

mgr inż. Łukasz Nowak^{a)}, dr inż. Natalia Schmidt-Polończyk^{a)*}

^{a)}AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Górnictwa i Geoinżynierii / AGH University of Science and Technology, The Faculty of Mining and Geoengineering

*Autor korespondencyjny / Corresponding author: nschmidt@agh.edu.pl

Weryfikacja możliwości bezpiecznej ewakuacji z tunelu drogowego w warunkach pożaru

Verification of Possible Safe Evacuation From Road Tunnels in the Event of Fire

Проверка возможности проведения безопасной эвакуации из автомобильного тоннеля в условиях пожара

ABSTRAKT

Cel: Celem artykułu jest przedstawienie rezultatów badań numerycznych ewakuacji z tunelu drogowego w warunkach pożaru dla trzech różnych scenariuszy pożarowych, których bazę stanowiła katastrofa w tunelu drogowym Mont Blanc z 1999 roku. W oparciu o nią wykonano trzy modele tunelu:

- model odpowiadający rzeczywistym warunkom panującym w tunelu w czasie pożaru w 1999 roku,
- model odnoszący się do warunków po wprowadzeniu zmian związanych z przebudową tunelu i jego ponownym otwarciem w 2002 roku oraz,
- model odnoszący się do obowiązujących w UE wymogów Dyrektywy 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady.

Wprowadzenie: Artykuł poświęcono w głównej mierze wpływowi rozmieszczenia schronów oraz wyjść ewakuacyjnych w tunelu drogowym na rezultaty działań samoratowniczych w chwili wystąpienia zagrożenia pożarowego. Tunel drogowy jest przestrzenią ograniczoną, w której pożar prowadzi do szybkiej zmiany parametrów otoczenia i powstania warunków krytycznych mogących stanowić zagrożenie dla jego użytkowników. W związku z powyższym gęstość rozmieszczenia dróg ewakuacyjnych w tego typu przestrzeniach ma bardzo istotny wpływ na czas działań samoratowniczych.

Metodologia: W artykule przeprowadzono badania modelowania numerycznego, które pozwoliły wyznaczyć wymagany czas bezpiecznej ewakuacji T_{REST} . Dostępny czas ewakuacji T_{ASET} został wyznaczony w oparciu o analizę pożaru w tunelu Mont Blanc z 1999 roku. Ewakuację uznano za bezpieczną, gdy spełnione zostało tzw. kryterium bezpiecznej ewakuacji, czyli zależność $T_{ASET} \geq T_{REST}$.

Wnioski: Wyniki obliczeń numerycznych potwierdziły, że wprowadzone po pożarze zmiany w tunelu Mont Blanc mogłyby zapewnić bezpieczeństwo użytkownikom tunelu w razie wystąpienia w nim pożaru podobnego do tego z 1999 roku. Ponadto w przypadku dwóch pozostałych scenariuszy pożarowych – czyli dla rozmieszczenia schronów co 300 metrów oraz wyjść ewakuacyjnych do równoległego tunelu ewakuacyjnego usytuowanych co 500 metrów – wykazano brak możliwości przeprowadzenia skutecznych działań samoratowniczych. Czas ewakuacji w dużej mierze zależy od czasu przejścia drogą ewakuacyjną, dlatego gęstość wyjść ewakuacyjnych oraz schronów powinna być ustalana na etapie projektowym z uwzględnieniem najbardziej krytycznego scenariusza. Dzięki temu w chwili wystąpienia niebezpiecznej sytuacji w przestrzeni tunelu każdy jego użytkownik będzie miał warunki do bezpiecznej ewakuacji.

Słowa kluczowe: ewakuacja, wyjścia ewakuacyjne, bezpieczeństwo pożarowe, tunel Mont Blanc

Typ artykułu: studium przypadku – analiza zdarzeń rzeczywistych

Przyjęty: 25.06.2017; Zrecenzowany: 03.08.2017; Opublikowany: 30.09.2017;

Autorzy wnieśli równy wkład merytoryczny w opracowanie artykułu;

Proszę cytować: BiTP Vol. 47 Issue 3, 2017, pp. 96–110, doi: 10.12845/bitp.47.3.2017.8;

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

ABSTRACT

Aim: The main purpose of this article is to present the results of numerical calculations of evacuation from the road tunnel in the case of fire in three different scenarios. The research is based on the Mont Blanc tunnel catastrophe in 1999. Three tunnel models were generated on this basis:

- a model corresponding to the actual conditions in the tunnel during the 1999 fire,
- a model reflecting conditions after modifications associated with the tunnel's redevelopment and its reopening in 2002,
- a model referring to the requirements of Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council binding in the EU.

Introduction: In the article, the authors focused on the influence of the distance between shelters or evacuation exits in a road tunnel on the results of self-rescue actions in the event of fire. Tunnels have limited space, so a fire leads to rapid changes in the environment's parameters and the

occurrence of critical conditions, which can be dangerous for human life. Therefore, the distribution of evacuation exits influences the duration of self-rescue actions.

Methodology: Numerical calculations were conducted for the purpose of defining the Required Safe Escape Time T_{RSET} . The Available Safe Escape Time T_{ASET} was determined on the basis of the analysis of the fire in the Mont Blanc tunnel in 1999. The evacuation process is considered safe when the so-called safe escape time criterion is met, i.e. when dependency $T_{ASET} \geq T_{RSET}$ is met.

Conclusions: The results of the numerical calculation confirmed that the modifications after the Mont Blanc fire could ensure safe evacuation in the event of a fire similar to that of 1999. Moreover, in the case of the two remaining fire scenarios (the distance between shelters is 300 m and the distance between evacuation exits to the parallel evacuation tunnel is 500 m), there is no possibility to conduct safe self-rescue actions. Evacuation time largely depends on the movement speed of evacuees, thus the distribution of evacuation exits or shelters should be determined during the design phase taking into consideration the most dangerous scenario, so that each tunnel user would have proper conditions for safe evacuation.

Keywords: evacuation, evacuation exits, fire safety, Mont Blanc tunnel

Type of article: case study – analysis of actual events

Received: 25.06.2017; Reviewed: 03.08.2017; Published: 30.09.2017;

The authors contributed equally to this article;

Please cite as: BITP Vol. 47 Issue 3, 2017, pp. 96–110, doi: 10.12845/bitp.47.3.2017.8;

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: Цель статьи – представить результаты численного моделирования эвакуации из автомобильного тоннеля во время пожара для трех различных сценариев пожара, представленных на основе катастрофы в Монбланском автомобильном тоннеле, которая произошла в 1999 году. На основе этого происшествия были созданы три модели тоннеля:

- модель, соответствующая реальным условиям в тоннеле во время пожара в 1999 году,
- модель, включающая изменения, связанные с реконструкцией и повторным открытием тоннеля в 2002 году,
- модель, относящаяся к действующим в ЕС требованиям – Директиве 2004/54/ЕС Европейского Парламента и Совета.

Введение: В статье основное внимание уделяется влиянию размещения бункеров и эвакуационных выходов в автомобильном тоннеле на результаты самоспасательных действий во время появления пожарной угрозы. Автомобильный тоннель представляет собой ограниченное пространство, в котором пожар приводит к быстрому изменению параметров окружающей среды, созданию критических условий, которые могут поставить под угрозу его пользователей. Поэтому частота размещения эвакуационных путей существенно влияет на время действий по самоспасению.

Методология: В статье было проведено численное моделирование, которое позволило определить требуемое безопасное время эвакуации T_{RSET} . Реальное время эвакуации T_{ASET} было установлено на основе анализа пожара в Монбланском тоннеле 1999 года. Эвакуация считалась безопасной, если был выполнен критерий безопасной эвакуации, т.е. сохранена зависимость $T_{ASET} \geq T_{RSET}$.

Выводы: Результаты численного моделирования подтвердили, что изменения введенные в Монбланском тоннеле после пожара, могли бы обеспечить безопасность пользователей тоннеля в случае пожара похожего на пожар 1999 года. Кроме того, в случае остальных двух сценариев пожара, а именно: распределения бункеров каждые 300 метров и эвакуационных выходов в параллельный аварийный тоннель каждые 500 метров – не обеспечивается возможность проведения эффективных действий по самоспасению. Время эвакуации в значительной степени зависит от времени прохода эвакуационного пути, поэтому плотность эвакуационных выходов, бункеров должна быть определена на стадии проектирования с учетом наиболее критического сценария, так, чтобы во время появления наиболее опасной ситуации в тоннеле, каждый пользователь мог безопасно эвакуироваться.

