

kpt. mgr inż. Michał Pająk<sup>a)</sup>, dr hab. inż. Monika Madej, prof. PŚk<sup>b)\*</sup>, prof. dr hab. inż. Dariusz Ozimina<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup>Komenda Wojewódzka Państwowej Straży Pożarnej w Kielcach / Świętokrzyskie Headquarters of the State Fire Service

<sup>b)</sup>Politechnika Świętokrzyska / Kielce University of Technology

\*Autor korespondencyjny / Corresponding author: mmadej@tu.kielce.pl

## Analiza ryzyka dla transportu drogowego towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem

Risk Analysis for Road Transport of Explosive Dangerous Goods

Анализ риска автомобильного транспорта взрывоопасных грузов

### ABSTRAKT

**Cel:** W artykule opisano metodykę analizy ryzyka grupowego dla transportu drogowego towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem.

**Projekt i metody:** Do określenia poziomu ryzyka związanego z transportem drogowym towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem zastosowano dane przestrzenne obejmujące swym zasięgiem obszar całej Polski. Do przetworzenia wyżej wymienionych danych wykorzystano oprogramowanie GIS oraz bazę danych PostgreSQL z nakładką Postgis. Analiza ryzyka została opracowana w oparciu o matrycę, której składowymi były: analiza prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku oraz jego skutków dla społeczeństwa zamieszkującego wokół dróg krajowych. W analizie prawdopodobieństwa uwzględniono: dotychczasowe miejsca występowania wypadków z udziałem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem (w latach 2010–2015), przestrzenne rozmieszczenie parkingów ze stanowiskami dla pojazdów przewożących towary niebezpieczne, stan nawierzchni dróg krajowych oraz parametr określający kolizyjność lub bezkolizyjność tych dróg. Przedstawiono również metodykę dotyczącą sposobu selekcji akcji w transporcie drogowym z udziałem autocystern przewożących towary niebezpieczne stwarzające zagrożenie wybuchem. Omówiono także statystykę wyżej wymienionych wypadków. W analizie skutków uwzględniono szczegółową gęstość zaludnienia wokół dróg krajowych w promieniu do 1000 metrów. Analizy zostały wykonane indywidualnie dla każdego odcinka drogi krajowej o długości do 1 km. Ich etapy zostały zwizualizowane w formie map, które obejmują swym zasięgiem wszystkie drogi krajowe w Polsce.

**Wyniki:** Na podstawie przeprowadzonych badań określono poziom ryzyka grupowego związanego z transportem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem dla wszystkich odcinków dróg krajowych. Wyniki przeprowadzonych badań mogą być pomocne w bardziej świadomym planowaniu tras przewozu tego typu towarów niebezpiecznych.

**Wnioski:** We wnioskach przedstawionych w artykule opisano działania mające na celu obniżenie ryzyka związanego z transportem drogowym towarów niebezpiecznych. Uwzględniono w nich również rekomendacje mające na celu optymalizację metodyki, na bazie której została opracowana analiza ryzyka.

**Słowa kluczowe:** transport drogowy, towary niebezpieczne, wypadki, analiza ryzyka, analiza prawdopodobieństwa, analiza skutków, zagrożenie wybuchem, gęstość zaludnienia

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

Przyjęty: 22.11.2017; Zrecenzowany: 20.12.2017; Opublikowany: 29.12.2017;

Procentowy wkład merytoryczny w powstanie artykułu: M. Pająk – 55%, M. Madej – 35%, D. Ozimina 10%;

Proszę cytować: BiTP Vol. 48 Issue 4, 2017, pp. 54–69, doi: 10.12845/bitp.48.4.2017.3;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

### ABSTRACT

**Objective:** This paper describes the methodology for analysing the societal risk involved in road transport of dangerous goods.

**Project and methods:** Spatial data covering the whole territory of Poland were used to determine the level of risk involved in the transport of dangerous goods by road. The GIS software and PostgreSQL database with a POSTGIS extension were employed to process this data. The risk analysis was based on a matrix which included an accident-likelihood assessment and a consequence assessment for communities living near national roads. The likelihood assessment included the recorded locations of accidents involving explosive dangerous goods (in the years 2010–2015), the spatial distribution of parking areas with spaces intended for vehicles carrying explosive dangerous goods, the condition of pavements on national roads and whether these roads have partial or no grade separation, or full grade separation. The paper also presents a methodology for the selection of fire-service operations involving tanker lorries carrying explosive dangerous goods. The statistics of the abovementioned accidents are also discussed. The consequence assessment takes into account the specific population density around national roads within a radius of up to 1,000 meters. The assessments were undertaken individually for each national-road section with a length of up to 1 km. The individual stages of these assessments were visualised as maps covering all national roads in Poland.

**Results:** The study has established the level of societal risk associated with the transport of explosive dangerous goods for all national-road sections. The results of the study could help to make better-informed planning decisions regarding dangerous-goods routes.

**Conclusions:** In the conclusions section, the paper describes the measures to mitigate the societal risk associated with road transport of dangerous goods. The conclusions also include recommendations to optimise the methodology used in the risk analysis.

**Keywords:** road transport, dangerous goods, risk analysis, likelihood assessment, consequence assessment, explosion hazard, population density

**Type of paper:** original scientific article

Received: 22.11.2017; Reviewed: 20.12.2017; Published: 29.12.2017;

Percentage contribution: M. Pająk – 55%, M. Madej – 35%, D. Ozimina 10%;

Please cite as: BiTP Vol. 48 Issue 4, 2017, pp. 54–69, doi: 10.12845/bitp.48.4.2017.3;

This is an open access article under the CC BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

## АННОТАЦИЯ

**Цель:** В статье описывается методология анализа группового риска автомобильных перевозок опасных грузов, представляющих угрозу взрыва.

**Проект и методы:** Для определения уровня риска, связанного с автомобильным транспортом взрывоопасных товаров, были использованы пространственные данные, охватывающие всю территорию Польши. Для обработки этих данных было использовано программное обеспечение Геоинформационной системы и база данных PostgreSQL с интерфейсом Postgis. Анализ риска был разработан на основе матрицы, компонентами которой были: анализ вероятности аварии и анализ последствий для населения, живущего вокруг национальных дорог. Анализ вероятности включал в себя: фактические места происшествий с взрывоопасными товарами (в 2010–2015 гг.), пространственное расположение парковок, предназначенных для автомобилей, перевозящих взрывоопасные товары, состояние поверхности национальных дорог и параметр, определяющий количество ДТП либо безаварийность на национальных дорогах. Была также представлена методология выбора действий при транспортировке взрывоопасных товаров с участием автоцистерн. Обсуждалась также статистика вышеупомянутых аварий. В анализе последствий была учтена точная плотность населения, проживающего вокруг национальных дорог в радиусе до 1000 метров. Анализ проводился индивидуально для каждого участка национальной дороги протяженностью до 1 км. Этапы вышеуказанного анализа были отображены в виде карт, которые охватывают все национальные дороги в Польше.

**Результаты:** На основе проведенных исследований был определен уровень группового риска, связанного с транспортом взрывоопасных товаров для всех участков национальных дорог. Результаты проведенных исследований могут быть полезны при более сознательном планировании маршрутов транспортировки таких товаров.

**Выводы:** В выводах, представленных в статье, описываются действия, направленные на снижение риска, связанного с перевозкой взрывоопасных товаров. Выводы включают также рекомендации, направленные на оптимизацию методологии, на основе которой был разработан анализ рисков.

**Ключевые слова:** дорожный транспорт, опасные грузы, аварии, анализ риска, анализ вероятности, анализ последствий, угроза взрыва, плотность населения

**Вид статьи:** оригинальная научная работа

Принята: 22.11.2017; Рецензирована: 20.12.2017; Опубликована: 29.12.2017;

Процентное соотношение вклада в создание статьи: M. Pająk – 55%, M. Madej – 35%, D. Ozimina 10%;

Просим ссылаться на статью следующим образом: BiTP Vol. 48 Issue 4, 2017, pp. 54–69, doi: 10.12845/bitp.48.4.2017.3;

Настоящая статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией CC BY-NC-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

## Wprowadzenie

Towary stwarzające zagrożenie wybuchem są najczęściej przewożonymi towarami niebezpiecznymi [1]. Spośród wszystkich klas towarów niebezpiecznych określonych w umowie ADR (1, 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 5.2, 6.1, 6.2, 7, 8 i 9) w przeważającej większości zaliczają się one do trzech pierwszych.

