych materiałów w obszarze metod oceny bezpieczeństwa kolejowego udostępnionych przez europejskie i krajowe organy skupione wokół bezpieczeństwa kolejowego [95-98]. Analiza wykazała, że pomijają one problematykę potrąceń zwierzyny przez pociągi. Niemniej tematyka ta jest poruszana w wielu artykułach naukowych [105-116, 118-121]. Głównym celem publikacji jest wskazanie wzorców przestrzennych i czasowych potrąceń zwierzyny, które pozwalają na wyznaczenie „czarnych punktów” tzw. hot-spotów na sieci kolejowej. Wyznaczenie lokalizacji, w których dochodzi do największej liczby wydarzeń związanych z potrąceniem zwierzyny pozwala na wprowadzenie w danym obszarze działań mających na celu zminimalizowanie liczby takich kolizji lub łagodzenia ich skutków. W przedmiotowych pracach dostrzega się brak rozwiązań związanych z aktywnym wsparciem pracowników kolejowych, a przede wszystkim maszynistów, w zakresie przekazywania aktualnej informacji o niebezpiecznych odcinkach linii kolejowych.

Przegląd literatury w zakresie dostępnych modeli predycyjnych wykazał, że najczęściej odnoszą się one do zdarzeń kolejowych na przejazdach kolejowo-drogowych [133-136, 138-140]. Dostępne modele w zakresie potrąceń zwierzyny przez pociągi [144, 145] wskazują na rozwiązania, które wymagają szerokiego zakresu danych uczących na temat populacji zwierzyny w poszczególnych lokalizacjach, które nierzadko są bardzo trudno dostępne lub prawie niemożliwe do zdobycia przy racjonalnym nakładzie pracy, czasu i kosztów. Dodatkowo publikacje nie wskazują wykorzystania modeli do wsparcia działalności przewoźników kolejowych. Mając to na uwadze autorka dostrzega lukę w zakresie opracowania modelu potrąceń zwierzyny przez pojazdy kolejowe opartego na danych już rejestrowanych i posiadanych przez przewoźników kolejowych, które mogłyby zostać wykorzystane w funkcjonujących systematach zarządzania bezpieczeństwem.

Model predykcji potrąceń zwierzyny na obszarze kolejowym wraz z późniejszą prezentacją wyników na dedykowanej do tego celu mapie jest przykładem innowacyjnego rozwiązania dla systemów zarządzania bezpieczeństwem, które nie zostało dotychczas wdrożone w kompleksowy sposób przez żadnego przewoźnika kolejowego prowadzącego przewozy na terenie Unii Europejskiej. Przedstawiony w niniejszej pracy model został opracowany na podstawie danych uczących obejmujących okres 3 lat (2020-2022), pozyskanych od dwóch regionalnych, polskich przewoźników kolejowych w ruchu pasażerskim tj. Kolei Śląskich sp. z o.o. oraz Kolei Wielkopolskich sp. z o.o.

Przystępując do prac nad modelem predykcji wystąpień potrąceń zwierzyny przez pociągi regionalnych przewoźników pasażerskich przeprowadzono analizę statystyczną w zakresie występowania potrąceń zwierzyny na poszczególnych liniach kolejowych i ich odcinkach obsługiwanych przez przewoźników, która pozwoliła na wskazanie linii kolejowych, dla których przedstawienie wyników implementacji modelu jest najbardziej zasadne. W zakresie przedmiotowych linii przeprowadzono również analizę natężenia ruchu pociągów na poszczególnych odcinkach, która stanowi ważną zmienną dla modelu. Ponadto w modelu uwzględniono dobowy rozkład godzinowy oraz zmienność liczby potrąceń zwierzyny w poszczególnych miesiącach roku, charakteryzujących się zróżnicowaną długością dnia i nocy.

Na podstawie opisanych danych wejściowych opracowano model wskazujący odcinki o długości 5 km oraz okna czasowe o długości 1 godziny, w których występuje zwiększone prawdopodobieństwo wystąpienia kolizji ze zwierzyną. Wyniki modelu, uzyskane poprzez skrypt utworzony w języku Python, zostały przedstawione na mapach ostrzeżeń, które

prezentują w graficzny sposób ostrzeżenia spełniające określone progi prawdopodobieństwa wystąpienia potrącenia zwierzyny przez pojazdy kolejowe.

Model został zweryfikowany na późniejszych danych rzeczywistych (okres styczeń – kwiecień 2023) otrzymanych od przewoźników. Dane testowe zostały zaprezentowane w formie punktów na mapach ostrzeżeń, aby w sposób graficzny umożliwić wstępną weryfikację modelu. Ponadto przeprowadzono bardziej szczegółową weryfikację poprzez określenie jego skuteczności, rozumianej jako zgodność lokalizacji i czasu wydarzeń związanych z potrąceniem zwierzyny (dane testowe) z ostrzeżeniami wydanymi przez algorytm. Skuteczność modelu, bez wprowadzenia jakiegokolwiek korekty wynosi 39% dla Kolei Śląskich i 43% dla Kolei Wielkopolskich. Weryfikacja modelu z uwzględnieniem korekty kilometrażu wydanego ostrzeżenia o +/- 2km, która w opinii autorki jest uzasadniona z powodu możliwych błędów po stronie ludzkiej w zakresie przekazywania rzetelnej informacji o miejscu potrącenia, powoduje znaczący wzrost skuteczności modelu, odpowiednio do 59% w przypadku Kolei Śląskich i 48% w przypadku Kolei Wielkopolskich. Rozszerzenie tolerancji wydanych ostrzeżeń w aspekcie kilometrażu (+/- 4km) i czasu (+/- 40 min) powoduje zwiększenie skuteczności modelu do 73% i 62% odpowiednio dla Kolei Śląskich i Kolei Wielkopolskich. Przy czym należy zaznaczyć, że model może być zasilany o nowe dane uczące, które w perspektywie kilku lat mogą znacząco wpłynąć na jego precyzyjność, a co z tym związane skuteczność.

Ponadto uzyskane wyniki modelu zostały wykorzystane do rozbudowania Mapy wydarzeń kolejowych o nowe warstwy przedstawiające ostrzeżenia w zakresie możliwości potrącenia zwierzyny przez pociągi. Mapa wydarzeń z wykorzystaniem różnych sygnałów, obrazuje poziom ostrzeżenia na pięciokilometrowych odcinkach linii kolejowych. Użytkownik, zgodnie z własnym potrzebami, ma możliwość filtrowania linii kolejowych oraz godzin tak, aby uzyskać interesującą go informację. Taka forma prezentacji danych zwiększa czytelność wyników modelu dla pracowników kolejowych, a w konsekwencji pozwala na jej bezpośrednio wykorzystanie w systemach zarządzania bezpieczeństwem.

Wdrażanie powyżej wskazanych rozwiązań, które realnie mogą wspierać pracowników w uzyskaniu aktualnej informacji o zagrożeniach na liniach kolejowych, podniesieniu jakości procesu szkoleniowego poprzez wskazywanie ostrzeżeń o odcinkach szczególnie niebezpiecznych na sieci kolejowej czy rzetelnym identyfikowaniu zagrożeń i ocenie ryzyka operacyjnego, wpisują się w proaktywne działanie na rzecz bezpieczeństwa kolejowego i spełnienie wymagań prawnych w zakresie systemów zarządzania bezpieczeństwem.

Mając na uwadze przedstawione podsumowanie poprzez osiągnięcie celu głównego rozprawy doktorskiej tj. opracowanie mapy wydarzeń kolejowych oraz modelu ich predykcji na podstawie wybranych danych regionalnych przewoźników pasażerskich oraz wskazanie ich powiązania z systemami zarządzania bezpieczeństwem, potwierdzona została teza pracy wskazująca, że zasadnym jest opracowanie mapy wydarzeń kolejowych oraz modelu ich predykcji jako narzędzi wykorzystywanych w systemie zarządzania bezpieczeństwem przewoźników kolejowych.

W pracy, na podstawie analizy danych w zakresie potrąceń zwierzyny przez pociągi dwóch regionalnych przewoźników kolejowych w ruchu pasażerskim, tj. Kolei Śląskich i Kolei Wielkopolskich, za okres 3 lat (2020-2022), osiągnięto poniższe cele naukowe:

- a) wykonano analizę przestrzenną i czasową wydarzeń kolejowych związanych z potrąceniem zwierzyny przez pojazdy kolejowych,
- b) wyznaczono „czarne punkty” tzw. hot-spoty na sieci kolejowej obsługiwanej przez przewoźników,
- c) w oparciu o model predykcyjny wyznaczono odcinki linii kolejowych, o których ze względu na zagrożenie potrąceniem zwierzyny, powinien być ostrzegany maszynista.

