

dr inż. **Natalia Schmidt-Polończyk**¹

Przyjęty/Accepted/Принята: 11.10.2016;

Zrecenzowany/Reviewed/Рецензирована: 25.11.2016;

Opublikowany/Published/Опубликована: 30.12.2016;

Analiza wpływu gęstości rozmieszczenia wyjść ewakuacyjnych na bezpieczeństwo ludzi podczas pożaru w tunelach drogowych z systemem wentylacji wzdłużnej

An Analysis of the Location of Emergency Exits as a Factor Impacting on Human Safety under Fire Conditions in Road Tunnels with the Longitudinal Ventilation System

Анализ влияния частоты размещения аварийных выходов на безопасность людей во время пожара в дорожных туннелях с продольной системой вентиляции

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest przedstawienie rezultatów studium wybranych aktów prawnych na świecie w zakresie odległości pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi w tunelach drogowych oraz wyników weryfikacji wybranych obostrzeń na drodze badań modelowania numerycznego dla przyjętego scenariusza pożarowego.

Wprowadzenie: W artykule poruszono tematykę gęstości rozmieszczenia wyjść ewakuacyjnych, która znacząco wpływa na czas prowadzonych podczas pożaru w tunelu drogowym działań samoratowniczych, a co za tym idzie na bezpieczeństwo podczas ewakuacji. Rozmieszczenie wyjść ewakuacyjnych reguluje w Polsce Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz.U. Nr 63, poz. 735 z późn. zm.). Według przedmiotowego rozporządzenia odległość ta nie powinna przekraczać 500 m, co w świetle wybranych aktów legislacyjnych na świecie jest jednym z najmniej rygorystycznych wymagań. Odległość pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi zależy od wielu czynników, z których najważniejsze to: rodzaj pojazdów korzystających z tunelu, natężenie ruchu, wentylacja, moc pożaru, system wykrywania pożaru oraz parametry geometryczne tunelu. Rozbieżności w aktach prawnych stanowią podstawę do rozwijania podjętej tematyki badawczej.

Metodologia: W artykule przeprowadzono analizę wybranych aktów prawnych na świecie oraz badania modelowania numerycznego w celu sprawdzenia bezpieczeństwa podczas ewakuacji dla przyjętych wariantów wyjść ewakuacyjnych. Wyznaczono czas osiągnięcia krytycznego stanu środowiska w tunelu oraz sprawdzono, czy po jego upływie w tunelu znajdują się ludzie. W tym celu wykorzystano dwa narzędzia: program Fire Dynamic Simulator do oszacowania czasu osiągnięcia krytycznego stanu środowiska oraz program Pathfinder do wyznaczenia czasu ewakuacji.

Wnioski: Wyniki przeprowadzonej analizy numerycznej dowodzą, że nie jest możliwe zapewnienie bezpieczeństwa podczas działań samoratowniczych w tunelu drogowym o długości ≥ 1500 m, gdy nie ma w nim wyjść ewakuacyjnych lub gdy są rozmieszczone co 500 m. Dla rozważanego scenariusza pożarowego oraz przy założeniu, że czas detekcji i alarmu jest równy 120 s, odległość między wyjściami, przy której możliwe jest przeprowadzenie bezpiecznej ewakuacji z tunelu w przypadku pożaru wynosi 250 m. Ponadto określenie odległości między wyjściami ewakuacyjnymi w danym tunelu drogowym każdorazowo powinno być poprzedzone analizą ryzyka na etapie projektowym.

Słowa kluczowe: ewakuacja, wyjścia ewakuacyjne, bezpieczeństwo pożarowe, tunele drogowe

Typ artykułu: artykuł przeglądowy

ABSTRACT

Objective: This study examines the results of studies of selected worldwide legal acts stipulating the distances between escape routes in road tunnels, as well as the results of the verification of selected legal restrictions resulting from numerical model simulations of hypothesised fire scenarios.

Introduction: The issues of the distances between escape routes' significantly affecting the timing of self-rescue activities during fires in road tunnels, and related safety matters during evacuation activities, are described in the present study. These distances are controlled in Poland by the Regulation of the Ministry of Transport, Construction and Maritime Economy of 30 May 2000 on the technical conditions of road engineering objects and their locations (Journal of Laws No. 63, item 735, as amended). According to the Regulation in question, the distance between escape routes should not exceed 500 m, which, in the light of worldwide legislative acts, is one of the least rigorous requirements. The distance between escape routes depends on numerous factors and the most important are: type of vehicles passing the tunnel, traffic congestion, ventilation, heat release rate, fire-detection system and geometrical parameters. The differences between the legal acts are the basis of the described research topic.

¹ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza / AGH University of Science and Technology; nschmidt@agh.edu.pl;

Methodology: Analyses of selected worldwide legal acts and numerical modelling in order to check the safety conditions during evacuation were carried out for the adopted escape route variants. The time of the critical state reach in tunnels was determined and it was checked whether people were still present in tunnel after this time. Two types of tools were used: the Fire Dynamic Simulator program for assessing the time of reaching the critical environmental state, and the Pathfinder program for evacuation time calculation.

Conclusions: The results of the completed analyses proved that assuring safety during self-rescue activities road tunnels ≥ 1500 long without escape roads or with escape routes distanced every 500 m was not possible. For the considered fire scenario in question and assuming a detection time and alarm equal to 120 s, 250 m between escape routes is sufficient to guarantee safe evacuation from tunnels on fire. Furthermore, the calculation of the distance between escape routes for a given tunnel should be preceded by a risk analysis during the design stage.

Keywords: evacuation, escape routes, fire safety, road tunnels

Type of article: review article

АННОТАЦИЯ

Цель: Цель данной статьи заключается в представлении результатов исследования отдельных правовых актов со всего мира с точки зрения расстояния между аварийными выходами в дорожных туннелях, а также результатов проверки некоторых обострений посредством численного моделирования для рассматриваемого сценария пожара.

Введение: В статье рассматривается вопрос о частоте распределении аварийных выходов, которая существенно влияет на время проводимых действий по самоспасению во время пожара в дорожном туннеле, и, следовательно, на безопасность эвакуации. Распределение аварийных выходов в Польше регулируется Распоряжением министра транспорта и морского хозяйства от 30 мая 2000 г. о технических условиях, которым должны соответствовать дорожные инженерные сооружения и их расположение (Законодательный вестник № 63 поз. 735 с изменениями).

Согласно данному распоряжению это расстояние не должно превышать 500 м, что по сравнению с некоторыми законодательными актами в мире является одним из наименее строгих требований. Расстояние между аварийными выходами зависит от многих факторов, важнейшие из которых это: тип транспортных средств, которые пользуются туннелем, интенсивность дорожного движения, вентиляция, мощность пожара, система обнаружения пожара и геометрические параметры туннеля. Различия в законодательстве являются основой для развития предмета исследования.

Методология: В данной работе был проведен анализ некоторых актов из разных стран мира, а также проведено исследование численного моделирования для определения безопасности во время эвакуации для принятых вариантов аварийных выходов. Было определено время достижения критического состояния окружающей среды в туннеле и проверено будут ли по истечении этого времени в туннеле находиться люди. Для этого были использованы два инструмента: программа Fire Dynamic Simulator для оценки времени достижения критического состояния окружающей среды, а также Pathfinder - программа для определения времени эвакуации.

Выводы: Результаты проведенного численного анализа показывают, что не возможно обеспечить безопасность во время проведения действий по самоспасению в дорожном туннеле длиной ≥ 1500 м, если в нем не находятся аварийные выходы или если выходы расположены через каждые 500 м. Для рассматриваемого сценария пожара и предполагая, что значение времени обнаружения и сигнализации равны 120 с, расстояние между выходами на уровне 250 м достаточно для обеспечения безопасной эвакуации из туннеля охваченного пожаром. Кроме того, определению расстояния аварийных выходов для автомобильного туннеля каждый раз должен предшествовать анализ рисков на стадии проектировки.