Powszechność transportu towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem powoduje, że spośród wszystkich towarów niebezpiecznych mają one największy udział w wypadkach [2]. Co więcej, analiza wypadków drogowych z udziałem towarów niebezpiecznych wykazała, że w najtragiczniejszych zdarzeniach, z największą liczbą ofiar śmiertelnych, transportowano towary klasy 2 i 3 [2].

W artykule posłużono się następującymi definicjami:

- **towary niebezpieczne stwarzające zagrożenie wybuchem** – towary niebezpieczne zaliczone do klasy 1, 2, 3, 5.2, 6.1, oraz 8, których pary są palne,

## Introduction

Explosive dangerous goods are the largest component of all dangerous goods transported [1]. According to ADR, dangerous goods are divided into Classes 1, 2, 3, 4.1, 4.2, 4.3, 5.1, 5.2, 6.1, 6.2, 7, 8 and 9. Explosive dangerous goods are predominantly included in Classes 1, 2 and 3.

Explosive dangerous goods are transported on a regular basis, which is why accidents involving them are the most common among all types of dangerous goods [2]. What is more, an analysis of road accidents involving dangerous goods showed that the most tragic accidents with fatalities were caused by vehicles carrying Class 2 and Class 3 goods [2].

The following definitions are used in this paper:

- **explosive dangerous goods** - Class 1 dangerous goods and Class 2, 3, 5.2, 6.1 and 8 dangerous goods with flammable vapours;
- **risk** – the product of hazard-trigger event probability (a road accident involving explosive dangerous goods)

- **ryzyko** – iloczyn prawdopodobieństwa aktywizacji zagrożenia (zagrożeniem będzie wystąpienie wypadku drogowego z udziałem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem) oraz poziomu spowodowanych w związku z tym strat (w pracy przeanalizowano straty osobowe) [4],
- **ryzyko grupowe** – przedstawia prawdopodobieństwo tego, że określona liczba osób, która znajduje się na danym obszarze jest narażona na negatywne skutki zdarzenia niekorzystnego [13],
- **analiza ryzyka** – oszacowanie prawdopodobieństw, konsekwencji oraz poziomu ryzyka [5, 6],
- **kolizyjne odcinki dróg** – odcinki dróg, na których znajdują się: światła drogowe, kolizyjne skrzyżowania lub bezkolizyjne skrzyżowania ze światłami drogowymi,
- **bezkolizyjne odcinki dróg** – wszystkie pozostałe odcinki dróg, które nie zostały zaliczone do kolizyjnych.

W pracy przeprowadzono analizę dla ryzyka grupowego, które dotyczy społeczeństwa zamieszkującego wokół dróg krajowych DK na obszarze całego kraju. Ryzyko grupowe zostało oszacowane jako ryzyko powierzchniowe [3]. Dla każdego odcinka drogi krajowej o długości do 1 km wraz z obszarem w bezpośrednim sąsiedztwie został oszacowany poziom ryzyka.

Wartość ryzyka została obliczona jako iloczyn prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku w transporcie drogowym z udziałem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem oraz strat związanych z liczbą osób, która jest narażona na konsekwencje danego wypadku.

Do przeprowadzenia analizy ryzyka wykorzystano dane, które mają odniesienie przestrzenne. Problematyka analizy ryzyka zawarta w artykule jest odmienna niż w pozostałych badaniach naukowych realizujących przedmiotową tematykę. W wielu publikacjach opiera się ona głównie na czynniku ludzkim (zachowanie kierowcy) [15, 16] lub na intensywności ruchu drogowego [17]. W niniejszej pracy jako składowe niezbędne do obliczenia analizy ryzyka uwzględniono dane, które mają odniesienie przestrzenne oraz są kompletne dla obszaru całej Polski, tj. infrastruktura drogowa i wypadki z udziałem towarów niebezpiecznych. Na potrzeby opracowania analizy ryzyka wykonano również szacunkowy model gęstości zaludnienia.

W celu opracowania analizy prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych wykorzystano dane:

- z warstwy cyfrowej dróg krajowych pochodzącej z zasobów CODGIK (aktualność danych jest różna dla poszczególnych województw: 13.09.2015–08.07.2016) [7],
- dotyczące wypadków z udziałem towarów niebezpiecznych, z warstwy cyfrowej z przestrzennym rozmieszczeniem wypadków w transporcie drogowym z udziałem towarów niebezpiecznych za lata 2010–2015 [11],
- z warstwy kolizyjności i bezkolizyjności dróg krajowych opracowanej na bazie warstwy dróg krajowych pochodzącej z zasobów CODGIK oraz na podstawie ogólnodostępnych danych [8],
- z warstwy stanu nawierzchni dróg opracowanej na bazie warstwy dróg krajowych pochodzącej z zasobów

will be considered as a hazard-trigger event) and the resulting losses (this paper analyses the losses of life) [4];

- **societal risk** – represents the probability of a certain number of people in a given area being exposed to the negative effects of an adverse event [13];
- **risk analysis** – an estimation of likelihood, consequences and risk [5, 6];
- **partially separated or non-grade-separated road sections** – sections with traffic lights, non-grade-separated junctions or grade-separated junctions with traffic lights;
- **fully grade-separated road sections** – all sections of roads other than partially separated or non-grade separated.

The paper analyses the societal risk for communities living near national roads (DK) across Poland. The societal risk was estimated as an area risk [3]. Risk levels were estimated for each section of a national road with a length of up to 1 km along with the area in the immediate vicinity.

The risk was calculated as the product of the likelihood of a road accident involving explosive dangerous goods and the number of people potentially exposed to the consequences of the accident.

The risk analysis used spatially referenced data. The risk analysis in this paper is approached differently from other studies dealing with the subject at hand. Many publications focus primarily on the human factor (driver behaviour) [15, 16] or traffic intensity [17]. In this work, spatially referenced data for the whole territory of Poland were taken into account as the necessary components for risk estimation and analysis. These include road infrastructure and accidents involving dangerous goods. Furthermore, for the purposes of the risk analysis, a population density model was estimated.

For the purposes of assessing the likelihood of an accident involving dangerous goods, the following data were used:

- the digital layer of national roads from the resources of the Geodesic and Cartographic Documentation Centre (the timing of data collection varies between individual voivodships and includes the period between 13 September 2015 and 08 July 2016) [7];
- data on accidents involving dangerous goods from a digital layer with spatial distribution of accidents in road transport involving dangerous goods for the years 2010–2015 [11];
- the layer of fully grade-separated and partially or non-grade-separated sections of national roads, based on the layer of national roads from the Geodesic and Cartographic Documentation Centre's resources and on the basis of publicly available data [8];
- the layer of the road-pavement condition based on the national-road layer from the Geodesic and Cartographic Documentation Centre's resources and on the basis of publicly available data [9];
- data from General Directorate for National Roads and Motorways related to the spatial arrangement of parking

CODGIK oraz na podstawie ogólnodostępnych danych [9],

- GDDKiA związane z przestrzennym rozmieszczeniem parkingów przeznaczonych dla pojazdów przewożących towary niebezpieczne (według stanu na sierpień 2016 r.) [10].

Podczas opracowania analizy skutków zastosowano dane z:

- warstwy cyfrowej dróg krajowych pochodzącej z zasobów CODGIK (aktualność danych jest różna dla poszczególnych województw: 13.09.2015–08.07.2016) [7],
- warstwy punktów adresowych (aktualnej na dzień 15.11.2016 r. – zawierającej 7 437 098 adresów) opracowanej na podstawie danych z CODGIK [7],
- warstwy gęstości zaludnienia w formie siatki o długości boku 1 km, która została przygotowana na podstawie danych GUS dotyczących narodowego spisu powszechnego z 2011 roku [11].

## Metodyka badań

### Analiza prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych

W celu rozpatrzenia prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku w transporcie drogowym z udziałem towarów niebezpiecznych przeanalizowane zostały następujące grupy przyczyn: droga (stan nawierzchni, kolizyjność), ruch (intensywność transportu TN interpolowana na podstawie występowania wypadków z ich udziałem) oraz człowiek (dostępność parkingów dla pojazdów transportujących towary niebezpieczne – możliwość odpoczynku kierowcy).