Ключевые слова: эвакуация, эвакуационный выход, пожарная безопасность, Монбланский тоннель

Вид статьи: исследование случая – анализ реальных событий

Принята: 25.06.2017; Рецензирована: 03.08.2017; Опубликована: 30.09.2017;

Авторы внесли одинаковый вклад в создание этой статьи;

Просим ссылаться на статью следующим образом: BITP Vol. 47 Issue 3, 2017, pp. 96–110, doi: 10.12845/bitp.47.3.2017.8;

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

Infrastruktura drogowa w ostatnich latach rozwija się dynamicznie praktycznie na całym świecie, w tym również w Polsce. Zwiększa się rola budownictwa podziemnego, powstają coraz dłuższe tunele, które umożliwiają pokonywanie przeszkód terenowych (np. gór, rzek), usprawniają połączenia drogowe w miastach oraz wpływają pozytywnie na redukcję emisji zanieczyszczeń i hałasu [1]. Ze względu na swoją specyfikę (przestrzeń częściowo zamknięta) tunel jest konstrukcją, w której kolizja

Introduction

In recent years road infrastructure has been rapidly developing in most parts of the world, including Poland. The role of underground construction is growing and increasingly long tunnels are created for crossing various terrain obstacles (e.g. mountains, rivers), facilitating road transport in cities and positively influencing pollutant and noise emissions [1]. Tunnels, due to their specific construction (consisting of a partially closed space) are structures in which road accidents in

drogowa w niesprzyjających warunkach może doprowadzić do powstania pożaru, zagrozić życiu oraz zdrowiu ludzi. W większości przypadków przyczyną wystąpienia pożaru są usterki mechaniczne pojazdów (np. przegrzanie silnika, zwarcie w instalacji elektrycznej). Przykładem takiego zdarzenia może być zapalenie się ciężarówki przewożącej opony, które miało miejsce w tunelu Fréjus w 2005 roku (Francja–Włochy). Ogień może pojawić się również w wyniku zderzenia pojazdów, co miało miejsce w 2001 roku w tunelu Gleinalm (Austria), gdy po zderzeniu czołowym samochodu ciężarowego i osobowego śmierć w pożarze poniosło 5 osób [2, 3, 1].

W chwili zagrożenia zdrowia i życia użytkowników tunelu drogowego najważniejsze działania sprowadzają się do przeprowadzenia ich sprawnej ewakuacji. W celu poprawy bezpieczeństwa wdraża się dodatkowe środki techniczne np. wyjścia ewakuacyjne lub schrony przeciwpożarowe, a modelowanie samego procesu ewakuacji coraz częściej analizuje się z wykorzystaniem narzędzi symulacyjnych, opierających się na obliczeniach numerycznych. Wynik działań samoratowniczych użytkowników tunelu drogowego może być uzależniony od szeregu czynników, takich jak rozmieszczenie i liczba wyjść ewakuacyjnych, oddziaływanie zadymienia na prędkość poruszania się, rozmieszczenie sygnalizacji i znaków ewakuacyjnych, indywidualne cechy użytkowników (np. reakcja na stresujące sytuacje) czy też sam czas podjęcia ewakuacji [4, 5, 6].

Niniejszy artykuł oparto na trzech założonych scenariuszach, różniących się rozmieszczeniem wyjść ewakuacyjnych (schronów) w modelowanym tunelu drogowym. Za punkt odniesienia posłużyła katastrofa z 1999 roku w tunelu drogowym Mont Blanc, w oparciu o którą przeprowadzono symulację działań samoratowniczych przy rozmieszczeniu:

- schronów przeciwpożarowych co 600 m,
- wyjść do równoległego tunelu ewakuacyjnego co 500 m,
- wyjść do równoległego tunelu ewakuacyjnego (schronu) co 300 m.

Przeprowadzone modelowanie numeryczne pozwoliło ustalić czas wycofania się użytkowników z tunelu w przypadku wystąpienia w nim pożaru w każdym z wymienionych wariantów.

Zagrożenie pożarowe

Pożar to niekontrolowany w czasie proces, który może zaistnieć pod warunkiem wystąpienia trzech czynników: materiału palnego, źródła ciepła przekraczającego temperaturę zapłonu materiału palnego oraz dostatecznej ilości tlenu [7].

Pożar w tunelu drogowym może stanowić śmiertelne zagrożenie dla znajdujących się w nim ludzi oraz być przyczyną poważnych uszkodzeń konstrukcji samego tunelu. Przykłady pożarów w tunelach drogowych zostały zestawione w tabeli 1.

unfavourable conditions can lead to a fire, which poses danger to human life and health. In most cases the causes of fires are mechanical defects of vehicles (e.g. engine overheating, short circuit). An example of such an event may be the fire of a tyre-transporting truck, which took place in the Fréjus Road Tunnel (connecting France and Italy) in 2005. Fire may also occur as a result of a collision of two vehicles, as the one in 2001 in the Gleinalm Tunnel (Austria), when 5 people died in a fire following a head-on collision of a truck and a passenger car [2, 3, 1].

In a case of danger to the life and health of road tunnel users, their fast evacuation is the most important. In order to improve safety, additional technical measures are applied, e.g. evacuation exits or fire shelters, and the modelling of the process itself is increasingly often analysed with the use of simulation tools based on numerical calculations. The outcome of the self-rescue actions taken by road tunnel users may depend on a variety of factors, including the distribution and number of evacuation exits, the impact of fogging on the speed of traffic, the distribution of signalling and exit signs, the individual traits of tunnel users such as their reactions to stressful situations, and the time of starting evacuation [4, 5, 6].

This article is based on three scenarios which differ in the distribution of evacuation exits (shelters) in the modelled road tunnel. The catastrophe of 1999 in the Mont Blanc road tunnel was used as a reference point and it served as the basis for a simulation of self-rescue actions, with the positioning of:

- fire shelters every 600 m,
- exits to a parallel evacuation tunnel every 500 m,
- exits to a parallel evacuation tunnel (shelter) every 300 m,

The performed numerical modelling made it possible to determine the time of evacuation of tunnel users in the case of fire for each of the mentioned variants.

Fire risk

Fire is a process uncontrollable in time and its occurrence requires three factors: a flammable material, a source of heat exceeding the ignition temperature of the flammable material and a sufficient amount of oxygen [7].

Fire in a road tunnel may pose a threat to the life of people in the tunnel and a cause of serious damage to its structure. Examples of fires in road tunnels are compiled in table 1.

Tabela 1. Wybrane pożary w tunelach drogowych [8, 9]

Table 1. Examples of road tunnel fires [8, 9]

Pożar w tunelu Tunnel fire		Konsekwencje Consequences		
Rok Year	Kraj i długość tunelu Country and tunnel length	Konsekwencje w ludziach Human casualties	Zniszczone pojazdy Destroyed vehicles	Obudowa tunelu i instalacje Road tunnel lining and installations
1978	Holandia / the Netherlands, Velsen 770 m	5 ofiar śmiertelnych, 5 poszkodowanych 5 dead, 5 injured	4 samochody ciężarowe, 2 samochody osobowe 4 trucks, 2 cars	poważne uszkodzenie tunelu na długości 30 m serious damage, along a 30 m section
1979	Japonia / Japan, Nihonzaka 2 045 m	7 ofiar śmiertelnych, 1 poszkodowana 7 dead, 1 injured	127 samochodów ciężarowych, 46 samochodów osobowych 127 trucks, 46 cars	poważne uszkodzenie tunelu na długości 1100 m serious damage, along a 1100 m section
1982	USA Caldecott 1 028 m	7 ofiar śmiertelnych, 2 poszkodowane 7 dead, 2 injured	3 samochody ciężarowe, 1 autokar, 4 samochody osobowe 3 trucks, 1 coach, 4 cars	poważne uszkodzenie tunelu na długości 580 m serious damage, along a 580 m section
1987	Szwajcaria/Switzerland, Gumefens 343 m	2 ofiary śmiertelne 2 dead	21 samochodów ciężarowych, 1 van, 2 trucks, 1 van	powierzchniowe zniszczenia slight damage
1993	Norwegia/ Norway, Hovden 1 290m	5 poszkodowanych 5 injured in the collision	1 motocykl, 2 samochody osobowe 1 motor cycle, 2 cars	zniszczeniu uległo 111 m materiału izolującego 111 m of insulation, material destroyed
1994	South Africa Huguenot 3 914 m	1 ofiara śmiertelna, 28 poszkodowanych 1 dead, 28 injured	1 autokar 1 coach	poważne uszkodzenie tunelu serious damage
1995	Austria Pfander 6 719 m	3 ofiary śmiertelne, 4 poszkodowane 3 dead in the collision, 4 injured	1 samochód ciężarowy, 1 van, 1 samochód osobowy 1 truck, 1 van, 1 car	poważne uszkodzenie tunelu serious damage
1996	Włochy/Italy Isola delle Femmine 148 m	5 ofiar śmiertelnych, 20 poszkodowanych 5 dead, 20 injured	1 cysterna, 1 bus, 18 samochodów osobowych 1 tanker, 1 bus, 18 cars	poważne uszkodzenia, tunel zamknięty na 2,5 dnia serious damage, tunnel closed for 2.5 days
1999	Francja Włochy / France Italy Mont Blanc 11 600 m	39 ofiar śmiertelnych 39 dead	23 samochody ciężarowe, 10 samocho- dów osobowych, 1 motocykl, 2 samo- chody straży pożarnej 23 trucks, 10 cars, 1 motor cycle, 2 fire engines	poważne uszkodzenia, tunel ponownie otwarty po 3 latach serious damage, tunnel reopens 22/12/2001 after 3 years
1999	Austria Tauern 6 401 m	12 ofiar śmiertelnych, 49 poszkodowanych 12 dead, 49 injured	14 samochodów ciężarowych, 26 samochodów osobowych 14 trucks, 26 cars	poważne uszkodzenie tunelu serious damage
2001	Szwajcaria/Switzerland St. Gotthard 16 918 m	11 ofiar śmiertelnych 11 dead	13 samochodów ciężarowych, 4 vany, 6 samochodów osobowych 13 trucks, 4 vans, 6 cars	poważne uszkodzenia, tunel ponownie otwarty po 2 miesiącach serious damage, closed 2 months
2005	Francja Włochy / France Italy Fréjus 12 895 m	2 ofiary śmiertelne, 21 poszkodowanych zatrulo się dymem 2 dead, 21 treated for smoke inhalation	4 samochody ciężarowe, 3 samochody straży pożarnej 4 trucks, 3 fire fighting vehicles	poważne uszkodzenia, tunel ponownie otwarty po 2 miesiącach serious damage, tunnel closed
2006	Szwajcaria/Switzerland, Viamala 742 m	6 ofiar śmiertelnych, 6 poszkodowanych 6 dead, 6 injured	1 bus, 2 samochody osobowe 1 bus, 2 cars	–