Ключевые слова: эвакуация, аварийные выходы, пожарная безопасность, дорожные туннели

Вид статьи: обзорная статья

1. Wprowadzenie

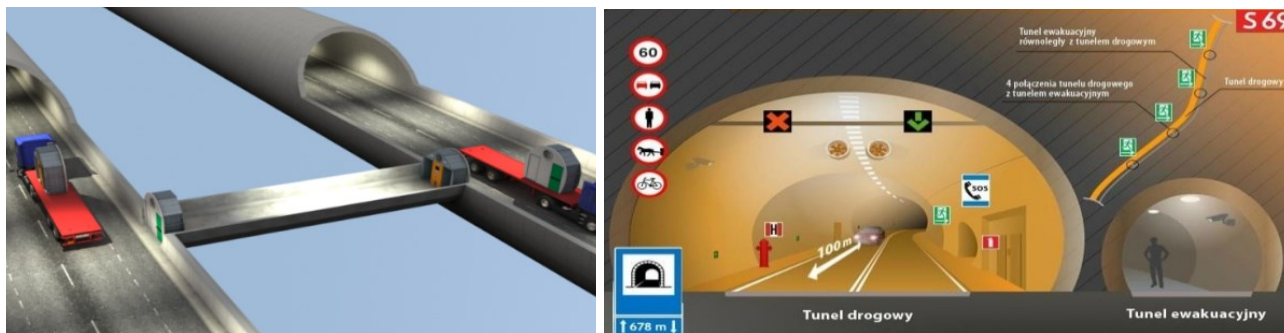
W przypadku pożaru w tunelu drogowym priorytetową kwestią jest ewakuacja osób zagrożonych w jak najkrótszym czasie. W celu zapewnienia bezpieczeństwa użytkowników tuneli drogowych zaleca się zastosowanie w tego typu budowlach dodatkowych środków technicznych w postaci wyjść ewakuacyjnych. Mogą one łączyć dwie nawy tunelu w przypadku jednokierunkowych tuneli dwunawowych lub stanowić połączenie tunelu dwukierunkowego (jednonawowego) z tunelem ewakuacyjnym prowadzącym na zewnątrz lub w inne bezpieczne miejsce (ryc. 1). Odległości pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi powinny umożliwiać przeprowadzenie bezpiecznych działań samoratowniczych w przypadku pojawienia się pożaru.

Proces ewakuacji osób z tunelu coraz częściej prognozowany jest przy wykorzystaniu obliczeń numerycznych, umożliwiających analizę różnych scenariuszy dla określonych założeń. W literaturze specjalistycznej odnaleźć można wiele prac poświęconych tej tematyce, m.in. pozycję [3], w której dokonano przeglądu wybranych metod symulacji ewakuacji z tuneli drogowych. Interesującą i bardzo przydatną przy wyborze programu do modelowania procesów ewakuacji jest praca [4], przedstawiająca doświadczenia osób prognozujących ewakuację przy wykorzystaniu różnych narzędzi symulacyjnych. Równie wartościową analizę, porównującą możliwości trzech programów: EVAC, STEPS oraz Pathfinder, służących do symulacji procesu ewakuacji przeprowadzono w [5]. Autorzy pracy wnikliwie scharakteryzowali badane

1. Introduction

In the event of fire in a road tunnel, the priority is to evacuate people in danger as quickly as possible. To guarantee the safety of road tunnel users, it is recommended to use in such structures additional technical measures in the form of emergency exits. These can connect two tubes in a tunnel in the case of unidirectional twin-tube tunnels or connect a bi-directional single-tube tunnel with an emergency tunnel leading outside or to another safe place (Fig. 1). The distance between emergency exits should facilitate safe-rescue operations in the event of fire.

The processes of evacuating people from tunnels are more and more often being forecast using numerical computations, which make it possible to analyse various scenarios corresponding to specific assumptions. In the specialist literature one can find many studies devoted to the issue in question, including [3], which reviews the selected methods of simulating evacuations from road tunnels. Study [4], presenting the experience of people forecasting evacuation activities using various simulation tools, is interesting and very useful for selecting a program for modelling the evacuation process. An equally valuable analysis was carried out in [5], that is comparing the capacities of three programs – EVAC, STEPS and Pathfinder used to simulate evacuation processes. The authors of this study characterised the studied programs in detail, taking into account any of their limitations which could impact on the obtained results. The impact of smoki-



Ryc. 1. Tunele drogowe z wyjściami ewakuacyjnymi: po lewej dwie tunele połączone wyjściami ewakuacyjnymi, po prawej główna nawa tunelu łączona wyjściami ewakuacyjnymi z tunelem ewakuacyjnym [1-2]

Fig. 1. Road tunnels with evacuation routes: left – two tunnel tubes connected to emergency exits, right – the main tunnel tube connected to evacuation routes with an evacuation tunnel [1-2]

programy, uwzględniając ich ograniczenia, które mogą mieć wpływ na otrzymane wyniki. Oddziaływanie zadymienia na prędkość poruszania się osób podczas ewakuacji w warunkach pożaru badano w [6]. Zbadano również wpływ znaków ewakuacyjnych na proces ewakuacji, a wyniki zawarto w [7]. Interesującym osiągnięciem w tematyce bezpieczeństwa podczas ewakuacji z tuneli drogowych w warunkach pożaru jest opracowanie i wdrożenie modułowego przejścia ewakuacyjnego, wyposażonego w dodatkowe systemy bezpieczeństwa m.in. w wentylację, system komunikacji, czujniki dymu. Wyniki tych badań zaprezentowano m.in. podczas II edycji polskiej konferencji „Budownictwo Podziemne i Bezpieczeństwo w Komunikacji Drogowej i Infrastrukturze Miejskiej” w roku 2014, organizowanej przez Akademię Górniczo-Hutniczą oraz zawarto w [1]. W pracy [8] przeanalizowano eksperymentalny przypadek ewakuacji z tunelu drogowego. Oddziaływanie pożaru na zachowanie osób podejmujących działania samostatownicze w tunelu, przy wykorzystaniu symulatora FDS+EVAC badano w [9], [10]. Analizę możliwości symulatora E-SIM przeznaczony do modelowania ewakuacji przeprowadzono w [11]. Badania nad nowym symulatorem TUNNEL-EVAC, przeznaczonym do modelowania procesów ewakuacji, którego prototyp został już opracowany podjęło grono naukowców z AGH. Postępy prac przedstawiono m.in. w: [12], [13].

W niniejszym artykule przedstawiono rezultaty analiz wymagań prawnych oraz zaleceń projektowych obowiązujących w Polsce oraz w wybranych krajach i regionach świata w zakresie odległości pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi w tunelach drogowych oraz wyniki własnych badań modelowych.

2. Zastosowanie wyjść ewakuacyjnych w tunelach drogowych w świetle polskich i zagranicznych wymagań prawnych

Zgodnie z wytycznymi Dyrektywy 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie minimalnych wymagań bezpieczeństwa dla tuneli w transeuropejskiej sieci drogowej, stosowanie wyjść ewakuacyjnych ma miejsce wtedy, gdy:

- „analiza odpowiednich ryzyk, obejmująca zagadnienie jak daleko i jak szybko przemieszcza się dym w warunkach miejscowych pokazuje, że wentylacja i inne zabezpieczenia są niewystarczające dla zapewnienia bezpieczeństwa użytkownikom dróg”,
- „...w nowych tunelach..., jeżeli natężenie ruchu jest większe niż 2 000 pojazdów na jeden pas ruchu”.