W celu przeprowadzenia analizy prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych, każdemu odcinkowi drogi krajowej [DK] o długości do 1 km przypisano wartość prawdopodobieństwa zgodnie ze wzorem:

$$P = 0,35W + 0,45K + 0,1N + 0,1A$$

gdzie:

**W** – warstwa dróg krajowych podzielona na odcinki z przypisaną wartością określającą częstotliwość dotychczasowego występowania wypadków z udziałem autocystern przewożących towary niebezpieczne stwarzające zagrożenie wybuchem; skala wartości: 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,

**K** – warstwa dróg krajowych podzielona na odcinki z przypisaną wartością określającą kolizyjność lub bezkolizyjność drogi; skala wartości: 0; 1,

**N** – warstwa dróg krajowych podzielona na odcinki z przypisaną wartością określającą jakość nawierzchni drogi; skala wartości: 0; 0,2; 0,5; 1,

**A** – warstwa dróg krajowych podzielona na odcinki z przypisaną dostępnością parkingów ze stanowiskami postojowymi dla pojazdów przewożących towary niebezpieczne; skala wartości: 0; 0,5; 1.

Wartości wag dla poszczególnych komponentów wzoru zostały opracowane na podstawie: literatury, wyników badań i wiedzy eksperckiej (tabela 1).

Następnie opracowano warstwy:

areas intended for vehicles carrying dangerous goods (as at August 2016) [10].

The following data were used in the consequence assessment:

- the digital layer of national roads from the resources of the Geodesic and Cartographic Documentation Centre (the timing of data collection varies between individual voivodships and includes the period between 13 September 2015 and 08 July 2016) [7];
- the address layer (as at 15 November 2016 – it contains 7,437,098 addresses) based on the Geodesic and Cartographic Documentation Centre's data [7];
- the layer of population density in the form of a grid with a side length of 1 km, developed on the basis of 2011 national-census data from the Central Statistical Office of Poland [11].

## Methodology

### The likelihood assessment of an accident involving dangerous goods

In order to consider the likelihood of a road accident involving dangerous goods, the following groups of causes were taken into account: road-related (pavement condition, no grade separation), traffic-related (the intensity of traffic involving dangerous goods, interpolated on the basis of the occurrence of accidents involving dangerous goods) and human-related (the availability of parking areas for vehicles carrying dangerous goods – rest areas).

In order to assess the likelihood of an accident with involving dangerous goods, a likelihood is assigned to each national-road section with a length of up to 1 km, according to the following formula:

$$P = 0.35W + 0.45K + 0.1N + 0.1A$$

where:

**W** – the national-road layer divided into sections with an assigned value defining the frequency of accidents involving tanker lorries carrying explosive dangerous goods; the frequencies are on a scale of 0; 0.25; 0.5; 0.75; 1;

**K** – the national-road layer divided into sections with an assigned value defining whether the road is partially or non-grade-separated, or fully grade-separated; the values are on a scale of 0; 1;

**N** – then national-road layer divided into sections with an assigned value defining road pavement quality, the values are on a scale of 0; 0.2; 0.5; 1;

**A** – the national-road layer divided into sections with the assigned availability of parking areas for vehicles carrying dangerous goods, the values are on a scale of 0; 0.5; 1.

The weights of the individual components of the formula were calculated based on the literature, study findings and expert knowledge (Table 1).

Subsequently, layers were developed for:

- accidents involving explosive dangerous goods;

## RESEARCH AND DEVELOPMENT

- wypadków z udziałem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem,
  - kolizyjności i bezkolizyjności dróg,
  - stanu nawierzchni dróg,
  - dostępności parkingów ze stanowiskami postojowymi dla pojazdów przewożących TN.
- partially or non-grade-separated roads and fully grade-separated roads;
  - condition of road pavements;
  - availability of parking areas with parking spaces intended for vehicles carrying dangerous goods.

**Tabela 1.** Wagi dla wzoru określającego prawdopodobieństwo

**Table 1.** Weights for the likelihood formula

Grupa przyczyn wypadku/Group of accident causes	Droga (0,55)/Road (0.55)		Ruch (0,45)/Traffic (0.45)	Kierowca (0,1)/Driver (0.1)	
Waga – czynnik wystąpienia wypadku/ Weight – factor of accident	0,45 – kolizyjność /bezkolizyjność drogi 0.45 – partially or non-grade-separated roads and fully grade-separated roads		0,45 – występowanie wypadków w przeszłości 0.45 – accident occurrence in the past	0,1 – dostępność parkingu na którym kierowca może odpocząć 0.1 – availability of rest areas	
Umożliwienie wartości przypisanej wagi/ Justification of the assigned weight	70% wypadków na DK z udziałem cystern z TN zagrażających wybuchem miało miejsce na kolizyjnych odcinkach DK. Mając na uwadze fakt, że kolizyjne drogi stanowią większą część wszystkich DK, do ww. czynnika przypisano wagę 0,45./70% of accidents on national roads involving tankers carrying explosive dangerous goods took place on non-grade-separated national roads. Considering that non-grade-separated roads constitute the majority of all national roads, a weight of 0.45 was assigned to this factor.		Zgodnie z literaturą: – niewłaściwa infrastruktura ma pośredni lub bezpośredni wpływ na 30% wszystkich wypadków [12] – stan nawierzchni drogi jest w niewielkim stopniu odpowiedzialny za wystąpienie wypadku [18]. W nawiązaniu do powyższego dla czynnika związanego ze stanem nawierzchni dróg przypisano wagę 0,1./ According to the literature: – improper infrastructure has an indirect or direct impact on 30% of all accidents [12] – road pavement condition is a minor factor in the accidents in question [18]. Accordingly, a weight of 0.1 was assigned to this factor.	W pracy wyznaczono obszary, w których dochodziło do wypadków z udziałem TN. Zgodnie z literaturą skala natężenia ruchu jest proporcjonalna do skali wypadków [19]. Ze względu na dużą istotność tego czynnika przypisano wagę 0,45. / The study identified areas where accidents involving dangerous goods occurred. According to the literature, the intensity of traffic is proportional to the frequency of accidents [19]. A weight of 0.45 was assigned due to the high significance of this factor.	Określono obszary dostępności ww. parkingów; jest to jeden z wielu czynników wpływających na zachowanie kierowcy. Ze względu na fakt, że zachowanie kierowcy jest kluczowym czynnikiem wystąpienia wypadku oraz ma na niego wpływ bardzo wiele składowych [16], w pracy uwzględniono tylko jedną z nich i dlatego założono wagę na poziomie 0,1./ Areas with parking-space availability were identified; this is one of the many factors affecting driver behaviour. Due to the fact that the driver's behaviour is a key factor in the occurrence of an accident and involves many aspects [16], only one of aspect of it was taken into account. Accordingly, a weight of 0.1 was assigned.

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

Warstwa związana z wypadkami z udziałem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem dotyczy tylko zdarzeń z udziałem autocystern, ponieważ podczas wypadku stwarzają one największe zagrożenie. Dane dotyczące wypadków pochodzą ze statystyk Państwowej Straży Pożarnej za lata 2010–2015. W celu wyselekcjonowania zdarzeń, które mają związek z wypadkami z udziałem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem w transporcie drogowym, zastosowano następujące kryteria:

- uwzględniono akcje, które miały miejsce w transporcie drogowym oraz do których jednocześnie przypisano został numer UN,
- uwzględniono akcje, w których brały udział ponad dwa zastępy jednostek ochrony przeciwpożarowej,
- uwzględniono akcje, które dotyczyły wypadków z udziałem autocystern.

Warstwa z wypadkami została opracowana w oprogramowaniu GIS w następujących krokach:

- 1) każdy odcinek drogi przekształcono w punkt (algorytm „point on surface”),
- 2) do każdego punktu stworzono bufor 15 km,
- 3) obliczono liczbę akcji w danym buforze (algorytm „point statistic for polygon”),

The layer concerning accidents involving explosive dangerous goods includes only events involving tanker lorries, since they present the greatest hazard. Data on accidents come from the State Fire Service and are for the years 2010–2015. Events related to road accidents involving explosive dangerous goods were identified on the basis of the following criteria:

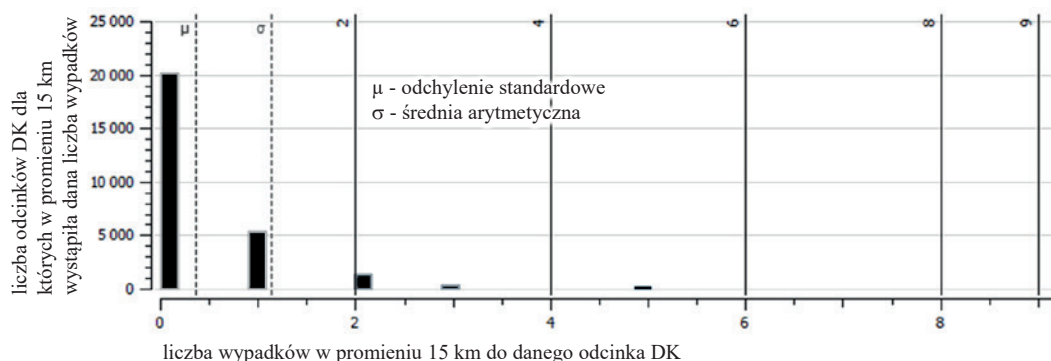
- events which involved fire-service operations in road transport to which a UN number was assigned;
- events which involved fire-service operations carried out by more than two fire-service teams,
- events which involved fire-service operations related to accidents involving tanker lorries.