W sytuacji wystąpienia pożaru w tunelu zmieniają się parametry otoczenia. Warunki, które mogą zagrażać życiu oraz zdrowiu ludzi, nazywane są krytycznymi i mówimy o nich w chwili, gdy [10, 11]:

- zasięg widzialność w tunelu jest mniejszy niż 10 m i temperatura powietrza wynosi ponad 60°C na wysokości mniejszej lub równej 1,8 m od poziomu drogi ewakuacyjnej,
- temperatura gazów pożarowych wynosi ponad 200°C na wysokości ponad 2,5 m od poziomu drogi ewakuacyjnej,
- podczas ekspozycji dłuższej niż 30 s gęstość strumienia promieniowania cieplnego ma wartość 2,5 kW/m²,
- zawartość tlenu spada poniżej 15%.

In the case of fire in the tunnel, the surrounding parameters change. The conditions which may pose a threat to human life and health are referred to as critical conditions and they occur when [10, 11]:

- the visibility range in the tunnel falls below 10 m and the air temperature exceeds 60°C at a height lower or equal to 1.8 m from the escape route level,
- the temperature of fire gases is higher than 200°C at a height of more than 2.5 m from the escape route level,
- with the exposure exceeding 30 s the density of the heat radiation flux is 2.5 kW/sq. m.
- and oxygen concentration falls below 15%.

Czas, w którym jeden z powyższych parametrów osiągnie wartość krytyczną jako pierwszy, nazywany jest dostępnym czasem bezpiecznej ewakuacji (T_{ASET}). Natomiast wymagany czas ewakuacji (T_{RSET}) jest czasem trwającym od początku powstania pożaru do momentu ewakuacji wszystkich użytkowników w bezpieczne miejsce i stanowi wypadkową [11, 12]:

- t_{det} czasu detekcji pożaru,
- t_a czasu alarmu,
- t_r czasu rozpoznania sytuacji,
- t_{reak} czasu reakcji na zdarzenie,
- t_p czasu przejścia ewakuujących się osób.

Zapewnienie bezpiecznych warunków ewakuacji jest możliwe, gdy spełnione jest tzw. kryterium bezpiecznej ewakuacji [10]:

$$T_{ASET} \geq T_{RSET} \quad (1)$$

Dostępny czas bezpiecznej ewakuacji (T_{ASET}) bywa przedstawiany jako suma wymaganego czasu ewakuacji (T_{RSET}) i pewnego marginesu bezpieczeństwa, który dla każdego z obiektów powinien być określany indywidualnie, w zależności od liczby użytkowników, wyposażenia i warunków konstrukcyjnych [12].

The time in which one of the above parameters first reaches a critical value is referred to as the available safe escape time (T_{ASET}). However, the required safe escape time (T_{RSET}) is the time from the onset of the fire to the evacuation of all users to a safe place, and is a resultant of [11, 12]:

- t_{det} fire detection time,
- t_a alarm time,
- t_r situation recognition time,
- t_{reak} reaction time,
- t_p movement speed of evacuees.

Ensuring safe evacuation conditions is possible when the so-called safe evacuation criterion is met [10]:

$$T_{ASET} \geq T_{RSET} \quad (1)$$

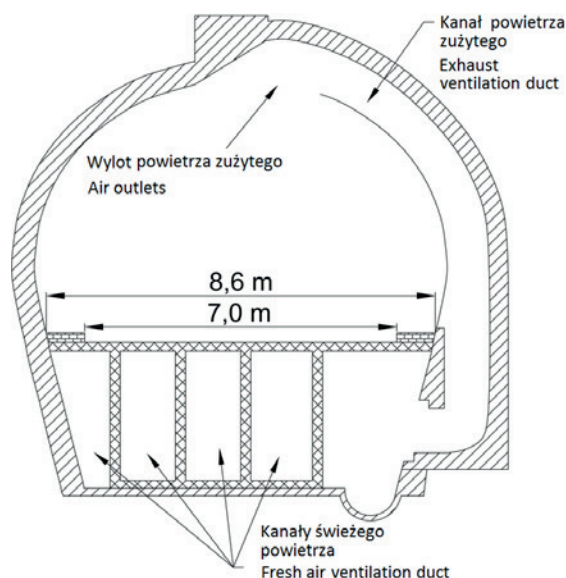
The available safe escape time (T_{ASET}) is sometimes presented as the total of the required safe escape time (T_{RSET}) with a safety margin, which should be specified individually for each object depending on the number of users, equipment and structural conditions [12].

Pożar w tunelu Mont Blanc – analiza przypadku

Tunel Mont Blanc został wybudowany jako tunel jednonawowy, dwukierunkowy o dwóch pasach jezdni łączący Chamonix (Francja) z Courmayeur (Włochy). Liczący 11,6 km długości obiekt był w chwili ukończenia budowy (1965) najdłuższym tunelem drogowym na świecie [13, 9]. Tunel posiada przekrój kształtem zbliżony do podkowy, jezdnia ma szerokość 7 m, a po obu jej stronach znajdują się chodniki o szerokości 0,8 m. Płyta jezdni oraz położone pod nią kanały zostały wykonane z żelbetonu, natomiast ściany tunelu (0,5 m grubości) z betonu bez wzmocnień [13]. Przekrój poprzeczny tunelu został zaprezentowany na rycinie 1.

Fire in the Mont Blanc tunnel – a case report

The Mont Blanc tunnel is a single-gallery two-direction tunnel with two lanes, linking Chamonix (France) with Courmayeur (Italy). This 11.6 km long structure at the time of completion (1965) was the longest road tunnel in the world [13, 9]. The tunnel's section is semicircular, with the road width of 7 m and 0.8 m long pavements on both sides. The road slab and channels located beneath were made of reinforced concrete, and the tunnel walls (0.5 m thick) from concrete without reinforcements [13]. The cross-section of the tunnel is presented in figure 1.



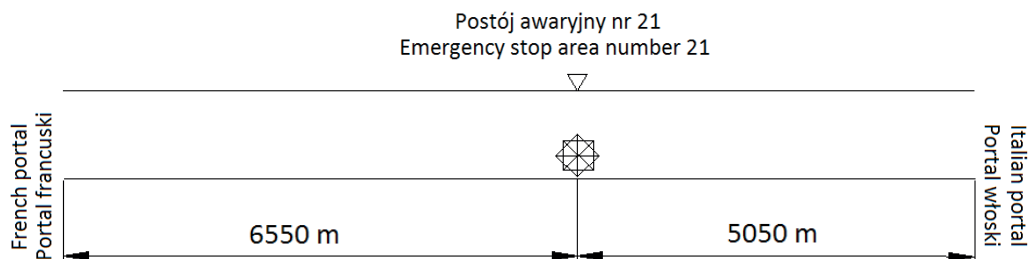
Rycina 1. Przekrój przez tunel [9]
Figure 1. Tunnel cross section [9]

Tunel został wyposażony w 18 schronów bezpieczeństwa rozmieszczonych co 600 metrów i zapewniających ochronę przez 2 godziny podczas pożaru. Zatoki przeznaczone do awaryjnego postoju pojazdów o szerokości 3,15 metrów i długości 30 metrów usytuowane były na zmianę po obu stronach drogi co 300 metrów i ponumerowane od 1 do 36 w kierunku od strony francuskiej do włoskiej. Po przeciwnych stronach dla zatok awaryjnego postoju wydzielone było miejsce umożliwiające samochodom ciężarowym zmianę kierunku jazdy [13]. Nisze bezpieczeństwa wyposażone zostały w ręczny ostrzegacz pożarowy. Dwie gaśnice znajdowały się co 100 metrów, a nisze przeciwpożarowe z przyłączem wody do celów gaśniczych co 150 metrów. Przed pożarem kamery monitoringu rozlokowane były co 300 metrów, natomiast sygnalizacja świetlna została umieszczona na portalach oraz co każde 1200 metrów tunelu. Tunel posiadał dwa centra dowodzenia i kontroli przy obu wlotach (portalach), każde odpowiedzialne za połowę długości tunelu oraz jednostkę straży pożarnej po stronie francuskiej [13, 14].