Poprzez wdrożenie w Kolejach Śląskich modelu predykcyjnego potrąceń zwierzyny oraz mapy wydarzeń prezentującej wyniki symulacji w zakresie ostrzeżeń wydawanych maszynistom zrealizowano cel użyteczny pracy.

Zaprezentowane wyniki modelu predykcyjnego oraz możliwości jego wykorzystania w formie mapy wydarzeń kolejowych, pomimo uzyskania na tym etapie satysfakcjonujących wyników, nadal pozostawiają bardzo szerokie możliwości dalszego rozwoju. Do potencjalnych kierunków rozwoju należy przede wszystkim zwiększanie zasobów danych uczących. Pozwola one na uzyskiwanie dokładniejszych i aktualnych wyników w zakresie prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji ze zwierzyną w konkretnej lokalizacji i przedziale godzinowym. Aspekt ten jest istotny, zważywszy na zmiany w rozkładach jazdy przewoźników, które związane są z rozwojem spółek poprzez zwiększanie liczby eksploatowanych pojazdów, a co z tym związane pracy przewozowej, jaki i szereg prowadzonych prac inwestycyjnych na sieci kolejowej polskiego zarządcy infrastruktury PKP PLK S.A., które skutkują tymczasowymi ograniczeniami w ruchu pociągów czy otwieraniem nowych linii kolejowych.

Innym kierunkiem rozwoju jest wykorzystanie wyników pozyskanych z modelu tak, aby w sposób maksymalny wesprzeć maszynistę, ograniczając jednocześnie zawodny wpływ czynnika ludzkiego na bezpieczeństwo. W rozprawie przedstawiono możliwość prezentacji wyników na mapie wydarzeń kolejowych, jednak w opinii autorki aktualnie dostępne rozwiązania techniczne stwarzają większe możliwości. Przykładowym rozwiązaniem byłby system, który wykorzystując zabudowane na pojazdach urządzenia GPS pozwalające na śledzenie bieżącej lokalizacji pojazdu kolejowego oraz w oparciu o wyniki modelu, wysyłałby w czasie rzeczywistym ostrzeżenie do maszynisty. Forma ostrzeżenia mogłaby zostać dopasowana do oczekiwań przewoźnika i przybierać np. formę dźwiękową czy nawet informacji przedstawianej na wyświetlaczach typu Head-Up Display.

Dodatkowo autorka dostrzega możliwości rozwoju samego modelu, który mógłby opierać się o centralną bazę danych zasilaną w zakresie kolizji pociągów ze zwierzyną przez wszystkich przewoźników kolejowych funkcjonujących na rynku przewozów w Polsce. Takie rozwiązanie byłoby szczególnie wartościowe dla przewoźników towarowych, którzy z większą częstotliwością zmieniają obsługiwane trasy. W nawiązaniu do tego informacja o prawdopodobieństwie wystąpienia kolizji ze zwierzyną dla maszynistów, którzy rzadko prowadzą pociągi na poszczególnych odcinkach linii kolejowych, byłaby szczególnie istotna i pożądana. Oczywiście zaletą rozwoju modelu w tym kierunku byłoby jego zasilenie znacznie większą ilością danych, co przełożyłoby się pozytywnie na jego dokładność. Ponadto model może być rozwijany również w całkowicie innych kierunkach analizy prawdopodobieństwa wystąpienia niebezpiecznych sytuacji na sieci kolejowej np. w zakresie wydarzeń występujących w obrębie przejazdów kolejowo-drogowych, które są w ostatnich latach najczęściej notowanymi zdarzeniami kolejowymi w Polsce [90].

9. Wnioski

1. Model predykcji potrąceń zwierzyny został opracowany i zweryfikowany na przykładzie dwóch regionalnych pasażerskich przewoźników kolejowych funkcjonujących na rynku polskim. Model spełnia swoje założenia w zakresie ostrzegania o najniebezpieczniejszych miejscach na sieci kolejowej w aspekcie kolizji ze zwierzyną. Weryfikacja modelu poprzez porównanie miejsc wydanych ostrzeżeń z lokalizacjami i czasem wystąpienia wydarzeń ze zbioru testowego potwierdza skuteczność modelu.
2. Prezentacja wyników modelu predykcyjnego na mapie wydarzeń kolejowych pozwala na realne wsparcie przewoźników kolejowych poprzez przekazywanie w czytelny sposób bieżącej i rzetelnej informacji na temat niebezpiecznych, pod względem potrąceń zwierzyny, odcinków linii kolejowych.
3. Zakres danych gromadzonych przez przewoźników kolejowych w zakresie potrącenia zwierzyny przez pociągi jest wystarczający do opracowania modelu predykcyjnego, jak również późniejszego zwiększania jego skuteczności poprzez bieżące rozszerzanie danych uczących. Cel użyteczny pracy został zrealizowany poprzez wdrożenie modelu predykcyjnego oraz mapy wydarzeń kolejowych w Kolejach Śląskich sp. z o.o.
4. Model predykcyjny cechuje się uniwersalnością. Weryfikacja modelu na danych różnych przewoźników kolejowych w regionalnym ruchu pasażerskim obsługujących linie kolejowe o różnym charakterze (długość, przebieg), odmiennym rozkładzie jazdy (rozkład dobowy ruchu pociągów, natężenie ruchu na odcinkach linii kolejowych) udowodniła, że może być on stosowany niezależnie od charakteru pracy realizowanej przez przewoźnika kolejowego.
5. Jeden z celów naukowych rozprawy osiągnięto poprzez wyznaczenie na podstawie modelu predykcyjnego odcinków linii kolejowych, o których - ze względu na zagrożenie potrąceniem zwierzyny - powinien być ostrzegany maszynista. Ostrzeżenia dzielą się na 4 klasy w zależności od przekroczenia wartości progowych prawdopodobieństwa wystąpienia kolizji pociągu ze zwierzyną. Kolorystyczne rozróżnienie poszczególnych klas jest widoczne na opracowanej mapie wydarzeń kolejowych.
6. W oparciu o analizę danych pozyskanych od Kolei Śląskich i Kolei Wielkopolskich osiągnięto poniższe cele naukowe, które były elementem składowym tworzenia modelu predykcyjnego:
 - a) wykonano analizę przestrzenną i czasową wydarzeń kolejowych związanych z potrąceniem zwierzyny przez pojazdy kolejowe,

- b) wyznaczono „czarne punkty” tzw. hot-spoty na sieci kolejowej obsługiwanej przez przewoźników.
7. Model predykcyjny zachował swoją stabilność pomimo okresu zakłóceń w gromadzonych danych (zmniejszona liczba wyprawianych pociągów) związanych z pandemią koronawirusa SARS-CoV-2.
 8. Na podstawie powyżej przedstawionych wniosków stwierdzono, że przyjęta teza rozprawy doktorskiej została udowodniona, a cel główny został zrealizowany.