The layer of accidents was developed using the GIS software as follows:

- 1) each road section was converted to a point (“point on surface” algorithm);
- 2) a buffer of 15 km was established for each point;
- 3) the number of fire-service operations in a given buffer was calculated (“point statistic for polygon” algorithm);
- 4) centroids were made for the buffers;



- 4) wykonano centroidy ww. buforów,
  - 5) utworzono kolumnę „wypadki” i przypisano do niej wartości zgodnie z tabelą 1,
  - 6) sporządzono histogram przedstawiający zależność liczby wypadków dla obszarów o promieniu do 15 km w funkcji odcinków dróg krajowych o długości do 1 km (ryc. 1),
  - 7) przyjęto pięciostopniową skalę od 0 do 1, gdzie 0 – oznacza odcinki, na których nie występowały wypadki, 1 – oznacza odcinki o największej liczbie wypadków,
  - 8) do warstwy z odcinkami DK przypisano tabelę atrybutów ww. warstwy punktowej (algorytm „złącz atrybuty według lokalizacji”).
- 5) a column called “accidents” was created and values according to Table 1 were assigned to it;
  - 6) a histogram showing the number of accidents in areas with a radius of up to 15 km as a function of national-road sections with a length of up to 1 km (Figure 1);
  - 7) a five-point scale from 0 to 1 was adopted, where 0 means sections where no accidents occurred and 1 means sections with the largest number of accidents;
  - 8) a table of attributes of the above point layer was assigned to the layer with national roads sections (“join attributes by location” algorithm).



Rycina 1. Zależność liczby wypadków dla obszarów o promieniu do 15 km od odcinków dróg krajowych

Źródło: Opracowanie własne.

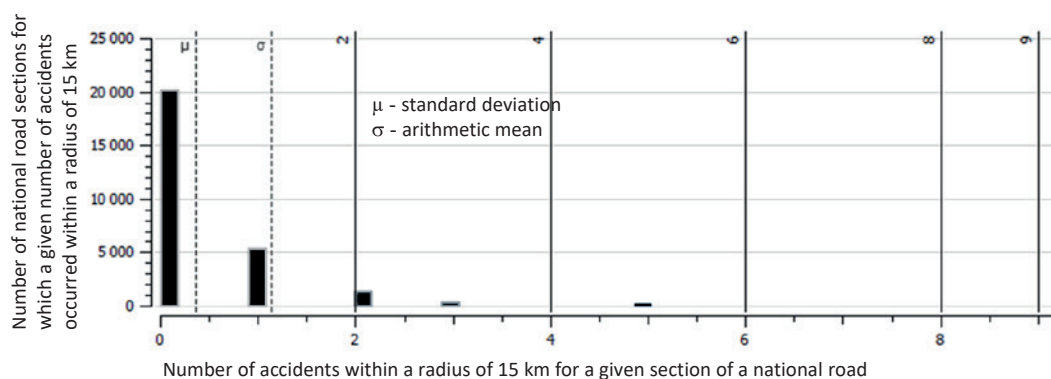


Figure 1. The pattern for accidents on areas with a radius of up to 15 km from sections of national roads

Source: Own elaboration.

Tabela 2. Poziomy częstotliwości wystąpienia wypadku

Table 2. Accident frequencies

Częstotliwość wypadków/Accident frequency	Skala/Scale	Liczba wypadków w promieniu 15 km od danego odcinka DK/ Number of accidents within a radius of 15 km from a given national road section
1 – bardzo mała/ very small	0	0
2 – mała/ small	0,25	1
3 – średnia/ average	0,5	2–3
4 – duża/ large	0,75	4–7
5 – bardzo duża/ very large	1	8–9

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Warstwa związana z kolizyjnością i bezkolizyjnością drogi powstała na podstawie ogólnodostępnych danych [8]. Została ona opracowana z wykorzystaniem metodyki, w ramach której:

- przyjęto dwustopniową skalę od 0 do 1,
- bezkolizyjnym odcinkom DK (jedno- i dwupasmowym) przypisano wartość: 0,
- kolizyjnym odcinkom DK (jedno- i dwupasmowym) przypisano wartość: 1.

Warstwa związana ze stanem nawierzchni dróg powstała na podstawie ogólnodostępnych danych [9]. Opracowano ją z wykorzystaniem metodyki, w której:

- przyjęto czterostopniową skalę: 0; 0,2; 0,5; 1,
- odcinkom dróg, których stan nawierzchni jest bardzo dobry, przypisano wartość: 0;
- odcinkom dróg, których stan nawierzchni jest dostateczny (bardzo małe koleiny, mała ilość łat), przypisano wartość: 0,2;
- odcinkom dróg, których stan nawierzchni jest zły (m.in. średnie koleiny, duża ilość łat, dyskomfort podczas jazdy), przypisano wartość: 0,5;
- odcinkom dróg, których stan nawierzchni jest bardzo zły (m.in. duże koleiny, duża ilość dziur, bardzo duża ilość łat, duży dyskomfort podczas jazdy) przypisano wartość: 1.

Wyżej wymienione wartości zostały przypisane do poszczególnych odcinków dróg na podstawie literatury [18] i wiedzy eksperckiej. Dla dróg dwupasmowych o różnych stanach nawierzchni na tym samym odcinku przypisywano wartość uśrednioną. Średnią stosowano także dla dróg z odcinkami charakteryzującymi się różnym stanem nawierzchni na niewielkiej długości.

Warstwa związana z dostępnością parkingów ze stanowiskami postojowymi dla pojazdów przewożących TN powstała na podstawie danych GDDKiA zawierających wykaz oraz przestrzenne rozmieszczenie przedmiotowych parkingów. Została ona opracowana na podstawie metodyki składającej się z następujących kroków:

- 1) każdy odcinek drogi przekształcono w punkt (algorytm „point on surface”),
- 2) do każdego punktu stworzono bufor 15 i 60 km,
- 3) obliczono liczbę parkingów w danym buforze (algorytm „point statistic for polygon”),
- 4) wykonano centroidy danych buforów,
- 5) do warstwy z odcinkami DK przypisano tabelę atrybutów wspomnianych warstw punktowych (algorytm „złącz atrybuty według lokalizacji”),
- 6) utworzono kolumnę „parkingi” i przypisano do niej wartości zgodnie z trzystopniową skalą (0; 0,5; 1),
- 7) odcinkom dróg, dla których przedmiotowe parkingi są dostępne w promieniu 15 km, przypisano wartość: 0,
- 8) odcinkom dróg, dla których przedmiotowe parkingi są dostępne w promieniu od 15 km do 60 km, przypisano wartość: 0,5,
- 9) odcinkom dróg, dla których przedmiotowe parkingi są dostępne w promieniu powyżej 60 km, przypisano wartość: 1.

The layer connected with fully/partly grade-separated and non-grade-separated roads was based on publicly available data. It was developed using the following methodology:

- a 2-point 0-1 scale was adopted;
- the value of 0 was assigned to fully grade-separated sections of national roads (single and dual carriageways);
- the value of 1 was assigned to partially or non-grade-separated sections of national roads (single and double carriageways).

The layer related to road pavement condition was based on publicly available data [9]. It was developed using the following methodology:

- a four-point scale was adopted – 0; 0.2; 0.5; 1
- road sections with a very good pavement condition were assigned the 0 value;
- road sections with a tolerable pavement condition (very small ruts, a small number of patches) were assigned the 0.2 value;
- road sections with a poor pavement condition (this includes medium-sized ruts, a large number of patches, discomfort while driving) were assigned the 0.5 value;
- road sections with a very poor pavement condition (this includes large ruts, a large number of potholes, a very large number of patches, high discomfort while driving), were assigned the 1 value.