Ponadto w istniejących tunelach, dłuższych niż 1000 metrów, o natężeniu ruchu większym niż 2000 pojazdów na jeden pas ruchu, poddawana jest ocenie wykonalność i skuteczność nowych wyjść awaryjnych [14].

ness on the movement speed of people during evacuation under fire conditions was studied in [6]. Also analysed was the influence of evacuation signs on the evacuation process. The results of the analysis are presented in article [7]. An interesting achievement in the field of safety during the evacuation of road tunnels under fire conditions is the preparation and implementation of modular emergency passages, equipped with additional safety systems, including ventilation and communication systems and smoke detectors. The results of these studies were presented at the 2nd Polish “Underground Construction and Safety in Road Transport and City Infrastructure” Conference in 2014, organised by the AGH University of Science and Technology, and included in article [1]. The study [8] analyses one experimental case of evacuation from a road tunnel. The impact of a fire on the behaviour of people carrying out safe-rescue activities inside a tunnel was researched in [9], [10] using the FDS+EVAC simulator. The capacity of the E-SIM simulator for the modelling of evacuations was fully used in [11]. Research into a new TUNNEL-EVAC simulator for the modelling of evacuation processes, whose prototype had been already created, was undertaken by a group of scientists from the AGH University of Science and Technology. The working progress is presented in articles [12] and [13], among others.

This paper presents the results of analyses of the legal requirements and design guidelines in force in Poland, and selected countries and territories, in respect of distances between emergency exits in road tunnels, as well as the results of own model tests.

2. The use of emergency exits in road tunnels in the light of Polish and foreign legal requirements

In line with the guidelines of Directive 2004/54/CE of the European Parliament and of the Council of 29 April 2004 on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network,

- “emergency exits shall be provided if an analysis of relevant risks, including how far and how quickly smoke travels under local conditions, shows that the ventilation and other safety provisions are insufficient to ensure the safety of road users”; and
- “In any event, in new tunnels, (...) where the traffic volume is higher than 2 000 vehicles per lane”.

Furthermore, in existing tunnels longer than 1 000 m, with a traffic volume higher than 2 000 vehicles per lane, the feasibility and effectiveness of the implementation of new emergency exits shall be evaluated [14].

When it comes to the distance between emergency exits, the requirements of Directive 2004/54/CE of the European

W kwestii odległości wyjść ewakuacyjnych wymagania Dyrektywy 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady pokrywają się z polskimi wymaganiami prawnymi zawartymi w Rozporządzeniu Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie [15]. Odległość ta nie powinna przekraczać 500 m [14-15]. Z kolei według niemieckich wytycznych projektowych [16] w tunelach o długości powyżej 400 m przejścia te „należy zaprojektować w regularnych odstępach, mniejszych niż 300 m”. Dla szerszego ujęcia tematu w tabeli 1 zestawiono regulacje wybranych aktów prawnych oraz wytycznych projektowych na świecie w omawianym zakresie.

Na podstawie zebranych danych można stwierdzić, iż wymagania prawne obowiązujące w Polsce są najmniej restrykcyjne i pokrywają się z wymaganiami Dyrektywy Europejskiej, która precyzuje minimalne wymagania dotyczące bezpieczeństwa, które każdy europejski kraj, w obrębie własnego terytorium może zastrzyć. Mogą zatem istnieć różne poziomy bezpieczeństwa w tunelach drogowych wynikające z różnic w odległościach pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi. Różnica ta stanowi pewną podstawę do prowadzenia weryfikacji aktualnie obowiązujących wymagań prawnych dotyczących odległości pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi, co w efekcie powinno skutkować opracowaniem racjonalnego, ujednoliconego rozwiązania w tym zakresie.

3. Badania wpływu zastosowania i odległości wyjść ewakuacyjnych na bezpieczeństwo użytkowników tunelu drogowego

Odległość wyjść ewakuacyjnych zależy m.in. od [17]:

- rodzaju pojazdów korzystających z tunelu, co dyktuje rodzaj prawdopodobnych zdarzeń,
- natężenia ruchu, a co za tym idzie liczby użytkowników w tunelu korzystających z wyjść w przypadku np. pożaru,
- wydajności systemu wentylacji – zapewnienia odpowiednich warunków podczas ewakuacji w tunelu,
- systemu detekcji i alarmu pożaru,
- parametrów geometrycznych tunelu, w tym nachylenia tunelu,
- zachowania ludzkiego.

Parliament and of the Council are compatible with Polish legal requirements included in the Regulation of the Minister of Transport and Maritime Economy of 30 May 2000 on the technical conditions to be met by road engineering structures and their location (Journal of Laws No. 63, 2000). The distance should not exceed 500 m [14-15]. In turn, according to German design guidelines [16], in tunnels longer than 400 m, such exits “should be designed at regular intervals of less than 300 m”. To present a broader picture, Table 1 presents the regulations of selected legal acts and design guidelines worldwide in the field in question.

Based on the collected data one can state that the legal requirements in force in Poland are the least rigorous and correspond to the requirements of the European Directive, which specifies the minimum safety requirements, which every European country can make more exacting within its territory. Road tunnels can therefore have varying safety levels, stemming from differences in distances between emergency exits. Such differences constitute a basis for verifying the legal requirements currently in force and concerning distances between emergency exits, which, in turn, should result in devising a rational and standardised solution in this regard.

3. Studies of the influence of the use of, and distance between, emergency exits on the safety of road tunnel users

The distance between emergency exits depends, among other things, on [17]:

- the type of vehicles using the tunnel, which dictates the type of possible events,
- traffic volume, and the number of users in the tunnel, using its exits in the event of, e.g., a fire,
- the capacity of the ventilation system – providing the appropriate conditions during tunnel evacuation,
- fire detection and alarm systems,
- the geometrical parameters of the tunnel, including tunnel slope,
- human behaviour.

The heat release rate is a very important parameter im-

Tabela 1. Zalecenia/obostrzenia w zakresie odległości pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi według wybranych dokumentów prawnych oraz wytycznych projektowych [1], [14–26]

Table 1. Recommendations/restrictions concerning the distance between emergency exits, according to selected legal acts and design guidelines [1], [14–26]

Kraje (których dotyczy dokument) Countries	Wymagana odległość pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi [m] Required distance between emergency exits [m]
Międzynarodowy / International	100-500
Unia Europejska / The European Union	≤ 500
Austria	≤ 500
Polska / Poland	≤ 500
Niemcy / Germany	< 300
Włochy / Italy	≤ 300
Francja / France	≤ 400
Wielka Brytania / The United Kingdom	≤ 100
Norwegia / Norway	≤ 250
Holandia / The Netherlands	oparta na analizie ryzyka / based on risk analysis
Szwajcaria / Switzerland	≤ 300
USA	200
Australia	≤ 120

Bardzo istotnym parametrem wpływającym na rozmieszczenie wyjść ewakuacyjnych w tunelach drogowych, a wynikającym bezpośrednio z pierwszego wymienionego powyżej czynnika, jest moc pożaru. Właściwe określenie mocy pożaru wymaga szczególnego podkreślenia, co wynika również z Dyrektywy [14], uzależniającej rozmieszczenie wyjść od tego „... jak daleko i jak szybko przemieszcza się dym w warunkach miejscowych...”.

Na świecie istnieją tunele drogowe, które nie posiadają wyjść ewakuacyjnych np. tunel Leardal w Norwegii (24 510 m), tunel Piumogna w Szwajcarii (1600 m), tunel Sóller w Hiszpanii (3000 m), tunel Waasland w Belgii (2100 m) i wiele innych [27]. Powodem takiego stanu rzeczy może być fakt, że większość z tych tuneli powstała ponad 16 lat temu. W związku z tym w niniejszej analizie oprócz różnicowania rozstawu wyjść awaryjnych uwzględniono przypadek tunelu bez wyjść ewakuacyjnych. Przyjęto następujące warianty tuneli:

- wariant I – tunel bez wyjść ewakuacyjnych (brak drugiej nawy lub tunelu ewakuacyjnego – wyjście z tunelu możliwe jedynie przez portale),
- wariant II – tunel z wyjściami ewakuacyjnymi, rozmieszczonymi co 500 m,
- wariant III – tunel z wyjściami ewakuacyjnymi, rozmieszczonymi co 250 m.

Ponadto dla wariantu III tunelu rozważano:

a) pożar zlokalizowany przy lewym portalu tunelu pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi prowadzącymi do tunelu ewakuacyjnego – ryc. 2a),

b) pożar przy jednym z wyjść ewakuacyjnych – ryc. 2b).