Bibliografia

- [1] Nathanail, E., Measuring the quality of service for passengers on the hellenic railways. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 2008. 42(1): s. 48-66.
- [2] Chekmareva, G., et al., Expert Methods for Assessing the Quality of Transportation Services. *Transportation Research Procedia*, 2023. 68: s. 98-108.
- [3] Irfan, S., D. Kee, S. Shahbaz, Service quality and rail transport in Pakistan: A passenger perspective. *World Applied Sciences Journal*, 2012. 18: s. 361-369.
- [4] Semchugova, E., et al., Models of Estimation of Application of Passenger Service Quality Parameters. *Transportation Research Procedia*, 2017. 20: s. 584-590.
- [5] Polski Komitet Normalizacyjny, Transport. Logistyka i usługi. Publiczny transport pasażerski. Definicje, cele i pomiary dotyczące jakości usług, Warszawa, 2024.
- [6] Słownik Języka Polskiego, termin „bezpieczeństwo”. <https://sjp.pwn.pl/szukaj/bezpiecze%C5%84stwo.html> [dostęp 09.11.2023 r.].
- [7] Słownik Języka Polskiego, termin „zagrożenie” <https://sjp.pwn.pl/szukaj/zagro%C5%BCenie.html> [dostęp 09.11.2023 r.].
- [8] Chojnowski, L., *Bezpieczeństwo. Zarys teorii*. 2015, Słupsk: Wydawnictwo Naukowe Akademii Pomorskiej w Słupsku.
- [9] Wasiuta, O., S. Wasiuta, et al. (red.) *Encyklopedia Bezpieczeństwa t. 1*. 2021: Kraków: Wydawnictwo LIBRON – Filip Lohner.
- [10] Wasiuta, O., R. Klepka, R. Kopeć, et al. (red.), *Vademecum bezpieczeństwa*. 2018, Kraków: Wydawnictwo LIBRON – Filip Lohner.
- [11] Pawłowski, J., B Zdrodowski, M. Kuliczkowski, et. al. (red.), *Słownik terminów z zakresu bezpieczeństwa narodowego*. 6 ed. 2008, Warszawa: Akademia Obrony Narodowej Wydział Strategiczno-Obronny.
- [12] Starczewska, M., et al (red.), *Leksykon terminów kolejowych*. 2011, Warszawa: KOW Sp. z o.o.
- [13] Rajchel, K., *Bezpieczeństwo ruchu drogowego w działaniach administracji publicznej*. 2006, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [14] Koźlak, A., *Ekonomika transportu. Teoria i praktyka gospodarcza*. 1 ed. 2010, Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego.
- [15] Roman, M., A. Górecka, M. Roman, *Wykorzystanie transportu pasażerskiego w rozwoju turystyki*. 2019, Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- [16] Churski, P., *Pojęcie, funkcje i rozwój transportu publicznego. Rozwój Regionalny i Polityka Regionalna*, 2010. 13: s. 17-28.
- [17] Załoga, E., K. Tomasz, *Pasażerski transport regionalny*. 2019, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [18] Jaworska, K., G. Nowacki, *Transport kolejowy w systemie logistycznym Polski. Techniki Transportu Szynowego*, 2019. 26 (4).
- [19] Perzyńska, A., et al., *Nowoczesne systemy bezpieczeństwa w transporcie drogowym. Współczesne trendy w logistyce - kompleksowe zarządzanie*, 2019. XX (5).
- [20] The European Rail Research Advisory Council, *Suburban and Regional Railways Landscape in Europe*. 2006.
- [21] Ustawa z dnia 16 grudnia 2010 r. o publicznym transporcie zbiorowym (Dz. U. 2022 poz. 1343).

- [22] Jacyna, M., et al. (red.), Organizacja ruchu kolejowego. 2019, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN SA.
- [23] Pasażerski transport regionalny w Polsce Ocena systemu i koncepcja zmian. Zeszyty Naukowe nr 792. Vol. Problemy Transportu i Logistyki nr 24. 2013, Szczecin: Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Szczecińskiego.
- [24] Wyszomirski, O., et al. (red), Transport Miejski. Ekonomia i Organizacja. 2007, Gdańsk: Uniwersytet Gdański.
- [25] Ustawa z dnia 28 marca 2003 r. o transporcie kolejowym (Dz. U. 2023 poz. 602 z późn. zm.).
- [26] Urząd Transportu Kolejowego. Usługi dla przewoźników. <https://utk.gov.pl/pl/uslugi/przewoźnicy/uslugi-dla-przewoźników> [dostęp 09.11.2023 r.].
- [27] Ustawa z dnia 8 września 2000 r. o komercjalizacji i prywatyzacji przedsiębiorstwa państwowego "Polskie Koleje Państwowe" (Dz. U. 2000.84.948 z późn. zm.).
- [28] Ustawa z dnia 13 listopada 2023 r. o dochodach jednostek samorządu terytorialnego (Dz.U. 2018 poz. 2016 z późn. zm).
- [29] Pawlik, M., et al. (red.) Interoperacyjność systemu kolei Unii Europejskiej. Infrastruktura, sterowanie, energia, tabor. 2015, Warszawa: KOW Sp. z o.o.
- [30] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu "Tabor - lokomotywy i tabor pasażerski" systemu kolei w Unii Europejskiej (Dz. U. L 356 z 12.12.2014).
- [31] Karta UIC 651 Ukształtowanie kabin maszynisty lokomotyw, wagonów napędnych, jednostek trakcyjnych i pojazdów sterujących.
- [32] PN-EN 16186-1+A1:2019-01 Kolejnictwo - Kabina maszynisty - Część 1: Dane antropometryczne i widoczno.
- [33] PN-EN 16186-2:2017-09 Kolejnictwo - Kabina maszynisty - Część 2: Rozmieszczenie wyświetlaczy, przełączników i wskaźników.
- [34] PN-EN 16186-3:2022-08 Kolejnictwo - Kabina maszynisty - Część 3: Projektowanie wyświetlaczy dla pojazdów kolejowych.
- [35] PN-EN 16186-4:2019-08 Kolejnictwo - Kabina maszynisty - Część 4: Układ i dostęp.
- [36] Naumann, A., et al., Rail Human Factors-Human-centred design for railway systems. IFAC Proceedings Volumes, 2013. 46(15): s. 330-332.
- [37] Grabarek, I., Diagnozowanie ergonomiczne układu maszynista - lokomotywa - otoczenie. Zeszyty Naukowe. Transport, Politechnika Śląska, 2003. z. 49: s 129-138.
- [38] Merlevede, J.V., et al., Expectations of train drivers for innovative driving cabin. IFAC-PapersOnLine, 2022. 55(29): s. 144-149.
- [39] Krystek, R., et al. (red), Zintegrowany System Bezpieczeństwa Transportu. I tom. Diagnoza bezpieczeństwa transportu w Polsce. 2009, Gdańsk: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- [40] Wilson, J.R., B.J. Norris, Rail human factors: Past, present and future. Applied Ergonomics, 2005. 36(6): s. 649-660.
- [41] Ahmadi Rad, M., L.M. Lefsrud, M.T. Hendry, Application of systems thinking accident analysis methods: A review for railways. Safety Science, 2023. 160.
- [42] Shappell, S., D. Wiegmann, The Human Factors Analysis and Classification System-HFACS. 2000. Office of Aviation Medicine Washington.

- [43] Hulme, A., et al., Accident analysis in practice: A review of Human Factors Analysis and Classification System (HFACS) applications in the peer reviewed academic literature. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting, 2019. 63: s. 1849-1853.
- [44] Zhan, Q., W. Zheng, B. Zhao, A hybrid human and organizational analysis method for railway accidents based on HFACS-Railway Accidents (HFACS-RAs). Safety Science, 2017. 91: s. 232-250.
- [45] Zhou, J.-L., Y. Lei, Paths between latent and active errors: Analysis of 407 railway accidents/incidents' causes in China. Safety Science, 2018. 110: s. 47-58.
- [46] Gawlak, K., Analysis and assessment of the human factors as a cause of occurrence of selected railway accidents and incidents. Open Engineering, 2023.
- [47] Accou, B., G. Reniers, Developing a method to improve safety management systems based on accident investigations: The SAFETY FRactal ANALYSIS. Safety Science, 2019. 115: s. 285-293.
- [48] Pasquini, A., A. Rizzo, L. Save, A methodology for the analysis of SPAD. Safety Science, 2004. 42(5): s. 437-455.
- [49] Ouyang, M., et al., STAMP-based analysis on the railway accident and accident spreading: Taking the China–Jiaoji railway accident for example. Safety Science, 2010. 48(5): s. 544-555.
- [50] Li, C., et al., A hybrid human and organisational analysis method for railway accidents based on STAMP-HFACS and human information processing. Applied Ergonomics, 2019. 79: s. 122-142.
- [51] Kabir, S., Y. Papadopoulos, Applications of Bayesian networks and Petri nets in safety, reliability, and risk assessments: A review. Safety Science, 2019. 115: s. 154-175.
- [52] Cooper, A., et al., The use of Bayesian Belief Networks (BBNs) to probe deeper into railway safety management systems – Two studies from Great Britain and Italy. Applied Ergonomics, 2023. 109.
- [53] Wang, N., et al., Hazards correlation analysis of railway accidents: A real-world case study based on the decade-long UK railway accident data. Safety Science, 2023. 166.
- [54] Grudowski, P., M. Wiśniewska, Kultura jakości, doskonałości i bezpieczeństwa w organizacji. 2019.
- [55] Cooper, D., Safety Culture. A model for understanding & quantifying a difficult concept. Professional Safety, 2002.
- [56] Piwowarski, J., Fenomen bezpieczeństwa. Pomędzy zagrożeniem a kulturą bezpieczeństwa. 2015, Kraków: Wyższa Szkoła Bezpieczeństwa Publicznego i Indywidualnego „Apeiron” w Krakowie.
- [57] Wiśniewska, M., P. Grudowski, Kultura jakości, doskonałości i bezpieczeństwa w organizacji. 2022, CeDeWu Sp. z o.o.: Warszawa.
- [58] Ejdyś, J., et al. (red.), Kształtowanie kultury bezpieczeństwa i higieny pracy w organizacji. 2010, Białystok: Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej.
- [59] Guldenmund, F., Understanding Safety Culture Through Models and Metaphors: Taking Stock and Moving Forward. 2018. s. 21-34.
- [60] Międzynarodowa Agencja Energii Atomowej (IAEA), A Harmonized Safety Culture Model. 2020.
- [61] Goncalves Filho, A.P., P. Waterson, Maturity models and safety culture: A critical review. Safety Science, 2018. 105: s. 192-211.