These values were assigned to the individual road sections on the basis of literature [18] and expert knowledge. In the case of dual-carriageway roads whose road pavement conditions varied within a given section, the average value was assigned. The same applied to roads with sections whose pavement conditions varied within short distances.

The layer related to the availability of parking areas intended for vehicles carrying dangerous goods was established on the basis of General Directorate for National Roads and Motorways data, including a list of such facilities and their spatial arrangement. It was developed using the following methodology:

- 1) each section was converted to a point (“point on surface” algorithm);
- 2) buffers of 15 km and 60 km were established for each point;
- 3) the number of parking areas in the given buffer was calculated (“point statistic for polygon” algorithm);
- 4) centroids were made of the above buffers;
- 5) a table of attributes of the above point layers was assigned to the layer with national roads sections (“join attributes by location” algorithm);
- 6) the “parking area” column was created and assigned values on a 3-point scale (0; 0.5; 1);
- 7) the value of 0 was assigned to road sections for which parking areas are available within a radius of 15 km;
- 8) the value of 0.5 was assigned to road sections for which parking areas are available within a radius of 15 to 60 km;
- 9) the value of 1 was assigned road sections for which parking areas are available within a radius of over 60 km.

### **Analiza skutków wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych**

W niniejszej pracy analizy zostały przeprowadzone z uwzględnieniem ryzyka grupowego, ponieważ dotyczyły one społeczeństwa zamieszkującego wokół dróg krajowych. W celu przeprowadzenia analizy skutków dla wypadków z udziałem cystern przewożących TN stwarzające zagrożenie wybuchem określono dwie wielkości stref zagrożenia generowanego przez przewożone towary niebezpieczne. Strefy zostały zdefiniowane jako obszary w kształcie kół o promieniach 300 m i 1000 m. Poniżej przedstawiono umotywowanie wyboru wielkości zasięgu dla poszczególnych stref.

- 1) strefa o promieniu 300 m – jest to strefa charakteryzująca się dużą wartością promieniowania cieplnego (powyżej 10 kW/m<sup>2</sup> – po 1 min ekspozycji mogą pojawić się ofiary śmiertelne) w przypadku wybuchu typu BLEVE i pożaru kulistego FIREBALL cysterny przewożącej TN stwarzające zagrożenie wybuchem,
- 2) strefa o promieniu 1000 m – maksymalna strefa zagrożenia wyznaczana przez służby ratownicze w przypadku zdarzeń z udziałem autocystern przewożących TN stwarzające zagrożenie wybuchem, podczas których istnieje zagrożenie wybuchem typu BLEVE i pożarem kulistym FIREBALL; wielkość strefy jest związana m.in. z możliwością wystąpienia odłamków.

Do określenia liczby osób znajdujących się w powyższych strefach wykorzystano warstwę gęstości zaludnienia przygotowaną na podstawie danych Głównego Urzędu Statystycznego oraz Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii [14].

### **Analiza ryzyka wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych**

Analiza ryzyka została opracowana poprzez zestawienie wyników: analizy prawdopodobieństwa oraz analizy skutków. Zostało to zrealizowane poprzez zastosowanie maczyzy ryzyka. Dzięki temu do każdego odcinka DK został indywidualnie przypisany poziom ryzyka.

## **Wyniki badań**

### **Analiza prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych**

Poniżej przedstawiono wybrane warstwy będące składowymi wzoru dotyczącego analizy prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych.

W tabeli 3 zestawiono towary niebezpieczne stwarzające zagrożenie wybuchem, których udział w wypadkach autocystern w latach 2010–2015 w transporcie drogowym był największy. Łącznie odnotowano 108 wypadków spełniających powyższe kryteria.

### **The consequence assessment of accidents involving dangerous goods**

The assessments in this study include societal risk, as they involved communities living near national roads. For the purposes of the consequence assessment of accidents involving tankers carrying explosive dangerous goods, two types of hazard zones were identified that are generated by the goods in question. The zones are defined as circle-shaped areas with radii of 300 m and 1,000 m. Below is an explanation of why these ranges were selected for individual zones:

- a zone with a radius of 300 m – a zone with high thermal radiation (above 10 kW/m<sup>2</sup> – after 1 minute of exposure, fatalities may occur) in the event of a BLEVE and a FIREBALL of a tanker carrying explosive dangerous goods;
- a zone with a radius of 1,000 m – a maximum hazard area determined by emergency services in accidents involving tankers carrying explosive dangerous goods where there is a risk of a BLEVE and FIREBALL; the size of the zone depends on splinter risk.

The population density layer based on the Central Statistical Office's and Head Office of Land Surveying and Cartography's data was used to determine the number of people in these zones [14].

### **Risk analysis for an accident involving dangerous goods**

The risk analysis compared the results of the likelihood assessment and the consequence assessment using a risk matrix. As a result, each section of national roads was assigned an individual risk level.

## **Results**

### **The likelihood assessment of an accident involving dangerous goods**

Below are selected layers which constitute the likelihood-assessment formula for an accident involving dangerous goods.

Table 3 lists the explosive dangerous goods that were most commonly involved in tanker-lorry road accidents in the years 2010–2015. In total, 108 fire-service operations met the criteria outlined above.



Tabela 3. Towary niebezpieczne, których udział w wypadkach był największy

Table 3. Dangerous goods most commonly involved in accidents

Nr UN/ UN No.	Numer rozpoznawczy zagrożenia/Hazard identification number	Grupa pakowania/ Packing group	Nazwa towaru niebezpiecznego stwarzającego zagrożenie wybuchem/Name of explosive dangerous goods	Liczba wypadków/ Number of accidents	Procent ogólnej liczby wypadków/Percentage of total accidents
1965	23	–	LPG	51	47,7%
1203	33	II	BENZyna/PETROL	23	21,5%
1268	33	I	DESTYLATY Z ROPY NAFTOWEJ/PETROLEUM DESTILATIONS	8	7,5%
1307	33	II	KSYLENY/XYLENES	3	2,8%
1170	33	II	ETANOL/ETHANOL	3	2,8%
1173	33	II	OCTAN ETYLU/ETHYL ACETATE	3	2,8%
1972	223	–	METAN SKROPLONY/LIQUIFIED METHANE	3	2,8%
1863	33	I	PALIWO LOTNICZE/AVIATION FUEL	2	1,9%
1978	23	–	PROPAN/PROPANE	2	1,9%
1993	33	I	MATERIAŁ ZAPALNY CIEKŁY I.N.O./ FLAMMABLE LIQUID MATERIAL I.N.O.	2	1,9%
1263	33	I	FARBY/PAINTS	2	1,9%

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Ponad 45% zdarzeń dotyczyło wypadków z udziałem autocystern przewożących LPG.

Na rycinie 2 przedstawiono mapę wypadków cystern przewożących towary niebezpieczne stwarzające zagrożenie wybuchem oraz sieć dróg krajowych z oznaczoną częstotliwością tego rodzaju wypadków.

More than 45% of accidents involved tankers carrying explosive dangerous goods.

Figure 2 presents a map of accidents involving tankers carrying explosive dangerous goods and a network of national roads with frequencies of such accidents.



Rycina 2. Częstotliwość wypadków z udziałem towarów niebezpiecznych zagrażających wybuchem

Figure 2. The frequency of accidents with explosive dangerous goods

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Ponad 50% zdarzeń udziałem TN stwarzających zagrożenie wybuchem miało miejsce na drogach krajowych.

Na rycinie 3 przedstawiono mapę z przestrzennym rozmieszczeniem parkingów ze stanowiskami postojowymi dla samochodów przewożących towary niebezpieczne oraz siecią dróg krajowych z przypisaną dostępnością tego rodzaju parkingów.

More than 50% of accidents involving explosive dangerous goods occurred on national roads.

Figure 3 shows a map with the spatial distribution of parking areas with parking spaces for vehicles transporting dangerous goods and includes a network of national roads showing the availability of such facilities.



**Rycina 3.** Rozmieszczenie i dostępność parkingów dla samochodów przewożących TN

**Figure 3.** Spatial distribution and availability of parking areas for vehicles carrying dangerous goods

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

Należy stwierdzić, że parkingi przystosowane do postoju samochodów transportujących TN są nierównomiernie rozłożone na obszarze całego kraju. Istnieją również obszary o dużej gęstości występowania wypadków (ryc. 2), w których nie zostały rozlokowane tego typu parkingi.