W scenariuszu pożarowym lokalizację źródła pożaru założono na 250 metrów, licząc od portalu lewego tunelu dwukierunkowego, co dla wariantu III spowoduje zablokowanie pierwszego wyjścia ewakuacyjnego.

Dla przyjętych wariantów odległości pomiędzy wyjściami awaryjnymi sprawdzano bezpieczeństwo podczas ewakuacji, wyznaczając czas osiągnięcia krytycznego stanu środowiska w tunelu oraz całkowity czas ewakuacji. Krytyczny stan środowiska zależy od wartości parametrów, takich jak: temperatura powietrza, gęstość strumienia promieniowania cieplnego, temperatura gorących gazów pożarowych, zasięg widzialności oraz zawartość tlenu. Przekroczenie dopuszczalnych wartości tych parametrów [28-29] może powodować zagrożenie utraty zdrowia lub życia osób ewakuujących się. Sytuacja, gdy w momencie pojawienia się krytycznych warunków środowiska w tunelu drogowym nadal przebywa pewna liczba osób, która do tego czasu nie zdążyła przemieścić się w bezpieczne miejsce oznacza m.in., że wskutek braku wyjść ewakuacyjnych lub zbyt dużej odległości pomiędzy nimi bezpieczna ewakuacja w tym obiekcie nie jest zapewniona.

Realizację celu badawczego przeprowadzono z wykorzystaniem dwóch narzędzi: Fire Dynamic Simulator do wyznaczenia czasu osiągnięcia krytycznych warunków w tunelu oraz program Pathfinder, za pomocą którego wyznaczono całkowity czas ewakuacji.

Wpływając na pozycjonowanie wyjść awaryjnych w tunelach drogowych, a wynikając bezpośrednio z pierwszego wymienionego czynnika, jest moc pożaru. Właściwe określenie mocy pożaru wymaga szczególnego podkreślenia, co wynika również z Dyrektywy [14], uzależniającej rozmieszczenie wyjść od tego „... jak daleko i jak szybko przemieszcza się dym w warunkach miejscowych...”.

Na świecie istnieją tunele drogowe, które nie posiadają wyjść ewakuacyjnych np. tunel Leardal w Norwegii (24 510 m), tunel Piumogna w Szwajcarii (1600 m), tunel Sóller w Hiszpanii (3000 m), tunel Waasland w Belgii (2100 m), etc. [27]. Powodem takiego stanu rzeczy może być fakt, że większość z tych tuneli powstała ponad 16 lat temu. W związku z tym w niniejszej analizie oprócz różnicowania rozstawu wyjść awaryjnych uwzględniono przypadek tunelu bez wyjść ewakuacyjnych. Przyjęto następujące warianty tuneli:

- wariant I – tunele bez wyjść ewakuacyjnych (brak drugiej nawy lub tunelu ewakuacyjnego – wyjście z tunelu możliwe jedynie przez portale),
- wariant II – tunele z wyjściami ewakuacyjnymi, rozmieszczonymi co 500 m,
- wariant III – tunele z wyjściami ewakuacyjnymi, rozmieszczonymi co 250 m.

Furthermore, for variant III, the following was considered:

a) a fire located near the left portal, between emergency exits leading to an emergency tunnel – Fig. 2a),

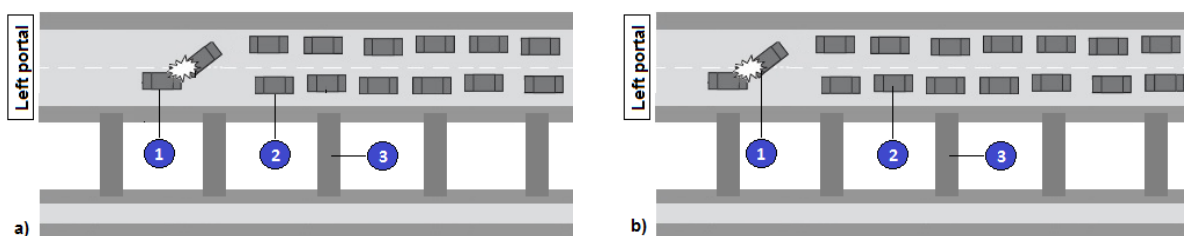
b) a fire located near one of the emergency exits – Fig. 2b).

In a fire scenario, the fire source location was set at 250 metres, starting from the left portal of bi-directional tunnels, which, in the case of variant III, will block the first emergency exit.

Evacuation safety was evaluated for adopted variants of distance between emergency exits, by determining the time needed for the tunnel environment's reaching critical state and total evacuation time. The critical state of the environment depends on the value of the following parameters: air temperature, heat flux density, temperature of hot fire gases, visibility, and oxygen content. Exceeding the allowable values of these parameters [28-29] can put at risk the health and lives of people being evacuated. The situation in which critical environmental conditions occur when there are still some people left in the road tunnel who have not managed to move to a safe location means that due to the lack of emergency exits or a too large distance between them, safe evacuation in such a facility is not ensured.

The research objective was achieved using two tools: the Fire Dynamic Simulator to determine the time to reach critical conditions within the tunnel, and Pathfinder, used to determine total evacuation time.

The way the simulations were conducted, the justification



Ryc. 2. Lokalizacja pożaru: a) pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi, b) przy wyjściu ewakuacyjnym; (1) lokalizacja pożaru, (2) pojazdy w tunelu, (3) wyjścia ewakuacyjne

Fig. 2. Fire location a) between emergency exits b) at an emergency exit
fire location, (2) vehicles in the tunnel, (3) emergency exits

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Sposób prowadzenia symulacji, uzasadnienie wyboru programów oraz ich charakterystykę przedstawiono w [30]. Badania przeprowadzono dla pięciu długości tunelu: 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m, 3500 m dla warunków pożaru o strumieniu wyzwalanego ciepła – 30 MW. Warunki początkowo-brzegowe do analizy numerycznej, rozwój pożaru, parametry określające proces spalania pojazdu ciężarowego przyjęto analogicznie jak w pracy [30].

W tunelu przewidziano system wentylacji mechanicznej wzdłużnej, w którym powietrze płynie od portalu lewego, wzdłuż osi obiektu do portalu prawego. W rozważanym tunelu dwukierunkowym po obu stronach pożaru mogą znajdować się samochody, które nie będą w stanie opuścić obiektu – ryc. 3. Sytuacja ta stwarza zagrożenie dla użytkowników znajdujących się w zadymionej części tunelu.

System wentylacji wzdłużnej został zaprojektowany dla warunków pożaru zgodnie z procedurą obliczeniową zawartą w [31]. W scenariuszu uruchomienia wentylatorów strumieniowych uwzględniono utrzymanie zjawiska stratyfikacji gazów i dymów pożarowych, co korzystnie wpłynie na bezpieczeństwo podczas ewakuacji w początkowej fazie pożaru.

W artykule określenie natężenia ruchu oraz prędkości poruszających się pojazdów jest istotne ze względu na ustalenie liczby osób podejmujących ewakuację z tunelu objętego pożarem. Na etapie opracowania założeń technicznych dla projektu tunelu natężenie ruchu w tunelach określane jest na podstawie przeprowadzonej prognozy ruchu. W analizowanym przypadku założono ruch pojazdów osobowych, ciężarowych i autokarów z zakazem wjazdu pojazdów przewożących materiały niebezpieczne. Określenie liczby użytkowników tunelu drogowego przeprowadzono zakładając m.in. procentowy skład ruchu:

- udział procentowy samochodów osobowych – 90%,
- udział procentowy pojazdów ciężarowych – 9%,
- udział procentowy autobusów – 1%.

Liczbę osób podejmujących ewakuację oszacowano dla zatoru. Dla tunelu o długości 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m oraz 3500 m wynosiła ona odpowiednio 620 os., 827 os., 1034 os., 1241 os. i 1448 os.