- [62] Wang, C.H., Y.J. Liu, Omnidirectional safety culture analysis and discussion for railway industry. *Safety Science*, 2012. 50(5): s. 1196-1204.
- [63] Ciuica, O., C. Dragomir, B. Pusca, Safety Culture Model In Military Aviation Organisation. *Scientific Journal of Silesian University of Technology. Series Transport*, 2020. 108: s. 15-25.
- [64] Cooper, M.D., et al., The Safety Culture Construct: Theory and Practice, in *Safety Cultures, Safety Models: Taking Stock and Moving Forward*. 2018, Springer International Publishing: Cham. s. 47-61.
- [65] Cooper, M.D., Towards a model of safety culture. *Safety Science*, 2000. 36(2): s. 111-136.
- [66] Agencja Kolejowa Unii Europejskiej. Safety Culture. https://www.era.europa.eu/domains/safety-management/safety-culture_en [dostęp 26.01.2024 r.].
- [67] Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2018/762 z dnia 8 marca 2018 r. ustanawiające wspólne metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do wymogów dotyczących systemu zarządzania bezpieczeństwem na podstawie dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 oraz uchylające rozporządzenia Komisji (UE) nr 1158/2010 i (UE) nr 1169/2010 (Dz.U. C/2018/1392).
- [68] Agencja Kolejowa Unii Europejskiej. Introduction to the European Railway Safety Culture Model. 2020, Luksemburg.
- [69] Urząd Transportu Kolejowego, Deklaracja w sprawie kultury bezpieczeństwa w transporcie kolejowym. <https://utk.gov.pl/pl/deklaracja/> [dostęp 26.01.2024 r.].
- [70] Rail Safety and Standard Board (RSSB). <https://www.rssb.co.uk/> [dostęp 27.01.2024 r.].
- [71] Rail Safety and Standard Board (RSSB), Application of human factors within safety management systems. 2021.
- [72] Transport Canada, Safety Culture Policy Statement. Fundamentals of Safety Culture as part of a Federally-Regulated Rail Safety Regime. 2021, Kanada.
- [73] Blewett, V., et al. (red.), Keeping rail on track: preliminary findings on safety culture in Australian rail. 2012.
- [74] ADB Institute, Safety Culture in High-Speed Railways and the Importance of Top Management Decisions. 2019.
- [75] Dyrektywa 2004/49/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie bezpieczeństwa kolei wspólnotowych oraz zmieniająca dyrektywę Rady 95/18/WE w sprawie przyznawania licencji przedsiębiorstwom kolejowym, oraz dyrektywę 2001/14/WE w sprawie alokacji zdolności przepustowej infrastruktury kolejowej i pobierania opłat za użytkowanie infrastruktury kolejowej oraz certyfikację w zakresie bezpieczeństwa (Dziennik Urzędowy L 164 , 30/04/2004 P. 0044 - 0113).
- [76] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1158/2010 z dnia 9 grudnia 2010 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do zgodności z wymogami dotyczącymi uzyskania kolejowych certyfikatów bezpieczeństwa (Dz.U. L 326 z 10.12.2010).
- [77] Agencja Kolejowa Unii Europejskiej. Safety management system requirements for safety certification or safety authorisation. 2021.
- [78] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/798 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie bezpieczeństwa kolei (Dz.U. L 138 z 26.5.2016).

- [79] Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) nr 402/2013 z dnia 30 kwietnia 2013 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w zakresie wyceny i oceny ryzyka i uchylające rozporządzenie (WE) nr 352/2009. (Dz.U. L 121/8).
- [80] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1078/2012 z dnia 16 listopada 2012 r. w sprawie wspólnej metody oceny bezpieczeństwa w odniesieniu do monitorowania, która ma być stosowana przez przedsiębiorstwa kolejowe i zarządców infrastruktury po otrzymaniu certyfikatu bezpieczeństwa lub autoryzacji bezpieczeństwa oraz przez podmioty odpowiedzialne za utrzymanie (Dz.U. L 320 z 17.11.2012).
- [81] Rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2020/572 z dnia 24 kwietnia 2020 r. dotyczące struktury sprawozdań stosowanej na potrzeby sprawozdań z dochodzeń w sprawie wypadków i incydentów kolejowych (Dz. U. C/2020/2518).
- [82] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z dnia 16 marca 2016 r. w sprawie poważnych wypadków, wypadków i incydentów w transporcie kolejowym (Dz. U. 2016 poz. 369).
- [83] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 11 czerwca 2021 r. w sprawie wspólnych wskaźników bezpieczeństwa (CSI) (Dz. U. 2021 poz. 1245)
- [84] Będkowski-Kozioł, M., Ł. Gołąb, O dogmatyce prawa transportu kolejowego. Kilka uwag w dziesiątą rocznicę uchwalenia ustawy o transporcie kolejowym z 2003 r., Internetowy Kwartalnik Antymonopolowy i Regulacyjny. 2013. s. 110-129.
- [85] Tomo, A., et al., Regulation, governance and organisational issues in European Railway Regulation Authorities. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 2024. 29.
- [86] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Instrukcja o postępowaniu w sprawach poważnych wypadków, wypadków i incydentów w transporcie kolejowym Ir-8.
- [87] Siergiejczyk, M., P. Dziula, Threats to Transport Systems Catalogue. *Journal of KONBiN*, 2015. 27.
- [88] Kwaśnikowski, J., G. Gramza, Analiza wybranych zakłóceń w ruchu kolejowym. *Problemy Eksploatacji*, 2007. 2.
- [89] Romański, M., Współczesne aspekty bezpieczeństwa kolejowego w Polsce. 2014, Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- [90] Urząd Transportu Kolejowego, Sprawozdanie ze stanu bezpieczeństwa ruchu kolejowego 2022. 2023.
- [91] Urząd Transportu Kolejowego, Dane statystyczne. <https://dane.utk.gov.pl> [dostęp 25.01.2024 r.].
- [92] Urząd Transportu Kolejowego, Prezes UTK z inicjatywą badania wpływu czynnika ludzkiego na zdarzenia kolejowe. <https://utk.gov.pl/pl/aktualnosci/18892,Prezes-UTK-z-inicjatywa-badania-wplywu-czynnika-ludzkiego-na-zdarzenia-kolejowe.html> [dostęp 25.01.2024 r.].
- [93] Agencja Kolejowa Unii Europejskiej, Przewodnik: wymogi dotyczące systemu zarządzania bezpieczeństwem w zakresie certyfikacji bezpieczeństwa lub autoryzacji bezpieczeństwa. 2021.
- [94] Hong, W.T., G. Clifton, J.D. Nelson, Railway accident causation analysis: Current approaches, challenges and potential solutions. *Accident Analysis & Prevention*, 2023. 186.
- [95] Urząd Transportu Kolejowego. Opracowania Urzędu Transportu Kolejowego. <https://utk.gov.pl/pl/dokumenty-i-formularze/opracowania-urzedu-tran> [dostęp 29.01.2024 r.].
- [96] Państwowa Komisja Badania Wypadków Kolejowych. Raporty. <https://www.gov.pl/web/mswia/raporty> [dostęp 29.01.2024 r.].