24 marca 1999 roku w omawianym tunelu doszło do katastrofy. Belgijska ciężarówka (chłodnia) marki Volvo, jadąca z Francji do Włoch, zapaliła się i zatrzymała się w odległości około 7 kilometrów od francuskiego portalu. Powodem powstania pożaru był żarzący się niedopałek papierosa, który dostał się do filtra powietrza samochodu [13, 9]. Schemat lokalizacji pożaru został przedstawiony na rycinie 2.

The tunnel was equipped with safety shelters located every 600 metres enabling protection for 2 hours during a fire (18 shelters). Bays for the emergency stop of vehicles with a width of 3.15 metres and with a length of 30 metres were located interchangeably on both sides of the road every 300 metres and numbered from 1 to 36 from the French towards the Italian side. On the opposite sides of emergency stop bays a place was provided for trucks to change their direction [13]. Safety niches equipped with fire pullbox alarms and two fire extinguishers were located every 100 metres, and fire niches with water supply connections for fire extinguishing purposes – every 150 metres. Before the fire, surveillance cameras were located every 300 metres, and traffic lights were installed on portals and every 1200 metres of the tunnel. The tunnel was equipped with two command and control centres on both end (portals), each covering half of the tunnel's length, and a firefighting unit on the French side [13, 14].

On 24 March 1999 there was a catastrophe in the tunnel. A Belgian Volvo refrigerated truck going from France to Italy caught fire and stopped approx. 7 kilometres from the French portal. The cause of the fire was a cigarette stub which got into the truck's air filter [13, 9]. The fire's location is presented in figure 2.



Rycina 2. Lokalizacja pożaru w tunelu Mont Blanc

Figure 2. Location of fire in the Mont Blanc tunnel

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [14].

Source: Own elaboration based on [14].

Ogień szybko rozwinął się ze względu na obecność i ilość łatwopalnych materiałów w ciężarówce [13]:

- 550 litrów oleju napędowego w zbiorniku paliwa ciężarówki,
- 9 ton margaryny i 12 ton mąki w chłodni,
- powłoki chłodni wykonane z palnej pianki izotermicznej.

Pożar szybko rozprzestrzenił się, temperatura dochodziła nawet do 1000°C. Zadymienie z każdą minutą wypełniało kolejne odcinki tunelu, ograniczało widoczność i uniemożliwiało obserwację zdarzenia przez kamery [9].

W tunelu po stronie francuskiej za palącą się ciężarówką zostało uwięzionych 38 osób w 25 pojazdach. W powstałym zatorze znalazło się: 14 samochodów ciężarowych, 10 samochodów osobowych (w tym 1 furgonetka) i 1 motocykl. Większość kierowców zamiast podjąć ewakuację, po powstaniu pożaru pozostała wewnątrz bądź w pobliżu swoich pojazdów. Osoby, które próbowały uciekać, pokonały odcinek 100–500 metrów,

The fire developed quickly due to the presence of flammable materials in the truck [13].

- 550 litres of diesel oil in the truck's fuel tank,
- the refrigerated products: 9 tonnes of margarine and 12 tonnes of flour,
- the refrigerated truck's lining made of flammable isothermal foam.

The fire spread quickly and the temperature reached 1000°C. With each minute smoke covered further sections of the tunnel, limiting visibility and obscuring the view from cameras [9].

On the French side of the tunnel behind the burning truck 38 people were trapped in 25 vehicles. In the created congestion there were 14 trucks, 10 passenger cars (including one van) and one motorcycle. Most drivers, instead of attempting evacuation, remained inside or near their vehicles. Those who tried to escape managed to cover the distance of 100–500 metres

INŻYNIERIA POŻAROWA

zanim straciły przytomność z powodu zadymienia oraz toksyczności gazów i dymów pożarowych. Śmierć poniosło 39 osób – 38 uwięzionych za belgijską ciężarówką oraz jeden strażak [13, 14]. Przebieg najważniejszych etapów pożaru w tunelu Mont Blanc został przedstawiony w tabeli 2.

before they lost consciousness due to fogging or toxic gases and smoke. 39 people died, including 38 individuals trapped behind the Belgian truck and one firefighter [13, 14]. The major stages of the fire in the Mont Blanc tunnel are presented in table 2.

Tabela 2. Przebieg pożaru w tunelu Mont Blanc – 24 marca 1999 roku [13, 9]

Table 2. Course of the fire in the Mont Blanc tunnel – 24 March 1999 [13, 9]

Godzina Time	Rozwój pożaru Fire development
10:46	Wjazd belgijskiej ciężarówki do tunelu. The Belgian truck entered the tunnel.
10:52	Kierowcy jadący z naprzeciwka (pomiędzy 2. a 3. kilometrem tunelu) informują kierowcę belgijskiej ciężarówki o białym dymie wydobywającym się z jego naczepy. Dym jest już na tyle gęsty, że zostaje uruchomiony czujnik dymu w zatoce awaryjnego postoju nr 18, a operator francuskiej stacji kontrolnej zauważa dym na kamerach znajdujących się w zatokach od nr 16 do nr 19. White smoke was seen coming out of the truck's trailer by oncoming drivers between kilometre 2 or 3 of the tunnel. Smoke detector in emergency stop bay 18 was activated. The operator at the French control station saw the smoke in the tunnel through the cameras at emergency stop bays 16–19.
10:53	Kierowca belgijskiej ciężarówki zatrzymuje się w zatoce awaryjnego postoju nr 21, według jego relacji wszystko stanęło w ogniu w ciągu zaledwie 30 sekund. Najbliższy czujnik wykrywający pożar po stronie włoskiej został wyłączony poprzedniej nocy. The truck slowed down and stopped at emergency stop bay 21. According to the driver, within 30 seconds everything was ablaze. The nearest sensor of the fire detection system, operated by the Italian side, was placed out of service the night before.
10:54	Użycie telefonu alarmowego z zatoki awaryjnego postoju nr 22 oraz uruchomienie ręcznego ostrzegacza pożarowego w zatoce awaryjnego postoju nr 21. A phone call at emergency stop bay 22 was made and a fire pullbox alarm from emergency stop bay 21 was launched.
10:55	Operatorzy po obu stronach kontaktują się ze sobą i tunel zostaje zamknięty. Dym rozprzestrzenił się bardzo szybko i wypełnia już 900 m tunelu. The tunnel was closed at 10:55. The smoke spread very quickly and filled 900 m of the tunnel up to bay 18 within 10 minutes after ignition.
10:59	Dymy pożarowe rozprzestrzeniają się z prędkością 1,5 do 2 m/s, zadymienie objęło już 1,2 km tunelu. The velocity of the smoke was 1.5 to 2 m/s, the smoke filled 1.2 km of the tunnel.
11:00	Strażakom po obu stronach tunelu nie udaje się opanować pożaru. Jak wykazało śledztwo, większość zginęła w czasie pierwszych 15 minut od wykrycia pożaru. Firefighters on both sides of the tunnel failed to control the fire. Investigation discovered that most of the victims died within 15 minutes of the fire first being detected.
11:15	Wóz straży pożarnej z Chamonix zatrzymał się w odległości 2,7 km od ciężarówki po stronie francuskiej, ze względu na wysoką temperaturę oraz zadymienie. The Chamonix firefighters' vehicle stopped at 2.7 km from the truck on the French side due to smoke and heat.
11:20 ~ 11:30	Strażacy z Courmayeur docierają na odległość około 300 metrów od belgijskiej ciężarówki, wtedy zaczynają eksplodować opony pojazdów, zmuszając ich do wycofania się do schronu nr 24. Drugi wóz francuskiej straży pożarnej zatrzymuje się na 4,8 kilometrze tunelu. The Courmayeur firefighters came within about 300 m from the truck, then were forced to go back to shelter 24, which was 0.9 km from the truck. The second French firefighters' vehicle stopped at 4.8 km.
11:54	Dzięki kanałom powietrznym znajdującym się pod jezdnią udaje się uratować życie kilku osób. The rescue mission was carried out using the fresh air channels located under the road, saving the lives of several people.
	Całkowite ugaszenie pożaru zajęło ponad 50 godzin. Completely extinguishing the fire took 50 hours.

W pożarze spłonęło 36 pojazdów: 2 wozy straży pożarnej, 23 samochody ciężarowe, 10 samochodów osobowych oraz 1 motocykl. Wszystkie znajdowały się pomiędzy zatokami awaryjnego postoju nr 19 i 23 – na odcinku o długości 1,2 kilometra [13].

