

STANISŁAW NAWRAT
SEBASTIAN NAPIERAJ

WENTYLACJA I BEZPIECZEŃSTWO W TUNELACH KOMUNIKACYJNYCH



UCZELNIANE WYDAWNICTWA NAUKOWO-DYDAKTYCZNE

KRAKÓW 2005

**STANISŁAW NAWRAT
SEBASTIAN NAPIERAJ**

**WENTYLACJA
I BEZPIECZEŃSTWO
W TUNELACH
KOMUNIKACYJNYCH**



UCZELNIANE WYDAWNICTWA NAUKOWO-DYDAKTYCZNE

KRAKÓW 2005

KU 0171 pozycja wydawnictw naukowych
Akademii Górniczo-Hutniczej im. S. Staszica w Krakowie

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2005
ISBN 83-7464-026-X

Redaktor Naczelny Uczelnianych Wydawnictw
Naukowo-Dydaktycznych: *Jan Sas*

Z-ca Redaktora Naczelnego: *Beata Barszczewska-Wojda*

Komitet Naukowy UWND AGH:
Janusz Kowal (przewodniczący),
Tadeusz Banaszewski,
Bogdan Choczewski,
Zdzisław Cięciwa,
Edward Fraś,
Ryszard Uberman

Recenzent: *prof. dr hab. inż. Andrzej Strumiński*

Redakcja: *Małgorzata Tabor*

Redakcja techniczna, projekt okładki i strony tytułowej: *Beata Barszczewska-Wojda*

Skład komputerowy: **LIBRA**, tel. 0600053872

Redakcja Uczelnianych Wydawnictw Naukowo-Dydaktycznych AGH
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
tel. 617-32-28, tel./fax 636-40-38
e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl
<http://www.WydawnictwoAGH.pl>

Spis treści

| | |
|--|----|
| Wstęp | 7 |
| 1. Budownictwo tunelowe | 9 |
| 1.1. Tunele kolejowe..... | 11 |
| 1.2. Tunele drogowe | 12 |
| 1.3. Tunele komunikacyjne w Polsce | 13 |
| 1.4. Koncepcje budowy tuneli..... | 14 |
| 1.4.1. Tunel pod Cieśniną Beringa | 15 |
| 1.4.2. Tunel pod Cieśniną Gibraltarską | 16 |
| 1.4.3. Rozwój sieci tuneli w Europie | 16 |
| 1.4.3.1. Budowa tunelu kolejowego Alp Transit Gotthard | 16 |
| 1.4.3.2. Szybka kolej w Szwajcarii..... | 18 |
| 1.4.3.3. Projekt tunelu w Warszawie | 18 |
| 1.4.3.4. Projekt tunelu w Krakowie | 19 |
| 2. Wentylacja tuneli | 20 |
| 2.1. Wybrane przepisy prawne dotyczące budowl tunelowych | 20 |
| 2.1.1. Etap drążenia tunelu | 21 |
| 2.1.2. Etap użytkowania tunelu | 23 |
| 2.2. Wentylacja tuneli podczas drążenia | 29 |
| 2.2.1. Systemy wentylacji tuneli podczas drążenia | 30 |
| 2.2.2. Projektowanie wentylacji tuneli podczas drążenia | 32 |
| 2.3. Systemy wentylacji tuneli | 33 |
| 2.3.1. Systemy wentylacji wzdłużnej | 35 |
| 2.3.1.1. Wentylacja naturalna wzdłużna | 35 |
| 2.3.1.2. Wentylacja naturalna wzdłużna z szybem | 36 |
| 2.3.1.3. Wentylacja naturalna wzdłużna z wentylatorami | 37 |
| 2.3.1.4. Wentylacja naturalna wzdłużna z szybem wspomaganą depresją mechaniczną | 37 |
| 2.3.1.5. System Saccardo Nozzle | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.2. Wentylacja mechaniczna poprzeczna | 38 |
| 2.3.2.1. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przyspagowa | 38 |
| 2.3.2.2. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przystopowa | 39 |
| 2.3.2.3. Wentylacja mechaniczna poprzeczna pełna | 40 |
| 2.3.3. Mieszane systemy wentylacji | 41 |
| 2.3.4. Specjalne systemy wentylacji | 41 |
| 3. Projektowanie wentylacji tuneli komunikacyjnych | 43 |
| 3.1. Ruch pojazdów w tunelach drogowych | 44 |
| 3.2. Metody wyznaczania wydatku powietrza w tunelu | 45 |
| 3.2.1. Metoda M. Pulsforta | 46 |
| 3.2.2. Metoda A.G. Bendeliusa | 50 |
| 3.3. Przykłady obliczeń | 54 |
| 3.3.1. Obliczanie minimalnego wydatku powietrza w tunelu metodą M. Pulsforta | 55 |
| 3.3.2. Obliczanie minimalnego wydatku powietrza w tunelu metodą A.G. Bendeliusa | 57 |
| 3.4. Metody wyznaczania depresji naturalnej | 59 |
| 3.5. Wentylacja mechaniczna | 59 |
| 3.6. Klimatyzacja tuneli komunikacyjnych | 60 |
| 4. Systemy bezpieczeństwa w tunelach | 62 |
| 4.1. Monitoring w tunelach komunikacyjnych | 64 |
| 4.1.1. Monitoring widoczności w tunelu | 64 |
| 4.1.2. Monitorowanie koncentracji tlenu węgla w tunelu | 64 |
| 4.2. Kierunki poprawy bezpieczeństwa w tunelach | 65 |
| 4.3. Badania stanu bezpieczeństwa w tunelach | 65 |
| 5. Zagrożenie pożarowe w tunelach | 71 |
| 5.1. Pożar w tunelu drogowym Mont Blanc | 74 |
| 5.2. Pożar w tunelu drogowym Gotthard | 76 |
| 5.3. Pożar w tunelu drogowym Gleinalmtunnel | 77 |
| 5.4. Pożar w Eurotunelu | 77 |
| 5.5. Eksperymentalne i modelowe badania przebiegu pożaru w tunelach | 78 |
| 5.5.1. Badania laboratoryjne | 79 |
| 5.5.2. Modele numeryczne | 79 |
| 6. Eurotunnel | 84 |
| 6.1. Wprowadzenie | 84 |
| 6.2. Komunikacja i wentylacja | 87 |
| 6.3. Zasady bezpieczeństwa | 88 |

| | |
|--|-----|
| 7. Tunel Mont Blanc | 93 |
| 7.1. Charakterystyka | 93 |
| 7.2. Wentylacja | 94 |
| 8. Tunel Laerdal | 101 |
| 8.1. Wentylacja i oczyszczanie powietrza | 102 |
| 8.2. Środki bezpieczeństwa..... | 103 |
| 8.3. Dodatkowe wyposażenie | 103 |
| 9. Zakończenie | 105 |
| Literatura | 106 |

BG AGH

Wstęp

W ostatnich latach znacznie wzrosło zapotrzebowanie na usługi transportowe krajowe i międzynarodowe, co wpłynęło w sposób bezpośredni na rozwój komunikacji zwłaszcza drogowej i kolejowej na świecie. Rozwój szybkiego i sprawnego transportu wymagał zmiany infrastruktury technicznej między innymi poprzez wybudowanie i modernizację szlaków komunikacyjnych, w tym tuneli, wprowadzenie nowoczesnego taboru samochodowego i kolejowego, a także zastosowanie logistycznych systemów zarządzania komunikacją.

Bezpośredni wpływ na rozwój komunikacji w tunelach mają także z jednej strony potrzeby skrócenia długości dróg transportu, ograniczenia ruchu samochodowego w miastach, bezpiecznego i łatwego przekraczanie pasm górskich, rzek i cieśnin, a z drugiej strony potrzeby ochrony krajobrazu i środowiska, m.in. przez ograniczenie hałasu i emisji zanieczyszczeń.

Tunele są jednymi z najważniejszych elementów układów komunikacyjnych, dlatego są przedmiotem wielu badań teoretycznych, projektów eksperymentalnych oraz projektów technicznych, a także specjalnego nadzoru. Obecnie nie projektuje się tuneli o małych przekrojach i długościach. W związku z dynamicznym rozwojem komunikacji oraz możliwościami technicznymi zostały zbudowane nowoczesne tunele komunikacyjne jak np.: tunel kolejowy Eurotunnel pod kanałem La Manche łączący Francję z Wielką Brytanią i tunel samochodowy Lærdal w Norwegii. Prowadzone są także prace zmierzające do realizacji wielu projektów komunikacyjnych jak np. projekt budowy kompleksu tunelów Swissmetro z superszybką koleją w Szwajcarii. Niektórzy uważają, że istnieją szanse dalszego rozwoju tego projektu polegające na budowie Eurometra.

W tunelach są stosowane różne systemy wentylacji i klimatyzacji, a także oczyszczania powietrza z zanieczyszczeń stałych i gazowych. Wpływają one znacznie na koszty budowy i eksploatacji tuneli.

Różnorodne są także zabezpieczenia przeciwpożarowe i ewakuacyjne. Można tu wymienić np. kamery i czujniki monitorujące wnętrze tuneli przez całą dobę. Systemy automatyczne mogą kontrolować różne parametry decydujące o bezpieczeństwie ruchu w tunelach jak np. przepływy powietrza, zawartości szkodliwych substancji w powietrzu i ilość pojazdów w tunelach.

Pomimo wyposażenia tuneli w nowoczesne systemy bezpieczeństwa pożary, wypadki i katastrofy w tunelach są częstym zjawiskiem, np. w 1999 r. pożar w tunelu samochodowym Mont Blanc spowodował śmierć 39 osób.

Główne przyczyny katastrof w tunelach komunikacyjnych to: nieprzystosowanie ich do znacznego wzrostu intensywności ruchu, nieostrożność kierowców, a także awaryjność taboru komunikacyjnego i zawodność systemów bezpieczeństwa. W związku z tym problemy techniczne w zakresie prawidłowego przewietrzania, zabezpieczenia i ewakuacji są nadal aktualne i wymagają dalszego rozwoju.

W Polsce istnieje niewiele tuneli komunikacyjnych, z których największym przedsięwzięciem jest metro w Warszawie. Obserwując trendy światowe, można przewidywać, że utrzymany będzie dynamiczny rozwój budownictwa tunelowego w przyszłości, co zintensyfikuje inwestycje tunelowe także w Polsce, posiadającej duży potencjał górniczy.

Przy budowie i użytkowaniu obiektów tunelowych korzystamy z doświadczeń górnictwa jako pokrewnej dziedziny inżynierskiej. Wiele kwestii związanych z budownictwem tunelowym opiera się całkowicie na wiedzy górniczej.

Publikacja ma na celu przedstawienie podstawowych zagadnień i problemów związanych z wentylacją i bezpieczeństwem w tunelach komunikacyjnych.

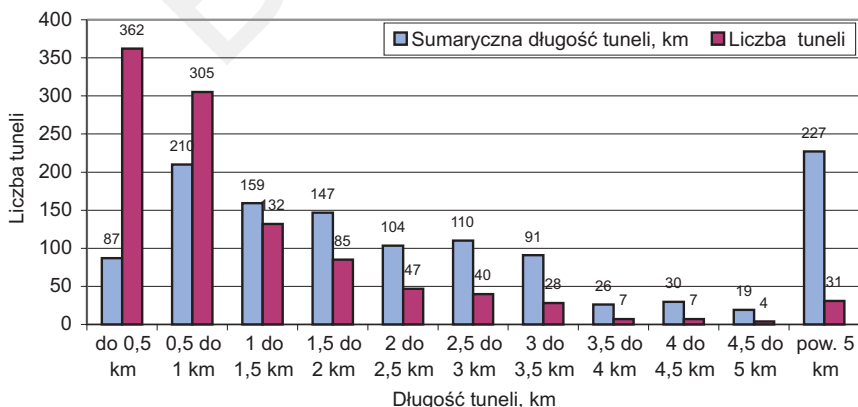
1. Budownictwo tunelowe

W polskim prawie tunel to „budowla przeznaczona do przeprowadzenia drogi, samodzielnego ciągu pieszego lub pieszo-rowerowego, szlaku wędrówek zwierząt dziko żyjących lub innego rodzaju komunikacji gospodarczej przez lub pod przeszkodą terenową, a w szczególności: tunel, przejście podziemne” [31].

Według kryterium funkcjonalności, tunele można podzielić na:

- komunikacyjne:
 - drogowe,
 - kolejowe,
 - metra,
- specjalne:
 - akwedukty,
 - kanalizacyjne,
 - ewakuacyjne,
 - schrony wojskowe itp.

Z rysunku 1.1 wynika, że przeważają tunele o długości od 500 do 1000 m, które w istotny sposób ułatwiają komunikację, natomiast mniej jest tuneli bardzo długich, których budowa wymaga dużych nakładów inwestycyjnych, a rentowność ich jest zazwyczaj niska.

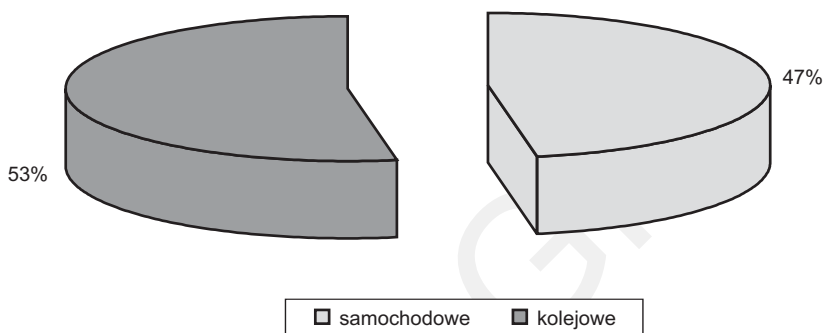


Rys. 1.1. Liczba tuneli i ich długości [15]

Rozwój budownictwa podziemnego – tunelowego nastąpił głównie w krajach, w których warunki naturalne, powierzchnia obszarów możliwych do zagospodarowania, warunki klimatyczne i urbanizacja kraju, wymusiły stosowanie tego typu rozwiązań. Niewątpliwie od kilku lat grupa krajów, do której należą Austria, Norwegia, Szwajcaria, Japonia, Niemcy, Francja oraz Włochy wykazuje nadzwyczajną aktywność w tej dziedzinie.

Szacuje się, że całkowita długość czynnych tuneli komunikacyjnych w Europie [10] wynosi ponad 15 000 km.

Liczba tuneli samochodowych i kolejowych jest zbliżona (rys. 1.2), przy czym w ostatnich latach nastąpił dynamiczny wzrost liczby tuneli samochodowych.



Rys. 1.2. Tunele kolejowe i samochodowe o długości powyżej 2000 m [18]

Tunele budowano już w starożytności, m.in. około 700 lat p.n.e. wydrążono tunel akweduktowy w Judei pod Jerozolimą doprowadzający do miasta wodę, a 500 lat p.n.e. zbudowano w pobliżu Aten tunel o długości 1280 m [7]. W 76 r. został zbudowany tunel drogowy Galeria del Furlo we Włoszech o długości 38 m.

Dynamiczny rozwój budownictwa tunelowego nastąpił dopiero w XIX i XX wieku dzięki nowym technologiom górniczym (zastosowano kombajny tarczowe), a został on wymuszony potrzebami technicznymi kolejnictwa (tab. 1.1).

W 1826 r. zbudowano pierwszy tunel kolejowy Wapping w Wielkiej Brytanii o długości 2030 m.

W Polsce do ważniejszych tuneli należy tunel kolejowy na Śląsku na linii Wałbrzych Główny – Jedlina Górna o długości 1601 m, zbudowany jeszcze w XIX wieku, oraz tunel drogowy Zagłębienie Wisłostrady w Warszawie o długości ok. 800 m, zbudowany w ostatnich latach.

Cywilizacyjne oraz gospodarcze wymagania w zakresie budowy i eksploatacji tuneli doprowadziły do wyodrębnienia się oraz rozwoju nowej dziedziny górnictwa powiązanej ściśle z budownictwem, obejmującej projektowanie, budowę i bezpieczną eksploatację podziemnych tuneli.

Tabela 1.1
Najdłuższe tunele w Europie zbudowane w latach 1750–1900 [10]

| Nazwa tunelu | Kraj | Rok rozpoczęcia budowy | Długość [m] |
|-----------------|-----------------|------------------------|-------------|
| Noirieu | Francja | 1822 | 12000 |
| Rigueval | Francja | 1803 | 5675 |
| Mauvage | Francja | 1840 | 4800 |
| Blaisy | Francja | 1846 | 4095 |
| Sapperton | Wielka Brytania | 1783 | 3830 |
| Thames & Medwey | Wielka Brytania | 1822 | 3620 |
| Soussey | Francja | 1826 | 3521 |
| Pouilly | Francja | 1842 | 3330 |
| Blisworth | Wielka Brytania | 1798 | 2820 |
| Rollebois | Francja | 1841 | 2642 |
| Harecastle II | Wielka Brytania | 1825 | 2630 |
| Harecastle I | Wielka Brytania | 1770 | 2600 |
| Hauenstein | Szwajcaria | 1853 | 2496 |
| Arschweiller I | Francja | 1839 | 2250 |
| Kilsby | Wielka Brytania | 1834 | 2204 |
| Wapping | Wielka Brytania | 1826 | 2030 |
| Roule | Francja | 1841 | 1720 |
| Terre Norie | Francja | 1826 | 1500 |
| Semmering | Austria | 1849 | 1430 |
| Lioran | Francja | 1839 | 1386 |

1.1. Tunele kolejowe

Tunele kolejowe w dalszym ciągu odgrywają bardzo ważną rolę komunikacyjną. Ich charakterystykę przedstawia tabela 1.2.

Tabela 1.2

Najdłuższe tunele kolejowe na świecie (projektowane, budowane, eksploatowane) [15]

| Państwo | Nazwa tunelu | Długość [m] | Rok otwarcia |
|---------------------------|----------------------|-------------|--------------|
| Szwajcaria | Alp Transit Gotthard | 57 072 m | 2014 |
| Austria – Włochy | Basis Brenner | 55 000 m | PRJ |
| Japonia | Sei-kan | 53 850 m | 1988 |
| Francja – Włochy | Basis Mont d'Ambin | 52 110 m | 2015 |
| Wielka Brytania – Francja | Chunnel (Eurotunnel) | 50 450 m | 1994 |
| Szwajcaria | Lötschberg | 34 600 m | 2007 |
| Austria | Koraln | 32 800 m | 2010 |
| Hiszpania | Guadarrama | 28 377 m | PRJ |
| Japonia | Hakkouda | 26 455 m | BD |
| Japonia | Iwate | 25 810 m | BD |
| Japonia | Iiyama | 22 221 m | BD |
| Japonia | Daishimizu | 22 221 m | 1982 |
| Włochy – Szwajcaria | Simplon – II | 19 824 m | 1922 |
| Włochy – Szwajcaria | Simplon – I | 19 803 m | 1906 |
| Szwajcaria | Zimmerberg-Base | 19 700 m | 2013 |
| Austria | Semmering basis | 19 200 m | BD |
| Szwajcaria | Vereina | 19 058 m | 1999 |
| Japonia | Shinkanmon | 18 713 m | 1975 |
| Włochy | Vaglia | 18 561 m | 2006 |
| Włochy | Appennino | 18 507 m | 1934 |

Oznaczenia:

PRJ – projektowany

BD – brak danych

1.2. Tunele drogowe

Wraz z rozwojem technologicznym, oraz zmianą formy transportu z szynowego na drogowy, coraz większą rolę pełnią tunele przystosowane do ruchu samochodowego. Najdłuższe tunele samochodowe na świecie przedstawia tabela 1.3.

Tabela 1.3
Najdłuższe tunele drogowe na świecie (budowane, eksploatowane) [15]

| Lp. | Kraj | Tunel | Długość [m] | Rok otwarcia |
|-----|------------------|---------------------|-------------|--------------|
| 1 | Norwegia | Laerdal | 24 510 | 2000 |
| 2 | Chiny | Zhongnanshan | 18 040 | 2009 |
| 3 | Szwajcaria | Gotthard | 16 918 | 1980 |
| 4 | Austria | Arlberg | 13 972 | 1978 |
| 5 | Chiny (Tajwan) | Hsuehshan | 12 900 | 2005 |
| 6 | Francja – Włochy | Fréjus | 12 895 | 1980 |
| 7 | Francja – Włochy | Mont Blanc | 11 611 | 1965 |
| 8 | Norwegia | Gudvanga | 11 428 | 1991 |
| 9 | Norwegia | Folgefonn | 11 150 | 2001 |
| 10 | Japonia | Kan-etsu | 11 055 | 1991 |
| 11 | Japonia | Kan-etsu | 10 926 | 1985 |
| 12 | Japonia | Hida | 10 750 | 2010 |
| 13 | Włochy | Gran Sasso d'Italia | 10 176 | 1984 |
| 14 | Włochy | Gran Sasso d'Italia | 10 173 | 1995 |
| 15 | Francja | Le Tunnel Est | 10 000 | 2006 |

1.3. Tunele komunikacyjne w Polsce

W Polsce występują bardzo duże opóźnienia w zakresie rozwoju sieci komunikacyjnej zarówno drogowej, jak i kolejowej. Potwierdza ten stan zbudowanie tylko około 25 tuneli (16 na Śląsku) przeważnie kolejowych i to głównie na przełomie XIX i XX wieku (tab. 1.4).

Po II wojnie światowej nastąpił dynamiczny rozwój budownictwa tunelowego na świecie zarówno z powodu potrzeb komunikacyjnych, jak i militarnych. Jednakże w Polsce nadal nie docenia się ich wagi i znaczenia dla budownictwa tunelowego, pomimo istnienia własnego potencjału naukowego, projektowego i wykonawczego. Trudno uznać za duże osiągnięcie zbudowanie jedyne tunelu drogowego dłuższego niż 500 m, który jest elementem Wisłostrady w Warszawie.

Tabela 1.4
Tunele w Polsce [13]

| Lp. | Tunel | Długość [m] | Rok otwarcia |
|-----|---------------------------------------|-------------|--------------|
| 1 | Wałbrzych Główny – Jedlina Górna | 1601 | 1880 |
| 2 | Bartnica – Świerki Dolne | 1168 | 1880 |
| 3 | Kamienna Góra – Kowar | 1025 | 1905 |
| 4 | Duszniki – Kulin | 577 | 1905 |
| 5 | Łupków | 416 | BD |
| 6 | Jedlina Górna – Głuszycza | 378 | 1880 |
| 7 | Bardo | 364 | 1874 |
| 8 | Długopole Zdrój – Długopole Dolne | 360 | 1875 |
| 9 | Nielestno – Wleń | 320 | 1909 |
| 10 | Kuźnice Świdnickie – Wałbrzych Główny | 309 | 1866 |
| 11 | Wojanów – Trzeińsko | 295 | 1865 |
| 12 | Kuźnice Świdnickie – Mioszowa | 262 | 1873 |
| 13 | Góra Czyżyk | 187 | 1907 |
| 14 | Pilchowice Nielestno | 154 | 1909 |
| 15 | Górzyniec – Szklarska Poręba | 145 | BD |
| 16 | Kulin – Lewin | 80 | 1905 |
| 17 | Tunel | BD | BD |
| 18 | Grybów | BD | BD |
| 19 | Żegiestów | BD | BD |
| 20 | Uherce | BD | BD |
| 21 | Szklary | BD | BD |
| 22 | Bielsko Biała | BD | BD |
| 23 | Strzyżów | BD | BD |
| 24 | Cementownia Odra w Opolu | BD | BD |
| 25 | Zabrze PTWiGK | BD | BD |

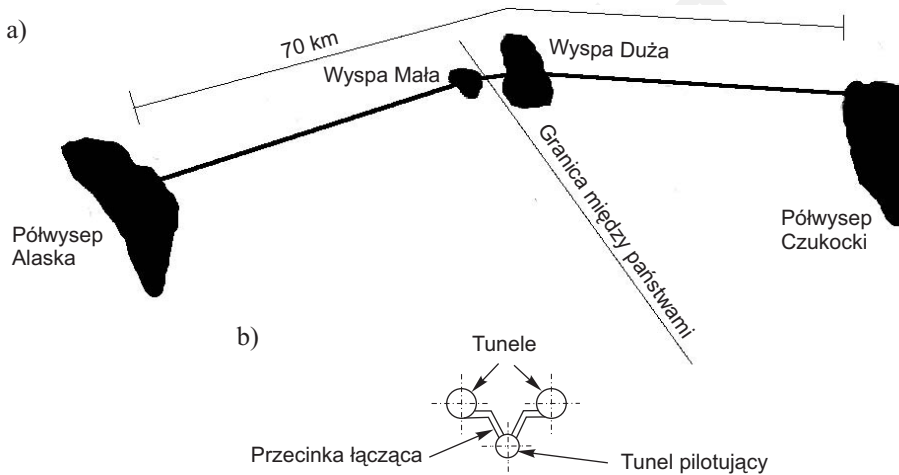
BD – brak danych

1.4. Koncepcje budowy tuneli

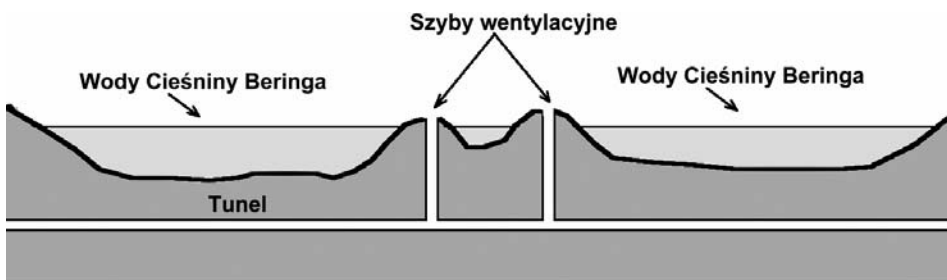
W związku z potrzebami zwiększania intensywności komunikacji i dążeniem do skrócenia czasu transportu, w wielu państwach prowadzone są inwestycje komunikacyjne o znaczeniu lokalnym, krajowym i międzynarodowym. Podejmowane są również prace koncepcyjne zmierzające do opracowania nowych projektów budowy tuneli międzykontynentalnych.