- [97] Agencja Kolejowa Unii Europejskiej. European Railway Agency Database of Interoperability and Safety (ERADIS). https://eradis.era.europa.eu/safety_docs/AnnualReport/default.aspx [dostęp 30.01.2024 r.].
- [98] Office of Rail and Road. Safety statistisc. <https://dataportal.orr.gov.uk/statistics/health-and-safety/rail-safety/> [dostęp 30.01.2024 r.].
- [99] Office of the National Rail Safety Regulator. Rafil safety report. <https://www.onrsr.com.au/publications/corporate-publications/rail-safety-report> [dostęp 24.01.2024 r.].
- [100] Transportation Safety Board of Canada. Corporate publication. <https://www.tsb.gc.ca/eng/publications/index.html> [dostęp 30.01.2024 r.].
- [101] Shahrir, A., M. Manan, Assessment of Railway Safety in Southeast Asia Region. 2022. 82.
- [102] Cao, Y., et al., A statistical study of railway safety in China and Japan 1990–2020. *Accident Analysis & Prevention*, 2022. 175.
- [103] Liu, X., *Statistical Causal Analysis of Freight-Train Derailments in the United States*. *Transportation Engineering, Part A: Systems*, 2017. 143.
- [104] Blumenfeld, M., et al., Towards measuring national railways' safety through a benchmarking framework of transparency and published data. *Safety Science*, 2023. 164.
- [105] Santos, S.M., F. Carvalho, A. Mira, et al., Current Knowledge on Wildlife Mortality in Railways, *Railway Ecology*, 2017, Springer International Publishing. s. 11-22.
- [106] St. Clair, C., et al., Railway mortality for several mammal species increases with train speed, proximity to water, and track curvature. *Scientific Reports*, 2020. 10(1).
- [107] Popp, J.N., S.P. Boyle, *Railway ecology: Underrepresented in science? Basic and Applied Ecology*, 2017. 19: s. 84-93.
- [108] Roy, M., R. Sukumar, *Railways and Wildlife: A Case Study of Train-Elephant Collisions in Northern West Bengal, India*, *Railway Ecology*, 2017, Springer International Publishing. s. 157-177.
- [109] Vyas, R., A. Vasava, *Mugger Crocodile (Crocodylus palustris) Mortality due to Roads and Railways in Gujarat, India*. *Herpetological Conservation and Biology*, 2019. 14: s. 615-626.
- [110] Heske, E.J., *Blood on the Tracks: Track Mortality and Scavenging Rate in Urban Nature Preserves*. *Environmental Science*, 2015.
- [111] Dasoler, B.T., et al., The need to consider searcher efficiency and carcass persistence in railway wildlife fatality studies. *European Journal of Wildlife Research*, 2020. 66.
- [112] Godinho, C., et al., Bird Collisions in a Railway Crossing a Wetland of International Importance (Sado Estuary, Portugal), *Railway Ecology*. 2017, Springer International Publishing. s. 103-115.
- [113] Iosif, R., *Railroad-Associated Mortality Hot Spots for A Population of Romanian Hermann's Tortoise (Testudo Hermannii Boettgeri): A Gravity Model for Railroad-Segment Analysis*. *Procedia Environmental Sciences*, 2012. 14: s. 123-131.
- [114] Vemund Jaren, et al., *Moose - train collisions: the effects of vegetation removal with a cost-benefit analysis*. *Alces*, 1991. 27: s. 93-99.
- [115] Seiler, A. and M. Olsson, *Wildlife Deterrent Methods for Railways-An Experimental Study*, *Railway Ecology*. 2017, Springer International Publishing. s. 277-291.

- [116] Fedorca, A., et al., Sustainable Landscape Planning to Mitigate Wildlife–Vehicle Collisions. *Land*, 2021. 10(7).
- [117] Tamas, C., F. Janos, Annual trends in the number of wildlife-vehicle collisions on the main linear transport corridors (highway and railway) of Hungary. *North-Western Journal of Zoology*, 2014. 11.
- [118] Nezval, V., M. Bíl, Spatial analysis of wildlife-train collisions on the Czech rail network. *Applied Geography*, 2020. 125.
- [119] Krauze-Gryz, D., et al., Temporal pattern of wildlife-train collisions in Poland. *The Journal of Wildlife Management*, 2017. 81: s. 1513-1519.
- [120] Iwiński, M., et al., Environmental Protection in the Aspect of Preventing Collisions with Wild Boar, Roe Deer, Red Deer Based on Selected Railway Lines in Wielkopolska. *Rocznik Ochrony Środowiska*, 2019.
- [121] Klich, D., et al., Increasing mortality of European bison (*Bison bonasus*) on roads and railways. *Global Ecology and Conservation*, 2023. 48.
- [122] Milewicz, J., D. Mokrzan, G. Szymański, Methods to reduce wildlife collisions with rail vehicles. *Rail Vehicles*, 2021: s. 30-43.
- [123] Oliveira, L., et al., What passengers really want: Assessing the value of rail innovation to improve experiences. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2019. 1.
- [124] Ge, L., S. Voß, L. Xie, Robustness and disturbances in public transport. *Public Transport*, 2022. 14(1): s. 191-261.
- [125] Massel, A., Konkurencyjność kolei na rynku transportowym. *Gospodarowanie W Transporcie Kolejowym Unii Europejskiej*, 2007. s. 98-121.
- [126] Eriksson, C., Does tree removal along railroads in Sweden influence the risk of train accidents with moose and roe deer?, praca magisterska, Swedish University of Agricultural Sciences, 2014.
- [127] Bešinović, N., Resilience in railway transport systems: a literature review and research agenda. *Transport Reviews*, 2020. 40(4): s. 457-478.
- [128] Abioye, O.F., et al., Accident and hazard prediction models for highway-rail grade crossings: a state-of-the-practice review for the USA. *Railway Engineering Science*, 2020. 28(3): s. 251-274.
- [129] Pupavac, D., A. Marinac, J. Knežević, An Estimate of the Number of Accidents and Serious Accidents in Railway Traffic. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 2023. 52.
- [130] Feng, F., W. Li, Q. Jiang, Railway Traffic Accident Forecast Based on an Optimized Deep Auto-encoder. *PROMET - Traffic&Transportation*, 2018. 30: s. 379-394.
- [131] Wujie, J., et al., Analyzing and Predicting Railway Operational Accidents Based on Fishbone. *Tehnički vjesnik*, 2022. 29: s. 542-552.
- [132] Rungskunroch, P., A. Jack, S. Kaewunruen, Benchmarking on railway safety performance using Bayesian inference, decision tree and petri-net techniques based on long-term accidental data sets. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021. 213.
- [133] Department of Transportation. A New Model for Highway-Rail Grade Crossing Accident Prediction and Severity. 2020, Waszyngton.
- [134] Nowakowska, M., Modele regresji Bayesa w analizach bezpieczeństwa ruchu drogowego. *Drogownictwo*, 2016. 2.
- [135] Federal Railroad Administration. Web Accident Prediction System. <https://safetydata.fra.dot.gov/webaps/> [dostęp 30.01.2024 r.].

- [136] Liang, C., et al., Developing accident prediction model for railway level crossings. *Safety Science*, 2018. Volume 101: s. 48-59.
- [137] Liang, C., M. Ghazel, Accident Prediction Modeling Approaches for European Railway Level Crossing Safety. 2023.
- [138] Oh, J., S.P. Washington, D. Nam, Accident prediction model for railway-highway interfaces. *Accident Analysis & Prevention*, 2006. 38(2): s. 346-356.
- [139] Ambros, J., et al., Quantifying the impact of risk factors at railway level crossings using accident prediction models: A cross-country study. 2018.
- [140] Meng, H., et al., Railway accident prediction strategy based on ensemble learning. *Accident Analysis & Prevention*, 2022. 176.
- [141] Lorenc, A., et al., Predicting the Probability of Cargo Theft for Individual Cases in Railway Transport. *Tehnicki vjesnik - Technical Gazette*, 2020.
- [142] Chow, T., et al., A GIS approach to the development of a segment-level derailment prediction model. *Accident Analysis & Prevention*, 2021. 151.
- [143] Department of Transportation. Development of a Bayesian Network Based Accident Model for Hazmat Unit Trains. 2023, Waszyngton.
- [144] Visintin, C., et al., Managing the timing and speed of vehicles reduces wildlife-transport collision risk. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2018. 59: s. 86-95.
- [145] Ahmed, R. A. Saikia, Pandora's Box: A spatiotemporal assessment of elephant-train casualties in Assam, India. *PLOS ONE*, 2022. 17(7): s. 1-23.
- [146] Backs, J.A.J., J.A. Nychka, C.C. St. Clair, Low audibility of trains may contribute to increased collisions with wildlife. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 2022. 13.
- [147] Kietlińska, B., Mapa jako narzędzie wizualizacji i analizy danych jakościowych. *Societas Communitas*, 2018. 2: s. 177-192.
- [148] Pietkiewicz, S., Ewolucja definicji mapy w ostatnim stuleciu, *Prace i studia geograficzne*. 1995, Warszawa.
- [149] Żyszkowska, W., W. Spallek, D. Borowicz, *Kartografia tematyczna*, ed. 1. 2012, Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN.
- [150] Michno, A., *Zasady czytania i interpretacji map*. 2016.
- [151] Macioch, A., G. Malmon, *Funkcje interaktywne współczesnych map elektronicznych*, Katedra Kartografii Uniwersytetu Warszawskiego. 2010.
- [152] Crampton, J., Interactivity Types in Geographic Visualization. *Cartography and Geographic Information Science*. *Cartography and Geographic Information Science - CARTOGR GEOGR INF SCI*, 2002. 29: s. 85-98.
- [153] Roth, R., Interactive Maps: What we know and what we need to know. *Journal of Spatial Information Science*, 2013. 6: s. 59-115.
- [154] Cron, J., R. Sieber, L. Hurni, *Guidelines To Optimized Graphical User Interfaces Of Interactive Atlases*. 2007.
- [155] Rzeszewski, M., J. Jasiewicz, *WebGIS - od map w internecie do geoprzetwarzania*. GIS - platforma integracji w geografii, 2009: Bobucki Wydawnictwo Naukowe s. 23-33.
- [156] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. (mapy kolejowe). <https://www.plk-sa.pl/o-spolce/biuro-prasowe/mapy> [dostęp 16.01.2024 r.]
- [157] Indian Railways mapy sieci kolejowej. https://core.indianrailways.gov.in/view_section.jsp?lang=0&id=0,294,384 [dostęp 16.01.2024 r.].