Określenie czasu ewakuacji wymagało przypisania każdej ewakuującej się osobie zestawu indywidualnych parametrów, z których najważniejszymi są: prędkość poruszania się, szerokość ramion oraz czas opóźnienia. Ponadto w oszacowaniu całkowitego czasu ewakuacji należało uwzględnić czas detekcji pożaru, alarmu oraz czas opóźnienia (czas rozpoznania alarmu i czas reakcji) użytkowników tunelu. Niniejsza analiza

for program selection, and their characteristics, are presented in [30]. The studies were carried out for five tunnel lengths: 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m and 3500 m for fire conditions with an emitted heat stream of 30 MW. The initial-boundary conditions for numerical analysis, the fire development, and the parameters determining the burning process in a heavy goods vehicle, were corresponding to those in study [30].

A longitudinal mechanical ventilation system, with air flowing from the left portal, along the axis of the facility to the right portal, was provided in the tunnel. In the bi-directional tunnel in question, cars might be located on both sides of the fire, and will not be able to leave the structure – Fig. 3. This situation poses danger for users located in the smoke-filled part of the tunnel.

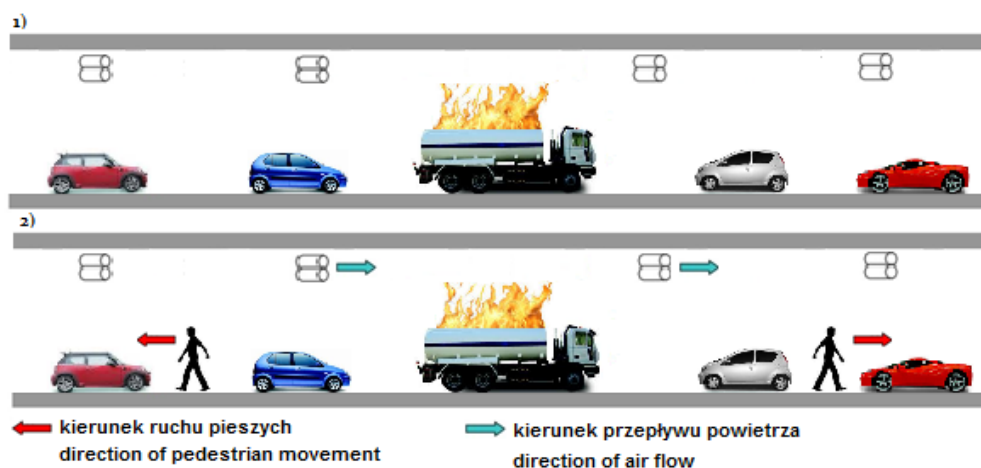
The longitudinal ventilation system was designed to operate in fire conditions in line with the computational procedure presented in [31]. The scenario of jet fan activation takes into account the maintenance of a gas and the fire smoke stratification phenomenon, which will have a positive impact on safety during evacuation in the initial phase of fire.

In the article, the determination of traffic volume and the speed of vehicles is important in terms of determining the number of people evacuating themselves from a tunnel covered in fire. At the stage of developing technical guidelines for tunnel design, traffic volume in tunnels is determined on the basis of traffic forecasts. In the analysed case, it was assumed that the traffic would consist of passenger car, heavy goods vehicles and buses, with vehicles transporting dangerous goods' being banned from entering the tunnel. The number of road tunnel users was determined using the percentage composition of traffic:

- the percentage of passenger cars – 90%,
- the percentage of heavy goods vehicles – 9%,
- the percentage of buses – 1%.

The number of people being evacuated was estimated for congestion, which was for the following tunnel lengths: 1500 m – 620 people, 2000 m – 827 people, 2500 m – 1034 people, 3000 m – 1241 people, 3500 m – 1448 people.

Determining the evacuation time required for attributing a set of individual parameters, the most important being, speed, shoulder width and delay time, to every “evacuating” person. Furthermore, to estimate total evacuation time, one has to take into account fire detection time, alarm time and delay time (between recognising the alarm and reacting) in



Ryc. 3. Pożar pojazdu ciężarowego w tunelu dwukierunkowym: 1) wybuch pożaru, 2) faza ewakuacji

Fig. 3. Fires in heavy goods vehicles in bi-directional tunnels: 1) fire start, 2) evacuation phase

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

zakłada, że wykrycie pożaru przez systemy detekcji nastąpi po 120 s od momentu pojawienia się pożaru, co przyjęto na podstawie [32]. Czas opóźnienia, jak i dobór indywidualnych parametrów osób ewakuujących się oparto o wyniki badań eksperymentalnych [11], a ich dobór został przedstawiony w artykule [30]. W analizie przyjęto brak wzdłużnego nachylenia tunelu drogowego oraz nie uwzględniono komponentu niekontrolowanych i gwałtownych zakłóceń w ruchu strumieni ludzkich wynikających np. z paniki.

Czasy ewakuacji, będące wynikiem obliczeń programu Pathfinder, mogą różnić się od siebie w ramach jednego, tego samego przypadku. Różnica ta wynika głównie z losowego rozmieszczenia użytkowników w modelu geometrycznym. Stąd by otrzymać wartość reprezentatywną czasu ewakuacji, symulacje należało powtórzyć kilkakrotnie dla każdego wariantu. W celu oszacowania wystarczającej liczby prób przeprowadzono serię 30 symulacji dla wariantu I, II i III, dla długości 1500 m. Z uzyskanych rezultatów obliczono średnie wartości czasu ewakuacji dla 5 i 10 prób. Ze średnich z kolei obliczono odchylenia standardowe, na podstawie których przyjęto wystarczającą liczbę symulacji dla danego przypadku. Przeprowadzona analiza miała na celu sprawdzenie zmienności otrzymanych wyników. Na jej podstawie przyjęto, że dla tuneli dwukierunkowych z wyjściami ewakuacyjnymi wystarczającą liczbą prób symulacji jest wartość 5, na podstawie niewielkich różnic w odchyleniach standardowych dla 5 i 10 prób. Z kolei dla przypadku bez wyjść ewakuacyjnych symulacje w liczbie 5 prób mogą dawać niereprezentatywne rezultaty, na co wskazuje znacznie większa wartość odchylenia standardowego dla średnich wartości czasów ewakuacji w porównaniu z odchyleniem dla średniej wartości z 10 prób. Dlatego za liczbę wymaganych prób symulacji dla wariantu bez wyjść przyjęto wartość 10.

4. Analiza wyników badań numerycznych

Dla przyjętego scenariusza pożarowego rozwiązanie bez wyjść ewakuacyjnych oraz z wyjściami o odległości równej maksymalnej, dopuszczalnej odległości według [15] spowoduje, że w momencie pojawienia się krytycznych warunków środowiska w tunelu drogowym będzie przebywać pewna liczba osób narażona na utratę zdrowia lub życia – tabela 2. Odległość co 250 m pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi (optymalna długość drogi ewakuacyjnej) umożliwi bezpieczną ewakuację, zakładając, że czas detekcji nie będzie dłuższy niż 120 s – tabela 2.

Czas pojawienia się w tunelu krytycznego stanu środowiska został określony na podstawie pierwszego przekroczenia dopuszczalnej wartości parametru widzialności – tabela 2. Wyniki obliczeń numerycznych pozwoliły na oszacowanie zależności pomiędzy czasem ewakuacji, odległością wyjść ewakuacyjnych oraz długością tunelu – ryc. 4. W tym celu wykorzystano model regresji, określający zależność między zmienną niezależną a zmienną zależną. Obliczenia przeprowadzono przy użyciu programu Statystyka 10, wykorzystując metodę najmniejszych kwadratów [33]. Teoretyczne wartości czasu ewakuacji zostały wyznaczone z równania płaszczyzny, w oparciu o wyniki przeprowadzonych w pracy badań numerycznych. W celu dokonania wyboru modelu, który cechował się największym dopasowaniem do danych empirycznych, użyto podstawowej miary dopasowania modelu regresji – współczynnika determinacji R^2 , który w przyjętym w pracy modelu wyniósł 0,95.