1.4.1. Tunel pod Cieśniną Beringa

Opracowany projekt koncepcyjny budowy tunelu pod Cieśniną Beringa [9] można uznać za nierealny, jednakże podobnie było z Eurotunelem, który po wielu latach dyskusji został jednak zbudowany. Byłoby to połączenie tunelowe (rys. 1.3 i 1.4) o długości około 70 km, między Półwyspem Alaski (USA) a Półwyspem Czukockim (Rosja). Trasa tunelu przebiegałaby przez położone w połowie cieśniny Wyspy Diomedede; w ten sposób długość poszczególnych odcinków tunelu byłaby krótsza. Głębokość wody w cieśninie wynosi około 30 m, a tunel byłby wydrążony w skałach granitowych. Jego wykonanie mogą utrudniać warunki klimatyczne tego regionu. Dla efektywnego wykorzystania takiego połączenia niezbędne byłoby zbudowanie około 7000 km dróg dojazdowych i linii kolejowych, które decydująco wpływają na rentowność tego projektu. Połączenie takie byłoby bezprecedensowe, a także znacznie uprościłoby handel pomiędzy kontynentami amerykańskim i azjatyckim.



Rys. 1.3. Lokalizacja tunelu pod Cieśniną Beringa [1]:
a) szkic sytuacyjny; b) przekrój poprzeczny tuneli



Rys. 1.4. Przekrój podłużny projektowanego tunelu pod Cieśniną Beringa

1.4.2. Tunel pod Cieśniną Gibraltarską

Prace projektowo-badawcze nad budową tunelu pod Cieśniną Gibraltarską łączącą Ocean Atlantycki z Morzem Śródziemnym są prowadzone od wielu lat. Tunel o długości 54 km połączy hiszpańską Punta Malabata z marokańskim Tanger i będzie przebiegał w najgłębszym miejscu około 100 m poniżej wód Cieśniny Gibraltarskiej. Tunel – na wzór Eurotunelu – będzie składać się z dwóch osobnych tuneli kolejowych oraz tunelu technicznego umieszczonego pośrodku. Problemem jest słabo rozwinięta sieć kolejowa na kontynencie afrykańskim. Byłoby to jedyne w swoim rodzaju połączenie komunikacyjne między Afryką i Europą, które znacznie ułatwiłoby wzajemną wymianę handlową.

1.4.3. Rozwój sieci tuneli w Europie

W ramach Unii Europejskiej podejmowane są prace projektowe i inwestycyjne zmierzające do stworzenia ogólnoeuropejskiego, nowoczesnego systemu komunikacyjnego uwzględniającego wymagania w zakresie wzrostu natężenia ruchu kolejowego i samochodowego, a także użytkowania ekologicznych środków transportowych. Generalna polityka komunikacyjna UE zmierza do rozwoju korytarzy multimodalnych, dających priorytet przewozom towarowym i szybkiej sieci dla przewozów pasażerskich. System ten został nazwany Trans European Network (TEN). Realizacja tych zadań wymaga także modernizacji istniejących tuneli komunikacyjnych.

Kilka znaczących połączeń transgranicznych drogowych i kolejowych, zawierających ważne ze względów komunikacyjnych odcinki tunelowe, jest w fazie projektu oraz budowy.

Wśród nich można wymienić:

- Alp Transit Gotthard,
- tunel Brenner,
- tunel szybkiej kolei Bolonia – Florencja.

1.4.3.1. Budowa tunelu kolejowego Alp Transit Gotthard

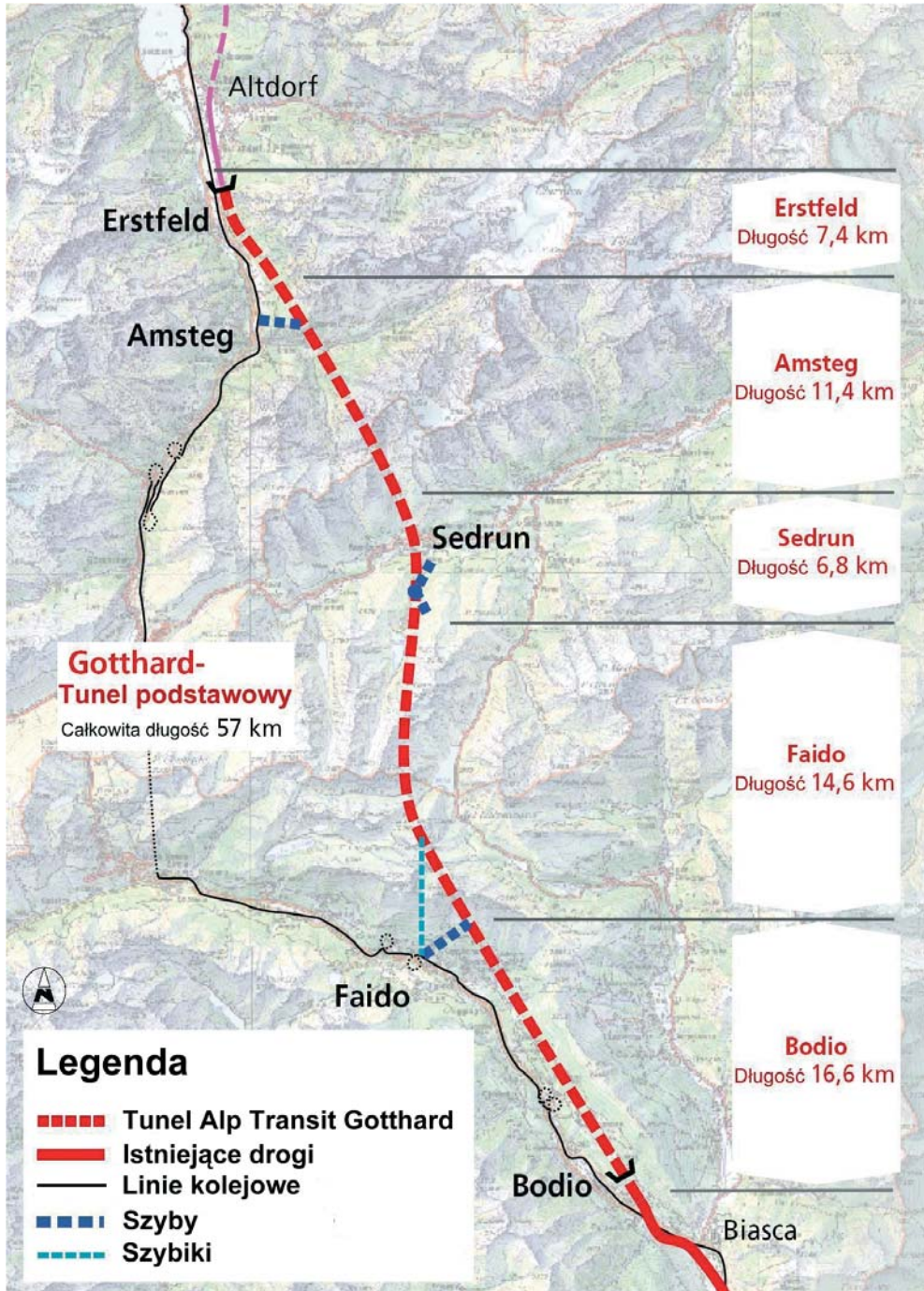
W Szwajcarii jest budowany tunel kolejowy Alp Transit Gotthard mający usprawnić transport towarów oraz podróży przez Alpy [14].

Tunel jest drążony według najnowszych standardów w zakresie budownictwa i będzie składał się z:

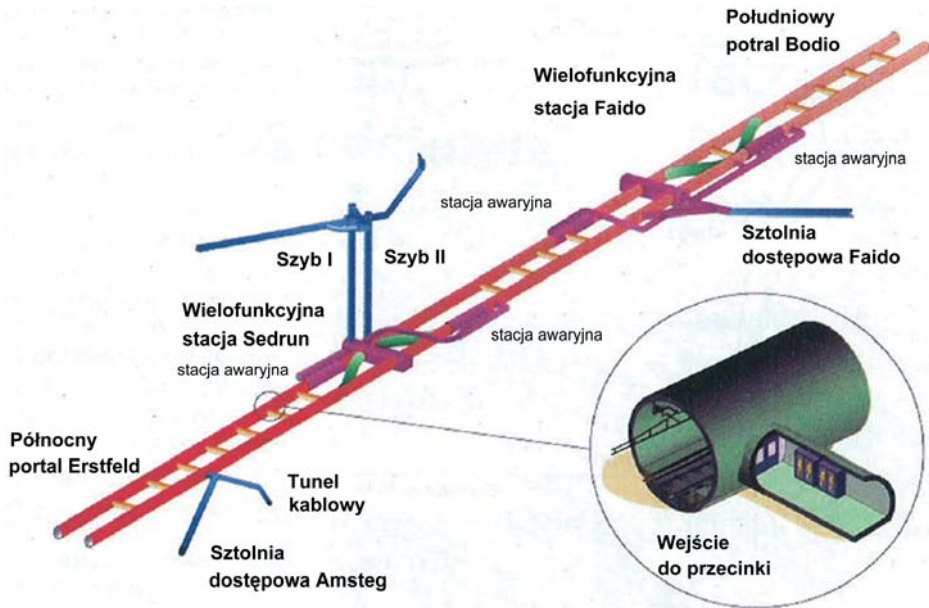
- dwóch niezależnych rur o długości 57 km każda o średnicach 8,8 m i 9,55 m, (odstęp między rurami ok. 40 m),
- 180 przecznic łączących – awaryjnych,

Przewiduje się, że tunel zostanie oddany do użytku w 2014 r.

Dla skrócenia czasu drążenia, oraz wyeliminowania pojawiających się problemów transportowo-wentylacyjnych, występujących przy tak długich wyrobiskach, tunel jest drążony z siedmiu przodków jednocześnie. Rysunki 1.5 i 1.6 przedstawiają planowaną trasę tunelu i rozwiązania konstrukcyjne.



Rys. 1.5. Trasa tunelu Alp Transit Gotthard [14]



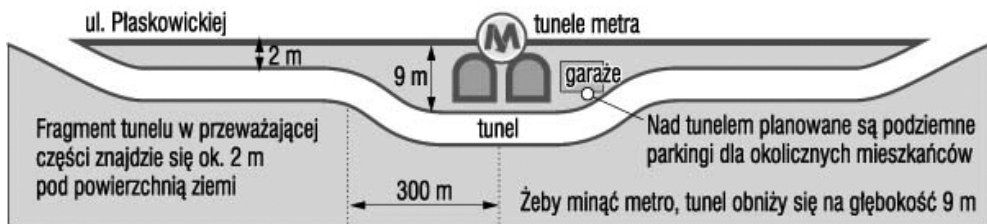
Rys. 1.6. Schemat systemu tunelu Alp Transit Gotthard [14]

1.4.3.2. Szybka kolej w Szwajcarii

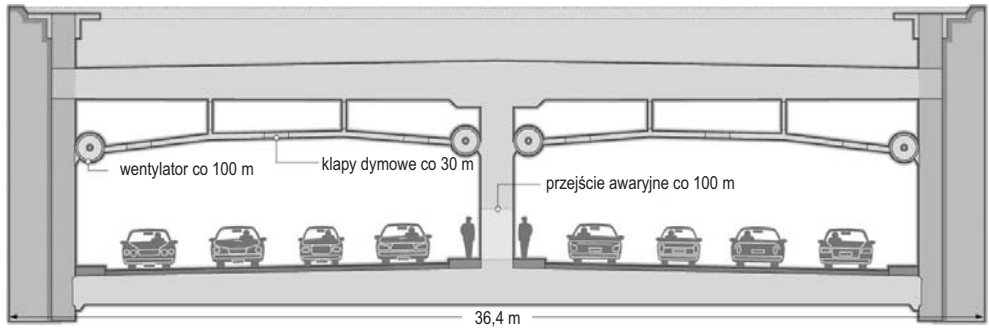
W Szwajcarii prowadzone są prace koncepcyjno-analityczne nad budową nowoczesnego systemu komunikacji „Swissmetro”, którego projekt zakłada budowę sieci tuneli podziemnych łączących najważniejsze miasta i uruchomienie w nich kolei z pociągami magnetycznymi poruszającymi się z prędkością do 500 km/h [12].

1.4.3.3. Projekt tunelu w Warszawie

Projekt trasy drogowej w Warszawie przewiduje budowę tunelu, składającego się z dwóch niezależnych kanałów, w których zostaną umieszczone jezdnie z czterema pasami ruchu w jednym kierunku każda (rys. 1.7 i 1.8) [15].



Rys. 1.7. Przekrój podłużny przez tunel w Warszawie-Ursynowie [15]

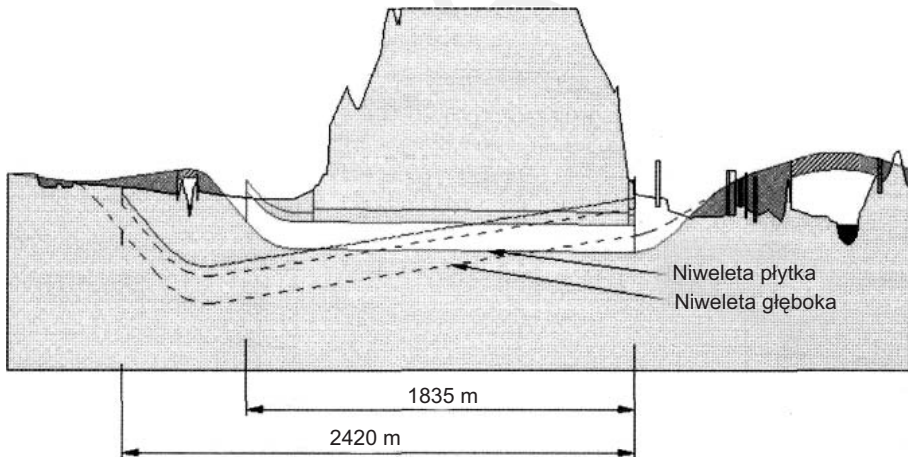


Rys. 1.8. Przekrój poprzeczny przez tunel Warszawa–Ursynów [15]

Tunel będzie płytko usytuowany, głębiej zejdzie jedynie, aby ominąć tunele metra. Przewiduje się, że powietrze w tunelu będzie oczyszczane z zanieczyszczeń gazowych i pyłowych.

1.4.3.4. Projekt tunelu w Krakowie

Aby ułatwić komunikację w mieście, podjęto działania związane z budową Trasy Zwierzynieckiej. Prowadzone są prace koncepcyjno-projektowe nad możliwością i opłacalnością budowy tunelu drogowego w ciągu Trasy (rys. 1.9) [16].



Rys. 1.9. Przekrój podłużny tunelu – Trasa Zwierzyniecka (warianty: płytka i głęboka) [16]

Założono, że tunel o długości 2420 m będzie przebiegał pod rzeką Rudawą i wzgórzem Sowiniec („głębokie” posadowienie tunelu). Takie umiejscowienie, pomimo niewątpliwych zalet, wpłynie m.in. na bardzo duże koszty budowy obiektu pod rzeką.

W związku z tym, poddano analizie także wariant płytkiego posadowienia tunelu o długości 1835 m.

2. Wentylacja tuneli

Prawidłowa wentylacja jest podstawą bezpiecznej eksploatacji tuneli komunikacyjnych i powinna zapewniać przede wszystkim:

- wymianę powietrza w stopniu powodującym obniżenie stopnia koncentracji szkodliwych zanieczyszczeń gazowych, pyłowych oraz dymów w powietrzu w tunelach do poziomu dopuszczonego przez odpowiednie przepisy lub inne wymagania np. medyczne;
- dobrą widoczność;
- korzystne warunki klimatyczne w tunelach poprzez między innymi regulację prędkości, temperatury powietrza;
- możliwości sprawnej ewakuacji użytkowników z tuneli w przypadkach wystąpienia pożarów;
- sprawne ugaszenie pożarów.

System wentylacji powinien spełniać specyficzne kryteria dla stanów normalnych i awaryjnych oraz być możliwie najtańszym rozwiązaniem technicznym zapewniającym maksymalne bezpieczeństwo korzystającym z tunelu.

W Polsce zagadnienia związane z wentylacją tuneli są stosunkowo mało znane m. in. z powodu niewielkiej ilości tuneli komunikacyjnych.

Na świecie zagadnienia wentylacji i bezpieczeństwa w tunelach komunikacyjnych są przedmiotem wielu analiz oraz doświadczeń, które wykorzystuje się w pracach projektowych i budowlanych.

2.1. Wybrane przepisy prawne dotyczące budowy tunelowych

Tunele są specyficznymi budowlami łączącymi elementy budownictwa podziemnego, wykorzystującego technikę górniczą, i powierzchniowego, co ma także wyraźne odbicie w aktach prawnych.

Istniejąca infrastruktura, kolejowa i drogowa, stwarza problemy spowodowane z jej zużyciem technicznym i moralnym (80% tuneli kolejowych zostało wybudowanych w XIX wieku) oraz wzrastającego natężenia ruchu towarowego i pasażerskiego.

Obecne prawodawstwo krajowe dotyczące budownictwa tunelowego cechuje się dużą różnorodnością. Niektóre kraje członkowskie Unii Europejskiej posiadają precyzyjne prawo odnoszące się do bezpieczeństwa w tunelach, podczas gdy w innych krajach, jest ono niewystarczające, a nawet nieistniejące. Wymogi prawne obowiązujące w Unii Europejskiej mogą przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa w tunelach zarówno na poziomie technicznym, jak i eksploatacyjnym.

2.1.1. Etap drażenia tunelu

W okresie drażenia tunelu stosuje się głównie przepisy zawarte w Rozporządzeniu Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych, (Dz.U.02.139.1169), a w szczególności regulacje prawne z działu IV – Przewietrzanie i klimatyzacja [31].

§ 187

1. Ilość powietrza doprowadzana do wyrobisk powinna zapewniać utrzymanie w tych wyrobiskach wymaganego składu powietrza i jego temperatury.
2. Wszystkie dostępne wyrobiska i pomieszczenia przewietrza się w taki sposób, aby zawartość tlenu w powietrzu nie była mniejsza niż 19% (objętościowo), a najwyższe dopuszczalne stężenia gazów w powietrzu nie przekraczały wartości określonych w tabeli 2.1.

Tabela 2.1
Najwyższe dopuszczalne stężenia gazów w powietrzu

| Rodzaj gazu | NDS mg/m ³ (objętościowo i %) | NDSCh mg/m ³ (objętościowo i %) |
|------------------|---|---|
| Dwutlenek węgla | – (1,0) | – (1,0) |
| Tlenek węgla | 30 (0,0026) | 180 (0,015) |
| Tlenek azotu | 5 (0,00026) | 10 (0,00052) |
| Dwutlenek siarki | 2 (0,00075) | 5 (0,0019) |
| Siarkowodór | 10 (0,0007) | 20 (0,0014) |

3. Skrótów wymienione w ust. 2 oznaczają:
 - NDS – najwyższe dopuszczalne stężenie średnio ważone,
 - NDSCh – najwyższe dopuszczalne stężenie chwilowe,
 zdefiniowane w odrębnych przepisach.
4. W zakładach górniczych stosujących maszyny z napędem spalinowym zawartość tlenków azotu określa się na podstawie stężenia dwutlenku azotu.

5. Prawidłowość wskazań i działań przyrządów automatycznych oraz indywidualnych stosowanych do pomiarów stężeń gazów, o których mowa w ust. 2, kontroluje się za pomocą mieszanek wzorcowych.

§ 188. W przypadku stwierdzenia, że skład powietrza nie odpowiada wymaganiom określonym w § 187 ust. 2, niezwłocznie wycofuje się ludzi, a wejście do zagrożonego wyrobiska zabezpiecza się. W miejscach tych wykonuje się wyłącznie prace z zakresu ratownictwa górniczego i przeciwpożarowego.

§ 223

1. Wyrobiska, które nie są przewietrzane prądami powietrza wytwarzanymi przez wentylator główny, przewietrza się za pomocą lutniociągów.
2. Lutniociągi powinny być wykonywane z lutni metalowych lub trudno palnych antyelektrostatycznych lutni z tworzyw sztucznych.
3. Wyrobiska można przewietrzać pomocniczymi urządzeniami wentylacyjnymi, jeżeli długość tych wyrobisk nie jest większa niż:
 - 1) w polach niemietanowych i polach zaliczonych do I kategorii zagrożenia metanowego:
 - a) 15 m – przy nachyleniach do 10° (we wzniosie i upadzie),
 - b) 10 m – przy nachyleniach powyżej 10° (we wzniosie i upadzie),
 - 2) w polach II, III i IV kategorii zagrożenia metanowego:
 - a) 6 m – przy nachyleniu do 10° (we wzniosie i upadzie),
 - b) 4 m – przy nachyleniu powyżej 10° (we wzniosie i upadzie).

§ 225

1. Przewietrzanie lutniociągiem może być ssące, tłoczące lub kombinowane.
2. Odległość lutniociągu od czoła przodka nie może być większa niż:
 - 1) w polach niemietanowych i niezagrożonych wyrzutami gazów i skał – 10 m,
 - 2) w polach metanowych lub zagrożonych wyrzutami gazów i skał:
 - a) przy wentylacji ssącej – 6 m,
 - b) przy wentylacji tłoczącej lub kombinowanej – 8 m.
3. W uzasadnionych przypadkach, stosując wentylacje tłoczącą, odległość określona w ust. 2 pkt 1 może być zwiększona do 15 m, za zgoda kierownika ruchu zakładu górniczego.
4. W wyrobiskach drążonych kombajnami:
 - 1) odległość lutniociągu ssącego od czoła przodka przy wentylacji ssącej nie powinna być większa niż 3 m,
 - 2) odległość lutniociągu tłoczącego od czoła przodka przy wentylacji tłoczącej nie powinna być większa niż:
 - a) w polach niemietanowych – 10 m,
 - b) w polach metanowych – 8 m,
 - 3) przy wentylacji kombinowanej odległość lutniociągu ssącego od czoła przodka nie powinna być większa niż 6 m, a odległość lutniociągu tłoczącego – większa niż 12 m.

§ 227

1. Lutniociąg wyprowadza się do przepływającego prądu powietrza na odległość co najmniej 8 m w takim kierunku, aby nie występowała recyrkulacja powietrza.
2. Przepis ust. 1 nie dotyczy lutniociągów pomocniczych stosowanych:
 - 1) przy wentylacji kombinowanej,
 - 2) dla usuwania nagromadzeń metanu,
 - 3) dla poprawy warunków klimatycznych.
3. W wyrobisku, z którego pobierane jest powietrze do przewietrzania wyrobiska z użyciem lutniociągu, powinna płynąć ilość powietrza uniemożliwiająca występowanie jego recyrkulacji, natomiast na odcinku lutniociągu w prądzie przepływającym powinna być utrzymana wymagana prędkość powietrza.
4. Przy wentylacji kombinowanej ilość powietrza doprowadzana lutniociągiem zasadniczym powinna być większa od ilości pobieranej przez lutniociąg pomocniczy.

§ 228

1. Prędkość prądu powietrza w wyrobisku przewietrzanym z użyciem lutniociągu powinna wynosić co najmniej w polach:
 - 1) niemetanowych i I kategorii zagrożenia metanowego – 0,15 m/s,
 - 2) III, IV kategorii zagrożenia metanowego – 0,30 m/s.
2. W drażonym wyrobisku o przekroju poprzecznym w wyłomie ponad 20 m² przewietrzanym z użyciem lutniociągu prędkość powietrza może być mniejsza niż określona w ust. 1, jeżeli zapewnione jest utrzymanie dopuszczalnych zawartości gazów oraz właściwych warunków klimatycznych.

§ 234. Wentylatory lutniowe w polach metanowych powinny pracować bez przerwy; w przypadku przerwy awaryjnej w pracy wentylatora roboty wstrzymuje się, wycofuje ludzi, a wejście do wyrobiska zagrażdza.

2.1.2. Etap użytkowania tunelu

Po uzyskaniu w tunelu połączenia umożliwiającego jego przewietrzania prądami przepływowymi mają zastosowanie przepisy prawne określone Rozporządzeniem 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) [32].

§ 1

1. Rozporządzenie określa warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie, zwane dalej „obiettami inżynierskimi”, oraz ich usytuowanie.
2. Do obiektów inżynierskich zalicza się:
 - 1) obiekty mostowe,
 - 2) tunele,
 - 3) przepusty,
 - 4) konstrukcje oporowe.

3. Warunki techniczne, o których mowa w ust. 1, przy zachowaniu przepisów Prawa budowlanego i przepisów o drogach publicznych oraz innych ustaw, a także wymagań Polskich Norm, zapewniają w szczególności:
 - 1) bezpieczeństwo konstrukcji w aspekcie zapewnienia nośności i stateczności,
 - 2) bezpieczeństwo obiektów inżynierskich, w szczególności z uwagi na możliwość pożaru, powodzi, pochodu lodów, uderzenia statków i pojazdów, wpływu ruchu zakładu górniczego,
 - 3) bezpieczeństwo użytkowania,
 - 4) bezpieczeństwo obsługi i bieżącego utrzymania obiektów inżynierskich,
 - 5) trwałość obiektów inżynierskich,
 - 6) ochronę środowiska przyrodniczego, zwanego dalej „środowiskiem”,
 - 7) warunki użytkowe uwzględniające potrzeby osób niepełnosprawnych.

§ 3. Ilekroć w rozporządzeniu jest mowa o:

- 2) tunelu – rozumie się przez to budowlę przeznaczoną do przeprowadzenia drogi, samodzielnego ciągu pieszego lub pieszo-rowerowego, szlaku wędrówek zwierząt dziko żyjących lub innego rodzaju komunikacji gospodarczej przez lub pod przeszkodą terenową, a w szczególności: tunel, przejście podziemne,
- 3) przepuście – rozumie się przez to budowlę o przekroju poprzecznym zamkniętym, przeznaczoną do przeprowadzenia cieków, szlaków wędrówek zwierząt dziko żyjących lub urządzeń technicznych przez korpus drogi.

§ 60. 1. Tunel powinien zapewnić przeprowadzenie elementów drogi, o których mowa w § 88 ust. 1.