Tunel został poważnie uszkodzony na długości 900 metrów (pęknięcia betonu), a na odcinku liczącym ponad kilometr odpadły okładziny, odsłaniając warstwy skał. Uszkodzeniu uległy również schrony będące w pobliżu pożaru oraz asfaltowa nawierzchnia drogi na odcinku ponad 1,2 kilometra, której spalanie mogło uwolnić energię porównywalną z pożarem 85 samochodów osobowych i 12 ciężarówek [13]. Widok tunelu Mont Blanc po pożarze prezentuje fotografia na rycinie 3.

36 vehicles were burnt in the fire: 2 fire trucks, 23 trucks, 10 passenger cars and 1 motorcycle. All of them were between emergency stop bays 19–23, at a distance of 1.2 kilometre [13].

900 metres of the tunnel were significantly damaged (cracks in concrete), the linings came off along an over one kilometre long section, revealing rock layers. Shelters near the fire were also damaged, together with the asphalt road surface along an over 1.2 kilometre section, the burning of which could release energy comparable with a fire of 85 passenger cars and 12 trucks [13]. The view of the Mont Blanc tunnel after the fire is presented in figure 3.



Rycina 3. Widok tunelu Mont Blanc po pożarze [15]

Figure 3. Mont Blanc tunnel after the fire [15]

Badania numeryczne ewakuacji

Dzięki rozwojowi techniki komputerowej proces ewakuacji coraz częściej prognozowany jest z wykorzystaniem obliczeń numerycznych. Symulacja działań samoratowniczych pozwala już na etapie projektowania określić możliwości ewakuacji dla różnych scenariuszy pożarowych i określonych założeń [1, 4]. Najczęściej wykorzystywanymi programami komputerowymi do tego celu są [16]: Exodus, FDS+EVAC, Legion, Pathfinder, Simulex, Steps, Vissim.

Badania numeryczne działań samoratowniczych sprowadzają się głównie do określenia wymaganego czasu ewakuacji, czyli czasu opuszczenia zagrożonego miejsca przez wszystkie osoby. W tym celu wymagane jest wyznaczenie wszystkich składowych T_{RSET} .

Czas detekcji pożaru jest czasem liczonym od chwili powstania pożaru do momentu jego wykrycia. Czas alarmu to okres przetwarzania informacji o zaistnieniu zdarzenia i wyemitowania alarmu pożarowego. Na całkowity czas ewakuacji składa się również czas rozpoznania sytuacji (t_r) i czas reakcji na alarm (t_{reak}). Ich wypadkową jest czas opóźnienia, który zależy m.in. od znajomości otoczenia przez osoby ewakuujące się i rodzaju spalania (bezpłomieniowe, płomieniowe) [1, 4, 17]. Ostatnim elementem zależności jest czas przejścia ewakuujących się osób wyznaczony przy zastosowaniu programu Pathfinder. Pathfinder to symulator ewakuacji osób umożliwiający określenie wymaganego czasu ewakuacji. Ponadto program pozwala na przewidywanie sposobu poruszania się ludzi uciekających w tłumie, tworzenie dowolnych scenariuszy ewakuacji i ich optymalizację oraz weryfikację przepustowości drzwi, schodów, korytarzy [18]. Program Pathfinder wielokrotnie przechodził testy weryfikacji i walidacji modelu, analizie podlegało również działanie poszczególnych funkcji i zachowań. Rezultaty otrzymanych symulacji pokrywały się z wynikami badań doświadczalnych ewakuacji przeprowadzanych w skali rzeczywistej [19].

W modelowaniu numerycznym czasu ewakuacji niezwykle istotne jest precyzyjne określenie parametrów początkowo-brzegowych, tak by wyniki analizowanej sytuacji były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistości. W tym celu należy określić

Numerical calculations of evacuation

Due to the development of computer science the evacuation process is increasingly often predicted with the use of numerical calculations. The simulation of self-rescue actions, already at the design stage, makes it possible to determine evacuation options for various fire scenarios and for specific assumptions [1, 4]. The software most frequently used for this purpose includes [16] Exodus, FDS+EVAC, Legion, Pathfinder, Simulex, Steps and Vissim.

Numerical calculations of self-rescue actions mainly involve the determination of the required safe escape time, i.e. the time when all the people under threat leave the danger zone. For this purpose, all components of T_{RSET} need to be determined.

The fire detection time is calculated from the onset to the detection of the fire. The alarm time is the time of processing information on the event and sounding the fire alarm. The total evacuation time also consists of the situation recognition time (t_r) and the alarm reaction time (t_{reak}). Their resultant is the response time, which depends, i.a., on evacuees' familiarity with the surroundings and the type of combustion (smouldering, flaming) [1, 4, 17]. The last component of the dependence is the movement speed of evacuees determined with the Pathfinder software. The Pathfinder is a simulator of evacuation enabling the determination of the required safe escape time. Furthermore, the software makes it possible to predict the paths taken by escaping people in a crowd, create any evacuation scenarios and optimise them, and also verify the capacity of doors, stairs and corridors [18]. The Pathfinder software was subjected to the verification and validation research for the model, and the analysis also covered the performance of particular functions and behaviour. The results of the obtained simulations were consistent with the results of real-scale experimental research of evacuation [19].

For the numerical modelling of evacuation time it is extremely crucial to precisely define the initial and boundary parameters, for the results of the analysed situation to be as close to reality as possible. For this purpose it is necessary to specify

zestaw indywidualnych cech każdej ewakuującej się osoby, do których należą: prędkość poruszania się, szerokość ramion oraz przyjęty czas opóźnienia. Zakres przyjętych wartości parametrów określonych na podstawie danych rzeczywistych [17] został przedstawiony w tabeli 3.

Tabela 3. Parametry ewakuujących się osób [4, 17]

Table 3. Parameters of evacuees [4, 17]

	Kobiety Women		Mężczyźni Men	
	minimum minimum	maksimum maximum	minimum minimum	maksimum maximum
szerokość ramion shoulder width	36,60 cm	45,00 cm	40,60 cm	49,30 cm
prędkość poruszania się movement speed	1,05 m/s	1,45 m/s	1,10 m/s	1,60 m/s
czas opóźnienia response time	0-120 s			

Przyjęty scenariusz pożarowy

Podstawą rozważanego scenariusza pożarowego była katastrofa z 1999 roku w tunelu drogowym Mont Blanc. Założenia uwzględniają powstanie pożaru w miejscu zgodnym ze stanem rzeczywistym, czyli w odległości 6550 metrów od portalu wjazdowego po stronie francuskiej (5050. metr tunelu od strony włoskiej) [14]. Wymiary tunelu zostały przedstawione w poprzedniej części artykułu. Analiza przypadku zawiera się w opisie pożaru w tunelu Mont Blanc.

Model zakłada ewakuację 38 osób, które zostały uwięzione w 25 pojazdach na odcinku 600 metrów (pomiędzy zatokami awaryjnego postoju o nr 19 i 21), za palącą się ciężarówką od strony francuskiej. Każdej z osób zostały nadane indywidualne parametry ewakuacji: prędkość poruszania się, szerokość ramion, czas opóźnienia – tabela 3. Wśród ewakuujących się przyjęto: 50% kobiet i 50% mężczyzn oraz ich przypadkowy rozkład w przestrzeni zatoru drogowego za płonącym samochodem ciężarowym. Na drodze ewakuacji „wycięto” w płaszczyźnie poruszania się obszary odpowiadające wymiarom każdego z 25 pojazdów (14 samochodów ciężarowych – 2,5 m x 12 m; 10 samochodów osobowych – 2,3 m x 5 m; 1 motocykl – 0,8 m x 2,2 m), które stanowią przeszkody dla ewakuujących się ludzi.

W badaniach numerycznych przyjęto ewakuację wszystkich użytkowników, uwzględniającą czas opóźnienia ($t_r + t_{reak}$) wynoszący od 0 do 120 sekund. Czas ten został uwzględniony w ustawieniach modelu. Dzięki temu możliwe było przeprowadzenie symulacji i określenie czasu przejścia t_p .

Śmierć osób w tunelu Mont Blanc była spowodowana szybkim wystąpieniem trujących gazów pożarowych [1]. Osoby znajdujące się za płonącą ciężarówką, ze względu na zadymienie, znalazły się w krytycznych warunkach środowiska już po kilku minutach. Dostępne materiały nie podają precyzyjnie czasu wystąpienia takich warunków, jednak dla potrzeb modelu dostępny czas ewakuacji T_{ASET} został ustalony na około 7 minut [14]. Wyznaczono go na podstawie wykresu przedstawiającego postęp zadymienia podczas pożaru w tunelu Mont Blanc (rycina 4). Wykres ten został opracowany w oparciu o dane z czujników, które zarejestrowały obniżenie poziomu widoczności, będące rezultatem gromadzących się gazów i dymów pożarowych.

the individual traits of each evacuee, i.e. speed, shoulder width and the assumed response time. The range of the assumed parameter values specified on the basis of actual data [17] is presented in table 3.