Po obliczeniu równania  $P = 0,35W + 0,45K + 0,1N + 0,1A$  dla odcinków DK, każdemu z nich przypisano wartości od 1 do 5, które reprezentują skalę prawdopodobieństwa (tabela 4). Zostały one zdefiniowane poprzez podział ze względu na równą liczbę odcinków DK przypisanych do każdej skali. Dzięki zastosowaniu tego sposobu grupowania danych, wartość mody ( $P = 0,5$ ) dla przedmiotowego zbioru została określona jako średnie prawdopodobieństwo. Było to istotne, ze względu na fakt, że liczba odcinków dróg krajowych dla których  $P = 0,5$  stanowi około 31% wszystkich odcinków DK.

The figure clearly shows that parking areas intended for vehicles carrying dangerous goods are unevenly distributed over the country. There are also areas with high accident density (Fig. 2) in which such facilities are not available.

After calculating the equation  $P = 0.35W + 0.45K + 0.1N + 0.1A$  for national-road sections, each section was assigned values from 1 to 5 as a measure of likelihood (Table 4). They were defined on the basis of the equal number of national-road sections assigned to each likelihood. Based on this grouping method, the mode value ( $P = 0.5$ ) for the set was determined as the average likelihood. It was significant due to the fact that the number of national-road sections for which  $P = 0.5$  constitutes approximately 31% of all national-road sections.

**Tabela 4.** Skala prawdopodobieństwa**Table 4.** Likelihood scale

Prawdopodobieństwo/Likelihood	Zakres wyników równana $P = 0,35W + 0,45K + 0,1N + 0,1A$ Result range for $P = 0.35W + 0.45K + 0.1N + 0.1A$
1 – bardzo małe/very low	0,000 ÷ 0,436
2 – małe/low	0,437 – 0,487
3 – średnie/average	0,488 – 0,515
4 – duże/high	0,516 – 0,561
5 – bardzo duże/very high	0,562 – 0,820

**Źródło:** Opracowano na podstawie [8–11].

**Source:** Own elaboration on the based on [8–11].

**Rycina 4.** Prawdopodobieństwo wystąpienia wypadku z udziałem TN zagrażających wybuchem**Figure 4.** The likelihood of an accident involving explosive dangerous goods

**Źródło:** Opracowanie własne, na podstawie [8–11].

**Source:** Own elaboration based on [8–11].

Na rycinie 4 przedstawiono mapę prawdopodobieństwa wystąpienia wypadku w transporcie drogowym z udziałem cystern przewożących towary niebezpieczne stwarzające zagrożenie wybuchem.

Figure 4 shows the likelihood map of road accidents involving tankers carrying explosive dangerous goods.

**Analiza skutków wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych**

W wyniku przeprowadzonej analizy została opracowana statystyka określająca procent populacji kraju mieszkającej w pobliżu dróg krajowych (tabela 5).

**The consequence assessment of an accident involving dangerous goods**

The assessment produced statistics on the percentage of population living near national roads in Poland (Table 5).

**Tabela 5.** Statystyka określająca procent populacji kraju mieszkającej w pobliżu DK

**Table 5.** Statistics showing the percentage of Poland's population living near national roads

Promień buforu dla dróg krajowych/Buffer radius for national roads	Liczba pkt. adresowych znajdujących się w danym buforze/ Number of address points located in a given buffer	Liczba ludności znajdującej się w danym buforze/Population in a given buffer	% ludności/ % of population
300	881 953	5 565 690	14,58
1000	2 224 668	14 721 853	38,56
cała Polska/ Poland at large	7 437 098	38 179 065	100,00

**Źródło:** Opracowano na podstawie [14].

**Source:** Own elaboration on the based on [14].

W celu określenia skali skutków, do podziału zbioru odcinków dróg krajowych DK wykorzystano zakres zmienności związany z odchyleniem standardowym, który został obliczony dla uśrednionej liczby ludności. Dla strefy o promieniu 300 metrów przeprowadzono agregację danych z 8 punktów na każdy odcinek drogi o długości 1 km. Dla strefy o promieniu 1000 metrów wykonano agregację danych z 5 punktów na każdy odcinek drogi o długości 1 km (tabela 6) [14].

In order to determine the scale of consequences, the set of national-road sections was divided using standard-deviation based variability which was calculated for the average population. For zones with a radius of 300 meters, data from 8 points per each 1-km-long road section was aggregated. For zones with a radius of 1,000 meters, data from 5 points per each 1-km-long road section was aggregated (Table 6) [14].

**Tabela 6.** Zestawienie poziomów skutków w zależności od gęstości zaludnienia

**Table 6.** List of consequence levels by population density

Skala skutków dla odcinka DK o długości do 1 km/ Scale of effects for a 1-km-long section	Zakres danych Data range	Zagregowana do odcinków o długości do 1 km średnia liczba osób zamieszkujących wzdłuż drogi krajowej w odległości: Average number of people living along national roads, aggregated to a length of 1 km, within a distance of:	
		1000 m (średnia z 5 punktów na kilometr) 1,000 m (average of 5 points per km)	300 m (średnia z 8 punktów na kilometr)/ 300 m (average of 8 points per km)
		0–52 151	0–6 010
	średnia arytm. – $\mu$ arithmetic mean – $\mu$	2005,65	209,13
	odchylenie standardowe – $\sigma$ standard deviation – $\sigma$	4593,53	502,44
	zakres zmienności variability		
1 – bardzo małe skutki 1 – very minor consequences	< 0,2 $\sigma$	0–919	0–100
2 – małe skutki 2 – minor consequences	0,2s–0,8 $\sigma$	919–3 675	100–402
3 – średnie skutki 3 – average consequences	0,8s–1,6 $\sigma$	3 675–7 350	402–804
4 – duże skutki 4 – major consequences	1,6s–2,4 $\sigma$	7350–11 024	804–1 206
5 – bardzo duże skutki 5 – very major consequences	> 2,4 $\sigma$	11 024–52 151	1 206–6 010

**Źródło:** Opracowano na podstawie [14].

**Source:** Own elaboration on the based on [14].



## BADANIA I ROZWÓJ

Końcowym etapem metodyki określającej analizę skutków było przypisanie określonych wag istotności dla stref 300 m i 1000 m. Wykonano to zgodnie ze wzorem:  $S = (0,7 * \text{skala skutków dla strefy 300 m}) + (0,3 * \text{skala skutków dla strefy 1000 m})$ .

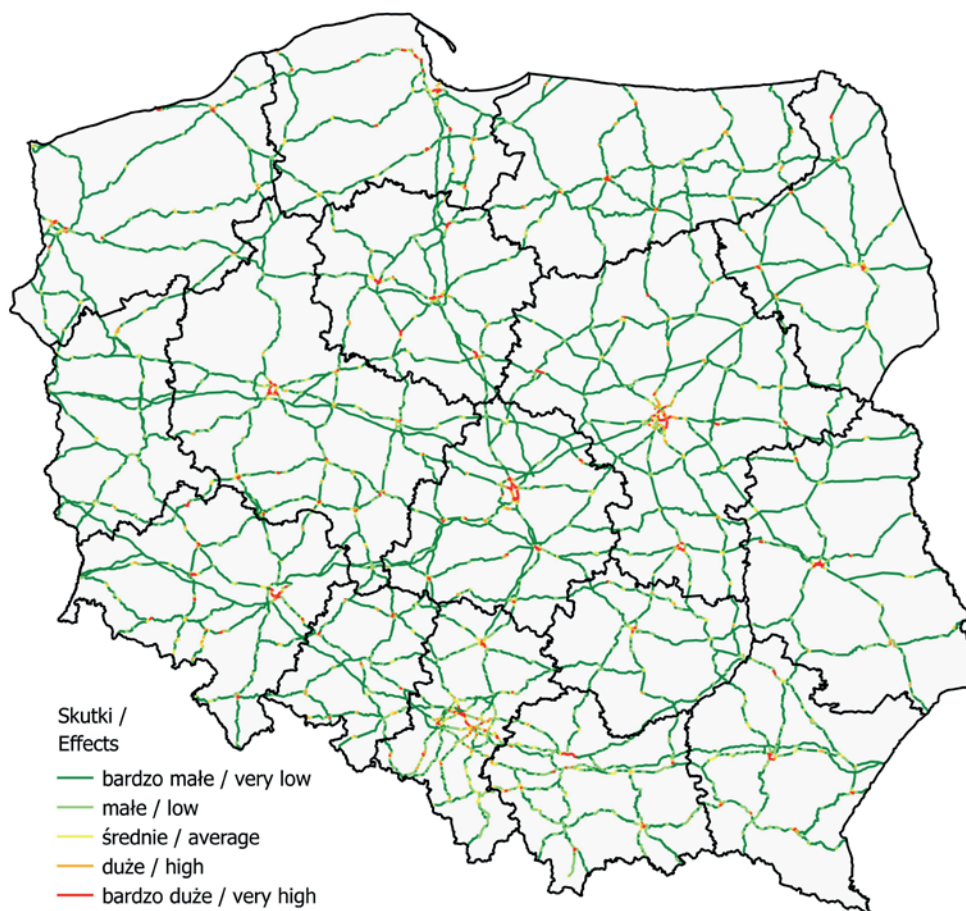
Dobór powyższych wartości wag wynika z faktu, iż w przypadku realnych zdarzeń, podczas których doszło do wybuchu cysterny przewożącej TN stwarzające zagrożenie wybuchem, najczęściej poszkodowanych znajdowałoby się w promieniu 300 metrów od miejsca wypadku [2].