- [158] SNCF Resau. Mapa sieci kolejowej Francji. <https://www.sncf-reseau.com/fr/carte/carte-interactive-reseau-ferre-francais-0> [dostęp 18.01.2024 r.].
- [159] Burlington Northern Santa Fe. Mapa linii kolejowych. <https://www.bnsf.com/ship-with-bnsf/maps-and-shipping-locations/rail-network-maps.page> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [160] National Rail mapy sieci kolejowej. <https://www.nationalrail.co.uk/travel-information/maps-of-the-national-rail-network/> [dostęp 16.01.2024 r.].
- [161] DB InfraGO. Mapy priorytetyzacji tras kolejowych w przypadku poważnych zakłóceń na sieci kolejowej. <https://www.dbinfra.go.com/web-en/rail-network/major-disruptions-12541124#> [dostęp 19.01.2024 r.].
- [162] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Mapa interaktywna linii kolejowych. <http://mapa.plk-sa.pl/> [dostęp 19.01.2024 r.].
- [163] DB InfraGO. Mapa interaktywna linii kolejowych. <https://geovdbn.deutschebahn.com/pgv-map/client/gisclient/index.html?applicationId=1278344> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [164] Adif. Mapa de la red ferroviaria española. <https://www.adif.es/informacion-al-usuario/mapa> [dostęp 16.01.2024 r.].
- [165] Departament Transportu Stanów Zjednoczonych. Interaktywne mapy linii kolejowych. <https://railroads.dot.gov/rail-network-development/maps-and-data/maps-geographic-information-system/maps-geographic> [dostęp 21.01.2024 r.].
- [166] Canadian National Railway Company. Mapa sieci kolejowej i punktów dystrybucyjnych. <https://cnebusiness.geomapguide.ca/> [dostęp 13.01.2024 r.].
- [167] Správa železnic. Mapa inwestycji kolejowych. <https://mapy.spravazeleznic.cz/> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [168] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Mapa inwestycji ujętych w Krajowym Programie Kolejowym. <https://www.plk-inwestycje.pl/#/> [dostęp 16.01.2024 r.].
- [169] Illinois Commerce Commission. Mapa inwestycji w obszarze przejazdów kolejowodrogowych. <https://icc.illinois.gov/rail-safety/grade-crossing-map> [dostęp 23.01.2024 r.].
- [170] OpenRailwayMap. Informacje podstawowe. <https://www.openrailwaymap.org/imprint-en.html> [dostęp 18.01.2024 r.].
- [171] OpenRailwayMap. <https://www.openrailwaymap.org/> [dostęp 16.01.2024 r.].
- [172] Ogólnopolska Baza Kolejowa. Interaktywna mapa sieci kolejowej. <https://www.bazakolejowa.pl/index.php?dzial=mapa#6/52.000/18.000> [dostęp 19.01.2024 r.].
- [173] Železnice Slovenskej Republiky. Mapy do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyłeń od rozkładu jazdy. <https://mapa.zsr.sk/index.aspx> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [174] Signalbox. Mapa do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyłeń od rozkładów jazdy. <https://www.map.signalbox.io/?location=@51.51538,-0.28227,9Z> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [175] ScotRail. Mapa zakłóceń kolejowych. <https://www.scotrail.co.uk/plan-your-journey/live-network-map/map> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [176] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. Mapa do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyłeń od rozkładu jazdy. <https://portalpasazera.pl/MapaOL> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [177] AMTRAK. Mapa do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyłeń od rozkładu jazdy. <https://www.amtrak.com/track-your-train.html> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [178] Via Rail Canada. Mapa do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyłeń od rozkładu jazdy. <https://tsimobile.viarail.ca/> [dostęp 22.01.2024 r.].

- [179] Ameryka Północna. Mapa do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyień od rozkładu jazdy. <https://asm.transitdocs.com/> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [180] Mobility Portal. Mapa do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyień od rozkładu jazdy. <https://mobility.portal.geops.io/world.geops.transit?layers=paerke,strassennamen,halte,kanten,haltestellen,pois,world.geops.traviclive&x=810000&y=5900000&z=5.5&baselayer=world.geops.travic> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [181] General Transit Feed Specification. Making Public Transit Data Universally Accessible. <https://gtfs.org/> [dostęp 22.01.2024 r.].
- [182] DB InfraGO. Mapa zakłóceń w ruchu kolejowym. https://db-livemaps.hafas.de/bin/query.exe/dn?L=vs_baustellen& [dostęp 22.01.2024 r.].
- [183] Składana, P., et al., Trespassing Railway Property – Typology of Risk Localities. *Transportation Research Procedia*, 2016. 14: s. 2091-2100.
- [184] Projekt AMELIA. Mapa potrażeń osób postronnych przez pociągi w Czechach. <https://www.cdvgis.cz/~kubeczek/amelia/index.php> [dostęp 19.01.2024 r.].
- [185] Bezpieczny przejazd - mapa zdarzeń na przejazdach kolejowo-drogowych. <https://bezpieczny-przejazd.pl/ku-przestrodze/> [dostęp 19.01.2024 r.].
- [186] The Railways Archive. <https://www.railwaysarchive.co.uk/> [dostęp 08.02.2024 r.].
- [187] Gawlak, K., Sytuacja transportu kolejowego w wybranych państwach Unii Europejskiej, III Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Transport Kolejowy Przeszłość - Teraźniejszość - Przyszłość Urząd Transportu Kolejowego, 2019, Warszawa.
- [188] Gawlak, K., Mapa zdarzeń kolejowych jako narzędzie wspierające system zarządzania bezpieczeństwem przewoźnika kolejowego, praca magisterska, Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, 2020.
- [189] Gawlak, K., Mapa zdarzeń kolejowych w roli innowacyjnego projektu wspomagającego system zarządzania bezpieczeństwem regionalnego przewoźnika Koleje Śląskie sp. z o.o., IV Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna Transport Kolejowy Przeszłość - Teraźniejszość - Przyszłość Urząd Transportu Kolejowego, 2021, Warszawa.
- [190] Lima, S.L., et al., Animal reactions to oncoming vehicles: a conceptual review. *Biological Reviews*, 2015. 90(1): s. 60-76.
- [191] Bhardwaj, M., et al., Ungulates and trains -- Factors influencing flight responses and detectability. *Journal of Environmental Management*, 2022. 313.
- [192] Babińska-Werka, J., et al., Effectiveness of an acoustic wildlife warning device using natural calls to reduce the risk of train collisions with animals. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2015. 38: s. 6-14.
- [193] Urządzenia Ochrony Zwierząt UOZ-1 NELL sp. z o.o. <https://neel.com.pl/web/?id=1,5> [dostęp 08.02.2024 r.].
- [194] Bryniarska, Z., A. Kuza, Analiza wpływu COVID-19 na funkcjonowanie transportu pasażerskiego. *Transport Miejski i Regionalny*, 2021.
- [195] Gawlak, K., et al., Statistical analysis of geoinformation data for increasing railway safety. 2024 (artykuł w trakcie publikacji).