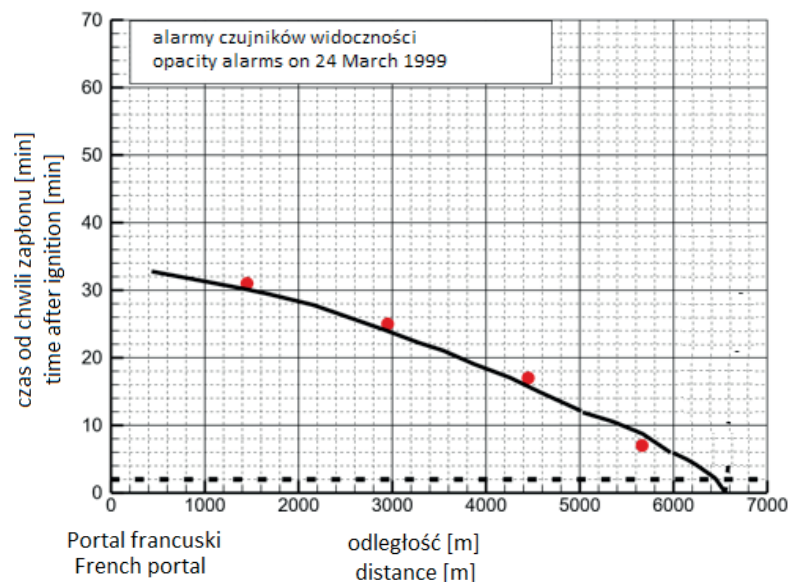
Adopted fire scenario

The basis for the considered fire scenario was the catastrophe in the Mont Blanc road tunnel in 1999. The assumptions include the development of the fire in a location identical with the actual, i.e. 6550 metres from the entrance portal on the French side (5050th metre of the tunnel on the Italian side) [14]. The tunnel’s dimensions were presented in the previous part of the article. The case report is included in the description of the fire in the Mont Blanc tunnel.

The model assumes the evacuation of 38 people trapped in 25 vehicles along 600 metres (between emergency stop bays 19 and 21), behind the burning truck from the French side. Each of the people were assigned individual evacuation parameters: movement speed, shoulder width and response time – see table 3. The assumptions for the evacuees were as follows: 50% of women and 50% of men, and their random distribution in the area of road congestion behind the burning truck. Along the evacuation route in the movement plane areas corresponding in size to each of the 25 vehicles were “cut out” (14 trucks – 2.5 m x 12 m; 10 passenger cars – 2.3 m x 5 m; 1 motorcycle – 0.8 m x 2.2 m), which were obstacles for the evacuees.

In numerical calculations the evacuation of all users was assumed, including the response time ($t_r + t_{reak}$) amounting from 0 to 120 seconds. The time was included in the model’s settings, due to which it was possible to perform the simulation and define the movement speed t_p .

The deaths of people in the Mont Blanc tunnel was caused by the rapid spreading of poisonous fire gases [1]. People behind the burning truck, due to the smoke, found themselves in critical conditions in a few minutes. The available sources do not specify the time when the critical conditions occurred, but for the purposes of the model the available safe escape time T_{ASET} was assumed at approx. 7 minutes [14] based on the figure illustrating the fogging during the fire in the Mont Blanc tunnel (figure 4). The figure was created on the basis of data from sensors, which recorded a lowered visibility resulting from the accumulation of fire gases and smoke.

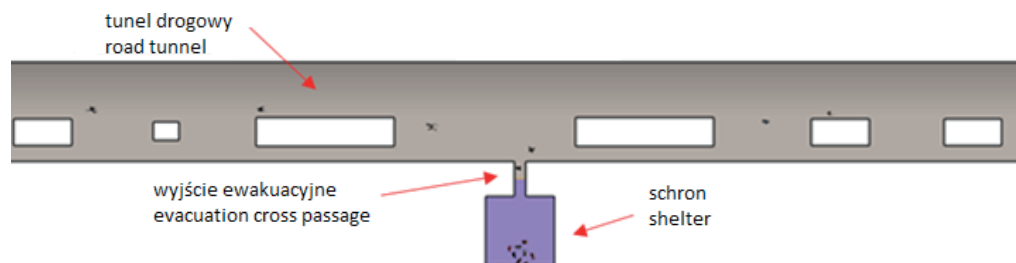


Rycina 4. Postęp zadymienia podczas pożaru w tunelu Mont Blanc [14]

Figure 4. Smoke progress during the Mont Blanc fire [14]

Pierwszy wariant symulacji opiera się na założeniu, że osoby podejmujące działania samoratownicze będą kierować się do najbliższych schronów przeciwpożarowych znajdujących się przed płonącą ciężarówką. Schrony te rozmieszczone są co 600 metrów, co odpowiada rzeczywistej sytuacji podczas pożaru z 1999 roku. Fragment modelu wykonany na potrzeby symulacji analizowanego wariantu prezentuje rycina 5.

The first variant of the simulation was based on the assumption that people undertaking self-rescue actions would move towards the nearest fire shelters before the burning truck. The shelters were placed every 600 metres, which corresponds to the actual situation during the fire in 1999. A fragment of the model performed for the purposes of the simulation of the analysed variant is presented in figure 5.



Rycina 5. Schrony rozmieszczone co 600 metrów

Figure 5. Distance between shelters – 600 m

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Drugi wariant zakłada wykorzystanie wyjść ewakuacyjnych prowadzących do równoległego tunelu ewakuacyjnego, rozmieszczonych zgodnie z wymaganiami Dyrektywy 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego i Rady, według której odległość pomiędzy wyjściami awaryjnymi nie może przekraczać 500 m [20]. Fragment modelu wykonany na potrzeby symulacji analizowanego wariantu prezentuje rycina 6.

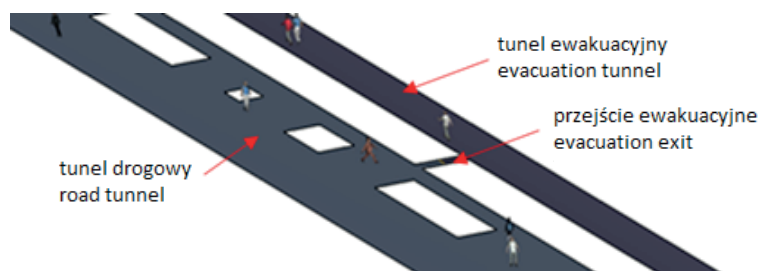
The second variant assumed the use of evacuation exits leading to a parallel evacuation tunnel placed in line with the requirements of Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council, according to which the distance between evacuation exits may not exceed 500 m [20]. A fragment of the model performed for the purposes of the simulation of the analysed variant is presented in figure 6.

Trzeci wariant symulacji nawiązuje do warunków w tunelu po jego ponownym otwarciu w 2002 roku. Schrony rozmieszczone są co 300 metrów i połączone są z korytarzem bezpieczeństwa biegnącym pod powierzchnią jezdni, równoległe do tunelu (kanał wentylacyjno-ucieczkowy) – rycina 7 [13]. Na potrzeby badań numerycznych tego wariantu model posiada wyjścia

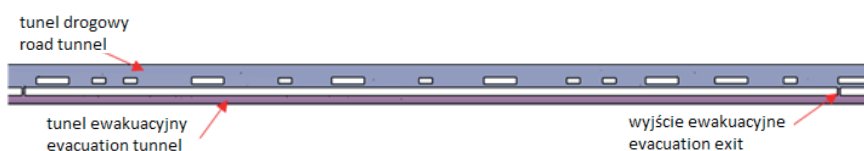
The third simulation variant refers to the conditions in the tunnel after its reopening in 2002. The shelters were placed every 300 metres and are connected with the security corridor underneath the road parallel with the tunnel (a ventilation and escape channel) – figure 7 [13]. For the purposes of numerical calculations of the variant, the model is equipped with evacuation

ewakuacyjne prowadzące do równoległego tunelu ewakuacyjnego, rozmieszczone co 300 metrów. Jego fragment prezentują ryciny 7 i 8.

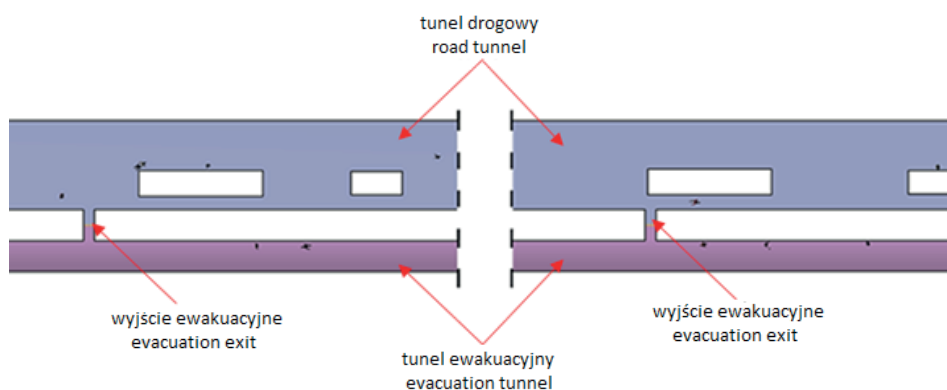
exits leading to a parallel evacuation tunnel located every 300 metres. A fragment of the corridor is presented in figures 7 and 8.