Na rycinie 5 znajduje się mapa przedstawiająca wyniki analizy skutków wystąpienia wypadku z udziałem cystern przewożących TN stwarzające zagrożenie wybuchem.

The final step in the consequence assessment methodology was to assign the relevant weights to 300 m and 1,000 m zones. This was done in accordance with the following formula:  $S = (0.7 * \text{consequence scale for the 300 m zone}) + (0.3 * \text{consequence scale for the 1000 m zone})$ .

The aforementioned weights were assigned with the fact in mind that in the case of real events involving the explosion of a tanker carrying explosive dangerous goods, the largest number of casualties would be within 300 meters of the accident site [2].

Figure 5 shows a map of the results of consequence assessment for accidents involving tankers carrying explosive dangerous goods.



**Rycina 5.** Wyniki analizy skutków wystąpienia wypadku

**Figure 5.** Accident consequence assessment

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

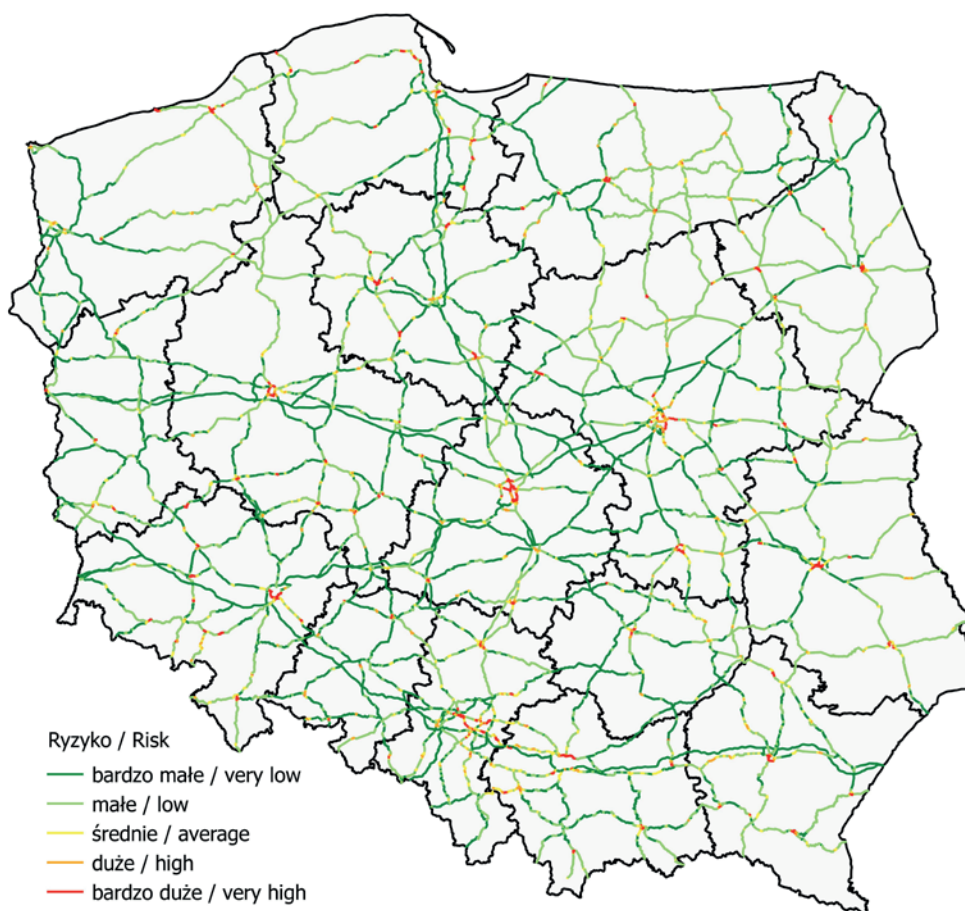
### **Analiza ryzyka wystąpienia wypadku z udziałem towarów niebezpiecznych**

Rycina 6 przedstawia mapę z wynikami analizy ryzyka wystąpienia wypadku w transporcie drogowym z udziałem cystern przewożących TN stwarzające zagrożenie wybuchem.

### **The risk analysis of accidents involving dangerous goods**

Figure 6 is a map showing results of risk analysis for road accidents involving tankers carrying explosive dangerous goods.





**Rycina 6.** Analiza ryzyka wystąpienia wypadku

**Figure 6.** Accident risk analysis

**Źródło:** Opracowanie własne.

**Source:** Own elaboration.

Powyższa mapa została opracowana na podstawie matrycy przedstawionej na rycinie 7. Niesymetryczny kształt matrycy ryzyka wynika z faktu, że skutki mają większą wagę niż prawdopodobieństwo ich wystąpienia. W omawianym przypadku skutki dotyczą liczby osób, które mogą zostać poszkodowane podczas wystąpienia wypadku w transporcie drogowym towarów niebezpiecznych.

The map is based on the matrix presented in Figure 7. The asymmetric shape of the risk matrix is attributable to the fact that the consequences have higher weights assigned to them compared to the potential risk of such consequences. In this case, the consequences concern the number of people at risk of injury from a road accident involving dangerous goods.

5 – bardzo duże prawdopodobieństwo	małe ryzyko	średnie ryzyko	duże ryzyko	bardzo duże ryzyko	bardzo duże ryzyko
4 – duże prawdopodobieństwo	małe ryzyko	małe ryzyko	średnie ryzyko	duże ryzyko	bardzo duże ryzyko
3 – średnie prawdopodobieństwo	bardzo małe ryzyko	małe ryzyko	średnie ryzyko	duże ryzyko	bardzo duże ryzyko
2 – małe prawdopodobieństwo	bardzo małe ryzyko	małe ryzyko	małe ryzyko	średnie ryzyko	duże ryzyko
1 – bardzo małe prawdopodobieństwo	bardzo małe ryzyko	bardzo małe ryzyko	małe ryzyko	średnie ryzyko	duże ryzyko
Prawdopodobieństwo / Skutki	1 – bardzo małe skutki	2 – małe skutki	3 – średnie skutki	4 – duże skutki	5 – bardzo duże skutki

**Rycina 7.** Matryca ryzyka

**Źródło:** Opracowanie własne.

5 – very high likelihood	low risk	average risk	high risk	very high risk	very high risk
4 – high likelihood	low risk	low risk	average risk	high risk	very high risk
3 – average likelihood	very low risk	low risk	average risk	high risk	very high risk
2 – low likelihood	very low risk	low risk	low risk	average risk	high risk
1 – very low likelihood	very low risk	very low risk	low risk	average risk	high risk
Likelihood Consequences	1 – very minor consequences	2 – minor consequences	3 – average consequences	4 – major consequences	5 – very major consequences

**Figure 7.** Risk matrix  
Source: Own elaboration.

### Podsumowanie

Zastosowanie przedstawionej w pracy mapy ryzyka związanej z transportem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem pozwoli na bardziej świadome planowanie tras przewozu tego typu towarów i wpłynie korzystnie na obniżenie ryzyka.