1. Poszczególne kierunki ruchu bądź jego rodzaje powinny być umieszczone w oddzielnych tunelach. Jeśli konstrukcja tunelu może pomieścić obie jezdnie i torowisko tramwajowe, to jezdnie i torowisko powinny być wydzielone specjalnymi przegrodami lub barierami betonowymi.

§ 61. Przekrój tunelu powinien zapewnić zachowanie skrajni, o których mowa w § 55 ust. 1, pkt 1, 2, 4, 7 oraz w ust. 3, identycznych jak na odcinkach przed i za tunelem.

§ 62. 1. Tunel przeznaczony do ruchu pieszych pod drogą powinien mieć w szczególności szerokość dostosowaną do natężenia ruchu pieszych i długości przeszkody oraz zapewnić niezbędną skrajnię, warunki widoczności i wygodę użytkowników. Minimalne szerokości tuneli jako przejść podziemnych wynikają z warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie.

§ 64. 1. Jeśli w tunelach, ze względu na ich długość, przekrój poprzeczny i usytuowanie, brak wystarczającej widoczności, powinno być zastosowane sztuczne oświetlenie od zmierzchu do świtu oraz w porze dziennej.

Nie zachodzi potrzeba stosowania sztucznego oświetlenia tuneli i podziemnych przejść dla pieszych w porze dziennej, jeśli usytuowane są w linii prostej, a stosunek powierzchni przekroju wejść do powierzchni nawierzchni jezdni i chodników jest nie mniejszy niż 1:12 i zapewniony jest nieograniczony dostęp naturalnego światła do przejścia.

Za elementy ograniczające dostęp światła uznaje się w szczególności:

- 1) skarpe nasypu lub ścianę usytuowaną naprzeciw wejść,
- 2) zadrzewienie lub zakrzewienie wokół wejść,
- 3) wysoką zabudowę w sąsiedztwie wejść.

§ 65

1. Oświetlenie tunelu powinno zapewnić równomierne oświetlenie jezdni w przekroju poprzecznym tunelu, a zmienne – na jego długości, oraz właściwą widoczność w strefie przejściowej między otwartą przestrzenią a początkiem tunelu.
2. Oświetlenie w tunelu powinno być wspomagane uzupełniającymi rozwiązaniami, polegającymi w szczególności na:
 - 1) zmianie barwy nawierzchni – z ciemnej na drodze na jasną w tunelu,
 - 2) odpowiednim zadrzewieniu i zakrzewieniu oraz stosowaniu osłon,
 - 3) zastosowaniu jasnych oblicowań ścian tunelu niedających refleksów.

§ 66. Oświetlenie sztuczne przejść dla pieszych powinno zapewnić równomierne oświetlenie nawierzchni przejścia i nie wykazywać różnic natężenia, wywołujących olśnienie przy wyjściu z przejścia na otwartą przestrzeń.

§ 79. Połączenie obiektu inżynierskiego z drogą powinno zapewnić w szczególności:

- kontynuację ruchu drogowego,
- właściwe warunki pracy konstrukcji obiektu,
- odpowiednie ukształtowanie przestrzeni pod obiektem mostowym w zależności od rodzaju przeszkody i zagospodarowania terenu,
- stabilność nasypu drogowego i terenu,
- stabilność i szczelność nawierzchni jezdni.

§ 88

1. Obiekt mostowy lub tunel, w zależności od potrzeb, przeznaczenia i usytuowania, powinien mieć w szczególności:
 - 1) jezdnię,
 - 2) torowisko tramwajowe,
 - 3) utwardzone pobocze, pas dzielący, pas awaryjny,
 - 4) chodnik, z wyjątkiem tunelu do ruchu pojazdów,
 - 5) ścieżkę rowerową, z wyjątkiem tunelu do ruchu pojazdów.
2. Dopuszcza się umieszczenie torowiska tramwajowego, chodników dla pieszych bądź ścieżek rowerowych na innych poziomach niż poziom jezdni, jeśli nie spowoduje to utrudnień konstrukcyjnych i eksploatacyjnych obiektu.

§ 290. W tunelach, w zależności od ich długości, powinna być przewidziana wentylacja dla odprowadzenia spalin.

§ 291. Instalacje wentylacyjne tuneli drogowych powinny zapewnić:

- 1) wymianę powietrza – aby nie zostały przekroczone stężenia zanieczyszczeń zagrażające przebywającym w tunelu użytkownikom dróg,
- 2) bezpieczeństwo i komfort jazdy – poprzez usuwanie dymów ograniczających widoczność oraz regulowanie temperatury i ruchu powietrza.

§ 292

1. Wentylacja tuneli drogowych powinna być ustalona na podstawie stężenia określonego ułamkiem molowym tlenu węgla i tlenu azotu w powietrzu tunelu oraz emisji dymów ograniczających widoczność.
2. Dopuszczalne stężenie określone ułamkiem molowym tlenu węgla w powietrzu tunelu określa tabela 2.2.

Tabela 2.2
Dopuszczalne stężenie tlenu węgla w powietrzu

| Rodzaj tunelu/rodzaj ruchu | Dopuszczalne stężenie określone ułamkiem molowym tlenu węgla | |
|---|--|--|
| | Ruch pojazdów płynny, % | Ruch pojazdów utrudniony lub zatrzymywany, % |
| W ciągu ulic miejskich | 0,015 | 0,015 |
| W ciągu dróg klas A i S | 0,015 | 0,025 |
| Górski | 0,015 | 0,025 |
| Na wyjściu z tunelu przy wentylacji podłużnej | 0,025 | 0,025 |
| Przebywanie w tunelu personelu wykonującego pracę | 0,005 | |

3. Dopuszczalne stężenie, określone ułamkiem molowym tlenu azotu w powietrzu tunelu, wynosi 0,0025%.
4. Dopuszczalne stężenie dymu w powietrzu tunelu, określone współczynnikiem widoczności i komfortu jazdy, podaje tabela 2.3.

Tabela 2.3
Dopuszczalne stężenie dymu w powietrzu

| Rodzaj tunelu rodzaj ruchu | Współczynnik widoczności i komfortu jazdy | |
|---|---|--|
| | Ruch pojazdów płynny (m^{-1}) | Ruch pojazdów utrudniony lub zatrzymywany (m^{-1}) |
| W ciągu ulic miejskich | 0,005 | 0,0075 |
| Pozamiejski przy prędkości pojazdów | | |
| 60–80 km/h | 0,0075 | 0,009 |
| 100 km/h | 0,005 | 0,009 |
| Przebywanie w tunelu personelu wykonującego pracę | 0,003 | |
| Konieczność zamknięcia ruchu w tunelu | 0,012 | |

5. Dopuszczalne stężenie masowe sadzy w powietrzu tunelu wynosi 2 mg/m^3 .

§ 293. Wentylacja tuneli drogowych może być wykonana w szczególności jako:

- 1) naturalna,
- 2) mechaniczna:
- 3) wzdłużna,
- 4) poprzeczna,
- 5) mieszana.

Wentylacja naturalna

§ 294

1. Wentylację naturalną, o której mowa w § 293 pkt 1, działającą dzięki różnicy ciśnień między głowicami tunelu oraz w wyniku ruchu pojazdów, dopuszcza się, z zastrzeżeniem ust. 2, w tunelach o długości:
 - 1) w ciągu dróg z ruchem jednokierunkowym, bez zatorów, gdy droga przebiega poza tunelem:
 - a) w poziomie terenu lub na nasypie – nie większej niż 600 m,
 - b) w wykopie – nie większej niż 400 m,
 - 2) w ciągu dróg o dużym natężeniu ruchu, z zatorami – nie większej niż 200 m.
2. W przypadku korzystnych warunków topograficznych i klimatycznych dopuszcza się wentylację naturalną w tunelach dłuższych, niż podano w ust. 1, pod warunkiem zastosowania rezerwowej wentylacji mechanicznej.

Wentylacja mechaniczna

§ 295

1. Wentylację mechaniczną, o której mowa w § 293 pkt 2, działającą dzięki wymuszaniu przepływu powietrza wzdłuż lub w poprzek osi tunelu, dopuszcza się, gdy długość tunelu przy wentylacji:
 - 1) wzdłużnej – jest nie większa niż 1000 m,
 - 2) poprzecznej – jest większa niż 1000 m.

Wentylacja mechaniczna wzdłużna

Wentylacja mechaniczna wzdłużna wymaga:

- 1) przy wentylatorach umieszczonych wzdłuż stropu tunelu:
 - a) zachowania odległości od ściany – dla ograniczenia wpływu tarcia powietrza o ścianę,
 - b) grupowania wentylatorów – aby odległości między grupami były nie mniejsze niż 60 m i nie większe niż 120 m,
 - c) odpowiedniej liczby wentylatorów w grupach – dla zapewnienia równomiernego ciśnienia powietrza,
- 2) przy zastosowaniu szybów wentylacyjnych – rozmieszczenia czerpni w pobliżu głowic tuneli oraz w środkowej ich części w przypadku nieparzystej liczby czerpni.

Wentylacja mechaniczna poprzeczna

Wentylacja mechaniczna poprzeczna, z poprzecznym ruchem powietrza na całej długości tunelu, działająca w wyniku różnicy ciśnień w kanałach umieszczonych wzdłuż tunelu, wymaga umieszczenia otworów:

- 1) do doprowadzenia powietrza – w dolnej części tunelu na wysokości kół pojazdów,
 - 2) do odprowadzenia powietrza – w części stropowej, z zastrzeżeniem ust. 4.
4. W wentylacji, o której mowa w ust. 3, dopuszcza się rezygnację z kanałów odprowadzających i usuwanie zużytego powietrza przez głowice tuneli lub pośrednie szyby wywiewne.
 5. Prędkość przepływu powietrza w tunelu z wentylacją mechaniczną nie powinna być większa niż 10 m/s.

§ 296. Jeśli zanieczyszczenia powietrza usuwanego z tuneli przekraczają dopuszczalne stężenia z uwagi na ochronę środowiska, powinny być zastosowane specjalne urządzenia oczyszczające przed wyemitowaniem do atmosfery.

§ 297

1. Przestrzenie zamknięte konstrukcji, pozostające pod normalnym ciśnieniem atmosferycznym, powinny być wyposażone w otwory wentylacyjne i otwory odprowadzające skropliny pary wodnej.
2. Otwory, o których mowa w ust. 1, powinny być:
 - 1) rozmieszczone tak, aby zapewniały ruch powietrza wewnątrz przekroju,
 - 2) zabezpieczone przed opadami atmosferycznymi oraz dostępem ptactwa i nietoperzy,
 - 3) wykonane w betonowych przekrojach skrzynkowych w szczególności za pomocą rur z tworzyw sztucznych, o średnicy 150 mm, z zachowaniem wymagań określonych w § 138 ust. 1 pkt 2.

Bezpieczeństwo pożarowe

§ 321

1. Konstrukcja tunelu powinna być wykonana z materiałów niepalnych i mieć odporność ogniową nie mniejszą niż 240 minut, a elementy wystroju jego wnętrza powinny być wykonane z materiałów niepalnych.
2. Kable elektroenergetyczne oraz oświetlenia awaryjnego powinny być umieszczone w dolnej części tunelu i odporne na działanie wysokiej temperatury.
3. Zasilanie oświetlenia i sygnalizacji w energię elektryczną powinno być przeprowadzone z obu końców tunelu i rozdzielone na sekcje.
4. Wentylatory umieszczone w stropie tunelu przy wentylacji wzdłużnej powinny być przystosowane do oddymiania w przypadku pożaru.
5. W tunelach z wentylacją poprzeczną kanały świeżego i zużytego powietrza powinny być oddzielone przegrodami z materiałów niepalnych o odporności ogniowej nie mniejszej niż 120 minut.
6. Wentylatory wywiewne we wszystkich systemach wentylacyjnych powinny być przystosowane do pracy w podwyższonej temperaturze lub chłodzone.

§ 322

1. Tunele o długości większej niż 100 m powinny być wyposażone w nisze ratunkowe rozmieszczone mijankowo na przeciwległych ścianach, w odległościach nie większych niż 100 m między niszami na każdej ze ścian, z tym że w tunelach o długości nie większej niż 200 m dopuszcza się jedną niszę na każdej ścianie. Nisze powinny być wyposażone w instalację wentylacyjną nadciśnieniową w stosunku do atmosfery tunelu oraz w oświetlenie awaryjne włączane automatycznie w razie pożaru.
2. Długości i odstępów, o których mowa w ust. 1, mogą być powiększone w przypadku:
 - 1) tuneli wyższych niż 5 m – o 25% ich wartości,
 - 2) zastosowania automatycznych urządzeń oddymiających – o 50% ich wartości,
 - 3) zaistnienia łącznie okoliczności wymienionych w pkt 1 i 2 – o 75% ich wartości.
3. Tunele dwukomorowe o długości większej niż 400 m powinny być wyposażone w przejścia ewakuacyjne między komorami, zastępujące nisze ratunkowe sąsiadujących ze sobą ścian komór, rozmieszczone w odstępach nie większych niż 100 m lub zwiększonych zgodnie z wymaganiami określonymi w ust. 2.

§ 323

1. Kanalizacja deszczowa w tunelach powinna umożliwić szybkie przyjęcie rozlanych benzyn lub olejów napędowych z uszkodzonych cystern i odprowadzenie ich do specjalnych zbiorników umieszczonych poza obiektem.
2. Kanalizacja, o której mowa w ust. 1, powinna zapobiec rozprzestrzenieniu się pożaru.

2.2. Wentylacja tuneli podczas drażenia

Przy projektowaniu drażenia tuneli należy szczegółowo przeanalizować warunki geologiczno-górnictwa, technologie i zagrożenia naturalne oraz źródła emisji zanieczyszczeń powietrza.

Głównymi źródłami zanieczyszczenia powietrza w tunelu są gazy postrzałowe zawierające znaczne ilości głównie dwutlenku węgla, tlenu węgla i tlenków azotu, a także gazy i pyły wytwarzane przez urządzenia technologiczne w procesach mechanicznego urabiania skał i ich transportu.

Czasami pewne ilości szkodliwych gazów wydzielane są z górotworu; najczęściej jest to dwutlenek węgla lub metan.

Poza zanieczyszczeniem powietrza konieczność przewietrzania miejsc robót wywołana jest podwyższaniem się temperatury powietrza w tunelu, zarówno na skutek zjawisk geotermicznych, ciepła powstającego na skutek robót strzałowych oraz wydzielanego przez ludzi i maszyny zainstalowane w tunelu.

W fazie drażenia, tunel jest wyrobiskiem górniczym, dlatego wszelkie roboty w nim podlegają wymogom przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. *Prawo geologiczne i górnicze* oraz Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych.

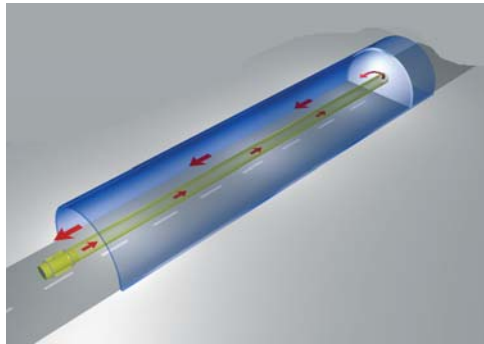
Prawidłowa wentylacja wyrobiska tunelowego wpływa nie tylko na bezpieczeństwo pracy, ale również na postęp robót i związane z nimi koszty.

Przepływ powietrza w lutniociągach i otworach wiertniczych może odbywać się pod wpływem depresji naturalnej lub depresji mechanicznej wentylatora lub układu wentylatorów.

2.2.1. Systemy wentylacji tuneli podczas drążenia

W fazie drążenia może być stosowane przewietrzanie tuneli za pomocą [27]:

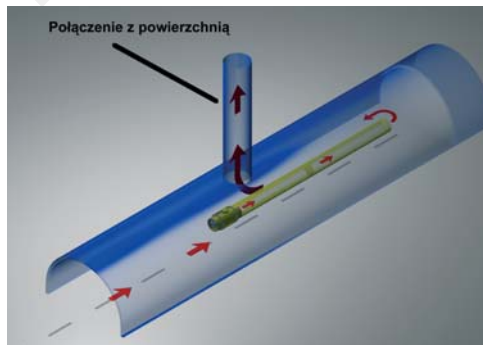
- lutniociągów wykonanych z lutni metalowych lub z tworzyw sztucznych (rys. 2.1),
- otworów wiertniczych wielkośrednicowych.



Rys. 2.1. Wentylacja tunelu lutniociągiem

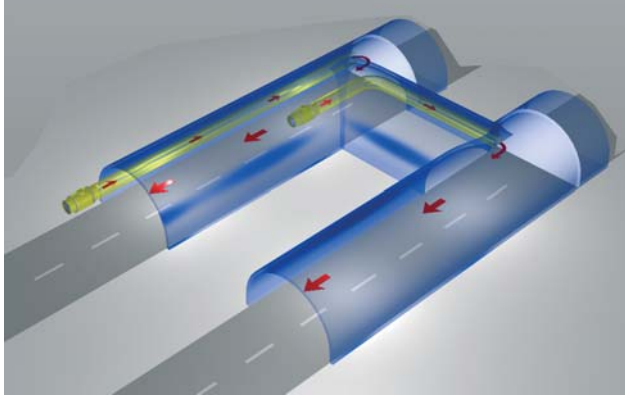
Bardzo często w celu skrócenia długości lutniociągu i poprawienia skuteczności wentylacji lutniociągami wykonuje się sztolnie, szyby i szybiki pozwalające uzyskać przewietrzanie odcinków tunelu prądami przepływowymi, w których są umieszczane wentylatory wymuszające przepływ powietrza w lutniociągu.

Wentylację tuneli za pomocą lutniociągów i otworów wiertniczych przedstawiono na rysunku 2.2.



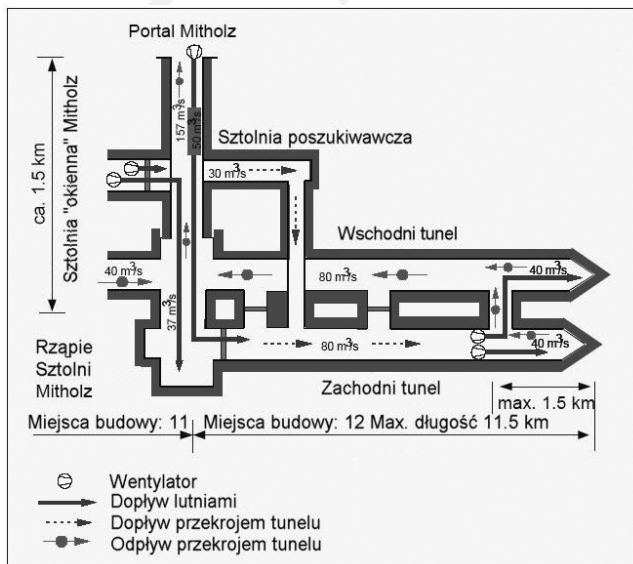
Rys. 2.2. Wentylacja tuneli za pomocą otworów wielkośrednicowych

System polega na wykonaniu tuneli równoległych połączonych przecinkami, przewietrzanych prądami powietrza przepływowymi, w których zainstalowane wentylatory czerpią powietrze do lutniociągów przewietrzających poszczególne przodki drążonych tuneli. Wentylację za pomocą tuneli równoległych i lutniociągów przedstawia rysunek 2.3.



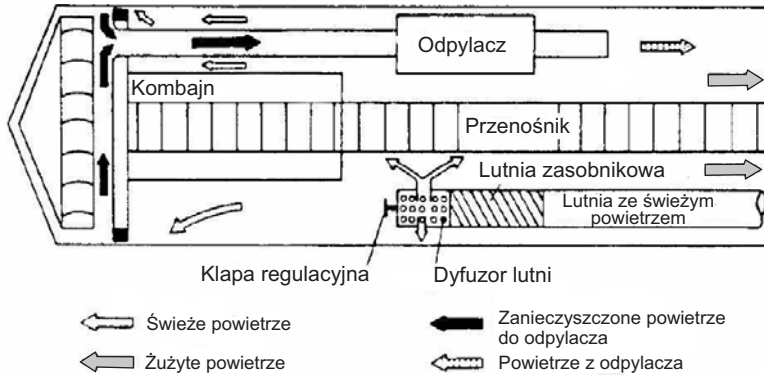
Rys. 2.3. Wentylacja za pomocą tuneli równoległych i przecinek

Wentylację tuneli za pomocą lutniociągów oraz przecinek, które zostało zastosowane w czasie drążenia tunelu Mitholtz, prezentuje rysunek 2.4.



Rys. 2.4. Sposób przewietrzania tunelu Mitholtz w czasie drążenia [30]

Możliwe jest także stosowanie wentylacji lutniociągami ssącymi oraz wentylacji kombinowanej, np. tuneli drażonych kombajnami (rys. 2.5).



Rys. 2.5. Schemat wentylacji tunelu drażonego kombajnem tarczowym pełnoprzekrojowym

2.2.2. Projektowanie wentylacji tuneli podczas drażenia

Projektując wentylację dla fazy drażenia tunelu, należy przeprowadzić:

1. rozeznanie zagrożenia czynnikami naturalnymi takimi jak np.:
 - dopływy gazów z górotworu (metan, dwutlenek węgla),
 - dopływy wody,
 - trzęsienia ziemi,
 - dopływy ciepła ziemskiego,
 - działanie warunków klimatycznych (wiatr, temperatura).
2. rozeznanie zagrożenia czynnikami technologicznymi, takimi jak np.:
 - gazy odstrzałowe (tlenek węgla, tlenki azotu),
 - gazy emitowane przez silniki spalinowe urządzeń technicznych,
 - zapylenie powietrza spowodowane procesami technologicznymi (urabianie i transport skały).
3. analizę wymagań higienicznych określonych w prawie.

Podstawowym działaniem dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy w tunelu, w aspekcie ograniczenie lub wyeliminowanie negatywnego oddziaływania zagrożeń, jest wyznaczenie minimalnego wydatku strumienia powietrza.

- 1) Minimalny wydatek powietrza w tunelu \dot{V}_v (m^3/s) ze względu na zapewnienie minimalnej prędkości powietrza wyznacza się na podstawie wzoru

$$\dot{V}_v = F v_{\min} \quad (2.1)$$

gdzie:

F – pole przekroju poprzecznego tunelu, m^2 ,

v_{\min} – minimalna prędkość powietrza określona ze względu na opanowanie zagrożeń lub wymagana przez przepisy prawne, m/s .

- 2) Minimalny wydatek powietrza w tunelu \dot{V}_r (m³/s) ze względu na rozrzedzenie gazów zagrażających bezpieczeństwu do bezpiecznych koncentracji gazów np. określonych w przepisach prawa na podstawie wzoru

$$\dot{V}_r = \frac{\dot{V}_g}{C_d} 100 \quad (2.2)$$

gdzie:

\dot{V}_g – wydatek strumienia gazów szkodliwych dopływających do tunelu, m³/s,
 C_d – maksymalna dopuszczalna koncentracja gazu szkodliwego, określona przepisami prawnymi, %.

- 3) Minimalny wydatek powietrza w tunelu \dot{V}_o (m³/s) ze względu na rozrzedzenie gazów odstrzałowych. Wydatek powietrza może być obliczony w oparciu o wzory określone w Poradniku Górnika [28].
- 4) Minimalny wydatek powietrza w tunelu \dot{V}_p (m³/s) ze względu na rozrzedzenia pyłów szkodliwych do koncentracji wymaganych przepisami prawa na podstawie wzoru

$$V_p = \frac{m_z}{C_d} \quad (2.3)$$

gdzie:

m_z – masowy wydatek strumienia pyłów szkodliwych w tunelu, mg/s;
 C_d – dopuszczalna koncentracja określona przepisami, mg/m³.

- 5) Minimalny wydatek powietrza w tunelu \dot{V}_c (m³/s), ze względu na cieplne warunki pracy można wyznaczyć w oparciu o odpowiednie prognozy klimatyczne [38].
- 6) Wydatek strumienia powietrza \dot{V}_T w przodku tunelu musi spełniać zależność

$$\dot{V}_T = \max f(\dot{V}_v, \dot{V}_r, \dot{V}_o, \dot{V}_p, \dot{V}_t) \quad (2.4)$$

2.3. Systemy wentylacji tuneli

Tunele komunikacyjne z punktu widzenia wentylacji są definiowane zarówno jako zamknięte przestrzenie naziemne, podziemne, jak i podwodne, przez które przemieszczają się pojazdy i ludzie oraz przepływa powietrze, w wyniku czego zachodzi wiele nieraz skomplikowanych procesów z zakresu: dynamiki gazów, wymiany ciepła, propagacji dymów pożarowych oraz zanieczyszczeń stałych i gazowych dla stanów ustalonych jak i nieustalonych.

Przepływ powietrza w tunelach może następować pod wpływem depresji:

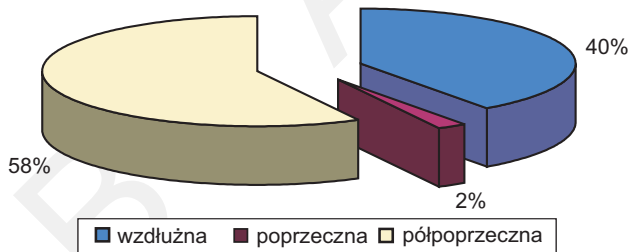
- naturalnej,
- mechanicznej.

Na ruch powietrza w tunelach ma także wpływ „tłokowe” oddziaływanie poruszających pojazdów zależne od relacji pomiędzy przekrojem tunelu i sumy przekrojów poprzecznych pojazdów oraz od kierunku i prędkości ich jazdy.

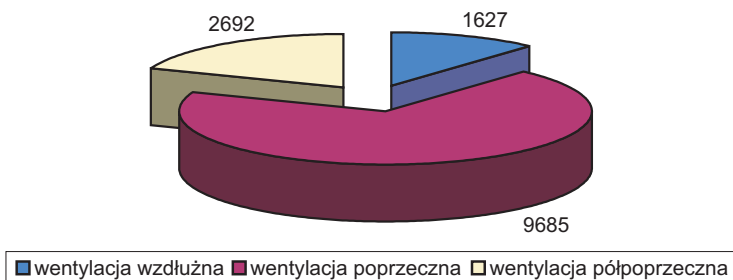
Uwzględniając stan techniki i wymagania przepisów, można wyróżnić następujące systemy wentylacji tuneli:

- wzdłużny:
 - wentylacja naturalna,
 - wentylacja naturalna z szybem,
 - wentylacja naturalna z wentylatorami,
 - wentylacja naturalna wspomagana depresją mechaniczną,
 - system Saccardo Nozzle,
- poprzeczny:
 - wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przyspągowa,
 - wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przystropowa,
 - wentylacja mechaniczna poprzeczna pełna,
- mieszany (kombinacja kilku systemów),
- specjalny.