Spis załączników

- Załącznik 1 Mapa wydarzeń kolejowych Kolei Śląskich z warstwą ostrzeżeń dla godzin 11:00-11:59
- Załącznik 2 Mapa wydarzeń kolejowych Kolei Śląskich z warstwą ostrzeżeń dla godzin 18:00-18:59
- Załącznik 3 Mapa wydarzeń kolejowych Kolei Wielkopolskich z warstwą ostrzeżeń dla godzin 11:00-11:59
- Załącznik 4 Mapa wydarzeń kolejowych Kolei Wielkopolskich z warstwą ostrzeżeń dla godzin 18:00-18:59

Spis rysunków

Rysunek 1	Pionowa klasyfikacja transportu	8
Rysunek 2	Aspekty kultury bezpieczeństwa.....	15
Rysunek 3	Doskonalenie kultury bezpieczeństwa.....	15
Rysunek 4	Struktura wydarzeń kolejowych wraz ze wstępną metodyką ich kwalifikacji ...	22
Rysunek 5	Średnia liczba kolizji z sarnami, jeleniami, łosiami i dzikami przypadająca na dzień (z rozróżnieniem na dni robocze i weekend) wyznaczona modelem GAMM.....	28
Rysunek 6	Wzrost złożoności zadań w ramach interaktywności mapy.....	34
Rysunek 7	Mapa sieci kolejowej PKP PLK S.A. - maksymalne prędkości rozkładowe (a), wycinek schematu sieci kolejowej w Wielkiej Brytanii (b).....	37
Rysunek 8	PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. - mapa interaktywna linii kolejowych.....	38
Rysunek 9	DB InfraGo - mapa interaktywna linii kolejowych	38
Rysunek 10	Správa železnic – interaktywna mapa inwestycji kolejowych.....	39
Rysunek 11	OpenRailwayMap prezentująca rozstaw torów (widok na Europę, Azję oraz północną i środkową Afrykę).....	40
Rysunek 12	OpenRailwayMap - wycinek na stację London St. Pancras International i London King's Cross. Maksymalne prędkości (a), infrastruktura (kategoria linii i numer toru) (b)	41
Rysunek 13	Ogólnopolska Baza Kolejowa – mapa z widokiem na południową Polskę (a), etykieta stacji Wrocław Główny (b), przekierowanie z odnośnika Linia Bytom – Wrocław Główny (132) (c)	41
Rysunek 14	Mapy do śledzenia lokalizacji pociągów i odchyłeń od rozkładu jazdy: Słowacja (a), Wielka Brytania (b)	42
Rysunek 15	DB InfraGO - mapa zakłóceń w ruchu kolejowym	43
Rysunek 16	Projekt „Amelia” - mapa kolizji pociągów z osobami postronnymi (a), zbliżenie na etykietę z informacjami o zdarzeniu (b).....	44
Rysunek 17	Departament Transportu Stanów Zjednoczonych - mapa kolizji pociągów z osobami postronnymi	45
Rysunek 18	Bezpieczny przejazd – mapa zdarzeń kolejowych na wybranych przejazdach kolejowo-drogowych w Polsce	46
Rysunek 19	The Railways Archive - mapa zdarzeń kolejowych w Wielkiej Brytanii	46

Rysunek 20	Liczba kolizji pociągów Kolei Śląskich ze zwierzyną na poszczególnych liniach kolejowych w latach 2020-2022	54
Rysunek 21	Wskaźnik kolizji ze zwierzyną na liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Śląskie na podstawie danych z lat 2020-2022	54
Rysunek 22	Wskaźnik gęstości kolizji ze zwierzyną na 5 km odcinkach linii nr 143 (a), 140 (b), 1 (c), 139 (d).....	57
Rysunek 23	Średnia liczba pociągów w dni robocze na poszczególnych liniach kolejowych: 143 (a), 140 (b), 1 (c), 139 (d)	59
Rysunek 24	Liczba kolizji ze zwierzyną na liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Wielkopolskie w latach 2020-2022.....	60
Rysunek 25	Wskaźnik kolizji ze zwierzyną dla poszczególnych linii kolejowych na podstawie danych z lat 2020-2022	61
Rysunek 26	Wskaźnik gęstości kolizji ze zwierzyną na 5 km odcinkach linii nr 356 (a), 357 (b), 354 (c), 3 (d).....	64
Rysunek 27	Liczba pociągów w dni robocze na poszczególnych liniach kolejowych: 356 (a), 357 (b), 354 (c), 3 (d).....	65
Rysunek 28	Roczny (a) oraz miesięczny: XI-XII i I-II (b), IX-X i III-IV (c), V-VIII (d) rozkład kolizji pociągów Kolei Śląskich ze zwierzyną w okresie 2020-2022.....	70
Rysunek 29	Roczny (a) oraz miesięczny: XI-XII i I-II (b), IX-X i III-IV (c), V-VIII (d) rozkład kolizji pociągów Kolei Wielkopolskich ze zwierzyną w okresie 2020-2022	71
Rysunek 30	Ostrzeżenia w styczniu (I) w zakresie prawdopodobieństwa kolizji pojazdu kolejowego ze zwierzyną przy uwzględnieniu różnych wartości progowych wydawanego ostrzeżenia dla linii kolejowych nr 143 (a), 140 (b), 1 (c), 139 (d).....	76
Rysunek 31	Ostrzeżenia w czerwcu (VI) w zakresie prawdopodobieństwa kolizji pojazdu kolejowego ze zwierzyną przy uwzględnieniu różnych wartości progowych wydawanego ostrzeżenia dla linii kolejowych nr 143 (a), 140 (b), 1 (c), 139 (d).....	77
Rysunek 32	Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 143 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w lutym (a) i kwietniu (b)	78
Rysunek 33	Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 140 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w styczniu (a) i kwietniu (b)	78
Rysunek 34	Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 1 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w styczniu (a) i marcu (b)	79

Rysunek 35	Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 139 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w marcu (a) i kwietniu (b).....	79
Rysunek 36	Ostrzeżenia w kwietniu (IV) w zakresie prawdopodobieństwa kolizji pojazdu kolejowego ze zwierzyną przy uwzględnieniu różnych wartości progowych wydawanego ostrzeżenia dla linii kolejowych nr 356 (a), 357 (b), 354 (c), 3 (d).....	80
Rysunek 37	Ostrzeżenia w listopadzie (XI) w zakresie prawdopodobieństwa kolizji pojazdu kolejowego ze zwierzyną przy uwzględnieniu różnych wartości progowych wydawanego ostrzeżenia dla linii kolejowych nr 356 (a), 357 (b), 354 (c), 3 (d).....	81
Rysunek 38	Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 356 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w lutym (a) i kwietniu (b)	82
Rysunek 39	Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 357 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w lutym (a) i kwietniu (b)	82
Rysunek 40	Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 354 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w styczniu (a) i lutym (b).....	83
Rysunek 41	Ostrzeżenia wydane dla linii kolejowej nr 3 wraz z oznaczeniem kolizji zarejestrowanych w 2023 r. odpowiednio w styczniu (a) i marcu (b)	83
Rysunek 42	Wyznaczanie współrzędnych geograficznych dla wybranych punktów linii kolejowej nr 139 obsługiwanej przez Koleje Śląskie sp. z o.o. na mapie interaktywnej linii kolejowych (PKP Polskie Linie Kolejowe S.A.).....	87
Rysunek 43	Mapa pięciokilometrowych odcinków linii kolejowych nr 140, 143, 1, 139 utworzona dla Kolei Śląskich w oprogramowaniu QGIS, po prawej stronie znajduje się tabela atrybutów z przypisanymi wartościami ostrzeżeń.....	88
Rysunek 44	Mapa pięciokilometrowych odcinków linii kolejowych nr 354, 356, 357, 3 utworzona dla Kolei Wielkopolskich w oprogramowaniu QGIS, po prawej stronie znajduje się tabela atrybutów z przypisanymi wartościami ostrzeżeń.....	88
Rysunek 45	Mapa wydarzeń kolejowych Kolei Śląskich z warstwami ostrzeżeń dla godzin 11:00-11:59 (a) oraz 18:00-18:59 (b) utworzona w oprogramowaniu ArcGIS...	90
Rysunek 46	Mapa wydarzeń kolejowych Kolei Wielkopolskich z warstwami ostrzeżeń dla godzin 11:00-11:59 (a) oraz 18:00-18:59 (b) utworzona w oprogramowaniu ArcGIS	90