Na podstawie przeprowadzanej analizy ryzyka sformułowano następujące wnioski:

1. Analiza przeprowadzona dla poszczególnych dróg krajowych pozwala stwierdzić, że transport towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem wykorzystujący obwodnice gęsto zaludnionych aglomeracji miejskich znacznie obniża poziom ryzyka.
2. Mapa ryzyka, która została opracowana w wyniku przeprowadzonej analizy powinna być brana pod uwagę podczas wyznaczania dróg tranzytowych dla transportu towarów niebezpiecznych.
3. W celu bardziej wiarygodnego oszacowania poziomu ryzyka na drogach krajowych, związanego z transportem towarów niebezpiecznych stwarzających zagrożenie wybuchem, należy opracować analizę skutków w oparciu o bardziej szczegółowe dane dotyczące rozmieszczenia ludności wokół dróg krajowych wraz z metodyką określającą gradację ludności w porze dziennej i nocnej.
4. Mapy skutków, prawdopodobieństwa oraz ryzyka stanowią źródło informacji dla służb ratowniczych, które można spożytkować w zakresie: rozbudowy analizy zagrożeń, planowania operacyjnego oraz przygotowania sił i środków do likwidacji przedmiotowych zdarzeń (priorytety w zakupach sprzętu i wyszkoleniu).

Artykuł został opracowany w ramach pracy statutowej numer 01.0.04.00/2.01.01.01.0034 MNSP.MKME.15.002.

### Literatura/Literature

[1] Pająk M., Madej M., Ozimina D., Milewski K., *Transport drogowy towarów niebezpiecznych – prognoza na lata 2015–2020*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, 4, 127–132.

[2] Pająk M., Madej D., Ozimina K., Milewski K., *Wypadki w transporcie drogowym towarów niebezpiecznych – analiza zdarzeń z lat 2010–2015*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2016, 10, 85–91.

### Conclusions

The use of risk maps for the transport of explosive dangerous goods will aid better-informed planning of dangerous-goods routes, helping to mitigate the risks involved.

The risk analysis led to the following conclusions:

1. The risk analysis for individual national roads has led to the conclusion that the road transport of explosive dangerous goods in densely populated urban areas involves a much lower risk when directed via ring roads.
2. The analysis produced a risk map, which should be taken into account when mapping out transit routes for the transport of dangerous goods.
3. For a more accurate estimation of the risk involved in the transport of dangerous goods on national roads, a consequence assessment should be undertaken based on more-detailed data on population distribution near national roads, along with a methodology for population gradation at night and at day.
4. The maps of consequences, likelihood and risk are sources of information for emergency services which could be useful for hazard analysis, operational planning, and the preparation of the forces and resources deployed to handle the accidents in question (supply of equipment and training should be prioritised).

The article was prepared under the statutory task no. 01.0.04.00/2.01.01.01.0034 MNSP.MKME.15.002.

- [3] Roguski E.W., Wróblewski D., *Diagnostyczna metoda oceny ryzyk i systemów reagowania POMRISC jako narzędzie programowania zmian doskonalących systemy bezpieczeństwa i ich monitorowania*, BiTP Issue 4, 2008, pp. 35–60.
- [4] Jamróz K., Kustra W., Wachnicka J., Berkowski M., *Metodologia klasyfikacji ryzyka dla wybranych rodzajów wypadków drogowych na drogach wojewódzkich oraz dla obszarów województw i powiatów wraz z dokonaniem klasyfikacji i przedstawieniem wyników na mapach Etap I*, Ministerstwo Infrastruktury i rozwoju, Warszawa / Gdańsk 2015.
- [5] Szymanek A., *Rozwój standardów zarządzania ryzykiem w transporcie drogowym*, „Logistyka” 2014, 3, 6185–6191.
- [6] Norma PN-ISO 31000:2012 Zarządzanie ryzykiem – Zasady i wytyczne.
- [7] CODGIK, <http://www.codgik.gov.pl/index.php/darmowe-dane.html> [dostęp: 03.05.2017].
- [8] Opracowanie własne na bazie warstwy dróg krajowych pochodzącej z zasobów CODGIK oraz <https://dl.dropboxusercontent.com/s/hklowukui4pepx6/mapka-igorsel.png>, [dostęp: 03.05.2017].
- [9] Opracowanie własne na bazie warstwy dróg krajowych pochodzącej z zasobów CODGIK oraz [www: http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1310317](http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=1310317), [dostęp: 03.05.2017].
- [10] Opracowanie własne na bazie danych GDDKiA, <https://www.gddkia.gov.pl/pl/24/pliki-do-pobrania>, [dostęp: 03.05.2017].
- [11] Dane na temat wypadków z udziałem towarów niebezpiecznych z Komendy Głównej Państwowej Straży Pożarnej.
- [12] Barcik J., Czech P., *Wpływ infrastruktury drogowej na bezpieczeństwo ruchu, cz. I i II*, „Zeszyty naukowe Politechniki Śląskiej, seria Transport” 2010, 67, 69.
- [13] Wróblewski D. (red.), *Rekomendacje formalno-prawne z zakresu zarządzania kryzysowego*, CNBOP-PIB, Józefów 2015, s. 138.
- [14] Pająk M., Madej M., Tyczewski P., *Gęstość zaludnienia jako kryterium opracowania mapy zagrożeń dla transportu towarów niebezpiecznych*, „Studia i materiały Miscellanea Oeconomicae” 2017, 1, 195–205
- [15] Bęczkowska S., Grabałek S., Choromański W., *Model oceny ryzyka w drogowym transporcie towarów niebezpiecznych – wybrane zagadnienia*, „Prace naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport” 2013, 96, 77–86.
- [16] Bęczkowska S., Grabałek I., *Zastosowanie technik heurystycznych w modelowaniu czynnika ludzkiego w drogowym transporcie towarów niebezpiecznych*, „Logistyka” 2014, 4, 1655–1664
- [17] Conca A., Ridella C., Saporì E., *A risk assessment for road transportation of dangerous goods: a routing solution*, “Transportation Research Procedia” 2016, 14, 2890–2899.
- [18] Drozdowska K., *Stan infrastruktury drogowej, a bezpieczeństwo ruchu na przykładzie województwa opolskiego*, „Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2013, 3, 1489–1496.
- [19] Kustra W., Jamróz K., *Analiza czynników wpływających na gęstość ofiar śmiertelnych na drogach krajowych w Polsce*, „Journal of KONBIN” 2010, 1(13).

## Wykaz skrótów/List of abbreviations

DK – droga krajowa/national road

TN – towary niebezpieczne/dangerous goods

**KPT. MGR INŻ. MICHAŁ PAJĄK** – absolwent studiów inżynierskich na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej oraz studiów magisterskich na Wydziale Inżynierii Bezpieczeństwa Pożarowego Szkoły Głównej Służby Pożarnej. Od 2011 roku jest wojewódzkim koordynatorem ratownictwa chemicznego. Ukończył szereg kursów z zakresu zastosowania systemów informacji przestrzennej GIS (ArcGIS, QGIS).

**DR HAB. INŻ. MONIKA MADEJ** – profesor Politechniki Świętokrzyskiej, zatrudniona w Katedrze Mechaniki Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn. Autorka i współautorka ponad 120 publikacji naukowych krajowych i zagranicznych, związanych z dyscypliną budowa i eksploatacja maszyn w specjalnościach: tribologia, inżynieria powierzchni, eksploatacja systemów, biomechanika.

**PROF. DR HAB. INŻ. DARIUSZ OZIMINA** – profesor zwyczajny, absolwent Politechniki Śląskiej, Wydziału Technologii i Inżynierii Chemicznej, zatrudniony w Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Autor wielu publikacji związanych z problematyką eksploatacji obiektów technicznych. Współpracuje z Wojskową Akademią Techniczną, Instytutem Technicznym Wojsk Lotniczych oraz z Wojskowym Instytutem Techniki Pancernej i Samochodowej.

**MICHAŁ PAJĄK, M.ENG.** – graduated from the Faculty of Advanced Technologies and Chemistry of the Military University of Technology (eng., 2011), the Faculty of Fire Safety Engineering of the Main School of Fire Service (MSc, 2014). Since 2011, he has been a regional coordinator of chemical rescue. He completed a number of courses in Geographic Information Systems (ArcGIS, QGIS).

**MONIKA MADEJ, D.SC. ENG. PROF. PŚk** – Professor at the Kielce University of Technology, works at the Department of Mechanical Engineering, the Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering. She has authored and co-authored more than 120 Polish and international publications related to mechanical engineering with a focus on tribology, surface engineering, systems operation, biomechanics.

**PROF. DARIUSZ OZIMINA, D.SC. ENG.** – full professor, graduated from the Silesian University of Technology, Faculty of Technology and Chemical Engineering, works at the Faculty of Mechatronics and Mechanical Engineering of the Kielce University of Technology. He has authored many publications dealing with systems operations of technological objects. He cooperates with the Military University of Technology, the Air Force Institute of Technology and the Military Institute of Armour and Automobile Technology.