Tunele komunikacyjne są przewietrzane przy zastosowaniu różnych systemów w zależności od warunków technicznych, natężenia ruchu oraz stopnia zagrożenia pożarowego i zanieczyszczeniami powietrza. Udziały stosowanych systemów wentylacji w tunelach przedstawiają rysunki 2.6 i 2.7 [12].



Rys. 2.6. Procentowe udziały systemów wentylacji tuneli



Rys. 2.7. Średnie długości tuneli (m) w zależności od rodzaju wentylacji

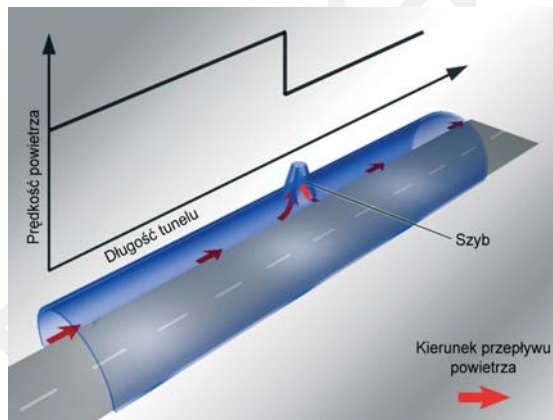
Depresja naturalna może powodować przepływ powietrza w różnych kierunkach w tunelu:

- od przekroju portalu wlotowego do przekroju portalu wylotowego,
- od przekrojów portali wlotowych do szybu,
- od szybu do przekrojów portali wylotowych.

W przypadku stosowania wentylacji naturalnej może występować duża zmienność stanów przewietrzania (wydatku strumienia powietrza i kierunku), powodująca występowanie trudności w ustabilizowaniu kierunków powietrza w tunelach, co jest szczególnie ważne w przypadkach zagrożenia pożarem. Koncentracja zanieczyszczeń powietrza narasta w kierunku portalu wylotowego.

2.3.1.2. Wentylacja naturalna wzdłużna z szybem

W przypadkach długich tuneli i znacznego natężenia ruchu pojazdów w celu zwiększenia wielkości strumienia powietrza (rys. 2.9), a także umożliwienia usuwania zanieczyszczeń powietrza, stosuje się jedno lub kilka dodatkowych połączeń tunelu z powierzchnią, najczęściej w formie szybu.



Rys. 2.9. Wentylacja naturalna z szybem umieszczonym pośrodku

Wielkość generowanej w szybie i tunelu depresji naturalnej (efekt „kominowy”) jest uzależniona od:

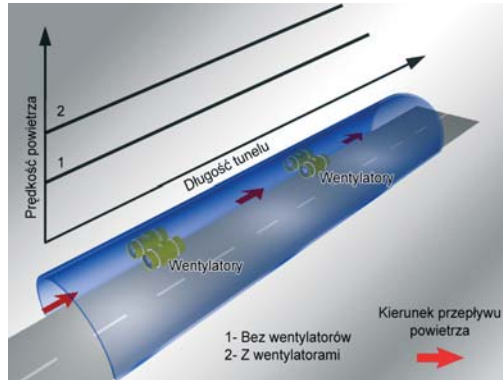
- wysokości szybu,
- różnicy gęstości powietrza w tunelu i na zewnątrz tunelu,
- kierunku i intensywności wiatru.

Zastosowanie więcej niż jednego szybu może spowodować wystąpienie niekorzystnych zjawisk zanieczyszczeń tunelu, np. zmiany kierunku przepływającego powietrza.

Koncentracje zanieczyszczeń powietrza narastają od portali wlotowych w stronę szybu.

2.3.1.3. Wentylacja naturalna wzdłużna z wentylatorami

Wentylacja wzdłużna naturalna z wentylatorami jest stosowana głównie w tunelach o małych i średnich długościach oraz w przypadku występowania dużych koncentracji zanieczyszczeń powietrza (rys. 2.10). Najczęściej wentylatory są umieszczane w grupach po dwa do czterech i w odstępach około 50–200 m w zależności od mocy.

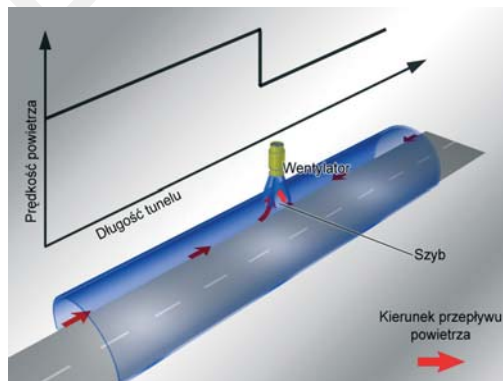


Rys. 2.10. Wentylacja wzdłużna wspomagana wentylatorami

Wentylatory umożliwiają okresowe lub stałe zwiększenie przepływu powietrza w tunelu, który pozwala ograniczyć wysoki stopień koncentracji zanieczyszczeń w powietrzu.

2.3.1.4. Wentylacja naturalna wzdłużna z szybem wspomagana depresją mechaniczną

Wentylacja naturalna w wielu przypadkach nie zapewnia uzyskania wymaganego wydatku strumienia powietrza w tunelu dlatego też, jest nieraz wspomagana depresją mechaniczną wentylatorów umieszczonych zazwyczaj w szybie lub szybach odprowadzających powietrze z tunelu. System ten (rys. 2.11) jest stosowany głównie w tunelach drogowych.

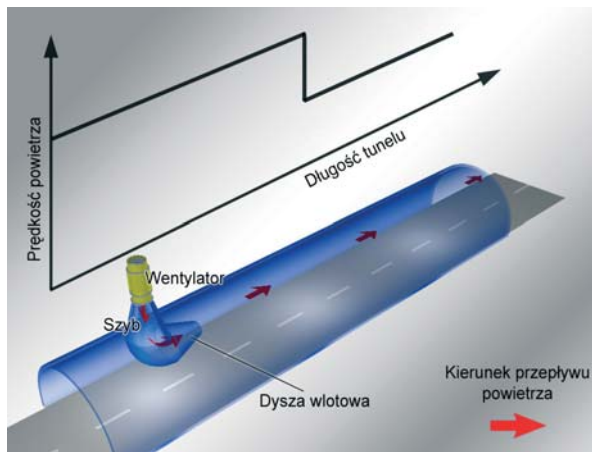


Rys. 2.11. Wentylacja tuneli z szybem i wentylatorem

System ten jest korzystny przy dwukierunkowym ruchu pojazdów, gdyż umożliwia odprowadzenie zanieczyszczeń powietrza z poszczególnych odcinków tunelu do jednego lub kilku szybów wentylacyjnych.

2.3.1.5. System Saccardo Nozzle

Saccardo Nozzle jest systemem stosowanym w tunelach o dużym natężeniu ruchu samochodowego (rys. 2.12). W tym rozwiązaniu powietrze jest włączane do tunelu za pomocą wentylatora i specjalnego przewodu w formie dyszy intensyfikującej przepływ wzdłużny powietrza wytworzony przez depresję naturalną. Efektywność systemu zależy głównie od prędkości powietrza i wydatku strumienia powietrza włączanego do tunelu oraz konstrukcji dyszy wylotowej. Systemy takie są niekorzystne przy ruchu dwukierunkowym.



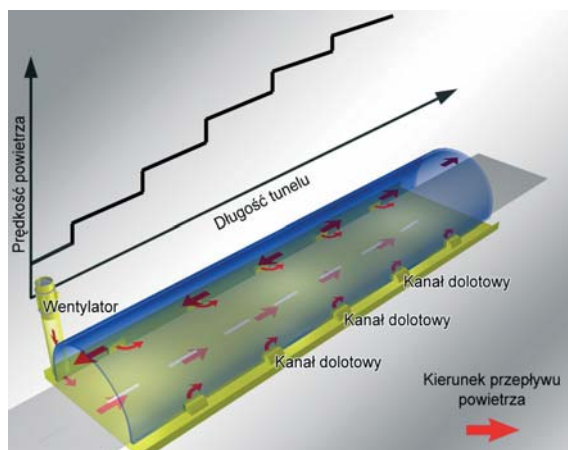
Rys. 2.12. System Saccardo Nozzle

2.3.2. Wentylacja mechaniczna poprzeczna

W systemach wentylacji poprzecznej działających głównie pod wpływem depresji mechanicznej powietrze w przekrojach wlotowych i wylotowych płynie w kierunku poprzecznym w stosunku do osi tunelu, natomiast pomiędzy tymi przekrojami przepływ powietrza jest wzdłużny, przy czym mogą wystąpić różnorodne modyfikacje systemu wynikające z uwarunkowań lokalnych.

2.3.2.1. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przyspagowa

W systemie wentylacji mechanicznej półpoprzecznej przyspagowej (rys. 2.13) powietrze jest doprowadzane do wnętrza tunelu kanałami przyspagowymi i rozdzielane odpowiednio na całej długości tunelu za pomocą regulowanych otworów wentylacyjnych umieszczonych w niewielkiej wysokości od poziomu jezdni lub toru. Wentylacja półpoprzeczna przyspagowa zapewnia jednolity rozdział powietrza na całej długości tunelu [4].



Rys. 2.13. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przyspagowa

Usytuowanie wylotów powietrza do tunelu w pobliżu jezdni tunelu umożliwia szybkie mieszanie się spalin z powietrzem od razu po wydostaniu się z układu wydechowego pojazdów.

Przy zastosowaniu takiego rozwiązania największa koncentracja zanieczyszczeń występuje w pobliżu jezdni tunelu.

W przypadku pożaru można zamknąć kanały usytuowane w bezpośredniej bliskości miejsca pożaru, tak aby nie doprowadzać powietrza do miejsca pożaru, a w innych miejscach tunelu można zwiększyć intensyfikację przewietrzania dla rozrzedzenia dymu poprzez otwarcie kanałów.

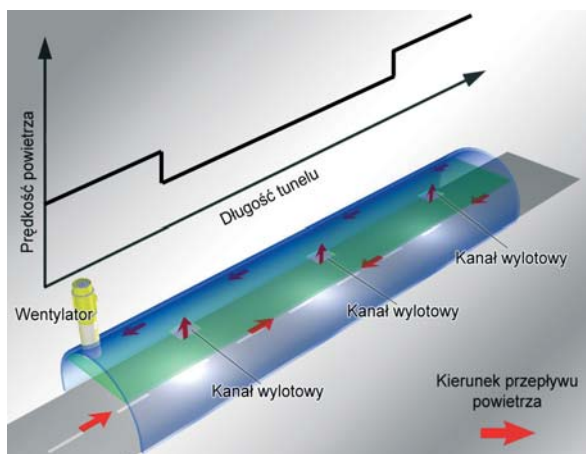
System ten w czasie pożaru daje także inną możliwość. W razie zagrożenia pożarowego można odwrócić kierunek przepływu powietrza, dzięki czemu dymy i gazy pożarowe mogą być odprowadzane do kanałów wentylacyjnych umieszczonych pod jezdnią. Rewersja wentylacji może ułatwić bezpieczną ewakuację użytkowników tunelu.

2.3.2.2. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przystropowa

Cechą charakterystyczną wentylacji mechanicznej półpoprzecznej przystropowej (rys. 2.14) jest to, że czyste powietrze wpływa do tunelu przez portale, a zanieczyszczone jest odprowadzane regulacyjnymi otworami do kanału lub kanałów wentylacyjnych znajdujących się w przystropowej części tunelu.

Przy zastosowaniu takiego rozwiązania największa koncentracja zanieczyszczeń występuje przy stropie tunelu [4].

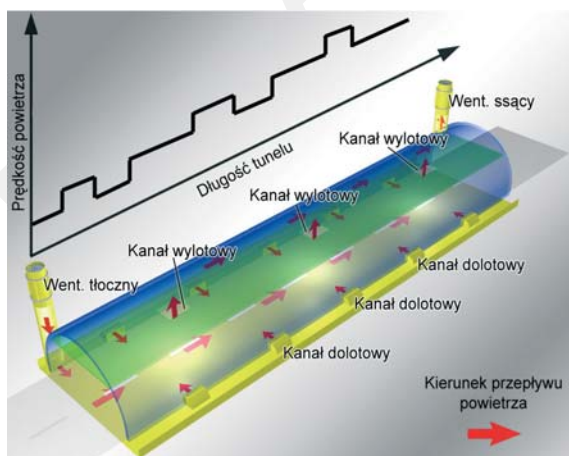
W przypadku pożaru można otworzyć otwory wentylacyjne usytuowane w bezpośredniej bliskości miejsca pożaru, aby umożliwić odprowadzanie dymów i gazów pożarowych do kanałów wentylacyjnych i ograniczyć rozprzestrzenianie się dymów i gazów na większej długości tunelu.



Rys. 2.14. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przystopowa

2.3.2.3. Wentylacja mechaniczna poprzeczna pełna

System wentylacji mechanicznej poprzecznej pełnej (rys. 2.15) jest połączeniem wentylacji półpoprzecznej przyspągowej i wentylacji półpoprzecznej przystopowej. Powietrze zawierające zanieczyszczenia stałe i gazowe jest odprowadzane przez kanały wylotowe znajdujące się przy stropie, a powietrze świeże doprowadza się przez kanały wlotowe rozmieszczone przy spągu.

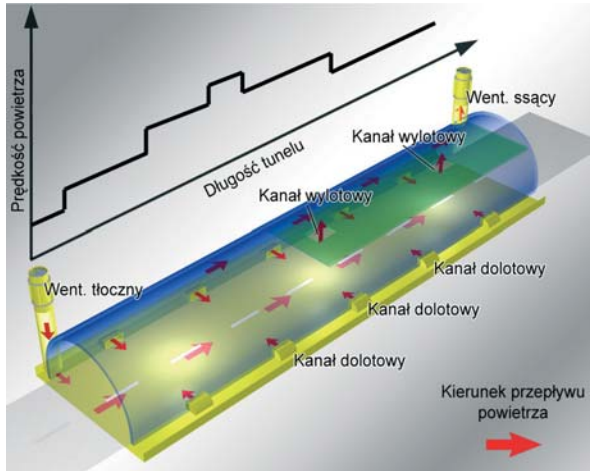


Rys. 2.15. Wentylacja mechaniczna poprzeczna pełna

Wentylacja mechaniczna poprzeczna pełna zazwyczaj jest stosowana dla przewietrzania długich tuneli i zagrożonych dużymi ilościami zanieczyszczeń stałych i gazowych. System ten zapewnia wysoki poziom bezpieczeństwa, szczególnie w przypadkach wystąpienia zagrożenia pożarowego.

2.3.3. Mieszane systemy wentylacji

Stosowane są także mieszane systemy wentylacji tuneli, łączące systemy wentylacji półpoprzecznej przyspągowej i wentylacji półpoprzecznej przystopowej (rys. 2.16).



Rys. 2.16. Wentylacja mechaniczna mieszana

Wiele tuneli, które nie wymagają przewietrzania mechanicznego, wymagają go w sytuacjach awaryjnych.

2.3.4. Specjalne systemy wentylacji

W przypadkach budowy skomplikowanych tuneli o dużym natężeniu ruchu pojazdów, a także dla osiągnięcia wysokiego poziomu bezpieczeństwa, zwłaszcza pożarowego, stosowane są specjalne systemy wentylacji tuneli np. system wentylacji w Eurotunelu.

Budownictwo tunelowe rozwinęło wiele nietypowych rozwiązań w zakresie wentylacji tuneli, a coraz wyższe wymagania w zakresie bezpieczeństwa stawiane tunelom sprawiają, że systemy wentylacyjne są bardziej skomplikowane.

Tunel Hai Van Pass (rys. 2.17) jest położony na odcinku autostrady A1 łączącej prowincję Thua Thien z Danang w centralnym Wietnamie [15]. Tunel jest położony na wysokości 1172 m n.p.m., pomiędzy dwoma mostami, a jego długość wynosi 6,3 km. Tunel w przekroju poprzecznym posiada wymiary: szerokość 11,5 m oraz wysokość 7,5 m. Wzdłuż tunelu podstawowego biegnie tunel konserwacyjny, który posiada 11 połączeń (przecinek) z tunelem podstawowym.

Wentylacja tunelu opiera się na systemie wentylacji wzdłużnej, z wlotem powietrza jednym a wylotem drugim portalem tunelu oraz szybem pochyłym. Specjalnie opracowany system wentylacyjny dla tego tunelu, z pochylonym szybem dwukomorowym, powoduje zasysanie zużytego powietrza przez jedną komorę sztolni, a doprowadzenie świeżego powiet-

rza drugą komorą sztolni. System posiada wentylatory tłoczące oraz ssące umieszczone w stacji wentylatorów na wzniesieniu, do którego biegnie szyb wentylacyjny. Wentylatory osiowe posiadają średnicę 3 m, a ich wydatek jest regulowany dzięki zmianie kąta nachylenia łopatek wirnika.



Rys. 2.17. System wentylacji tunelu Hai Van w Wietnamie [15]

System trzydziestu dwóch wentylatorów rozmieszczonych przy stropie tunelu, powoduje wzdłużny ruch powietrza w tunelu. Każdy z wentylatorów wzdłużnych posiada średnicę 1,5 m, a system filtrów elektrostatycznych redukuje zanieczyszczenia stałe i gazowe.

Tunel jest wyposażony w system kontroli wentylacji, korzystający z danych o wielkości ruchu, widoczności i stężeniu tlenku węgla w powietrzu, a także dobiera taką kombinację wentylacji, aby zużycie energii było jak najmniejsze przy zachowaniu odpowiednich norm dotyczących zanieczyszczeń. W przypadku wystąpienia pożaru wzdłużna prędkość powietrza w tunelu zostaje zahamowana poprzez system wentylatorów.

3. Projektowanie wentylacji tuneli komunikacyjnych

W tunelach komunikacyjnych systemy wentylacji powinny zapewnić:

- wymianę powietrza – aby nie zostały przekroczone stężenia zanieczyszczeń powietrza zagrażające przebywającym w tunelu użytkownikom;
- odprowadzanie nadmiaru ciepła wydzielanego przez samochody, oświetlenie oraz ludzi korzystających z tunelu, w takim stopniu aby nie powstała zbyt duża różnica temperatur w tunelu i poza nim;
- bezpieczeństwo i komfort jazdy – przez usuwanie dymów i sadzy ograniczających widoczność oraz regulowanie temperatury i ruchu powietrza;
- w przypadku zaistnienia pożaru ewakuację ludzi z tunelu i prowadzenie akcji przeciwpożarowej.

W tunelach drogowych podstawowym zagrożeniem dla ludzi są spaliny wydzielane przez silnik samochodowy, które składają się z gazów i substancji, takich jak dwutlenek węgla (CO_2), tlenek węgla (CO) metan (CH_4), nienasycone węglowodory, aldehydy, związki azotu, sadze, pary paliwa i smarów itp. Ze składników tych najbardziej niebezpieczny dla zdrowia i życia ludzkiego jest tlenek węgla (CO) ze względu na swą bardzo wysoką toksyczność.

Problemem może być także ciepło wydzielane z górotworu, przez pojazdy, oświetlenie oraz ludzi korzystających z tunelu.

W tunelach kolejowych problemy ochrony ludzi przed zagrożeniem gazami i substancjami szkodliwymi, jak i zapewnienia odpowiednich warunków cieplnych są mniejsze.

W związku z tym, że prawidłowa wentylacja wpływa bezpośrednio na bezpieczeństwo użytkowników i ekonomikę eksploatacji tuneli komunikacyjnych, zagadnienie projektowania wentylacji jest bardzo ważne.

Bardzo istotnym etapem projektowania jest wyznaczenie minimalnego wydatku strumienia powietrza w poszczególnych elementach tunelu, koniecznego dla opanowania zagrożenia:

- gazami wydzielanymi z silników spalinowych pojazdów;
- zadymieniem powietrza przez frakcje stałe znajdujące się w spalinach silnikowych;
- cieplnego powstałego w wyniku wydzielania ciepła przez górotwór i urządzenia stałe oraz poruszające się pojazdy w tunelu;
- pożarowego;

oraz spełnienia wymogów regulacji prawnych obowiązujących w tunelach.

Istnieje wiele metod określania koniecznego wydatku strumienia powietrza w tunelach charakteryzujących się różnymi stopniami skomplikowania i dokładności.

Po wyznaczeniu koniecznego wydatku powietrza prowadzone są dalsze prace pozwalające wyznaczyć:

- parametry depresji naturalnej i mechanicznej w tunelu,
- lokalizację i parametry urządzeń wentylacyjnych, takich jak wentylatory i tamy regulacyjne,
- rozptyły powietrza dla stanów ustalonych i nieustalonych, np. pożar, dynamiczne oddziaływanie ruchu pojazdów.

Ze względu na złożoność zagadnienia i bogate zasoby dostępnych materiałów w tym zakresie, przedstawiono tylko przykład rozwiązywania i projektowania wentylacji dla tunelu drogowego. Zasady te mogą być wykorzystane także w przypadkach projektowania wentylacji dla innych rodzajów tuneli komunikacyjnych w stopniu dostosowanym do występujących zagrożeń.

3.1. Ruch pojazdów w tunelach drogowych

Pojazdy samochodowe zasadniczo wyposażone są w silniki spalinowe i wysokoprężne. Jako paliwo w silnikach spalinowych stosowana jest benzyna, a w silnikach wysokoprężnych olej napędowy. Wykorzystywane są także alternatywne paliwa jak gaz naturalny (CNG) oraz gaz płynny (LPG).

Silniki samochodowe wytwarzają spaliny emitowane przez układy wydechowe do atmosfery. Większość pasażerskiego ruchu jest prowadzona przez samochodowe silniki spalinowe, których paliwem jest benzyna. Ruch samochodów ciężarowych, jak i autobusów jest obsługiwany przez samochody napędzane silnikami wysokoprężnymi, których paliwem jest olej napędowy.

Za podstawowe substancje zanieczyszczające atmosferę, emitowane przez silniki spalinowe, uważa się:

- tlenek węgla (CO);
- węglowodory (C_xH_y);
- aldehydy (RCHO), z których największe stężenie posiada formaldehyd;
- sadza (C);
- tlenki azotu (NO_x), jest to ogólne określenie tlenku azotu (NO) powstającego w komorze spalania w wysokich temperaturach w wyniku reakcji tlenu z azotem, oraz dwutlenku azotu (NO_2) powstającego w wyniku utleniania tlenku azotu;
- dwutlenek siarki (SO_2).

Substancje zanieczyszczające atmosferę emitowane do atmosfery tunelu, są zazwyczaj w postaci:

- gazowej: tlenek węgla, tlenki azotu, część węglowodorów i aldehydów oraz dwutlenek siarki;
- ciekłej: niektóre węglowodory i aldehydy;
- stałej: sadza i ciężkie węglowodory.

W tabeli 3.1 przedstawiono przeciętny skład gazów spalinowych. Rozbieżności wynikają z różnic konstrukcyjnych i regulacyjnych, warunków pracy, obciążeń, prędkości obrotowych silników poddawanych badaniom, a także z niejednakowych metod pomiarowych.

Tabela 3.1

Przeciętny ilościowy skład gazów spalinowych silników z zapłonem samoczynnym [34]

| Lp. | Składnik gazów | Jednostka | Zawartość | Ocena toksyczności |
|-----|----------------|------------------|-------------|--------------------|
| 1 | Azot | % | 76–78 | obojętny |
| 2 | Tlen | % | 2–18 | obojętny |
| 3 | Para | % | 0,5–4 | obojętna |
| 4 | Ditlenek węgla | % | 1,0–10,0 | duszający |
| 5 | Tlenek węgla | % | 0,01–0,5 | toksyczny |
| 6 | Tlenki azotu | % | 0,002–0,5 | toksyczne |
| 7 | Węglowodory | % | 0,009–0,5 | toksyczne |
| 8 | Aldehydy | % | 0,001–0,009 | toksyczne |
| 9 | Sadza | g/m ³ | 0,01–110 | toksyczna |
| 10 | 3,4 benzopiren | mg/m | do 10 | rakotwórczy |

Analiza spalin silników Diesla, których paliwem jest olej napędowy, wykonana w USA, przedstawiona jest w tabeli 3.2.

Tabela 3.2

Skład procentowy spalin silnika wysokoprężnego [4]

| Lp. | Składnik gazów | Jednostki | Skład procentowy spalin | Ocena toksyczności |
|-----|---------------------|-----------|-------------------------|--------------------|
| 1 | Tlenek węgla (max.) | % | 0,100 | toksyczny |
| 2 | Tlenek węgla (min.) | % | 0,020 | toksyczny |
| 3 | Ditlenek węgla | % | 9,000 | duszający |
| 4 | Tlenki azotu | % | 0,040 | toksyczne |
| 5 | Dwutlenek siarki | % | 0,020 | toksyczny |
| 6 | Aldehydy | % | 0,002 | toksyczne |
| 7 | Formaldehydy | % | 0,001 | toksyczne |

3.2. Metody wyznaczania wydatku powietrza w tunelu

Istnieje wiele metod określania koniecznego wydatku strumienia powietrza w tunelach charakteryzujących się różnymi stopniami skomplikowania i dokładności.

3.2.1. Metoda M. Pulsforta

Jedną z metod wyznaczenia minimalnego wydatku strumienia powietrza w tunelu jest metoda M. Pulsforta [30]. Określa ona wydatek powietrza w tunelu w zależności od wydatków strumienia dopływu do tunelu zanieczyszczeń stałych i gazowych, a w szczególności tlenku węgla i dymu z sadzą.