Na podstawie wyników badań oraz przy wykorzystaniu narzędzi statystycznych czas ewakuacji, będący funkcją odległości wyjść ewakuacyjnych oraz długości tunelu dwukierunkowego, opisano równaniem płaszczyzny:

$$T_1 = 0,00429 \cdot L + 0,22576 \cdot w + 290,755$$

tunnel users. This analysis assumes that the fire will be discovered by detection systems after 120 s of the outbreak of fire, based on [32]. Delay time and the selection of individual parameters of evacuating people are based on the results of experimental studies [11], and their selection is presented in article [30]. The analysis assumes no longitudinal slope of the road tunnel and does not take into account uncontrolled or violent disruptions in human movement resulting from, e.g., panic.

Evacuation times, resulting from computations made in the Pathfinder program, can vary within one and the same case. Such differences result mainly from the users' being distributed randomly in the geometrical model. Thus, to obtain a representative value of evacuation time, simulations had to be repeated several times for every variant. To estimate the required number of samples, a series of 30 simulations for variants 1, 2 and 3 for a length of 1500 m, was carried out. Average values of evacuation time for 5 and 10 samples were calculated using the obtained results. Using the average values, standard deviation was calculated, based on which the required number of simulations for given cases was adopted. The conducted analysis aimed at evaluating the variability of the obtained results. Based on this, it was assumed that for bi-directional tunnels with emergency exits, the required number of simulation samples was 5. This was based on small differences in standard deviation between 5 and 10 samples. In turn, for the cases without emergency exits, simulations with 5 samples can yield unrepresentative results, which is indicated by a much higher standard deviation for average evacuation time, compared with deviation for the average value from 10 samples. Therefore, the number of required simulation samples for variants without exits was set at 10.

4. The analysis of numerical study results

For the adopted fire scenario, a solution without emergency exits and with such exits located at intervals equal to the maximum allowable distance, according to [15], will result in some people located inside the road tunnel being at risk of losing their lives or health (Table 2) when critical environmental conditions occur. Providing emergency exits at intervals of 250 m (the optimal escape route length) will ensure the safety of evacuating – people, providing the detection time does not exceed 120 s (Table 2).

The time of critical environmental conditions occurring in the tunnel was set based on the visibility parameter's being exceeded for the first time – Table 2. The results of numerical computation made it possible to estimate the interrelation between evacuation time, distance between emergency exits and tunnel length – Fig. 4. A regression model was used for this purpose, determining the interrelation between independent and dependent variables. The calculations were conducted using the Statistica 10 program, utilising the least squares method [33]. The theoretical values of evacuation time were determined using the equation of a plane, based on the results of numerical studies carried out as part of this study. To select a model which best fitted the empirical data, the basic measure of the goodness of fit for the regression model – the R^2 coefficient of determination – was used, equalling 0.95 in the adopted model.

On the basis of the study results and using statistical tools, evacuation time, which is a function of distance between emergency exits and bi-directional tunnel length, was described with the equation of a plane:

$$T_1 = 0,00429 \cdot L + 0,22576 \cdot w + 290,755$$

gdzie:

T_1 – czas ewakuacji wyznaczony z równania płaszczyzny [s],
 L – długość tunelu drogowego [m],
 w – odległość pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi [m].

Dokładność obliczeń czasu ewakuacji T_1 w odniesieniu do wyników badania numerycznego T określono poprzez wyznaczenie błędu względnego, którego wartość dla analizowanych przypadków mieści się w przedziale 0,06-0,67%.

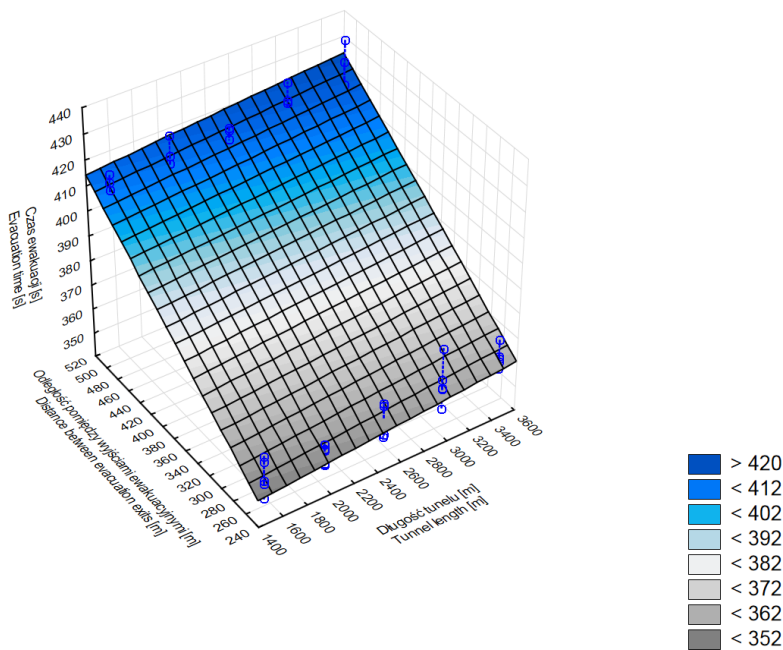
Niewielka wartość błędu względnego oraz wartość współczynnika determinacji bliska 1 potwierdza bardzo dobre dopasowanie modelu regresji do wyników modelowania numerycznego. Dopasowanie to pozwala na oszacowanie przy wykorzystaniu równania płaszczyzny maksymalnych, możliwych odległości wyjść ewakuacyjnych dla analizowanych przypadków, których wyniki przedstawiono na ryc. 5.

where:

T_1 – evacuation time determined using the equation of a plane [s],
 L – road tunnel length [m],
 w – distance between emergency exits [m].

The accuracy of the evacuation time T_1 calculation, in respect of numerical study T , was determined by setting the relative error, which value for the analysed cases lay between 0.06 and 0.67%.

The low value of the relative error and coefficient of determination's being close to 1 confirm a very good fit of the regression model to the results of the numerical modelling. This fit makes it possible to estimate, using the equation of a plane, the maximum possible distances between emergency exits for the analysed cases, whose results are presented in Fig. 5.

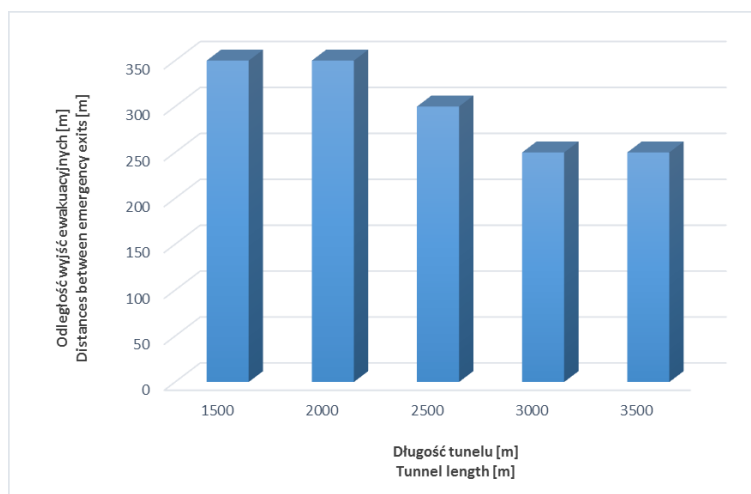


Ryc. 4. Graficzna zależność czasu ewakuacji od odległości wyjść ewakuacyjnych i długości tunelu

Fig. 4. A graphical representation of the dependence of evacuation time on the distance between evacuation exits and tunnel length

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.



Ryc. 5. Maksymalne bezpieczne odległości wyjść ewakuacyjnych wyznaczone z równania płaszczyzny dla analizowanych długości tunelu drogowego

Fig. 5. Maximum safe distances between emergency exits determined using the equation of a plane, for the analysed road tunnel lengths

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Wyniki badań numerycznych dla danego scenariusza i założeń wskazują odległość 250 m pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi jako wystarczającą dla zapewnienia bezpiecznych działań samoratowniczych podczas pożaru dla wszystkich analizowanych długości tuneli drogowych z wentylacją wzdłużną. Dla każdego przypadku możliwe jest precyzyjne określenie rozstawu wyjść zapewniającego z jednej strony bezpieczeństwo osób podczas ewakuacji, a z drugiej stanowiącego racjonalne ekonomicznie rozwiązanie. Dla przypadków analogicznych do przedstawionych można posłużyć się opracowaną na podstawie badań numerycznych zależnością zilustrowaną na ryc. 5. Należy jednak pamiętać, że określenie odległości pomiędzy wyjściami w tunelach drogowych jest kwestią indywidualną i każdorazowo powinno być poprzedzone analizą ryzyka na etapie projektowym.