Rycina 6. Wyjścia ewakuacyjne co 500 metrów
Figure 6. Distance between evacuation exits every 500 m
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Rycina 7. Wyjścia ewakuacyjne co 300 metrów
Figure 7. Evacuation exits every 300 m
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.



Rycina 8. Wyjścia ewakuacyjne co 300 metrów
Figure 8. Evacuation exits every 300 m
Źródło: Opracowanie własne.
Source: Own elaboration.

Wyniki modelowania numerycznego

Dodając do otrzymanych wyników czas detekcji i alarmu ($t_{det} + t_a$), których łączną wartość przyjęto na poziomie 120 sekund [12], otrzymano wymagany czas ewakuacji T_{REST} . Osiągnięcie bezpiecznej ewakuacji jest możliwe przy spełnieniu tzw. kryterium bezpiecznej ewakuacji (1). Rezultaty obliczeń zostały zestawione w tabelach 4 i 5.

Numerical modelling results

By adding the detection and alarm time, the total value of which was assumed at 120 seconds [12], to the obtained results ($t_{det} + t_a$), the required safe escape time was obtained T_{REST} . Safe evacuation is possible after meeting the so-called safe evacuation criterion (1). The calculation results are compiled in tables 4 and 5.

Tabela 4. Wyniki obliczeń numerycznych czasu przejścia

Table 4. Numerical results of the movement speed

Czas przejścia ($t_r + t_{reak} + t_p$) Movement speed		
Wariant Variant		
I	II	III
schrony co 600 m shelters every 600 m	wyjścia ewakuacyjne co 500 m evacuation exits every 500 m	schrony (wyjścia ewakuacyjne) co 300 m shelters (evacuation exits) every 300 m
408,8 s	477,4 s	220,9 s

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

Tabela 5. Wyniki obliczeń numerycznych wymaganego czasu ewakuacji

Table 5. Numerical results of the required safe escape time

Wariant Variant	Wymagany czas ewakuacji T_{RSET} Required safe escape time	Dostępny czas ewakuacji T_{ASET} Available safe escape time	Margines bezpieczeństwa Safety margin	Kryterium bezpiecznej ewakuacji Safe evacuation criteria
I	528,8 s		-	Niespełnione Unfulfilled
II	597,4 s	420,0 s	-	Niespełnione Unfulfilled
III	340,9 s		79,1 s	Spełnione Fulfilled

Źródło: Opracowanie własne.

Source: Own elaboration.

W oparciu o otrzymane wyniki badań numerycznych można stwierdzić, że przy założonym scenariuszu pożarowym jedynie w przypadku wariantu trzeciego (schrony rozmieszczone co 300 metrów) każdy z użytkowników tunelu drogowego ma szansę na bezpieczną ewakuację. Uwagę zwraca fakt, że czasy przejścia do bezpiecznego miejsca dla wariantu drugiego (wyjścia ewakuacyjne co 500 m) są większe od tych dla schronów rozmieszczonych co 600 metrów (warunki w tunelu w czasie pożaru w 1999 roku). Zaistniała sytuacja wynika przede wszystkim z lokalizacji pożaru w sąsiedztwie drzwi ewakuacyjnych, co dla części użytkowników oznaczało pokonanie 500 metrów tunelu celem przejścia do kolejnych drzwi ewakuacyjnych.

Podsumowanie

Po pożarze w 1999 roku tunel Mont Blanc zamknięto na trzy lata. Ustalenia powypadkowe wymagały wprowadzenia zmian w kwestii bezpieczeństwa w tunelu i obejmowały [13, 9]:

- nowe centrum dowodzenia posiadające całodobową załogę strażacką i pełniące nadrzędny nadzór i monitoring na całym obszarze tunelu,
- trzy stacje pomocy medycznej rozmieszczone przy portalach tunelu oraz w środku,
- czujniki ciepła po obu stronach tunelu pozwalające wykrywać przegrzane elementy ciężarówek przed ich wjazdem do tunelu,

On the basis of the obtained results of numerical calculations, it is possible to state that with the assumed fire scenario only in the case of the third variant (shelters located every 300 metres) each of the road tunnel users has a chance for safe evacuation. It should be pointed out that movement speeds to a safe place for the second variant (evacuation exits every 500 m) are higher than the ones obtained for shelters placed every 600 metres (conditions in the tunnel during the 1999 fire). The situation stems mainly from the location of the fire near the exit door, which for some users meant the necessity to walk 500 metres to the next door.

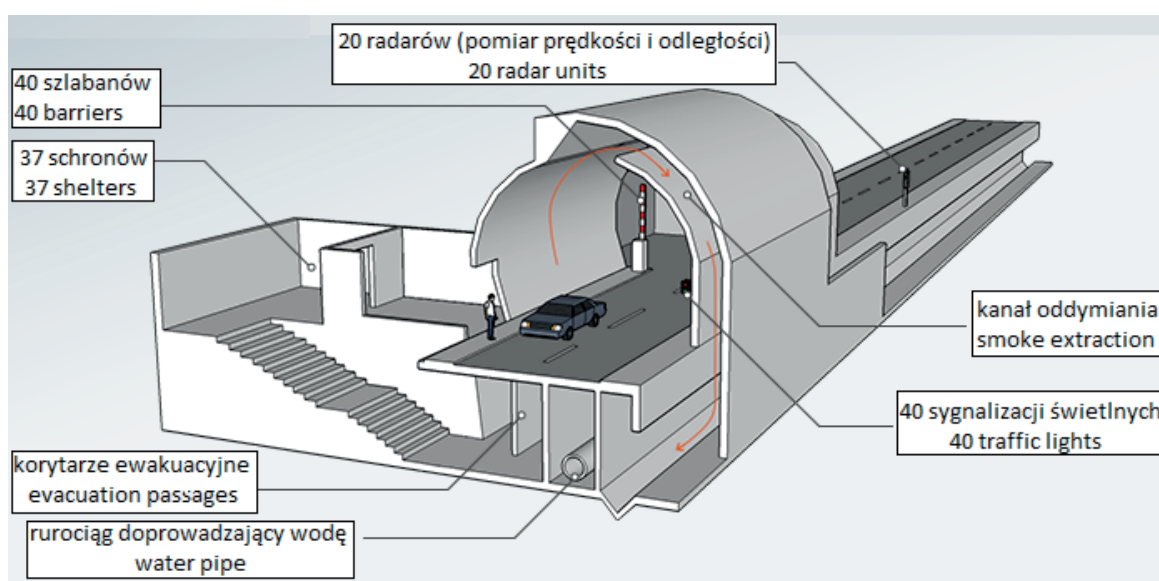
Summary

After the 1999 fire the Mont Blanc tunnel was closed for three years. The post-accident findings required changes in the tunnel safety, which included [13, 9]:

- a new command centre with 24-hour firefighting crew's presence overseeing and monitoring the entire tunnel area,
- three medical aid stations located at the tunnel portals and inside,
- heat sensors on both sides of the tunnel enabling the detection of overheated elements of trucks before they enter the tunnel,

INŻYNIERIA POŻAROWA

- schrony rozmieszczone co 300 m o powierzchni 37,5 m², wyposażone w urządzenia wideołączności, drzwi przeciwpożarowe i połączone z korytarzem bezpieczeństwa biegnącym równoległe do tunelu pod powierzchnią jezdni (kanał wentylacyjno-ucieczkowy), mieszczące jednocześnie 50 osób (przekrój poprzeczny przez tunel, schron oraz kanały wentylacyjno-ucieczkowe przedstawia rysunek 9),
 - nowe sygnalizatory świetlne i migające znaki ostrzegawcze: czerwone lampy nakazujące zatrzymanie pojazdu w razie awarii w tunelu (rozmieszczone co 300 m) oraz oznaczenia świetlne pozwalające na kierowanie ruchem i zawierające informacje o zmianie dopuszczalnej prędkości, wypadku w tunelu (rozmieszczone co 600 m).
- shelters placed every 300 m, with an area of 37.5 m², equipped with video communications devices and a fire door, and connected with the security corridor underneath the road parallel with the tunnel (a ventilation and escape channel). The shelters can contain up to 50 people at the same time. The cross-sections of the tunnel, shelter and ventilation and escape channels are presented in figure 9,
 - new traffic lights and flashing warning signs: red lights requiring the vehicles to stop in the event of a failure in the tunnel (placed every 300 m) and lighting for traffic management and displaying the speed limit or information about an accident in the tunnel (placed every 600 m).