Minimalny wydatek strumienia powietrza w tunelu Q_z (m^3/h) ze względu na zagrożenie tlenkiem węgla możemy wyznaczyć z zależności

$$Q_z = \frac{q_{CO} x_v x_i x_w}{3600} D \frac{10^2}{CO_{dop}} L \quad (3.1)$$

gdzie:

q_{CO} – wydatek tlenku węgla w spalinach emitowanych przez samochód w ciągu godziny, $m^3/h/sam.$;

x_v – współczynniki korygujący ze względu na prędkość pojazdów;

x_i – współczynniki korygujący ze względu na nachylenie tunelu;

x_w – współczynniki korygujący ze względu na wysokość tunelu;

D – natężenie ruchu, przy czym $D = \frac{M}{v}$, $sam./km$;

M – wielkość ruchu, sam/h ;

v – prędkość ruchu, km/h ;

CO_{dop} – dopuszczalna koncentracja tlenku węgla, %;

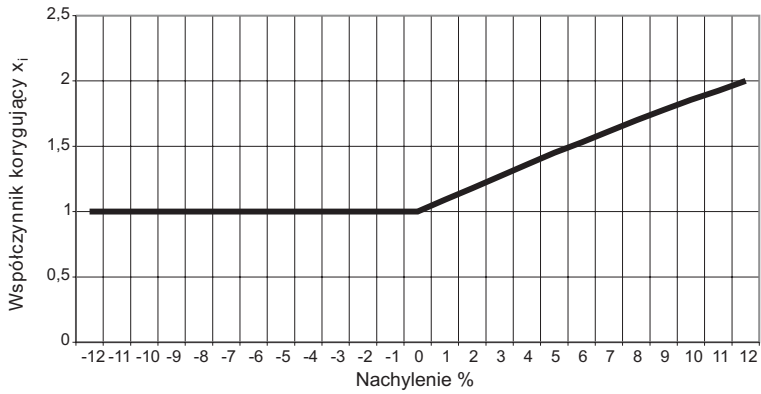
L – długość tunelu, km .

Tabela 3.3 przedstawia wielkość emisji zanieczyszczeń stałych i gazowych w spalinach silników pojazdów, w tym także dla samochodów ciężarowych.

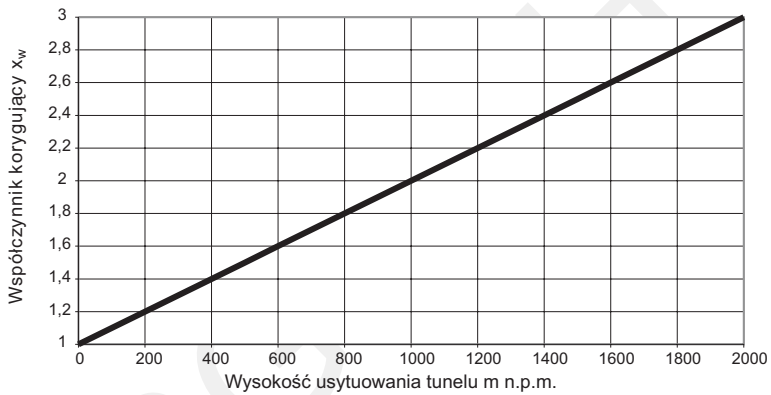
Tabela 3.3
Wartości emisji

| Wartości emisji | | | | | | |
|-----------------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------|---------------------------|-----------------------|
| Środek transportu | Samochody z rocznika 1995 | | Samochody z rocznika 2000 | | Samochody z rocznika 2010 | |
| | CO ($m^3/h/sam$) | Dym ($m^3/h/sam$) | CO ($m^3/h/sam$) | Dym ($m^3/h/sam$) | CO ($m^3/h/sam$) | Sadza ($m^3/h/sam$) |
| Samochody osobowe | 0,25 | 40 | 0,14 | 20 | 0,14 | 15 |
| Samochody ciężarowe do 15 t | 0,25 | 190 | 0,14 | 160 | 0,14 | 130 |
| Samochody ciężarowe do 30 t | 0,25 | 250 | 0,14 | 215 | 0,14 | 180 |

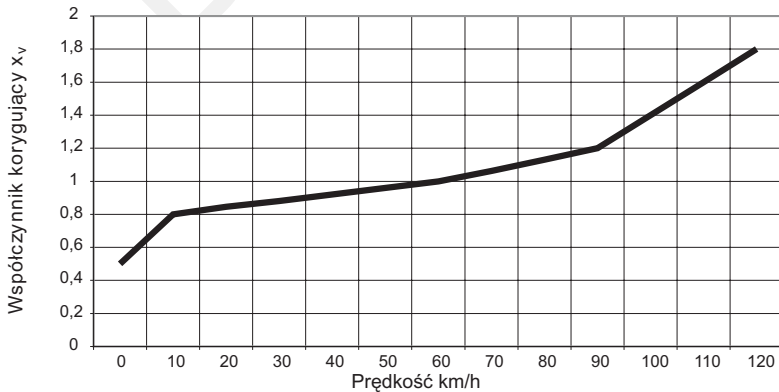
Wartości współczynników korygujących przedstawiają rysunki 3.1, 3.2 i 3.3.



Rys. 3.1. Współczynniki x_i , dla samochodów osobowych w zależności od różnych nachyleń niwelety drogi



Rys. 3.2. Współczynniki x_w , ze względu na wysokość usytuowania tunelu, dla samochodów ciężarowych i osobowych



Rys. 3.3. Współczynniki x_v , dla samochodów osobowych, w zależności od prędkości pojazdów

Minimalny wydatek strumienia powietrza w tunelu można wyznaczyć dla maksymalnego natężenia ruchu pojazdów. Tabela 3.4 przedstawia możliwe wielkości natężenia ruchu w miastach oraz poza obszarami miejskimi. Dla ułatwienia przeliczeń można przyjąć: 1 samochód ciężarowy = 2 samochody osobowe.

Tabela 3.4
Maksymalne wartości natężenia ruchu pojazdów samochodowych [30]

| Rodzaj utrudnienia ruchu | Prędkość km/h | Maksymalne wartości natężenia ruchu pojazdów samochodowych/km/pas ruchu | | | |
|--------------------------|---------------|---|---------------|------------------|---------------|
| | | Pozamiejskie tunele | | Miejskie tunele | |
| | | Jedno-kierunkowe | Dwukierunkowe | Jedno-kierunkowe | Dwukierunkowe |
| Płynny ruch | 60 | 30 | 23 | 33 | 25 |
| Utrudniony | 10 | 70 | 60 | 100 | 85 |
| Zator | 0 | 150 | 150 | 165 | 165 |

Wartości natężenia ruchu pojazdów w tunelu można także szacować z uwzględnieniem wpływu nachylenia tunelu na prędkość poruszania się samochodów. Zależność prędkości poruszania się samochodów od nachylenia niwelety drogi przedstawia tabela 3.5.

Tabela 3.5
Zależność prędkości pojazdu od nachylenia tunelu [30]

| Nachylenie tunelu [%] | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Prędkość pojazdu [km/h] | 80 | 80 | 70 | 55 | 45 | 40 | 35 |

Największe dopuszczalne koncentracje tlenu węgla należy przyjmować, uwzględniając odpowiednie przepisy prawne i wielkości przedstawione w tabeli 3.6.

Tabela 3.6
Wartości dopuszczalnych koncentracji CO i współczynnika s [30]

| Stan ruchu | Koncentracja CO [%] | Współczynnik $K \cdot 10^{-3}$ [1/m] |
|--|---------------------|--------------------------------------|
| Płynny ruch $v = 50-100$ km/h | 0,01 | 5 |
| Codzienny utrudniony ruch, zastój na wszystkich pasach ruchu | 0,01 | 7 |
| Wyjątkowo utrudniony ruch, postój na wszystkich pasach ruchu | 0,015 | 9 |
| Dłużej trwające prace konserwacyjne w tunelu, podczas ruchu | 0,026 | 3 |
| Zamknięcie tunelu | 0,025 | 12 |

Przy projektowaniu wentylacji tuneli należy także uwzględnić zawartość tlenku węgla występującą w powietrzu atmosferycznym w danym rejonie, a w przypadku braku danych pomiarowych można przyjmować koncentrację tlenku węgla w powietrzu atmosferycznym – 0,0002% dla terenów pozamiejskich, 0,0005% dla terenów miejskich oraz 0,0015% dla terenów o szczególnym natężeniu ruchu pojazdów.

Minimalny wydatek strumienia powietrza Q_D (m^3/s) w tunelu, biorąc za kryterium widoczność i rozrzedzenie dymu, można wyznaczyć z zależności

$$Q_D = \frac{q_D x_{vi} x_w}{3600} D \frac{1}{K_{dop}} L \quad (3.2)$$

gdzie:

q_D – emisja dymu przez samochód w ciągu godziny, $m^2/h/sam.$;

x_{iv} – współczynniki korygujący prędkości i nachylenie;

x_w – współczynniki korygujący wysokości;

D – natężenie ruchu, przy czym $D = \frac{M}{v}$, $sam./km$;

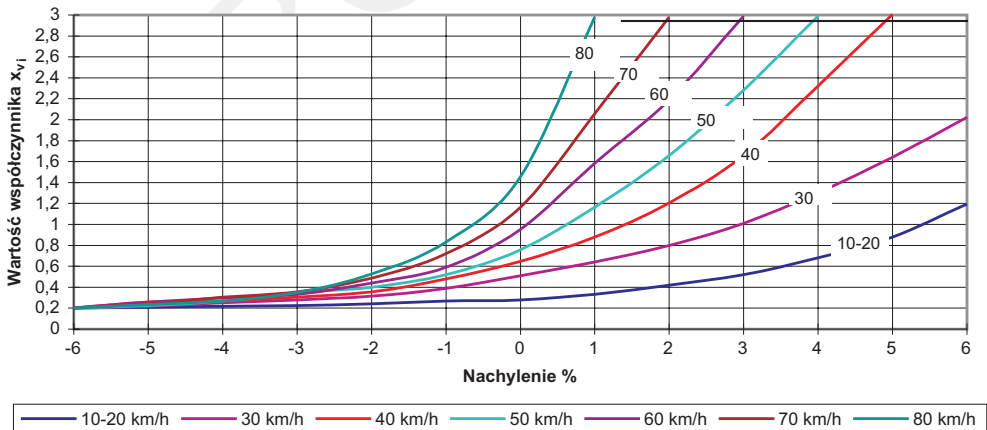
M – wielkość ruchu, $sam./h$;

v – prędkość ruchu, km/h ;

K_{dop} – dopuszczalna koncentracja dymu, $1/m$;

L – długość tunelu, km .

Przy większym obciążeniu silników (np. przy szybkiej jeździe przy dużym nachyleniu) w sposób znaczący powiększa się emisja dymu. Rysunek 3.4 przedstawia zależność współczynników x_{vi} od prędkości i nachylenia niwelety tunelu.



Rys. 3.4. Współczynnik x_{vi} zależny od prędkości i nachylenia niwelety tunelu dla samochodów ciężarowych

3.2.2. Metoda A.G. Bendeliusa

Problem wyznaczania minimalnego wydatku powietrza dla projektowanego tunelu opracował także A.G. Bendelius [4], a podstawowe elementy jego metodyki obliczeniowej przedstawiono w niniejszym rozdziale.

Metoda sprowadza się do wyznaczania minimalnego wydatku strumienia powietrza w tunelu koniecznego do rozrzedzenia: tlenu węgla, tlenków azotu i dymów poniżej koncentracji dopuszczalnych określonych odpowiednimi przepisami prawnymi. W związku z tym musimy wyznaczyć odpowiednie wielkości.

1. Natężenie ruchu pojazdów w tunelu można wyznaczyć z zależności

$$N_R = \frac{3600}{T_S} \quad (3.3)$$

gdzie:

N_R – natężenie ruchu pojazdów w tunelu, sam./h;

T_S – średni czas pojawiania się samochodu w danym przekroju tunelu, s/sam.

Średni czas pojawiania się samochodu można przyjmować

- dla ruchu o dużym natężeniu 1,8 s;
- dla ruchu o małym natężeniu 9–12 s.

2. Natężenie ruchu pojazdów można wyznaczyć także z zależności

$$N_R = \frac{v_s}{l_s} \quad (3.4)$$

gdzie:

N_R – natężenie ruchu pojazdów w tunelu, sam./h;

v_s – prędkość jazdy pojazdów, km/h;

l_s – średnia odległość pomiędzy pojazdami (w tunelu mierzona „przód od przodu”), m/sam.

3. Gęstość ruchu pojazdów w tunelu można wyznaczyć z zależności

$$G_R = \frac{N_R}{v} \quad (3.5)$$

gdzie:

G_R – gęstość ruchu pojazdów, sam./km;

N_R – natężenie ruchu pojazdów w tunelu, sam./h;

v – prędkość jazdy pojazdów, km/h.

4. Średni wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach samochodowych przez pojazdy osobowe do tunelu można wyznaczyć z zależności

$$\dot{V}O_{CO} = V_{so} L G_R k_w k_{vi} k_r \quad (3.6)$$

gdzie:

- $\dot{V}O_{CO}$ – średni wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy osobowe do tunelu, m^3/h ;
- V_{so} – wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach emitowanych przez pojazd, $m^3/h/sam.$;
- L – długość tunelu, m ;
- G_R – gęstość ruchu pojazdów w tunelu, $sam./km$;
- k_w – współczynnik korygujący zależny od średniej wysokości tunelu m n.p.m. (rys. 3.5);
- k_{vi} – współczynnik korygujący zależny od prędkości pojazdów i nachylenia niwelety tunelu (rys. 3.6);
- k_r – współczynnik rezerwy wydatku powietrza w tunelu ze względu na wpływ innych czynników, który można przyjmować od 1,2 do 1,5 w zależności od możliwości wystąpienia dodatkowych zjawisk związanych z przepływami powietrza.

5. Średni wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy ciężarowe do tunelu można wyznaczyć z zależności

$$\dot{V}C_{CO} = V_{sc} L G_R k_w k_{vi} k_r \quad (3.7)$$

gdzie:

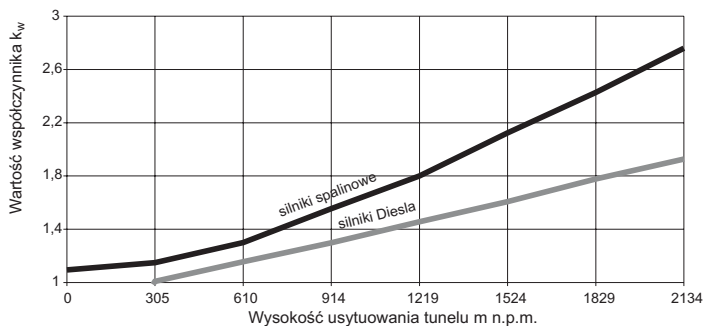
- $\dot{V}O_{CO}$ – średni wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy ciężarowe do tunelu, m^3/h ;
- V_{so} – wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach emitowanych przez pojazd, $m^3/h/sam.$;
- L – długość tunelu, m ;
- G_R – gęstość ruchu pojazdów w tunelu, $sam./km$;
- k_w – współczynnik korygujący zależny od średniej wysokości tunelu m n.p.m. (rys. 3.5);
- k_{vi} – współczynnik korygujący zależny od prędkości jazdy pojazdów i nachylenia niwelety tunelu (rys. 3.7);
- k_r – współczynnik rezerwy wydatku powietrza w tunelu ze względu na wpływ innych czynników, który można przyjmować od 1,2 do 1,5 w zależności od możliwości wystąpienia dodatkowych zjawisk związanych z przepływami powietrza.

6. Całkowity wydatek strumienia tlenu węgla emitowanego do tunelu przez samochody osobowe i ciężarowe można wyznaczyć z zależności

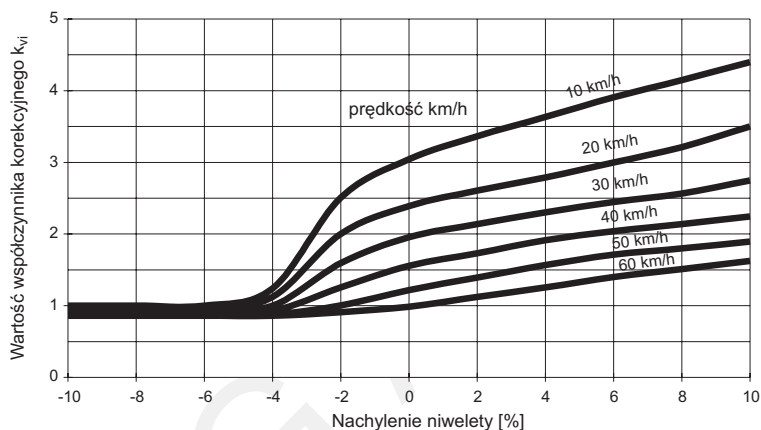
$$\dot{V}C_{co} = \dot{V}O_{co} + \dot{V}C_{co} \quad (3.8)$$

gdzie:

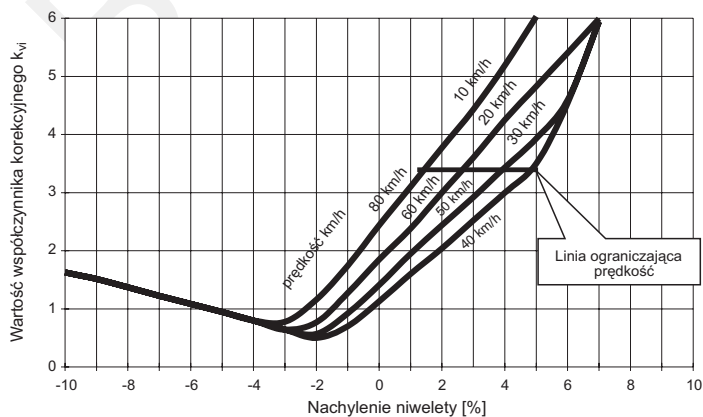
- $\dot{V}C_{co}$ – całkowity wydatek strumienia tlenu węgla w tunelu, m^3/h ;
- $\dot{V}O_{co}$ – średni wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy osobowe do tunelu, m^3/h ;
- $\dot{V}C_{co}$ – średni wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy ciężarowe do tunelu, m^3/h .



Rys. 3.5. Współczynniki k_w dla samochodów z silnikami spalinowymi i Diesla zależne od położenia tunelu nad poziomem morza



Rys. 3.6. Współczynniki k_{vi} dla samochodów osobowych zależne od prędkości jazdy i nachylenia niwelety tunelu



Rys. 3.7. Współczynniki k_{vj} dla samochodów ciężarowych zależne od prędkości jazdy i nachylenia niwelety drogi

7. Minimalny wydatek strumienia powietrza konieczny do rozrzedzenia tlenku węgla w tunelu do koncentracji dopuszczalnej przez odpowiednie przepisy prawne można wyznaczyć z zależności

$$\dot{V}_{pco} = \frac{100\dot{V}_{co}}{(C_d - C_z)} \quad (3.9)$$

gdzie:

- \dot{V}_{pco} – minimalny wydatek strumienia powietrza w tunelu ze względu na emisję tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy w tunelu, m³/h
- \dot{V}_{co} – całkowity wydatek strumienia tlenku węgla, m³/h;
- C_d – dopuszczalna koncentracja tlenku węgla w tunelu określona przepisami prawnymi, %;
- C_z – koncentracja tlenku węgla w powietrzu atmosferycznym doprowadzanym do tunelu, %.

8. Wydatek strumienia powietrza konieczny do rozrzedzenia dymów spalinowych w tunelu można określić z zależności

$$\dot{V}_D = \frac{\dot{V}C_D}{K_D} \quad (3.10)$$

gdzie:

- \dot{V}_D – minimalny wydatek strumienia powietrza w tunelu ze względu na emisję dymów w spalinach emitowanych przez pojazdy w tunelu, m³/h;
- $\dot{V}C_D$ – koncentracja dymów spalinowych samochodów ciężarowych, m²/h;
- K_D – współczynnik dopuszczalnej wielkości określającej widoczność, 1/m.

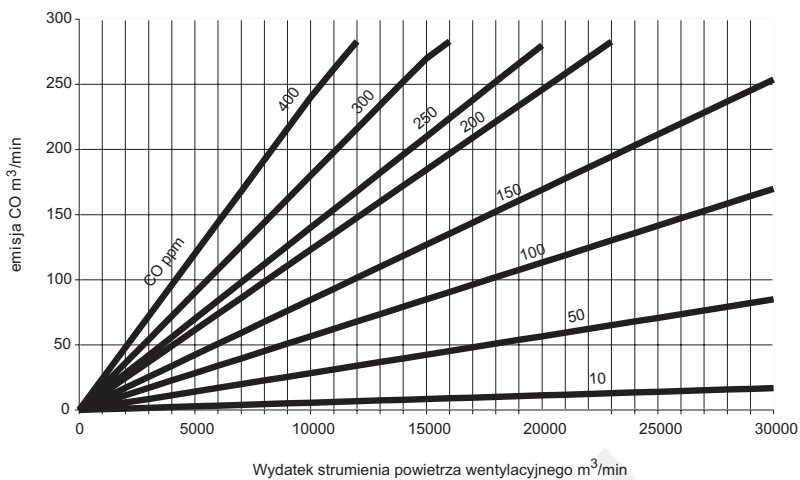
9. Minimalny wydatek powietrza konieczny do rozrzedzenia tlenków azotu do koncentracji dopuszczalnej odpowiednimi przepisami prawnymi można określić z zależności

$$\dot{V}_{pco} = \frac{100\dot{V}_{nz}}{(C_{dNz} - C_{zNz})} \quad (3.11)$$

gdzie:

- \dot{V}_{pNz} – minimalny wydatek strumienia powietrza w tunelu ze względu na emisję tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy w tunelu, m³/h;
- \dot{V}_{Nz} – całkowity wydatek strumienia tlenku węgla, m³/h;
- C_{dNz} – dopuszczalna koncentracja tlenku węgla w tunelu określona przepisami prawnymi, %;
- C_{zNz} – koncentracja tlenku węgla w powietrzu atmosferycznym doprowadzanym do tunelu, %.

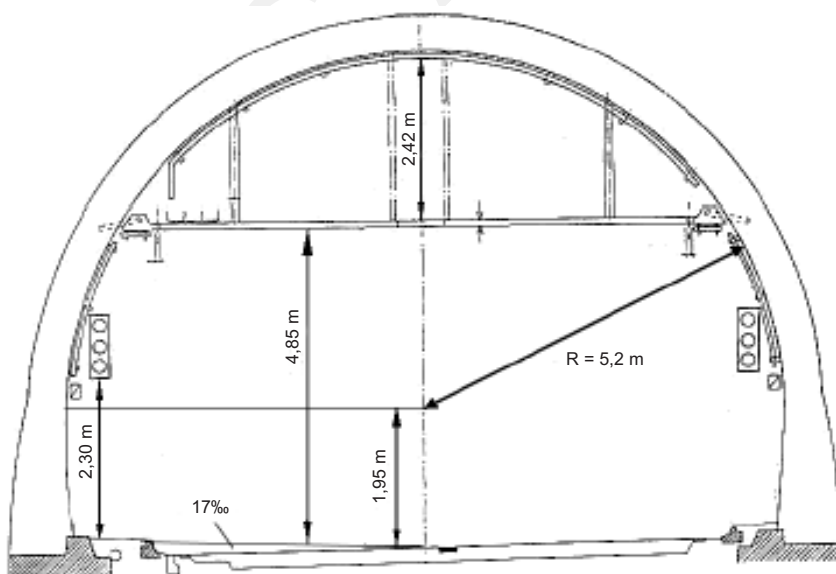
Rysunek 3.8 przedstawia w sposób przybliżony zależność wydatku strumienia powietrza od emisji tlenku węgla w gazach spalinowych.



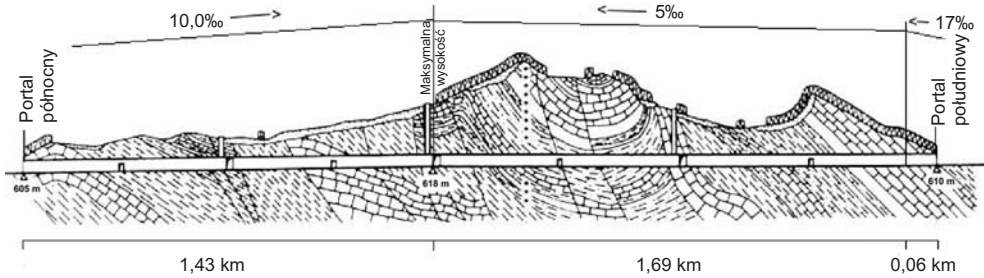
Rys. 3.8. Wydatek strumienia powietrza zależny od emisji tlenku węgla w gazach spalinowych i koncentracji tlenku węgla w tunelu

3.3. Przykłady obliczeń

Obliczenia wentylacyjne przeprowadzono dla warunków techniczno-ruchowych występujących w tunelu Belchen. Przekrój poprzeczny tego tunelu prezentuje rysunek 3.9, a przekrój podłużny – rysunek 3.10.



Rys. 3.9. Przekrój poprzeczny tunelu Belchen



Rys. 3.10. Przekrój podłużny tunelu Belchen

3.3.1. Obliczanie minimalnego wydatku powietrza w tunelu metodą M. Pulsforta

Dane dotyczące tunelu

| Charakterystyka | Część tunelu | | |
|-----------------|--------------|------|-----|
| | 1 | 2 | 3 |
| Długość, m | 1430 | 1960 | 60 |
| Nachylenie | -10‰ | 9,8‰ | 17‰ |

Tunel składa się z dwóch kanałów (tunel podwójny), w każdej z części znajdują się dwa pasy ruchu z ruchem w tym samym kierunku.

Przez tunel przejeżdża średnio 37 700 samochodów dziennie (1570 sam./h), w tym 17% ciężarowych (267 sam./h), oraz 83% osobowych (1303 sam./h).

Portale tunelu są umieszczone na wysokościach:

- północny – 515 m n.p.m.,
- południowy – 510 m n.p.m.

Prędkość pojazdów – 60 km/h.