The results of numerical studies for the hypothesised scenario and the assumptions made indicate a distance of 250 m between emergency exits as sufficient to ensure safe self-rescue activities during a fire for all the analysed lengths of road tunnels with longitudinal ventilation. It is possible to precisely determine the distances of exits for every case which facilitates the safety of people during evacuation and is an economically viable solution. For cases similar to those analysed in this article, one can use the interrelation devised based on numerical studies and illustrated in Fig. 5. One should bear in mind, however, that the determination of distances between exits in road tunnels is an individual issue and should be each time preceded by a risk analysis at the design stage.

Tabela 2. Wyniki badań numerycznych dotyczące: czasu pojawienia się w tunelu krytycznych warunków środowiskowych oraz czasu ewakuacji w zależności od długości tunelu, czasu detekcji i alarmu pożaru, odległości między wyjściami ewakuacyjnymi lub braku wyjść ewakuacyjnych, liczby osób zagrożonych oraz wyewakuowanych

Table 2. The results of numerical examinations of the time when critical environmental conditions appear in the tunnel and evacuation time depending on tunnel length, fire detection time and fire alarm time, as well as on the distance between emergency exits and the number of people exposed to risk, and evacuated persons

Tunel dwukierunkowy o mocy pożaru 30 MW / Bidirectional tunnel with 30 MW of heat release rate		Czas pojawienia się krytycznych warunków w tunelu [s] / Time when critical environmental conditions appear in the tunnel [s]	Czas ewakuacji [s] dla czasu detekcji i alarmu = 120 s / Evacuation time [s] for detection and alarm time = 120 s	Liczba osób wyewakuowanych / Evacuated persons	Liczba osób zagrożonych / Persons exposed to risk
Długość / Length	Wyjścia ewakuacyjne / Emergency exits				
1500 m	Bez wyjść ewak. No emergency exits	378	1278	179	441
	Wyjścia co 500 m Exits every 500 m		411	605	15
	Wyjścia co 250 m Exits every 250 m		356	620	0
2000 m	Bez wyjść ewak. No emergency exits	380	1742	172	655
	Wyjścia co 500 m Exits every 500 m		413	804	23
	Wyjścia co 250 m Exits every 250 m		354	827	0
2500 m	Bez wyjść ewak. No emergency exits	379	2221	224	810
	Wyjścia co 500 m Exits every 500 m		412	1000	34
	Wyjścia co 250 m Exits every 250 m		356	1034	0
3000 m	Bez wyjść ewak. No emergency exits	368	2685	203	1038
	Wyjścia co 500 m Exits every 500 m		415	1170	71
	Wyjścia co 250 m Exits every 250 m		362	1241	0
3500 m	Bez wyjść ewak. No emergency exits	366	3125	192	1256
	Wyjścia co 500 m Exits every 500 m		421	1349	99
	Wyjścia co 250 m Exits every 250 m		362	1448	0

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

5. Podsumowanie

Na podstawie analizy polskich i zagranicznych aktów prawnych oraz wytycznych projektowych zidentyfikowano różnice w zakresie odległości wyjść ewakuacyjnych w tunelach drogowych. Polskie obostrzenia [15] w analizowanej tematyce należą do najmniej restrykcyjnych spośród rozważanych. Przedstawione zagadnienie jest szczególnie ważne ze względu na bezpieczeństwo działań samoratowniczych w warunkach pożaru, ponieważ odległości wyjść ewakuacyjnych wpływają na czas ewakuacji.

W podjętych badaniach modelowania numerycznego przeanalizowano wariant, gdzie odległość pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi jest równa maksymalnej dopuszczalnej odległości wynikającej z polskich przepisów [15], czyli wartości 500 m. Ponadto badano przypadki bez wyjść ewakuacyjnych oraz z wyjściami rozmieszczonymi co 250 m.

W oparciu o informacje przedstawione w artykule można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Niezbędne środki techniczne pozwalające utrzymać wymagany poziom bezpieczeństwa podczas ewakuacji z tunelu drogowego z systemem wentylacji wzdłużnej w warunkach pożaru to poprzeczne wyjścia ewakuacyjne. Odległość pomiędzy nimi uzależniona jest m.in. od prognozowanej mocy pożaru, natężenia ruchu w tunelu, wentylacji, czasu wykrycia pożaru i innych czynników.
2. W tunelach drogowych o długości ≥ 1500 m bez wyjść ewakuacyjnych oraz z wyjściami rozmieszczonymi co 500 m dla zjawisk o charakterze dynamicznym – zależnych od czasu rozwoju pożaru, o strumieniu wyzwalonego ciepła równym 30 MW i zakładanym czasie wykrycia pożaru 120 s – bezpieczeństwo podczas ewakuacji nie zostanie zapewnione.
3. Dla rozważanego scenariusza pożarowego wyjścia w odległości 250 m są wystarczające dla zapewnienia bezpiecznych działań samoratowniczych podczas pożaru dla wszystkich analizowanych długości tunelu, przy zakładanym czasie wykrycia pożaru równym 120 s. Ponadto graniczne wartości odległości wyjść ewakuacyjnych wynoszą: 350 m dla tuneli o długości 1500 m, 2000 m; 300 m dla tuneli o długości 2500 m; 250 m dla tuneli o długości 3000 m i 3500 m.

Określenie odległości wyjść ewakuacyjnych dla danego tunelu drogowego każdorazowo powinno być poprzedzone analizą ryzyka na etapie projektowym dla najbardziej krytycznego scenariusza, który w swoim założeniu obejmować powinien konsekwencje innych możliwych zdarzeń. Wyznaczenie optymalnej odległości pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi w tunelach drogowych jest ciekawym zagadnieniem i wymaga kontynuacji podjętych badań oraz powinno skutkować opracowaniem racjonalnego, ujednoczonego rozwiązania w tym zakresie.

Literatura / Literature

- [1] Suárez J., *A Standardized Modular Solution For Tunnel Cross Passages*, [in:] *Budownictwo Podziemne i Bezpieczeństwo w Komunikacji Drogowej i Infrastrukturze Miejskiej*, AGH, Kraków 2014, 124-134.
- [2] Oficjalna strona internetowa Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad www.gddkia.gov.pl [dostęp: 1.10.2015].
- [3] Ronchi E., *Testing the predictive capabilities of evacuation models for road tunnel safety analysis*, "Safety Science" 2013, 59, 141-153.
- [4] Ronchi E., Kinsey M., *Evacuation models of the future: insights from an online survey of user's experiences and needs*, Advanced Research Workshop – Evacuation and Human Behaviour in Emergency Situations, Spain 2011.
- [5] Ronchi E., Colonna P., Capote J., Alvear D., Berloco N., Cuesta A., *The evaluation of different evacuation models for assessing road tunnel safety analyses*, "Tunnelling and Underground Space Technology" 2012, 30, 74-84.

5. Summary

Based on the analysis of Polish and foreign legal acts, and design guidelines, differences in terms of distances between emergency exits in road tunnels were identified. Polish restrictions [15] in the field in question are among the most lax regulations. The discussed issue is especially important when it comes to the safety of self-rescue activities in fire conditions, as the distance between emergency exits affects evacuation time.

In the carried out studies of numerical modelling, a variant was analysed in which the distance between emergency exits was equal to the maximum allowable distance under Polish regulations [15], i.e. 500 m. Furthermore, cases without emergency exits and with exits situated at intervals of 250 m, were also studied.