Rycina 9. Przekrój poprzeczny przez tunel, schron oraz kanały wentylacyjno-ucieczkowe [21]

Figure 9. Tunnel cross section, shelter and ventilation duct [21]

W oparciu o badania numeryczne działań samoratowniczych przeprowadzone dla analizowanego scenariusza pożarowego można stwierdzić, że wprowadzone po pożarze zmiany w kwestii bezpieczeństwa w tunelu mogłyby pozwolić na przeprowadzenie ewakuacji osób w razie pożaru podobnego do tego z 1999 roku. Schrony rozmieszczone co 300 metrów i połączone z korytarzem bezpieczeństwa dadzą ludziom możliwość sprawnego opuszczenia tunelu pod warunkiem, że „porzucą” oni swoje pojazdy zaraz po powstaniu pożaru i udadzą się do schronów. Następnie poprzez korytarz ewakuacyjny pod powierzchnią jezdni wydostaną się z tunelu. W 1999 roku pożar trwał 53 godziny, a schrony rozmieszczone co 600 metrów zapewniały ochronę jedynie przez 2 godziny [13]. Ich konstrukcja i wyposażenie nie były dostosowane do tego, że krytyczne warunki utrzymywały się przez tak długi czas. W takiej sytuacji nawet osoby podejmujące natychmiastowe działania samoratownicze nie były bezpieczne.

Wyniki symulacji z rozmieszczeniem drzwi ewakuacyjnych co 500 metrów, czyli maksymalną dopuszczalną odległością wynikającą z Dyrektywy 2004/54/WE Parlamentu Europejskiego

Based on the numerical calculations of self-rescue actions for the analysed fire scenario it can be concluded that security-related changes introduced after the fire could enable the evacuation of people in the case of a fire similar to that of 1999. Shelters placed every 300 metres and connected with the security corridor will enable people to quickly leave the tunnel, provided that they abandon their vehicles immediately after the fire and go to the shelters. After that they will get out of the tunnel using the evacuation tunnel underneath the road. In 1999 the fire lasted 53 hours, and shelters located every 600 metres provided protection for only 2 hours [13]. Their structure and equipment were not adjusted to situation in which critical conditions continued for longer periods. In such a situation even people immediately undertaking self-rescue actions were not safe.

The results of the simulation with exit doors every 500 metres, i.e. the maximum distance allowed in Directive 2004/54/EC of the European Parliament and of the Council, showed that it is not possible to ensure safety in the considered fire scenario [20]. It should be mentioned that Polish regulations also enable

i Rady, wskazały na brak możliwości zapewnienia bezpieczeństwa w przypadku rozważanego scenariusza pożarowego [20]. Należy tutaj wspomnieć, że polskie przepisy są analogiczne i pozwalają na usytuowanie wyjść ewakuacyjnych w odległości nieprzekraczającej 500 metrów [22].

Dopuszczalna odległość pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi powinna być określana już na etapie projektowym z uwzględnieniem najbardziej krytycznego scenariusza, indywidualnie dla każdego przypadku [5]. Czas wycofania się osób z zagrożonego pożarem tunelu w dużym stopniu uzależniony jest od czasu przejścia drogi ewakuacyjnej. Dlatego odległość pomiędzy wyjściami ewakuacyjnymi powinna być tak dobrana, by każdy z użytkowników miał możliwość przemieszczenia się w bezpieczne miejsce.

Artykuł został zrealizowany w ramach grantu nr 15.11.100.078.

Literatura / Literature

- [1] Nawrat S., Schmidt-Polończyk N., Napieraj S., *Modelowanie komputerowe dla oceny zagrożenia pożarowego i bezpieczeństwa w tunelach komunikacyjnych*, „Budownictwo Górnicze i Tunelowe” 2012, 2, 45–54.
- [2] Fera M., Macchiaroli R., *Use of analytic hierarchy process and fire dynamics simulator to assess the fire protection systems in a tunnel on fire*, „International Journal of Risk Assessment and Management” 2010, 14(6), 504–529.
- [3] Høj N.P., *Discussion of the hazards for tunnels in operation – presented in context of risk analysis and in design for safety*, Warsaw 2006.
- [4] 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, 253–263.
- [5] Schmidt-Polończyk N., *Analiza wpływu gęstości rozmieszczenia wyjść ewakuacyjnych na bezpieczeństwo ludzi podczas pożaru w tunelach drogowych z systemem wentylacji wzdłużnej*, BiTP Vol. 44 Issue 4, 2016, pp. 165–175.
- [6] Schmidt-Polończyk N., *Computer modeling of a fire hazard and evacuation of transportation tunnels with longitudinal ventilation system*, „AGH Journal of Mining and Geoengineering”, 2013, 37(1), 93–104.
- [7] Maciejasz Z., Kruk F., *Požary podziemne w kopalniach, część 1*, Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice 1977.
- [8] Fire Accidents in the World’s Road Tunnels [dok. elektr.], http://www.lotsberg.net/artiklar/brann/en_tab.htm, [dostęp: 5.03.2017].
- [9] Nawrat S., Napieraj S., *Wentylacja i bezpieczeństwo w tunelach komunikacyjnych*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2005.
- [10] 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).
- [11] *Działanie instalacji przeciwpożarowej wynikającej z założeń scenariusza pożarowego*, [w:] *Podręcznik projektanta systemów sygnalizacji pożaru, Część I i II*, Izba Rzeczoznawców SITP, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 2010.
- [12] Porowski R., Wnęk W., Kubica P., *Rola i znaczenie scenariuszy rozwoju zdarzeń w ochronie przeciwpożarowej*, Szkoła Główna Służby Pożarniczej, 2015 [dok. elektr.] www.psp.wlkp.pl/files/file/bonder/pub/2015/budma/Porowski.pdf, [dostęp: 5.03.2017].
- [13] *Case Studies: Historical Fires: Mont Blanc Tunnel Fire, Italy/France* [dok. elektr.], <http://www.mace.manchester.ac.uk/project/research/structures/strucfire/CaseStudy/HistoricFires/InfrastructuralFires/mont.htm>, [dostęp: 5.03.2017].
- [14] Voeltzel A., Dix A., *A comparative analysis of the Mont Blanc, Tauern and St. Gotthard tunnel fires* [dok. elektr.], <http://tunnels.piarc.org/sites/tunnels/files/public/wysiwyg/import/Chapters%20PIARC%20reports/2006%2005.16.B%20Chap%203.pdf>, [dostęp: 5.03.2017].
- [15] *The Mont Blanc Tunnel Fire* [dok. elektr.], <http://devastatingdisasters.com/the-mont-blanc-tunnel-fire-1954/>, [dostęp: 5.03.2017].
- [16] Ronchi E., Kinsey M., *Evacuation models of the future: insights from an online survey of user’s experiences and needs*, [in:] *Proceedings of the Advanced Research Workshop: “Evacuation and Human Behaviour in Emergency Situations*, Capote J., Alvear D. (eds.), Universidad de Cantabria, Spain 2011.
- [17] Smith J., *Agent-Based Simulation of Human Movements During Emergency Evacuations of Facilities*, American Society of Civil Engineers, Canada: American Society of Civil Engineers, 2008, 1–10.
- [18] Thunderhead Engineering, STIGO: O programie Pathfinder [dok. elektr.], <http://www.pyrosim.pl/o-programie-pathfinder/>, [dostęp: 5.03.2017].
- [19] Thunderhead Engineering: Pathfinder 2014.2 Verification and Validation, 2014.
- [20] 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 (Dz.U. L 167, 30.4.2004, s. 39–91).
- [21] The security features of the Mont Blanc Tunnel [dok. elektr.] <http://www.dw.com/en/the-security-features-of-the-mont-blanc-tunnel/a-18591388>, [dostęp: 5.03.2017].
- [22] 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.).

MGR INŻ. ŁUKASZ NOWAK – absolwent kierunku Górnictwa i Geologii, w specjalności wentylacja kopalń na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii, Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie oraz starszy inspektor w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy. Obszarem zainteresowania autora jest wentylacja, klimatyzacja, bezpieczeństwo pracy oraz zagrożenia aerologiczne w podziemnych zakładach górniczych.

DR INŻ. NATALIA SCHMIDT-POŁOŃCZYK – adiunkt na Wydziale Górnictwa i Geoinżynierii Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie oraz starszy inspektor w zakresie bezpieczeństwa i higieny pracy. W 2016 roku obroniła rozprawę doktorską pt. *Ocena możliwości stosowania systemu wentylacji wzdłużnej w długich tunelach drogowych*. Obszarem zainteresowań autorki są zagadnienia bezpieczeństwa w tunelach drogowych, w tym wentylacji i ewakuacji w warunkach pożaru oraz bezpieczeństwo pracy.

ŁUKASZ NOWAK, M.SC.ENG. – graduate in Mining and Geology specialising in mine ventilation at the Faculty of Mining and Geoengineering, the AGH University of Science and Technology in Kraków and senior inspector for occupational health and safety. His interests include ventilation, air conditioning, occupational safety and aerological hazards in underground mines.

NATALIA SCHMIDT-POŁOŃCZYK, PH.D. ENG. – assistant at the Faculty of Mining and Geoengineering, the AGH University of Science and Technology in Kraków and senior inspector for occupational health and safety. 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 areas of interest include safety in road tunnels, covering ventilation and evacuation in fire conditions, and occupational safety.