1. Obliczanie minimalnego wydatku strumienia powietrza w tunelu ze względu na koncentrację tlenu węgla Q_z ($m^3/s/km$).

| Część tunelu | Kierunek Północ – Południe | Wartość wydatku strumienia powietrza (m^3/s) |
|--------------|--|--|
| 1 | $Q_z = \frac{0,25 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1,5}{3600} \cdot 26,16 \cdot \frac{10^2}{0,015}$ | 20,0 |
| 2 | $Q_z = \frac{0,25 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1,5}{3600} \cdot 26,16 \cdot \frac{10^2}{0,015}$ | 18,2 |
| 3 | $Q_z = \frac{0,25 \cdot 1 \cdot 1,1 \cdot 1,5}{3600} \cdot 26,16 \cdot \frac{10^2}{0,015}$ | 18,2 |

| Część tunelu | Kierunek Południe – Północ | Wartość wydatku strumienia powietrza (m ³ /s) |
|--------------|---|---|
| 1 | $Q_z = \frac{0,25 \cdot 1,2 \cdot 1,5}{3600} \cdot 26,16 \cdot \frac{10^2}{0,015}$ | 21,8 |
| 2 | $Q_z = \frac{0,25 \cdot 1,1,05 \cdot 1,5}{3600} \cdot 26,16 \cdot \frac{10^2}{0,015}$ | 19,1 |
| 3 | $Q_z = \frac{0,25 \cdot 1 \cdot 1,5}{3600} \cdot 26,16 \cdot \frac{10^2}{0,015}$ | 18,2 |

Z obliczeń należy przyjąć wartość maksymalną $Q_z = 21,8 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$. W związku z tym w tunelu należy zapewnić wydatek strumienia powietrza $Q_z = 21,8 \cdot 3,2 \text{ km} = 69,76 \text{ m}^3/\text{s}$.

- Obliczenia minimalnego wydatku powietrza ze względu na kryterium widoczności świeżego dymu Q_D (m³/s/km).

Z obliczeń należy przyjąć wartość maksymalną $Q_D \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}$. W związku z tym w tunelu należy zapewnić wydatek strumienia powietrza wynoszący $Q_D = 0,194 \cdot 3,2 = 0,62 \text{ m}^3/\text{s}$.

| Część tunelu | Kierunek Północ – Południe | Wartość wydatku strumienia powietrza (m ³ /s) |
|--------------|---|---|
| 1 | $Q_D = \frac{250 \cdot 1,6 \cdot 1,5}{3600} \cdot 4,45 \cdot \frac{1}{5}$ | 0,148 |
| 2 | $Q_D = \frac{250 \cdot 0,7 \cdot 1,5}{3600} \cdot 4,45 \cdot \frac{1}{5}$ | 0,065 |
| 3 | $Q_D = \frac{250 \cdot 0,5 \cdot 1,5}{3600} \cdot 4,45 \cdot \frac{1}{5}$ | 0,046 |

| Część tunelu | Kierunek Południe – Północ | Wartość wydatku strumienia powietrza (m ³ /s) |
|--------------|---|---|
| 1 | $Q_D = \frac{250 \cdot 2,1 \cdot 1,5}{3600} \cdot 4,45 \cdot \frac{1}{5}$ | 0,194 |
| 2 | $Q_D = \frac{250 \cdot 1,2 \cdot 1,5}{3600} \cdot 4,45 \cdot \frac{1}{5}$ | 0,111 |
| 3 | $Q_D = \frac{250 \cdot 0,6 \cdot 1,5}{3600} \cdot 4,45 \cdot \frac{1}{5}$ | 0,056 |

- Wniosek: W tunelu należy zapewnić wydatek strumienia powietrza wynoszący co najmniej $70 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.3.2. Obliczanie minimalnego wydatku powietrza w tunelu metodą A.G. Bendeliusa

1. Gęstość ruchu

– samochody osobowe

$$G_R = \frac{1303}{60 \cdot 1000} = 0,02171 \text{ sam./m,}$$

– samochody ciężarowe

$$G_R = \frac{267}{60 \cdot 1000} = 0,00445.$$

2. Wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach samochodów osobowych $\dot{V}O_{co}$

| Część tunelu | Kierunek Północ – Południe | Wartość wydatku strumienia CO przez samochody osobowe (m ³ /h) |
|--------------|---|---|
| 1 | $\dot{V}O_{co} = 0,25 \cdot 1430 \cdot 0,021718 \cdot 1,1 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 11,1 |
| 2 | $\dot{V}O_{co} = 0,25 \cdot 1960 \cdot 0,021718 \cdot 0,95 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 13,1 |
| 3 | $\dot{V}O_{co} = 0,25 \cdot 60 \cdot 0,021718 \cdot 0,85 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 3,6 |

| Część tunelu | Kierunek Południe – Północ | Wartość wydatku strumienia CO przez samochody osobowe (m ³ /h) |
|--------------|---|---|
| 1 | $\dot{V}O_{co} = 0,25 \cdot 1430 \cdot 0,021718 \cdot 1,15 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 11,6 |
| 2 | $\dot{V}O_{co} = 0,25 \cdot 1960 \cdot 0,021718 \cdot 1 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 13,8 |
| 3 | $\dot{V}O_{co} = 0,25 \cdot 60 \cdot 0,021718 \cdot 0,9 \cdot 1,3 \cdot 1$ | 3,8 |

3. Wydatek strumienia tlenu węgla w spalinach samochodów ciężarowych $\dot{V}C_{co}$

| Część tunelu | Kierunek Północ – Południe | Wartość wydatku strumienia CO przez samochody osobowe (m ³ /h) |
|--------------|--|---|
| 1 | $\dot{V}C_{co} = 0,25 \cdot 1430 \cdot 0,00444 \cdot 2,5 \cdot 1,1 \cdot 1$ | 4,36 |
| 2 | $\dot{V}C_{co} = 0,25 \cdot 1960 \cdot 0,00444 \cdot 0,85 \cdot 1,1 \cdot 1$ | 2,01 |
| 3 | $\dot{V}C_{co} = 0,25 \cdot 60 \cdot 0,00444 \cdot 0,65 \cdot 1,1 \cdot 1$ | 0,47 |

| Część tunelu | Kierunek Południe – Północ | Wartość wydatku strumienia CO przez samochody osobowe (m ³ /h) |
|--------------|---|---|
| 1 | $\dot{V}C_{co} = 0,25 \cdot 1430 \cdot 0,00444 \cdot 0,7 \cdot 1,1 \cdot 1$ | 1,22 |
| 2 | $\dot{V}C_{co} = 0,25 \cdot 1960 \cdot 0,00444 \cdot 2,1 \cdot 1,1 \cdot 1$ | 5,03 |
| 3 | $\dot{V}C_{co} = 0,25 \cdot 60 \cdot 0,00444 \cdot 2,75 \cdot 1,1 \cdot 1$ | 2,03 |

4. Całkowity wydatek strumienia CO w spalinach doprowadzanych do tunelu przez samochody osobowe i ciężarowe

$$\dot{V}_{co} = (11,6 + 13,8 + 3,8) + (4,6 + 5,03 + 2,03) = 0,62 \text{ m}^3/\text{h}.$$

5. Minimalny wydatek strumienia powietrza konieczny do rozrzedzenia tlenku węgla w tunelu do koncentracji dopuszczalnej – 0,015%

$$\dot{V}_{pco} = \frac{100 \cdot 40,62}{(0,015 - 0,001)} = 290\,142 \text{ m}^3/\text{h} = 80,59 \text{ m}^3/\text{s}.$$

6. Wydatek strumienia powietrza konieczny do rozrzedzenia dymów spalinowych w tunelu

$$\dot{V}_D = \frac{250}{0,005} = 50\,000 \text{ m}^3/\text{h} = 13,88 \text{ m}^3/\text{s}.$$

7. Wniosek: w tunelu należy zapewnić wydatek strumienia powietrza co najmniej 81 m³/s.

3.4. Metody wyznaczania depresji naturalnej

Przepływ powietrza w tunelu występuje głównie pod wpływem działania depresji naturalnej i depresji wentylatorów.

W przypadku wentylacji naturalnej w tunelach może występować duża zmienność stanów przewietrzania, spowodowana następującymi przyczynami: działaniem wiatru, różnicą ciśnień powietrza przy wlotach tunelu oraz różnicą temperatur wewnątrz i zewnątrz tunelu.

Działanie wiatru i powstały na skutek tego ruch powietrza w tunelu zależy od ukształtowania powierzchni terenu w sąsiedztwie wlotów, zgodności trasy tunelu z kierunkiem działania najczęściej zdarzających się wiatrów oraz od stopnia zasłonięcia wlotów. Są to czynniki trudno uchwytnie i mogą być określone tylko w drodze obserwacji. Najczęściej dla uzyskania większej pewności, że zanieczyszczenie powietrza nie przekroczy koncentracji dopuszczalnej przyjmuje się, że istnieje pogoda bezwietrzna.

Różnice ciśnienia atmosferycznego przy wlotach tunelu również zależne są od kilku przyczyn: jedną z nich jest różnica powstała na skutek niwelacyjnych różnic wysokości wlotów, drugą różnica ciśnień związanych ze zjawiskami meteorologicznymi. Wielkość depresji naturalnej generowanej w tunelu można wyznaczyć z zależności [28]

$$h_n = (p_w - p_d) - g\zeta(z_w - z_d) \quad (3.12)$$

gdzie:

- h_n – depresja naturalna, Pa;
- p_d – ciśnienie powietrza w portalu, w którym powietrze dopływa do tunelu, Pa;
- p_w – ciśnienie powietrza w portalu, w którym powietrze wypływa z tunelu, Pa;
- z_d – wysokość niwelacyjna portalu, w którym powietrze dopływa do tunelu, m;
- z_w – wysokość niwelacyjna portalu, w którym powietrze wypływa z tunelu, m;
- ζ – średnia gęstość masy powietrza w tunelu, kg/m³;
- g – przyspieszenie ziemskie, m/s².

3.5. Wentylacja mechaniczna

W wielu przypadkach przepływ powietrza w tunelach komunikacyjnych zostaje wymuszony przez działanie wentylatorów. Szczególnie stan taki występuje, gdy wielkość depresji naturalnej w tunelu jest niewystarczająca dla zapewnienia stabilnego przepływu powietrza dla warunków normalnych i awaryjnych, jak na przykład zagrożenie pożarowe. Wymogi te są także określone przez prawo.

Ze względu na zasady działania wentylatory dzieli się na:

- wentylatory promieniowe, zwane także odśrodkowymi,
- wentylatory osiowe.

Zależności pomiędzy wytwarzaną przez wentylator depresją a jego wydatkiem często są graficznie przedstawiane i nazywane charakterystyką wentylatora. Każdy wentylator ma swoją charakterystykę przepływową zależną głównie od rodzaju wentylatora (promieniowe i osiowe), średnicy wirnika, konstrukcji łopatek i prędkości obrotowych.

Parametry pracy wentylatorów mogą być regulowane za pomocą:

- zmian prędkości obrotowej wirnika,
- kąta nachylenia łopatek wirnika,
- aparatu kierowniczego.

Charakterystykę przepływową tunelu można opisać równaniem

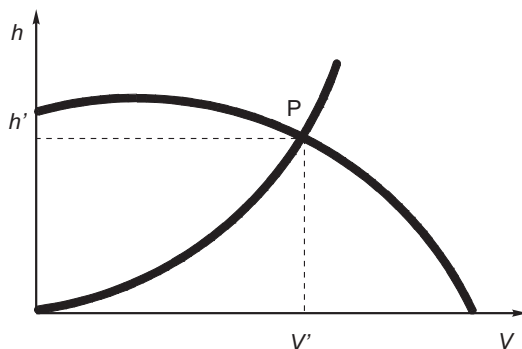
$$\Delta h = RV^2 \quad (3.13)$$

gdzie:

- Δh – spadek naporu aerodynamicznego powietrza w tunelu Pa;
- R – opór aerodynamiczny tunelu Ns²/m⁸;
- V – wydatek strumienia przepływu powietrza w tunelu m³/s.

Punkt P przecięcia charakterystyk wentylatora i tunelu nosi nazwę punktu pracy wentylatora (rys. 3.11).

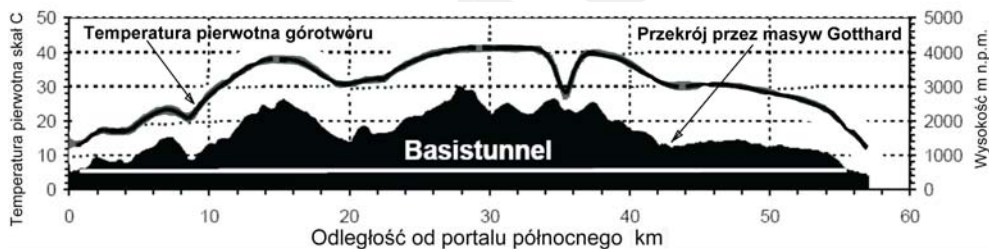
W rzeczywistości występują bardziej skomplikowane systemy wentylacji tuneli a do projektowania i prowadzenia badań symulacyjnych stosowane są zazwyczaj różne metody matematyczne wspierane techniką komputerową.



Rys. 3.11. Charakterystyka przepływu wentylatora i tunelu

3.6. Klimatyzacja tuneli komunikacyjnych

Jednym z podstawowych problemów rzutujących bezpośrednio na bezpieczeństwo i komfort cieplny w tunelach są możliwości usuwania nadmiaru ciepła wydzielającego się z górotworu (rys. 3.12) oraz ciepła wydzielanego przez pojazdy, maszyny i inne urządzenia znajdujące się w tunelu.

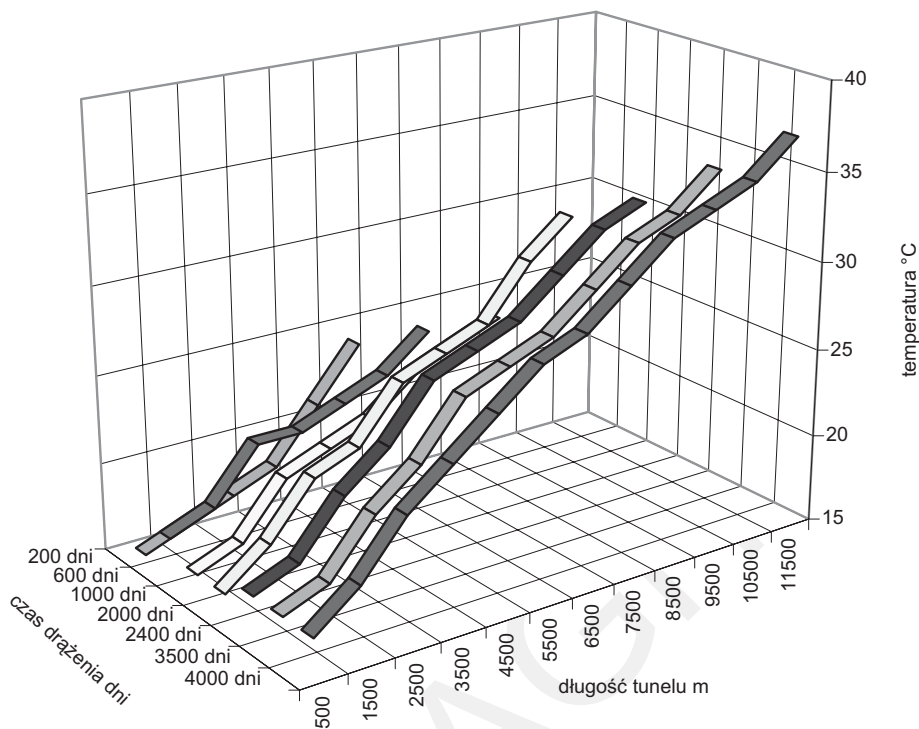


Rys. 3.12. Rozkład temperatury pierwotnej górotworu w tunelu [36]

Przepisy określają dopuszczalne parametry determinujące komfort cieplny.

Stosowanie intensywnej wentylacji, a także w wielu przypadkach urządzeń chłodniczych pozwala opanować występujące trudne warunki klimatyczne w tunelach. Stosowane systemy wentylacji i klimatyzacji zależne są od szeregu parametrów zarówno naturalnych jak i techniczno-technologicznych. Bardzo istotny wpływ na bilans cieplny tunelu mogą mieć także pogodowe roczne cykliczne zmiany temperatury powietrza doprowadzanego do tuneli (rys. 3.13). W związku z tym w tunelach, zwłaszcza kolejowych może zachodzić potrzeba ogrzewania powietrza doprowadzanego do tunelu.

Na komfort cieplny ma także wpływ poziom wilgotności powietrza w tunelu zależny od wilgotności powietrza atmosferycznego dopływającego do tunelu od strony portali, wymiany wilgoci pomiędzy powietrzem w tunelu a górotworem i różnego rodzaju dopływy wody z górotworu, oraz z pojazdów.



Rys. 3.13. Sezonowe zmiany temperatury powietrza w drażonym tunelu [36]

Znanych jest wiele metod i sposobów określenia bilansu cieplnego oraz prognozowania rozkładu temperatury w tunelach.

Podstawowym środkiem opanowania trudnych warunków cieplnych w tunelach jest przede wszystkim doprowadzenie odpowiedniego wydatku strumienia powietrza do tunelu, którego wielkość jest zależna od racjonalnego systemu wentylacji. W wielu przypadkach stosuje się klimatyzację polegającą na chłodzeniu i ogrzewaniu powietrza doprowadzanego do tuneli.

4. Systemy bezpieczeństwa w tunelach

Systemy bezpieczeństwa w tunelach komunikacyjnych są najważniejszymi elementami wpływającymi zarówno na ochronę życia ludzi, jak i na sprawność ruchu, co w konsekwencji rzutuje na bezpieczeństwo i rentowność transportu w tunelach.

W zależności od przeznaczenia tunelu, warunków lokalizacyjnych, występujących zagrożeń: pożarowego, trzęsieniami ziemi i wodnego stosowane są różne systemy bezpieczeństwa.

W ostatnich latach daje się zauważyć tendencja do wyposażania tuneli w nowoczesne systemy bezpieczeństwa obejmujące:

- urządzenia monitorujące stan ruch pojazdów, parametry wentylacji, parametry zagrożenia pożarowego oraz zawartości zanieczyszczeń stałych i gazowych w powietrzu;
- a także w systemy zarządzania transportowego i awaryjnego.

Unia Europejska wprowadziła mocą Dyrektywy 2004/54/EC z dnia 29 kwietnia 2004 roku regulacje prawne odnoszące się do wyposażenia tuneli drogowych wchodzących w skład sieci komunikacyjnej Europy TEN (*Trans European Network*).

Przy ustalaniu wymagań dotyczących bezpieczeństwa w tunelach, brane są pod uwagę następujące czynniki:

- długość tunelu,
- liczba kanałów tunelowych,
- liczba pasów ruchu,
- geometria przekroju poprzecznego,
- pionowe i poziome usytuowanie tunelu,
- typ konstrukcji,
- rodzaj ruchu (ruch dwukierunkowy lub jednokierunkowy),
- natężenie ruchu w tunelu, włączając czasowe jego zwiększenie (zatory itp.),
- ryzyko zatorów (czasowe, sezonowe)
- czas reakcji służb ratowniczych,
- udział procentowy samochodów ciężarowych w ruchu,
- rodzaje transportowanych ładunków niebezpiecznych,
- cechy dróg dojazdowych,
- szerokość jezdni,
- prędkość jazdy,
- środowisko geograficzne i meteorologiczne.

Tabela 4.1

Konstrukcyjne środki bezpieczeństwa tuneli

| | Ruch samochodowy ≤ 2000 sam./pas ruchu/dobę | | Ruch samochodowy > 2000 sam./pas ruchu/dobę | | | Dodatkowe warunki obowiązkowe do wprowadzenia |
|--|---|----------|--|-------------|----------|---|
| | 500–1000 m | > 1000 m | 500–1000 m | 1000–3000 m | > 3000 m | |
| Tunel podwójny albo więcej tuneli | – | – | – | – | – | Obowiązkowe, tam gdzie prognozowany ruch samochodowy w przeciągu 15 lat wyniesie powyżej 10 000 samochodów/pas ruchu/dobę. |
| Nachylenie ≤ 5% | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | Obowiązkowe, chyba, że warunki geograficzne uniemożliwiają takie rozwiązanie. |
| Przejścia ucieczkowe | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | Obowiązkowe tam gdzie nie ma awaryjnych pasów ruchu. W tunelach jednokierunkowych można zrezygnować z przejść ucieczkowych, jeżeli tunel jest zaopatrzony w instalację pozwalającą zamknąć ruch w tunelu w przypadku awarii, lub gdy koszt przebudowy jest niewspółmiernie duży, konstrukcja tunelu na to pozwala. W istniejących tunelach można zrezygnować z przejść ucieczkowych, pod warunkiem zastosowania dodatkowych środków bezpieczeństwa. |
| Wyjścia ucieczkowe co najmniej co 500 m | ▲ | ▲ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | Wyjścia awaryjne pozwalają opuścić tunel piechotą, a także grupom ratowniczym dostać się do miejsca wypadku. Przykładami takich dróg mogą być: – bezpośrednie wyjście z tunelu na zewnątrz, – połączenie pomiędzy tunelami, – wejścia do schronów. Schrony z połączeniem do oddzielnego tunelu ewakuacyjnego |
| Przecinki łączące tunele na odcinku co 1500 m | ▲ | ▲/• | ▲ | ▲/• | • | Obowiązkowe w tunelach podwójnych o długości powyżej 1500 m. Przecinki powinny posiadać odpowiedni prześwit dla dostępu służb ratowniczych. |
| Połączenia z tunelem ucieczkowym na końcu każdego portalu | • | • | • | • | • | Obowiązkowy dla tuneli podwójnych lub o większej liczbie kanałów tunelowych, niezależnie od położenia geograficznego. Połączenie powinno być dostosowane do wjazdu służb ratowniczych z każdego portalu. |
| Zatoki parkingowe co najmniej co 1000 m | ▲ | ▲ | ▲ | ▲/• | ▲/• | Obowiązkowe w nowych tunelach o długości powyżej 1500 m z ruchem dwukierunkowym bez pasów awaryjnych. W istniejących tunelach dwukierunkowych o długości powyżej 1500 m zależne od analizy bezpieczeństwa. Dla nowych i istniejących tuneli zależne od przekroju użytecznego tunelu. |
| Drenaż w celu odprowadzenia palnych płynów | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | Obowiązkowy dla tuneli, w których dozwolony jest transport materiałów niebezpiecznych. W przypadku istniejących tuneli, gdy koszt budowy byłby duży, należy przeprowadzić analizę bezpieczeństwa oraz wyeliminować ruch towarów niebezpiecznych. |
| Obudowa tunelu odporna ogniowo | • | • | • | • | • | Obowiązkowe dla tuneli, w których lokalne naruszenie struktury może prowadzić do tragicznych skutków jak np. tunele podwodne, tunele sąsiadujące z ważnymi obiektami itp. |










- obowiązkowy dla wszystkich tuneli
- ⊗ obowiązkowy z zastrzeżeniem
- ▲ nieobowiązkowy
- zalecany

Tabela 4.2
Techniczne środki bezpieczeństwa w tunelach

| | | Ruch samochodowy < 2000 sam/pas ruchu/dobę | | Ruch samochodowy > 2000 sam/pas ruchu/dobę | | | Dodatkowe warunki obowiązkowe do wprowadzenia |
|--|---|--|----------|--|-------------|----------|---|
| | | 500–1000 m | > 1000 m | 500–1000 m | 1000–3000 m | > 3000 m | |
| Oświetlenie | Normalne oświetlenie | • | • | • | • | • | Oświetlenie powinno zapewnić dostateczną widoczność w tunelu w dzień jak i w nocy, zarówno przy wjeździe do tunelu, jak i w środku. |
| – | Oświetlenie awaryjne | • | • | • | • | • | Powinno zapewnić minimalną widoczność w tunelu dla celów ewakuacji w przypadku awarii zasilania. |
| – | Oświetlenie ewakuacyjne | • | • | • | • | • | W skład oświetlenia ewakuacyjnego wchodzi znaki podświetlane informujące o drogach ucieczkowych, umieszczone na wysokości nie większej niż 1,5 m. |
| Wentylacja | Wentylacja mechaniczna | ▲ | ▲ | ▲ | • | • | Przy projektowaniu wentylacji mechanicznej, należy brać pod uwagę następujące czynniki: kontrola zanieczyszczeń emitowanych przez pojazdy podczas normalnego ruchu i zatorów, kontrola zanieczyszczeń powietrza w tunelu podczas zatrzymania ruchu, gdy wydarzył się wypadek, kontrola temperatury dymów podczas pożaru. Wentylacja mechaniczna powinna być zastosowana w każdym tunelu o długości powyżej 1000 m i natężeniu ruchu powyżej 2000 samochodów/pas ruchu/dobę. W tunelach z dwukierunkowym ruchem, lub jednokierunkowym ruchem i zatorami, dopuszcza się wentylację wzdłużną, jeżeli przeprowadzona analiza ryzyka pozwala na takie rozwiązanie. W takim przypadku należy zmniejszyć odstęp między wyjściami ewakuacyjnymi i umieścić system oddymiania w odpowiednich odstępach. |
| – | Wymagania dla wentylacji półpoprzecznej i poprzecznej | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | • | Dla tuneli z ruchem dwukierunkowym oraz natężeniem ruchu większym niż 2000 samochodów/pas ruchu dłuższych niż 3000 m z kontrolą wentylacji istnieją następujące wymagania: Wentylatory tłoczące i ssące będą zainstalowane z możliwością kontroli ich pracy zarówno grupowej, jak i indywidualnej. Wzdłużna prędkość powietrza w tunelu będzie monitorowana ciągle, wentylacja będzie sterowana dla zapewnienia odpowiednich prędkości. |
| Stacja ratownicza | Co 150 m | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | ⊗ | W stacjach będą zainstalowane telefony alarmowe, dwie gaśnice i inne środki służące do walki z pożarem, lecz nie chronią one użytkowników tunelu przed skutkami pożaru. Odległość między stacjami może być zwiększona do 250 m dla istniejących tuneli. |
| Hydrant z wodą | Co 250 m | • | • | • | • | • | Hydranty z wodą rozmieszczone nie rzadziej niż co 250 m. W przypadku braku hydrantów, należy dostarczyć wodę w inny sposób. |
| Znaki drogowe | – | • | • | • | • | • | Obowiązkowe dla wszystkich tuneli. |
| Centrum kontroli | – | ▲ | ▲ | ▲ | ▲ | • | Tunele o długości powyżej 3000 m i natężeniu ruchu powyżej 2000 samochodów/pas ruchu/dobę powinny posiadać centrum kontroli ruchu. |
| Monitoring | Video | – | – | – | – | • | System monitoringu za pomocą kamer, pozwalający kontrolować wypadki w tunelu, pożary powinien być zainstalowany w każdym tunelu z centrum kontroli. |
| – | Automatyczne wykrywanie pożarów | • | • | • | • | • | Automatyczna detekcja pożaru powinna być zainstalowana w tych tunelach które nie posiadają centrum kontroli oraz wentylacja nie jest sterowana automatycznie. |
| Wyposażenie do zablokowania wjazdu do tunelu | Sygnaly świetlne przed wjazdem do tunelu | ▲ | • | ▲ | • | • | Każdy tunel o długości większej niż 1000 m powinien posiadać znaki pozwalające zatrzymać ruch pojazdów do tunelu w przypadku pożaru lub innego niebezpieczeństwa. |

W tabeli 4.1 (na wklejce) przedstawiono wymagania konstrukcyjne wyposażenia tuneli, a w tabeli 4.2 (na wklejce) techniczne środki wyposażenia tuneli. W tabeli 4.3 przedstawiono znaki drogowe obowiązujące w tunelach wchodzących w skład TEN.