On the basis of information presented in the article, one can draw the following conclusions

1. The necessary technical measures facilitating the required safety level during evacuation from a road tunnel with a longitudinal ventilation system, in fire conditions, are transverse emergency exits. The distance between them depends, i.a., on the predicted heat release rate, traffic volume inside the tunnel, ventilation, detection time and other factors.
2. In road tunnels with a length ≥ 1500 m and with no emergency exits or with exits provided every 500 m, in relation to dynamic phenomena – which depend on fire development time, with a heat release rate of 30 MW and fire detection time of 120 s – evacuation safety will not be ensured.
3. For the discussed fire scenario, exits at intervals of 250 m are sufficient to ensure safe self-rescue activities during a fire for all the analysed tunnel lengths, assuming a fire detection time of 120 s. Furthermore, the boundary values of distances between emergency exits are 350 m for tunnels with a length of 1500 m, 2000 m, 300 m for tunnels with a length of 2500 m, and 250 m for tunnels with lengths of 3000 m and 3500 m.

The determination of distances between emergency exits for a given road tunnel should be each and every time by a risk analysis at the design stage for the most critical scenario with the objective to include the consequences of other possible events. Defining the optimal distance between emergency exits in road tunnels is an interesting topic and requires a follow-up to the initiated studies, and should result in rational, standardised solutions being devised.

- [6] Ronchi E., Gwynne S., Purser D. A., Colonna P., *Representation of the impact of smoke on agent walking speeds in evacuation models*, "Fire Technology" 2013, 49(2), 411-431.
- [7] Ronchi E., Nilsson D., Gwynne S., *Modelling the impact of emergency exit signs in tunnels*, "Fire Technology" 2012, 48(4), 861-988.
- [8] Nilsson D., Johansson M., Frantzich H., *Evacuation experiment in a road tunnel: A study of human behaviour and technical installations*, "Fire Safety Journal" 2009, 44 (4), 458-468.
- [9] Valasek L., Glasa J., *Simulation of the course of evacuation in tunnel fire conditions by FDS+Evac*, [in:] *Proceedings of the 2013 International Conference on Applied Mathematics and Computational Methods in Engineering*, Rhodes Island 2013, 288-295.
- [10] Glasa J., Valasek L., Halada L., Weisenpacher P., *Modelling of impact of fire on safe people evacuation in tunnel*, "Journal of Physics Conference Series" 2014, 490(012067), 1-4.
- [11] Smith J., *Agent-Based Simulation of Human Movements During Emergency Evacuations of Facilities*, [in:] *Structures Congress 2008: Crossing Borders*, D. Anderson, C. Ventura, D. Harvey, M. Hoit (eds.), American Society of Civil Engineers, Canada 2008, 1-10.

- [12] Wąs J., Lubaś R., *Adapting Social Distances Model for Mass Evacuation*, "Simulation Journal of Cellular Automata" 2013, 8, 395-405.
- [13] Wąs J., Rakoczy J., Rus M., Porzycki J., Lubaś R., Mycek M., *Problematyka modelowania i symulacji ewakuacji ludzi z tuneli*, [w:] *Budownictwo Podziemne i Bezpieczeństwo w Komunikacji Drogowej i Infrastrukturze Miejskiej*, AGH, Kraków 2014, 171-177.
- [14] Dyrektywa 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 29 kwietnia 2004 r. w sprawie minimalnych wymagań bezpieczeństwa dla tuneli w transeuropejskiej sieci drogowej.
- [15] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 63, poz. 735 z późn. zm.).
- [16] RABT: Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrsweesen, Richtlinien fuer Ausstattung und Betrieb von Strassentunneln, 2006.
- [17] Road Tunnels Manual. Structural Facilities Related To Operation And Safety, PIARC, 2011.
- [18] Bundesgesetz über die Sicherheit von Straßentunneln (Straßentunnel-Sicherheitsgesetz – STSG), BGBl. I Nr. 54/2006 in der Fassung BGBl. I Nr. 111/2010.
- [19] Linee Guida per la progettazione della sicurezza nelle Gallerie Stradali, Strade & Autostrade No. 61, Milan 2009.
- [20] Inter-Ministry Circular No. 2000-63-Safety in the Tunnels of the National Highways Network, Ministry of the Establishment, Transport and Housing, France 2000.
- [21] BD 78/99: Design Manual for Roads and Bridges. Part 9: Design of Road Tunnels, United Kingdom 1999.
- [22] Staten Vegvesen. Government guideline. Norwegian Public Roads Administration Directorate of Public Roads, Norway 2004.
- [23] Netherlands/NL-Safe, Recommendations Ventilation of Road Tunnels, (RWS Bouwdienst, Steunpunt Tunnelveiligheid), 2005.
- [24] FEDRO/ASTRA: Directive Road tunnel doors and gates, ASTRA 13 001. FEDRO, Switzerland 2009.
- [25] NFPA 502: National Fire Protection Association: Standard for Road Tunnels, Bridges, and Other Limited Access Highways, USA 2014.
- [26] Fire Safety Guidelines for Road Tunnels; Road tunnel design guideline, Fire Safety Design, Part 1 – 3, Australia 2001.
- [27] Strona internetowa firmy ADAC, <http://www.adac.de/> [dostęp: 1.11.2013].
- [28] British Standard PD 7974-6:2004: The application of fire safety engineering principles to fire safety design of buildings. Part 6: Human factors: Life safety strategies-Occupant evacuation, behaviour and condition (Sub-system 6).
- [29] *SITP: Działanie instalacji przeciwpożarowej wynikającej z założeń scenariusz pożarowego. Podręcznik projektanta systemów sygnalizacji pożaru*, Część I i II, Izba Rzeczoznawców SITP, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2010.
- [30] Nawrat S., Schmidt-Polończyk N., Napieraj S., *Ocena bezpieczeństwa użytkowników tunelu drogowego z wentylacją wzdłużną w warunkach pożaru przy wykorzystaniu narzędzi modelowania numerycznego*, BiTP Vol. 43 Issue 3, 2016, pp. 253-263.
- [31] CETU: Dossier Pilote des Tunnels Équipements, section 4.1 Ventilation, Centre d'études des Tunnels, France 2003.
- [32] Ingenieurbüro Vössing Vepro GmbH, Ingenieurbüro Dipl. Ing. H. Vössing GmbH, Projekt wykonawczy: Budowa drogi ekspresowej S-7 Kraków-Rabka Zdrój na odcinku Lubień – Rabka Zdrój Km 713+580,21 – Km 729+410,00 oraz budowa nowego odcinka drogi nr 47 klasy Gp na odcinku Rabka Zdrój – Chabówka Km 0+000,00 - Km 0+877,22, 7. Wyposażenie Tunelu Obiekt nr 17; 7.4.A. Projekt Wentylacji. Część 1. Charakterystyka Wentylacji, Kraków 2011.
- [33] Koronacki J., Mielniczuk J., *Statystyka dla studentów kierunków technicznych i przyrodniczych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.

Artykuł został przetłumaczony ze środków MNiSW w ramach zadania:

Stworzenie anglojęzycznych wersji oryginalnych artykułów naukowych wydawanych w kwartalniku „BiTP. Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza – typ zadania: stworzenie anglojęzycznych wersji wydawanych publikacji finansowane w ramach umowy 935/P-DUN/2016 ze środków Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych na działalność upowszechniającą naukę.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego

* * *

dr inż. Natalia Schmidt-Polończyk – asystentka na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie. W 2016 roku obroniła rozprawę doktorską pt. *Ocena możliwości stosowania systemu wentylacji wzdłużnej w długich tunelach drogowych. Obszarem zainteresowań autorki są zagadnienia wentylacji, bezpieczeństwa pożarowego oraz ewakuacji.*

Natalia Schmidt-Polończyk, Ph.D. Eng. – assistant at the Faculty of Mining and Geoen지니어ing, the AGH University of Science and Technology in Kraków. In 2016 she defended her doctoral dissertation entitled *An assessment of the possibility of using longitudinal ventilation systems in long road tunnels. The author's area of interest includes the fields of ventilation, fire safety and evacuation.*