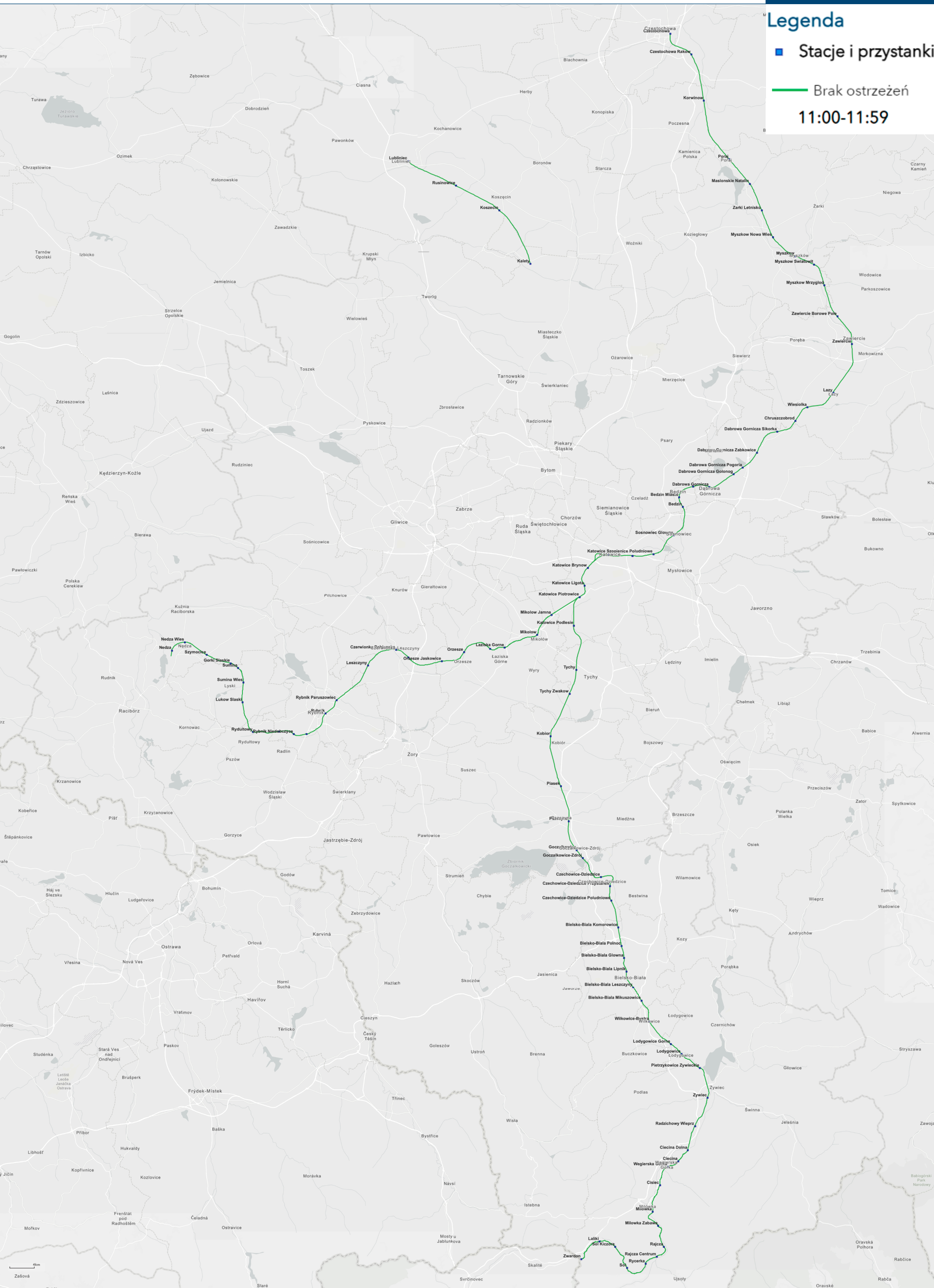
Spis tabel

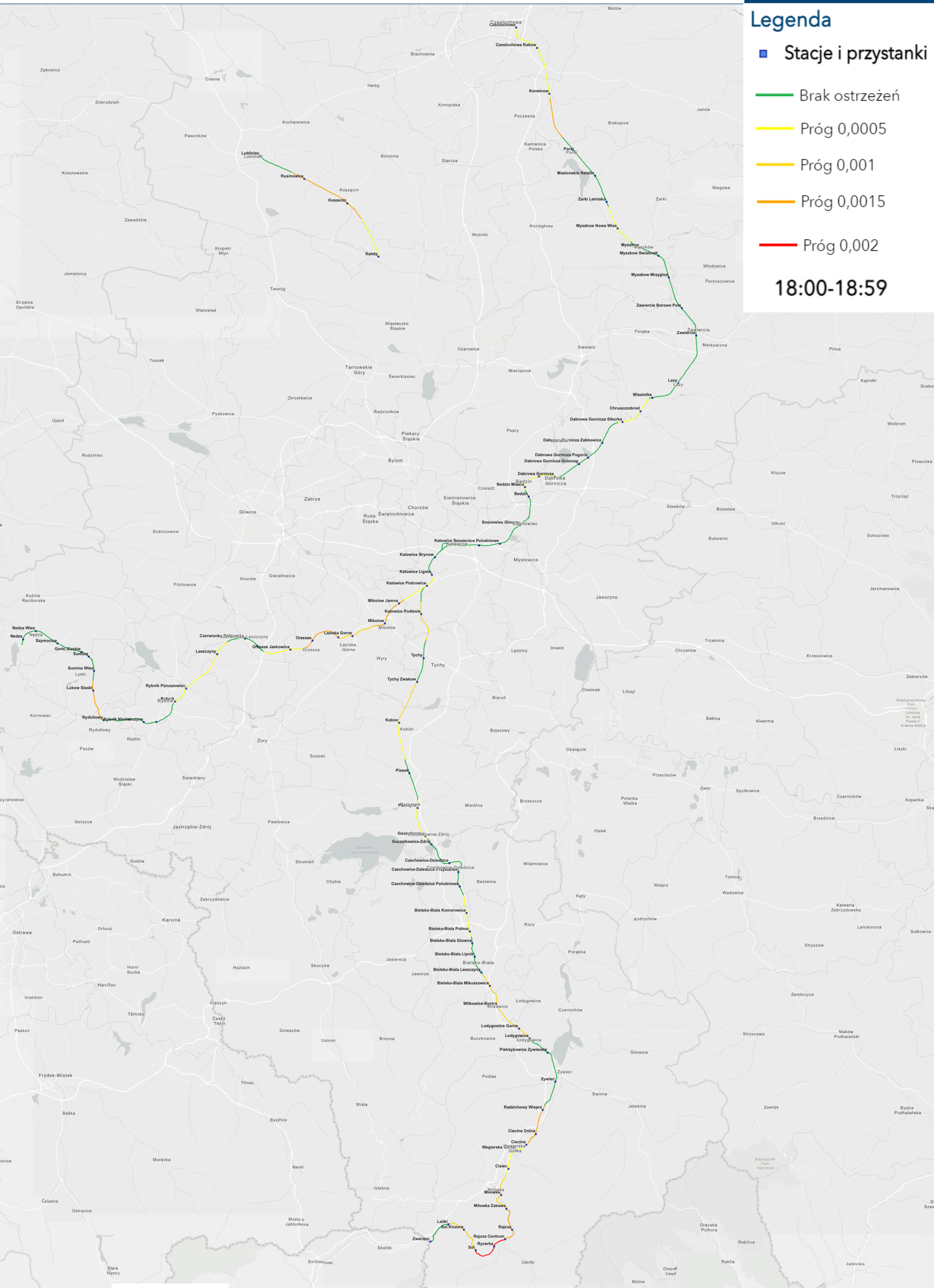
Tabela 1	Regulacje prawne powiązane z bezpieczeństwem w aspekcie przewoźników kolejowych.....	20
Tabela 2	Typy interaktywności map.....	34
Tabela 3	Podgrupy, grupy i funkcje interaktywne.....	35
Tabela 4	Analiza występowania kolizji ze zwierzyną na poszczególnych liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Śląskie	55
Tabela 5	Analiza występowania kolizji ze zwierzyną na poszczególnych liniach kolejowych obsługiwanych przez Koleje Wielkopolskie.....	62
Tabela 6	Przykładowe dane wejściowe niezbędne do zastosowania Procedury nr 1 BayesWarnAnimals	74
Tabela 7	Weryfikacja modelu predykcji potrażeń zwierzyny przez pociągi (Koleje Śląskie)	84
Tabela 8	Weryfikacja modelu predykcji potrażeń zwierzyny przez pociągi (Koleje Wielkopolskie).....	84
Tabela 9	Oznaczenie przedziałów wartości progowych prawdopodobieństwa w tabeli atrybutów	89

Legenda

- Stacje i przystanki
- Brak ostrzeżeń

11:00-11:59





Legenda

- Stacje i przystanki
- Brak ostrzeżeń
- Próg 0,0005
- Próg 0,001
- Próg 0,0015
- Próg 0,002

18:00-18:59

Legenda

- Stacje i przystanki
- Brak ostrzeżeń
- Próg 0,0005

11:00-11:59



Legenda

■ Stacje i przystanki

— Brak ostrzeżeń

— Próg 0,0005

— Próg 0,001

— Próg 0,0015

— Próg 0,002

18:00-18:59