Tabela 4.3
Znaki drogowe w tunelach

| | |
|---|--|
|  <p>Jeden z dwóch znaków umieszczanych przy każdym portalu, określający długość tunelu</p> |  <p>Zatoka bezpieczeństwa</p> |
|  <p>Lokalizacja telefonu alarmowego</p> |  <p>Lokalizacja gaśnic pożarowych</p> |
|  <p>Wyjście ewakuacyjne</p> |  <p>Wyjście ewakuacyjne</p> |
|  <p>Wyjście ewakuacyjne</p> |  <p>Wyjście ewakuacyjne</p> |
|  <p>Wielkość zatoki bezpieczeństwa</p> |  <p>Znaki służące do kierowania ruchem</p> |

Przedstawione wymagania w zakresie bezpieczeństwa w tunelach TEN mogą być zastosowane w innych systemach komunikacji tunelowej, a zakres środków powinien być uzależniony od analizy ryzyka uwzględniającej szereg parametrów technicznych i eksploatacyjnych, a także od uwarunkowań lokalnych.

4.1. Monitoring w tunelach komunikacyjnych

Widoczność i koncentracja tlenku węgla są miarodajnymi kryteriami oceny jakości powietrza i ruchu w tunelach drogowych. Szczególnie ważne dla bezpieczeństwa użytkowników jest przestrzeganie ustalonych wartości granicznych: koncentracji tlenku węgla i sadzy w powietrzu tunelu.

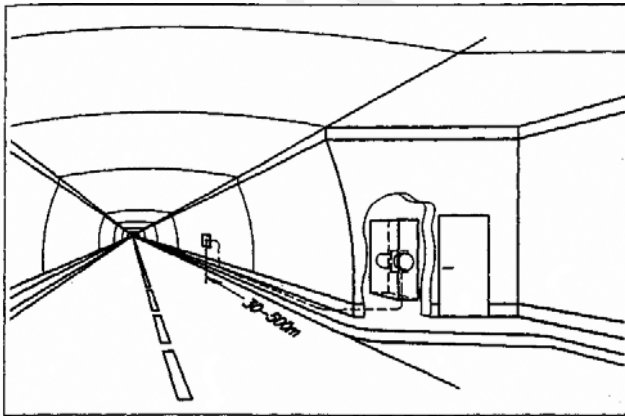
W poprzednich latach najczęściej krytyczną wielkością była koncentracja tlenku węgla, lecz w związku z wprowadzeniem katalizatorów i rosnącym ruchem ulicznym wzrosło znaczenie widoczności. Obie wartości służą do sterowania przewietrzaniem i mają wpływ nie tylko na bezpieczeństwo, lecz także na ekonomicznie optymalną eksploatację.

4.1.1. Monitoring widoczności w tunelu

Pod pojęciem widoczności rozumie się maksymalną odległość przy której ludzkie oko przy panujących określonych warunkach jest w stanie jeszcze rozpoznać obiekt z tła.

Stosowane w tunelach urządzenia pomiarowe bazują na określaniu:

- współczynnika gęstości optycznej K , który odtwarza straty widoczności spowodowane zanieczyszczeniem powietrza;
- wykrywaniu światła rozproszonego polegające na zdalnym pobieraniu prób powietrza w wyznaczonych miejscach tunelu i analizie w urządzeniu pomiarowym (rys. 4.1).



Rys. 4.1. Sposób pomiaru światła rozproszonego [12]

4.1.2. Monitorowanie koncentracji tlenku węgla w tunelu

Kontrola stężenia tlenku węgla w powietrzu przepływającym przez tunele prowadzona może być wieloma urządzeniami i metodami pomiarowymi, przy czym najczęściej stosowane są urządzenia wykonujące pomiary w sposób automatyczny i przekazujące do dyspozytorni bezpieczeństwa informacje, które są analizowane i archiwizowane. Systemy te wyposażone są w układy transmisji, alarmowania i wspomagania komputerowego.

4.2. Kierunki poprawy bezpieczeństwa w tunelach

Ważność zagadnień bezpieczeństwa w tunelach rośnie zwłaszcza w aspekcie budowy sieci transeuropejskie połączeń drogowych i kolejowych. Kilka ważnych połączeń transgranicznych drogowych i kolejowych, będących w fazie projektu lub budowy, zawiera ważne odcinki tunelowe, osiągające czasami 50 km. Wśród tych projektów – które już otrzymały lub otrzymają wspólnotową pomoc finansową, można wymienić tunel Somport o długości 8 km pomiędzy Francją i Hiszpanią, połączenie kolejowo-drogowe pomiędzy Danią i Szwecją (Oresund), przyszłe kolejowe połączenie transalpejskie Lyon – Turyn, projekt Brenner lub jeszcze linię dużych prędkości w budowie Bolonia – Florencja, której 60 na 90 km będzie umieszczonych w tunelu. W związku z tym nowe projekty tuneli będą musiały uwzględniać wymagania zapewnienia wysokiego poziomu bezpieczeństwa i komfortu dla użytkowników. Na rysunku 4.2 przedstawiono wizję tunelu idealnego, spełniającego wymogi transportowe i przede wszystkim wysoki poziom bezpieczeństwa.



Rys. 4.2. Tunel idealny pod kątem bezpieczeństwa [23]

4.3. Badania stanu bezpieczeństwa w tunelach

W celu sprawdzenia i oceny stanu bezpieczeństwa w tunelach komunikacyjnych przeprowadzane są audyty przez specjalistyczne jednostki nadzoru budowlanego, przeciwpożarowego i technicznego. Badania takie prowadzą też inne organizacje zajmujące się komunikacją.

Kompleksowa ocena poziomu bezpieczeństwa jest bardzo trudna z uwagi na dużą liczbę czynników bardzo często współzależnych od siebie, a także na zależności nie tylko ilościowe, ale również jakościowe. Badania poziomu bezpieczeństwa prowadzone są corocznie przez ADAC – Powszechny Niemiecki Automobilklub (*Allgemeiner Deutscher Automobil Club*), który do oceny tuneli wytypował czynniki wraz z odpowiednimi wagami (tab. 4.4), a wyniki testu z 2003 roku przedstawia tabela 4.5 (na wklejce).

Tabela 4.4
Czynniki oceny bezpieczeństwa w tunelach wg ADAC

| | |
|---|--|
| <p>System tunelu – waga 10%:</p> <ul style="list-style-type: none"> – liczba tuneli, – przebieg drogi, – szerokość pasów ruchu oraz dróg ucieczkowych, – rozmieszczenie zatok postojowych | <p>Stan tunelu – waga 9%:</p> <ul style="list-style-type: none"> – nawierzchnia, – oświetlenie, – oznaczenie |
| <p>Ruch i nadzór – waga 19%:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ruch (jedno lub dwukierunkowy), – obciążenie tunelu (zatory w ruchu), – ograniczenia w szczególnym przypadku meldowanie o przewożonych ładunkach niebezpiecznych, – szczególne środki bezpieczeństwa dla samochodów ciężarowych, – kontrola odstępu pomiędzy samochodami oraz prędkości ruchu, – ograniczenie dopuszczalnej prędkości, – budynek kontroli, – sterowanie ruchem (oświetlenie, tablice informacyjne, znaki informacyjne, i inne), – video rejestracja, – automatyczna detekcja zatorów, – systemy automatycznego wykrywania materiałów niebezpiecznych, – mechaniczne bariery dla zamknięcia ruchu (np. szlabany), – kontrola wysokości pojazdów, – informacja o objazdach w przypadku zatorów, lub zamknięcia tunelu | <p>Wentylacja pożarowa – waga 10%:</p> <ul style="list-style-type: none"> – specjalna wentylacja na wypadek pożaru, – kontrola prędkości wzdłużnej powietrza w tunelu, – sterowanie kierunkiem przewietrzania, – możliwość rewersyjnej pracy wentylatorów, – wentylacja poprzeczna: kontrola wielkości przepływu w kanałach wylotowych, wpływ wzdłużnej prędkości, otwarcie i zamknięcie kanału wylotowego, – wyposażenie tunelu odporne na temperaturę, – wykaz urządzeń kontrolujących parametry pożaru |
| <p>Komunikacja – waga 10%</p> <ul style="list-style-type: none"> – głośniki, radio dla kierowców, – informacje w różnych językach, – telefony alarmowe (oznaczenie, odstęp, ochrona przed hałasem) | <p>Organizacja akcji ratunkowej – waga 8%</p> <ul style="list-style-type: none"> – plany alarmowe, – automatyczne powiązanie systemów ratunkowo-sterujących, – regularne ćwiczenia ratunkowe, – regularna kontrola systemów bezpieczeństwa (wewnętrznych oraz zewnętrznych) |
| <p>Zagrożenie pożarowe – waga 21%:</p> <ul style="list-style-type: none"> – ochrona przeciwpożarowa budowli, oraz kabli w tunelu, – systemy detekcji pożaru (automatyczne/ręczne), – systemy gaśnicze (oznaczenie, konserwacja), – system rurociągów, – określenie wjazdu straży pożarnej, oraz czasu dojazdu, – kwalifikacje i wyposażenie straży pożarnej | <p>Drogi ucieczkowe i ratunkowe – waga 13%:</p> <ul style="list-style-type: none"> – odstęp dróg ucieczkowych, – oznaczenie dróg ucieczkowych, – oświetlenie awaryjne oraz świetlne oznaczenie dróg ucieczkowych w tunelu, – ograniczanie rozprzestrzeniania się dymu, alternatywne drogi ucieczki, – materiały ogniodporne, przewietrzanie – specjalne zarządzanie, – możliwość dojazdu pomocy (straż pożarna, karetki pogotowia itp.) |

Tabela 4.5

Tunele testowane przez ADAC w 2003 roku [1]

| Nazwa tunelu | Czynniki wchodzące w skład oceny wraz z ich wagą | | | | | | | | Ocena |
|---------------------------|--|-------------------|----------------------|--------------------|-------------------------|--------------|----------------------------|---------------------------------------|-------|
| | System tunelu 10% | Stan tunelu 9% | Ruch i nadzór 19% | Komunikacja 10% | Drogi ucieczkowe 13% | Pożar 21% | Wentylacja pożarowa 10% | Organizacja akcji ratunkowej 8% | |
| | Kraj | | | | | | | | ○ |
| | Austria | | | | | | | | ○ |
| Gleinalm | ++ | + | - | O | -- | ++ | ++ | + | ○ |
| Perjen | O | ++ | - | - | -- | ++ | ++ | + | ●● |
| Pfander | O | ++ | -- | + | -- | + | ++ | + | ○ |
| | Belgia | | | | | | | | ⊕⊕ |
| Waasland | -- | ++ | -- | -- | -- | O | -- | -- | ⊕ |
| | Szwajcaria | | | | | | | | ● |
| Porny | ++ | ++ | + | - | ++ | ++ | ++ | ++ | ● |
| Gorgier | - | O | -- | O | ++ | + | ++ | ++ | ○ |
| Piumogna | + | - | -- | - | -- | O | -- | O | ⊕⊕ |
| Milchbuck | -- | ++ | -- | + | -- | O | - | O | ⊕ |
| | Niemcy | | | | | | | | ⊕ |
| Weserauen | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | ○ |
| Elbtunnel (czwarty tunel) | ++ | O | - | ++ | - | ++ | ++ | ++ | ⊕⊕ |
| Petuelunnel | + | + | - | O | ++ | + | + | ++ | ●● |
| | Hiszpania | | | | | | | | ○ |
| Somport | ++ | ++ | ++ | ++ | ++ | O | ++ | ++ | ● |
| Soller | - | - | -- | -- | -- | -- | -- | -- | ⊕ |
| | Francja | | | | | | | | ○ |
| Nogent-sur-Marne | + | O | - | -- | O | -- | -- | - | ● |
| Prado Carenage | + | + | ++ | - | ++ | + | + | O | ● |
| | Wielka Brytania | | | | | | | | ● |
| Rotherhithe | -- | ++ | - | -- | -- | + | ++ | + | ●● |
| Blackwall South | -- | + | - | -- | -- | + | ++ | - | ○ |
| Tyne | -- | ++ | -- | + | -- | O | ++ | O | ○ |
| Blackwall Nord | -- | + | - | -- | -- | O | ++ | - | ○ |
| | Kraj | | | | | | | | ○ |
| | Włochy | | | | | | | | ○ |
| Fortezza | -- | ++ | - | -- | - | ++ | ++ | + | ○ |
| | Norwegia | | | | | | | | ○ |
| Ekeberg | ++ | O | O | O | O | + | + | O | ● |
| Festnings | O | O | -- | O | O | - | + | - | ●● |
| | Holandia | | | | | | | | ○ |
| IJ tunnel | -- | + | O | ++ | + | -- | -- | -- | ○ |
| Maastunnel | -- | + | O | -- | - | -- | -- | -- | ○ |
| | Słowacja | | | | | | | | ○ |
| Karawanken | O | + | O | + | -- | ++ | ++ | O | ○ |

OCENA ADAC

- ⊕⊕ bardzo dobry
- ⊕ dobry
- wystarczający
- zły
- bardzo zły

SKALA OCEN:

Stopień: „bardzo dobrze” > 90% z całkowitej liczby punktów,
 Stopień: „dobrze” > 80% z całkowitej liczby punktów,
 Stopień: „wystarczająco” > 70% z całkowitej liczby punktów,
 Stopień: „źle” > 60% z całkowitej liczby punktów,
 Stopień: „bardzo źle” < 60% z całkowitej liczby punktów

Przykład oceny tuneli przez ADAC w roku 2003

Do analizy czynników oceny stanu bezpieczeństwa wybrano tunel Waserauen, który otrzymał najlepszą ocenę, oraz tunel Solter, który otrzymał najgorszą ocenę.

W tabeli 4.6 przedstawiono dane charakterystyczne dla tunelu Waserauen. Wykaz cech pozytywnych i negatywnych określony zgodnie z oceną według metody ADAC podano w tabeli 4.7.

Tabela 4.6
Charakterystyka tunelu Waserauen

| Dane techniczne | Wielkość |
|-------------------------------|--------------------------|
| Rok uruchomienia | 2002 |
| Długość | 1730 m |
| Wysokość portali | 40/42 m |
| Liczba tuneli – kanałów | 2 (ruch jednokierunkowy) |
| Dopuszczalna prędkość | 80 km/h |
| Liczba samochodów | 30 000/dzień |
| Liczba samochodów ciężarowych | 10% |
| Awarie w 2002 roku | 0 |
| Wypadki w 2002 roku | 3 |
| Požary w 2002 roku | 0 |
| Ryzyko | niskie |

Tabela 4.7
Wykaz czynników decydujących o bezpieczeństwie w tunelu Waserauen

| Pozytywne czynniki | Negatywne czynniki |
|---|---|
| Tunel podwójny z połączeniami poprzecznymi oraz wyjściami, drogi ucieczkowe i ratunkowe w odstępach 150 m | Widoczność przy wjeździe do tunelu od strony mostu ograniczona ze względu na mur betonowy |
| Kierowanie ruchem przed wjazdem do tunelu | Telefony alarmowe nie są oddzielone od tunelu przegrodą dźwiękoszczelną |
| Zamknięty dla transportu materiałów niebezpiecznych | – |
| Dostępne radio dla kierowców, oraz komunikaty w kilku językach | – |
| Kamery rozmieszczone co 150 m w systemie „bez luk” | – |
| Automatyczna lokalizacja zatorów ruchu oraz wypadków | – |
| Zatoki postojowe co 600 m | – |

Tabela 4.7 cd.

| Pozytywne czynniki | Negatywne czynniki |
|---|--------------------|
| Telefony alarmowe co 150 m | – |
| Drogi ucieczkowe wystarczająco wyposażone | – |
| Głośniki w tunelu oraz przy portalach | – |
| Przy włączeniu telefonu alarmowego automatyczne ograniczenie prędkości oraz włączenie rejestracji video | – |
| Gaśnice co 150 m | – |
| Przy pobraniu gaśnicy automatyczne włączenie rejestracji video | – |
| Oświetlenie awaryjne i tablice pokazujące kierunek i odległość wyjść awaryjnych | – |
| Automatyczny system meldunków o pożarach | – |
| Podczas detekcji pożaru automatyczne włączanie systemu wentylacji pożarowej, informowanie straży pożarnej, oraz blokowanie wjazdu do tunelu | – |
| Specjalny program wentylacji na wypadek pożaru z uwzględnieniem powstającego prądu wzdłużnego, testowany w tunelu | – |
| Hydranty z wodą pod ciśnieniem rozmieszczone co 150 m | – |
| Dobre wyposażenie straży pożarnej | – |
| Regularne ćwiczenia pożarowe | – |
| Aktualny plan ucieczkowy i alarmowy | – |
| Tunel podwójny z połączeniami poprzecznymi oraz wyjściami, drogi ucieczkowe i ratunkowe w odstępach 150 m | – |

Dla tunelu Soller przedstawiono dane charakterystyczne w tabeli 4.8 oraz wykaz cech pozytywnych i negatywnych określony zgodnie z oceną według metody ADAC w tabeli 4.9.

Tabela 4.8
Charakterystyka tunelu Soller

| Dane techniczne | Wielkości |
|---------------------------|------------------------|
| Rok uruchomienia | 1997 |
| Długość | 3023 m |
| Różnica wysokości portali | 4,5 m |
| Liczba tuneli – kanałów | 1 (ruch dwukierunkowy) |
| Dopuszczalna prędkość | 90 km/h |

Tabela 4.8 cd.

| | |
|-------------------------------|------------|
| Liczba samochodów | 6540/dzień |
| Liczba samochodów ciężarowych | 6% |
| Awarie w 2002 roku | 0 |
| Wypadki w 2002 roku | 0 |
| Pożary w 2002 roku | 0 |

Tabela 4.9

Wykaz czynników decydujących o bezpieczeństwie w tunelu Soller

| Pozytywne czynniki | Negatywne czynniki |
|---|--|
| Meldowanie ciężarówek z materiałami niebezpiecznymi przed wjazdem do tunelu | Tunel pojedynczy z ruchem dwukierunkowym |
| Automatyczne stwierdzenie zatorów | Brak kierowania ruchem przed wjazdem do tunelu |
| Zatoki postojowe co 600 m | Niedostatecznie widoczne znaki poziome na jezdni |
| Telefon alarmowy | Brak radia dla kierowców dostępnego w tunelu |
| Gaśnice | Brak nadzoru video |
| Regularne ćwiczenia pożarowe | Telefony alarmowe nie są oddzielone od tunelu przegrodą dźwiękoszczelną |
| Aktualny plan uciezkowy i alarmowy | Wąskie drogi uciezkowe (60 cm szerokości) |
| – | Brak głośników |
| – | Brak dodatkowych dróg ewakuacyjnych |
| – | Brak oznaczenia kierunków ucieczki oraz oświetlenia awaryjnego |
| – | Brak automatycznego systemu informowania o pożarze |
| – | Brak automatycznej wentylacji pożarowej oraz zamknięcia tunelu dla samochodów wjeżdżających podczas pożaru |
| – | Brak specjalnego programu wentylacji na wypadek pożaru oraz potwierdzonych badaniami symulacji pożaru |
| – | Brak ochrony kabli w tunelu podczas pożaru |
| – | Brak przystosowania wentylatorów do pracy podczas pożaru |
| – | Brak doprowadzenia wody do tunelu, ora zhydrantów |
| – | Brak odpowiedniego wyposażenia straży pożarnej |

Przeprowadzone przez ADAC badania tunelu Soller wykazały, że występuje bardzo dużo czynników negatywnych (17) i niewiele pozytywnych (7) wpływających na bezpieczeństwo. W związku z tym tunel taki powinien być poddany w trybie pilnym modernizacji technicznej lub trzeba podjąć działania zmierzające do zmiany parametrów organizacyjnych (np. zmniejszenie obciążenia ruchem pojazdów) w tunelu.

BG AGH

5. Zagrożenie pożarowe w tunelach

Pomimo wyposażenia tuneli w nowoczesne systemy bezpieczeństwa pożary, wypadki i katastrofy w tunelach są dość częstym zjawiskiem. Potwierdzają to także pożary zaistniałe w ostatnich latach:

- 24 marca 1999 r. wybuchł pożar w tunelu drogowym Mont Blanc, który spowodował śmierć 39 osób;
- 18 listopada 2000 r. pożar w Eurotunelu;
- 27 listopada 2000 r. pożar w tunelu Leardal.

Za główne przyczyny katastrof w tunelach komunikacyjnych można uznać nieprzystosowanie ich do znacznego wzrostu intensywności ruchu, nieostrożność kierowców, a także awaryjność taboru komunikacyjnego i zawodność systemów bezpieczeństwa.

W związku z tym problemy w zakresie prawidłowego przewietrzania, zabezpieczenia przeciwpożarowego i ewakuacji ludzi są nadal aktualne. Szczególnie wymagają dalszych badań i stosowania nowoczesnych rozwiązań w zakresie struktur i konstrukcji budowlanych, automatycznych systemów kontroli zagrożenia pożarowego, sterowania parametrami stanu wentylacji, systemów gaszenia pożarów, bezpiecznej i sprawnej ewakuacji ludzi.

Pożary w tunelach komunikacyjnych stanowią realne zagrożenie nie tylko dla ludzi i pojazdów, ale także dla konstrukcji obiektów budowlanych (tab. 5.1) [15].

Zależność pomiędzy liczbą ludzi poszkodowanych i zabitych w wypadkach w tunelach w zależności od czasu ich wystąpienia (rys. 5.1) wskazuje, że w ostatnich latach nastąpił duży wzrost ilości poszkodowanych wskutek dynamicznego wzrostu natężenia ruchu i nieprzystosowania tuneli do tych potrzeb.

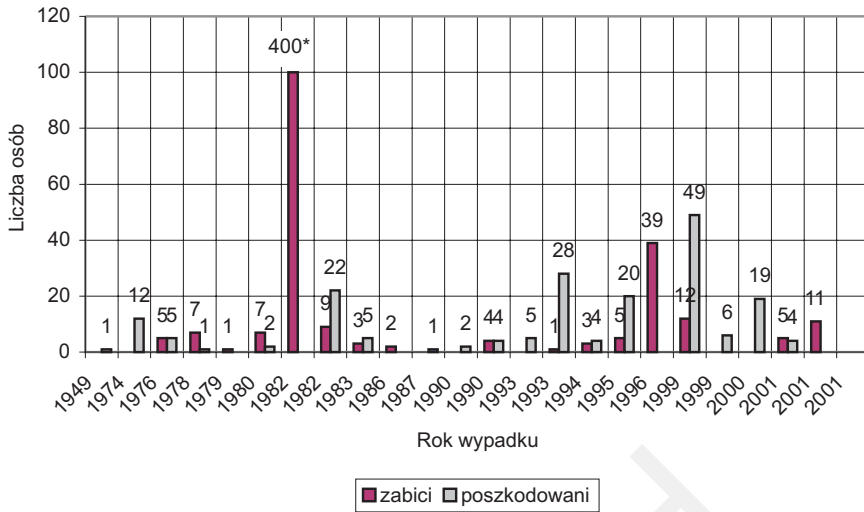
Z wzrostem długości tuneli wzrasta ilość ludzi poszkodowanych i zabitych w wypadkach spowodowanych pożarami (rys. 5.2).

Szczególnie dużym zagrożeniem jest wystąpienie i rozprzestrzenianie się w tunelu zadymienia powstałego wyniku pożaru, które uniemożliwia ewakuację ludzi z tunelu i jest przyczyną wielu wypadków zatrucia oraz śmierci. O dynamice propagacji dymów w tunelu decyduje intensywność ogniska pożaru (wielkość i rodzaj palących się materiałów i paliw), a także system wentylacji i prędkość przepływu powietrza w tunelu (rys. 5.3 i 5.4).

Tabela 5.1

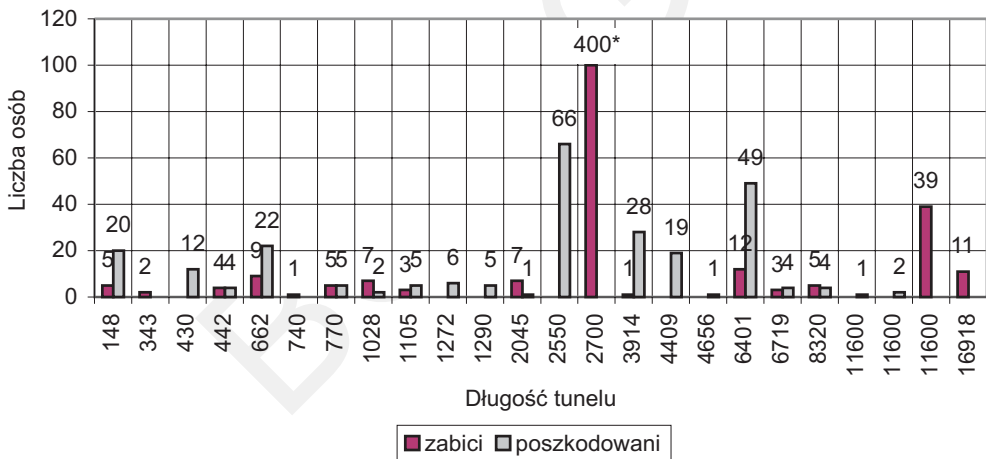
Niektóre wypadki pożarów w tunelach samochodowych [16]

| Rok | Pożar w tunelu | | | | Konsekwencje | | | |
|----------------------|-------------------------|-------------------------------------|--|---|---------------------|---|---|--|
| | Długość tunelu, m | Kraj | Pojazd w którym zauważono pożar | Przyczyna pożaru | Czas trwania pożaru | Konsekwencje w ludziach | Zniszczone pojazdy | Obudowa tunelu i instalacje |
| 1979 | Nihonzaka 2045 m | Shitzuoka Japonia | 4 samochody ciężarowe, 2 samochody osobowe | kolizja przód-tył pojazdów i pożar | 159 h | 7 ofiar śmiertelnych, 1 poszkodowany | 127 samochodów ciężarowe, 46 samochody osobowe | poważne uszkodzenie tunelu na długości 1100 m |
| 1982 | Caldecott 1028 m | Oakland USA | 1 samochód osobowy, 1 autokar, 1 samochód ciężarowy z 33 000 l benzyny | kolizja przód-tył pojazdów i pożar | 2 h 40 min | 7 ofiar śmiertelnych, 2 poszkodowanych | 3 samochody ciężarowe, 1 autokar, 4 samochody osobowe | poważne uszkodzenie tunelu na długości 580 m |
| 1994 | Huguenot 3914 m | Południowa Afryka | autobus z 45 pasażerami | zwarcie instalacji elektrycznej i pożar | 1h | 1 ofiara śmiertelna, 28 poszkodowanych | 1 autobus | poważne uszkodzenie tunelu |
| 1999 24 marca | Mont Blanc 1600 m | Francja- Włochy | samochód ciężarowy | wyciek oleju z silnika i pożar | - | 41 ofiar śmiertelnych | 23 samochody ciężarowe, 10 samochodów osobowych, 1 motocykl, 2 samochody straży pożarnej | poważne uszkodzenie, tunel ponownie otwarty 22.12.2001 |
| 2000 18 listopada | Eurotunnel | Wielka Brytania – Francja | samochód ciężarowy | wyciek oleju z silnika samochodu i pożar | 7 h | - | 10 samochodów, uszkodzenie tunelu | zatrzymanie ruchu przez okres 7 godzin |
| 2000 27 listopada | Leardal 24 510 m | Norwegia | autobus | zapalenie się wentylatora w autobusie | 1 h | - | 1 autobus | - |
| 2001 26 sierpnia | Gleinalim 8320 m | A 9 w pobliżu Graz Austria | samochód osobowy | zderzenie czołowe samochodu osobowego i ciężarowego | - | 5 ofiar śmiertelnych, 4 poszkodowanych | 1 samochód ciężarowy, 1 samochód osobowy | - |



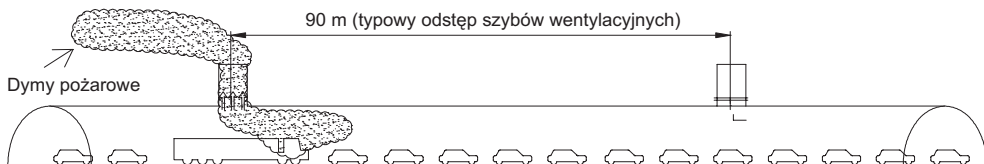
Rys. 5.1. Statystyka liczby wypadków w tunelach

* Podana na wykresie liczba została przedstawiona bez zachowania skali

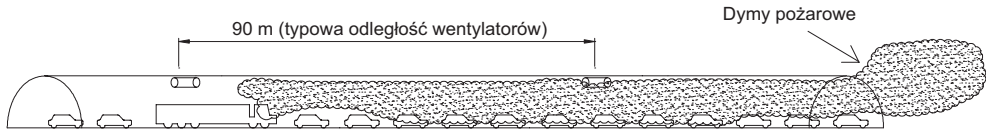


Rys. 5.2. Liczby wypadków w tunelach oraz długości tuneli

* Podana na wykresie liczba została przedstawiona bez zachowania skali



Rys. 5.3. Rozprzestrzenianie się dymów przy wentylacji z sztywami ssącymi



Rys. 5.4. Rozprzestrzenianie się dymów przy wentylacji wspomaganiej wentylatorami

5.1. Pożar w tunelu drogowym Mont Blanc

Tunel Mont Blanc został zbudowany w latach 1956–1964 o długość 11 600 m, jako tunel z jedną jezdnią dwupasmową i ruchem dwukierunkowym. Przez tunel prowadzi najkrótsza droga z Paryża do Rzymu [36]. Z tego względu obsługuje on około 50% transportu kołowego między Francją i Włochami. 24 marca 1999 roku w tunelu doszło do katastrofy. Belgijska ciężarówka Volvo znajdująca się w tunelu w odległości około 7 km od francuskiego portalu stanęła w płomieniach, blokując ruch na jednym pasie jezdni. Powodem wybuchu pożaru był żarzący się niedopałek papierosa w filtrze powietrznym samochodu. Dopiero po 9 minutach w tunelu zapaliły się czerwone światła alarmowe w związku z tym przez ten czas samochody jechały w kierunku pożaru. Pożar szybko rozprzestrzenił się z pojazdu na pojazd. Tunel został bardzo silnie zadymiony. Gęsty dym uniemożliwił orientację i prowadzenie obserwacji przez kamery. Temperatura osiągnęła nawet 1000°C. Dla uwięzionych w samochodach ludzi, a także tych, którzy usiłowali dostać się do przejść ewakuacyjnych nie było ratunku. Po zwiększeniu wydatku powietrza sytuacja uległa jeszcze pogorszeniu. Przez kolejne trzy dni z obu stron tunelu wydobywał się dym. W katastrofie zginęło 39 osób, spłonęło 7 samochodów ciężarowych i około 20 samochodów osobowych. Tunel został zamknięty na okres 3 lat.

Przebieg pożaru

1. Wielkość ruchu w tunelu wynosiła 150 sam./godzinę (50% ciężarowych).
2. Prędkość jazdy pojazdów w tunelu ok. 60 km/h.
3. Belgijska ciężarówka (chłodnia) była załadowana mąką i margaryną, a także posiadała materiały palne w zbiorniku pojazdu – 1000 l oleju napędowego.
4. Kontrola samochodów i ładunku przeprowadzona przez francuską policję nie wykazała nic szczególnego.

Przebieg pożaru przedstawia tabela 5.2.

Rozwój pożaru według francuskiej policji

Powstałe dymy pożarowe rozprzestrzeniły się z prędkością 1,5 do 2 m/s i w wyniku, czego nastąpiło o godzinach:

- 10:55 – zadymienie 900 m tunelu,
- 10:59 – zadymienie 1200 m tunelu,
- 11:15 – zadymienie 2600 m tunelu,
- 11:32 – zadymienie 4800 m tunelu.

Tabela 5.2
Chronometraż pierwszego stadium pożaru

| Czas | Zdarzenia |
|-------------|---|
| 10:46 | Wjazd belgijskiej ciężarówki |
| 10:52 | Zauważenie dymu przez kierowcę ciężarówki po otrzymaniu wiadomości od pozostałych kierowców |
| 10:53 | Zatrzymanie ciężarówki na awaryjnym postoju nr 21 |
| 10:52 | Alarm „zaciemnienie monitora” w kamerze obserwacyjnej z postoju nr 21 |
| 10:54 | Telefon alarmowy z postoju nr 22 |
| 10:54 | Wykrycie pożaru przez urządzenia kontrolne na postoju 21 |
| 10:54 | Rozmowa pomiędzy stacjami kontroli znajdującymi się po stronie francuskiej i włoskiej |
| 10:55–10:56 | Zamknięcie wjazdu do tunelu |
| 10:57 | Ucieczka kierowcy ciężarówki po zużyciu gaśnicy i zauważeniu płomieni w kabinie |

Wielkość katastrofy

Pożar spowodował 39 wypadków śmiertelnych w tym:

- 32 wypadki, którym ulegli kierowcy i pasażerowie w samochodach;
- 7 wypadków, którym ulegli ratownicy prowadzący akcję w tunelu.

Straty materialne

Tunel został uszkodzony na odcinku 900 m.

Uszkodzenie: 4 samochodów ciężarowych, 2 samochodów straży pożarnej, 9 samochodów osobowych i 1 motocykla.

Konieczność przeprowadzenia naprawy uszkodzonego odcinka tunelu i generalnej modernizacji technicznej, przeciwpożarowej i organizacyjnej w tunelu (rys. 5.5).

Zamknięcie tunelu dla komunikacji przez okres 3 lat.

Przyczyny pożaru i katastrofy

Specjalna Komisja określiła następujące główne przyczyny katastrofy:

- znaczne zwiększenie ruchu drogowego;
- tunel z jedną jezdnią – dwupasmową i ruchem w każdą stronę – nie daje możliwości zawrócenia bądź omińnięcia przeszkody;
- nieprawidłowe działanie przestarzałego systemu wentylacyjnego;
- niewstrzymanie ruchu w momencie wybuchu pożaru – światła sygnalizacyjne z odległości 1200 m były słabo widoczne z tego powodu częściowo uszkodzone samochody zderzyły się z ciężarówką;

- szybkie wystąpienie trujących gazów, które spowodowały śmierć kierowców (zatrucie tlenkiem węgla lub uduszenie wskutek niewystarczającej zawartości tlenu w powietrzu);
- nieskuteczne działanie kanału odsysającego;
- niedostateczne wyszkolenie, wyposażenie techniczne i trudności w skoordynowaniu akcji ratowniczej, którą prowadziły niezależnie strona włoska i francuska.

Zalecenia powypadkowe – zadania naprawcze

Ustalenia powypadkowe zmierzające do poprawienia bezpieczeństwa w tunelu zakładały między innymi:

- poprawę automatycznych systemów bezpieczeństwa: czuwania i systemów kontrolnych i informacyjnych o ruchu,
- zmianę systemu wentylacji,
- poprawienie pomieszczeń uciezkowych,
- wykonanie nowych dróg uciezkowych i nowych zatok bezpieczeństwa,
- opracowanie systemu kontroli wjeżdżających samochodów,
- utworzenie własnych drużyn ratowniczych i ich szkolenie,



Rys. 5.5. Widok tunelu Mont Blanc po pożarze [3]

5.2. Pożar w tunelu drogowym Gotthard

Tunel Gotthard jest jednym z głównych drogowych punktów tranzytowych między północą i południem Alp. Został otwarty w 1980 roku. Pod względem długości zajmuje drugie miejsce na świecie – 16 918 m. Każdego dnia tunelem przejeżdżało średnio 19 000 pojazdów. 24 października 2001 r. wybuchł pożar 2 km od południowego wjazdu do tunelu. Przyczyną pożaru było zderzenie dwóch ciężarówek. Ogień rozszerzył się na długości kilkuset metrów. Zawaliła się część sklepienia tunelu, który uległ zadymieniu, a temperatura

ogniska pożaru sięgała ponad 1000°C. Ratownicy gasząc pożar, zdołali obniżyć temperaturę do 200°C. Po wystąpieniu pożaru natychmiast podjęto akcję ewakuacji ludzi z tunelu. Większość użytkowników zdołała sama opuścić tunel, zawracając samochody albo uciekając do biegnącego równoległe tunelu ewakuacyjnego. Wiele osób zostało rannych lub zmarło z powodu zatrucia gazami toksycznymi (11 osób). W skutek uszkodzeń powstałych w czasie pożaru tunel został zamknięty na kilka miesięcy.

5.3. Pożar w tunelu drogowym Gleinalmtunnel

6 sierpnia 2001 r. doszło do zderzenia dwóch samochodów w ponad ośmiokilometrowym tunelu drogowym Gleinalmtunnel, niedaleko austriackiego miasta Graz. Po zderzeniu wybuchł pożar mniej więcej w połowie długości tunelu. Pięć osób zginęło, a cztery inne zostały ranne.

5.4. Pożar w Eurotunelu

Pożar w Eurotunelu wybuchł 18 listopada 1996 r., kiedy pociąg wahadłowy wjechał do tunelu ze składem wagonów. W jednym z nich zapalił się samochód [22]. Przebieg pożaru przedstawia tabela 5.3.

Tabela 5.3
Chronometraż pożaru

| Godzina | Zdarzenie |
|---------|---|
| 21.48 | Wjazd pociągu do tunelu |
| 21.49 | Alarm o wystąpieniu dymów w tunelu dotarł do Centrum Ruchu i Bezpieczeństwa |
| 21.50 | Powtórny sygnał alarmowy |
| 21.54 | Potwierdzony alarm pożarowy |
| 21.57 | Sygnalizacja u maszynisty pociągu o zagrożeniu i wymuszonym zatrzymaniu przez system automatyczny |
| 21.59 | Informacja od maszynisty o zatrzymaniu pociągu |
| 22.04 | Wjazd do tunelu ze stron angielskiej i francuskiej pociągów pożarniczych |
| 22.04 | Uruchomienie przez Centrum Ruchu i Bezpieczeństwa wentylacyjnych systemów przeciwpożarowych |
| 22.12 | Otwarcie przez Centrum Ruchu i Bezpieczeństwa tam umożliwiających doprowadzenie powietrza dla rozrzedzenia dymów w tunelu |
| 22.25 | Ewakuacja pasażerów pociągu do tunelu konserwacyjnego |
| 22.56 | Przybycie na miejsce pożaru pociągu pożarniczego |
| 05.00 | Całkowite ugaszenie pożaru i zakończenie akcji |

Rozwój pożaru

1. Ogień pożaru został przeniesiony w czasie jazdy do sąsiednich wagonów (rys. 5.6).
2. Temperatura pożaru osiągnęła 1000°C.
3. Pożar spowodował poważne uszkodzenia 46 m tunelu w miejscu, gdzie nastąpiło zatrzymanie pociągu, a zasięg różnych uszkodzeń objął dalsze 500 m.



Rys. 5.6. Spalony wagon po pożarze w Eurotunelu [20]

5.5. Eksperymentalne i modelowe badania przebiegu pożaru w tunelach

W oparciu o badania eksperymentalne lub modelowe dla każdego tunelu może być określony stopień bezpieczeństwa uwzględniający szczególnie zagrożenie pożarowe.

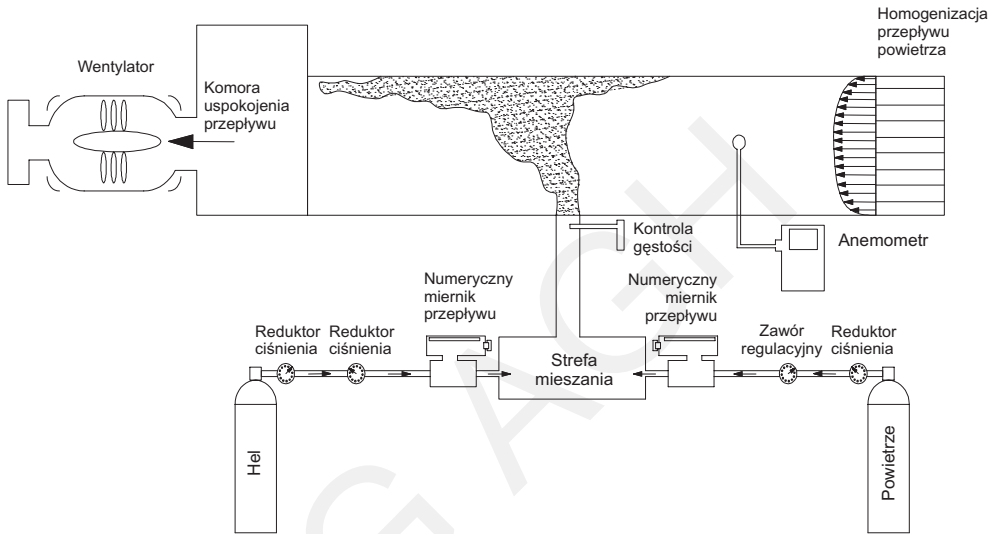
Badania eksperymentalne pożaru mogą być prowadzone w danym tunelu, przy czym bardzo trudno zrealizować pełny ich zakres ze względu na możliwości trwałego uszkodzenia tunelu, stąd zazwyczaj badania *in situ* prowadzone są w specjalnych doświadczalnych tunelach, które nie zawsze stanowią pełne odwzorowanie badanego – przeznaczonego do eksploatacji – tunelu. Badania eksperymentalne w tunelach są bardzo trudne i kosztowne, ale zapewniają bardzo duże podobieństwo w stosunku do stanu rzeczywistego.

Bardzo dużo informacji mogą dać badania modelowe przeprowadzane na modelach laboratoryjnych zapewniających wymagane podobieństwa geometryczne i przepływowe lub badania oparte na modelach matematycznych i wykorzystaniu komputerowej techniki obliczeniowej.

5.5.1. Badania laboratoryjne

Badania laboratoryjne polegają na wykonaniu modelu tunelu posiadającego duży stopień podobieństwa geometrycznego i przepływowego oraz na badaniu dynamiki pożaru i rozprzysygu gazów pożarowych, np. przez włączanie określonych gazów do powietrza w tunelu modelowym i obserwowaniu propagacji tych gazów [6]. Taka metodyka badań daje nam możliwości przeprowadzenia symulacji pożaru w wielu konfiguracjach.

Schemat modelu laboratoryjnego umożliwiający badanie zagrożenia pożarowego w tunelach przedstawia rysunek 5.7.



Rys. 5.7. Schemat modelu laboratoryjnego do badania zagrożenia pożarowego w tunelach [6]

Model laboratoryjny tunelu posiadał następujące parametry i właściwości:

- parametry geometryczne tunelu: długość: 10 m, wysokość: 10–40 cm, szerokość: 10–60 cm, nachylenie: $\pm 10^\circ$,
- pożar symulowany jest przez: powietrze i hel,
- system wentylacji tuneli: wentylacja wzdłużna.

Regulując przepływ powietrza przez model tunelu, można obserwować oraz rejestrować propagację gazów pożarowych. Model tego typu pozwala na dowolne regulowanie parametrów wentylacyjnych takich jak: prędkość powietrza intensywność pożaru itp.

5.2.2. Modele numeryczne

Znanych jest wiele metod modelowania numerycznego przebiegu pożaru w tunelach. Metody numeryczne w oparciu o modele matematyczne odwzorowujące stan rzeczywisty, pozwalają wyznaczyć parametry charakteryzujące stan i dynamikę rozwoju pożaru w tunelu.

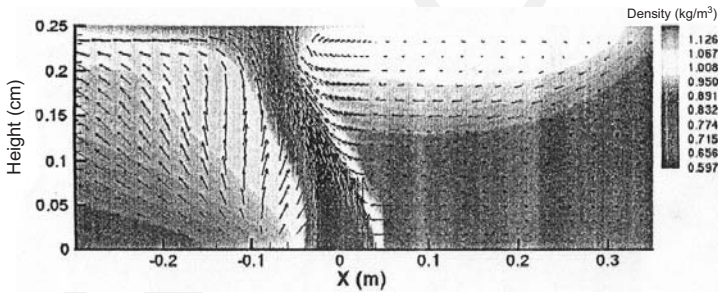
Taki sposób badań daje nam możliwość symulacji wielu sytuacji związanych z wystąpieniem pożaru w tunelu.

CFD – *Computational Fluid Dynamics* (numeryczna mechanika płynów) to nowa dziedzina znajdująca zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i przemysłu. Programy wykorzystujące osiągnięcia CFD umożliwiają szczegółową analizę zagadnień związanych z przepływem płynów, eliminując konieczność przeprowadzenia czasochłonnych i kosztownych badań doświadczalnych podczas cyklu projektowania i modernizacji urządzeń.

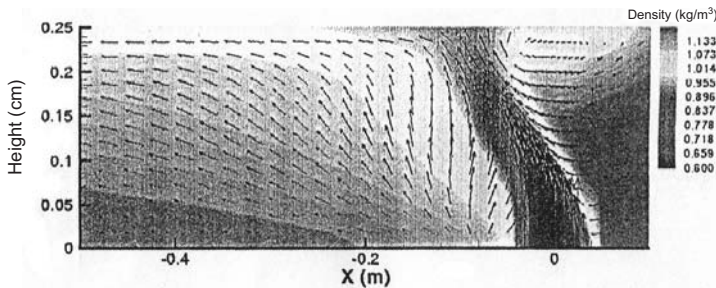
Programy CFD pozwalają uzyskać niezbędną informację o przepływie płynu (rozkład pola prędkości, pole ciśnienia), ruchu ciepła (pole temperatury) i masy (w tym reakcje chemiczne). Osiąga się to poprzez numeryczne rozwiązanie równań opisujących wymianę pędu, bilansu energii i masy. Jest dostępnych kilka numerycznych metod, które umożliwiają rozwiązanie wspomnianych równań. Są to:

- metoda elementu skończonego,
- metoda objętości skończonej.

Program numeryczny Fluent 5 (Fluent. Inc) oparty na MES (Metoda Elementów Skończonych) oraz MRS (Metoda Różnic Skończonych) pozwala modelować rozprzestrzenianie się dymów pożarowych w tunelu w zależności od wielu parametrów, np. prędkości powietrza (rys. 5.8 i 5.9).



Rys. 5.8. Badanie rozchodzenia się dymów w tunelu przy prędkości powietrza 1,7 m/s – ognisko pożaru w punkcie $x = 0$ [6]



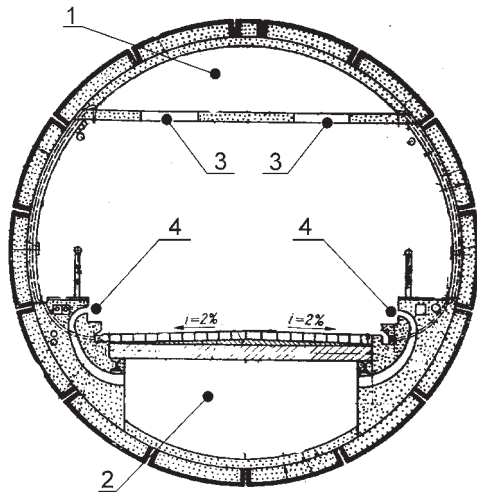
Rys. 5.9. Badanie rozchodzenia się dymów przy prędkości powietrza 1,9 m/s – ognisko pożaru w punkcie $x = 0$ [6]

Metody numeryczne są weryfikowane przez konfrontację z badaniami laboratoryjnymi lub rzeczywistymi.

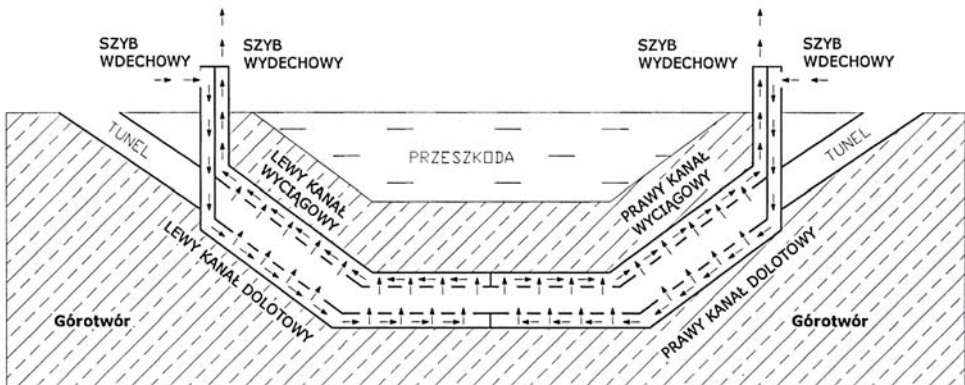
Badania modelowe tuneli w zakresie przewietrzania i dynamiki rozwoju pożaru mogą być także przeprowadzone za pomocą Systemu Programów Inżyniera Wentylacji „Ventgraph” [8].

W celu przedstawienia sposobu symulacji i zastosowania obliczeń numerycznych programem „Ventgraph” przeprowadzono badanie modelowe tunelu komunikacyjnego [2].

Przeprowadzono badanie dla modelu tunelu o przekroju kołowym (rys. 5.10) przewietrzanego systemem poprzecznym pełnym (rys. 5.11).



Rys. 5.10. Przekrój poprzeczny tunelu
Objaśnienia w tekście



Rys. 5.11. Przekrój podłużny tunelu

Powietrze jest doprowadzane do tunelu kanałem dolnym (2), umieszczonym pod powierzchnią jezdni, skąd za pomocą kanałów (4), znajdujących się pod chodnikami, przedostaje się do części przejazdowej tunelu. Otwory kanałów wyposażone są w zasuwę dla regulacji wielkości otworu i równomiernego dopływu powietrza. Kanał wyciągowy (1) jest umieszczony nad jezdnią i oddzielony płytą żelbetową, w której znajdują się podłużne prostokątne otwory (3) dla wyciągu zużytego powietrza, również zaopatrzone w zasuwę dla regulacji wielkości otworu (długość tunelu wynosi 3560 m).

Parametry ruchu:

- natężenie ruchu – 1300 pojazdów na godzinę, ruch dwukierunkowy, dla jednego kierunku 750 samochodów na godzinę, struktura ruchu w obydwu kierunkach jednakowa,
- system wentylacji: poprzeczny pełny, z dwoma szybami wentylacyjnymi w obu portalach tunelu.

Dla określenia wymaganego wydatku strumienia powietrza potrzebnego do rozrzedzenia tlenu węgla (najgroźniejszego zanieczyszczenia w powietrzu – wydzielanego przez silniki pojazdów), przyjęto następujące założenia:

- średnia emisja CO przez silniki pojazdów – $0,15 \text{ m}^3/\text{h}/\text{pojazd}$;
- natężenie ruchu – 1300 pojazdów/godzinę;
- dopuszczalne stężenie CO w powietrzu – 250 ppm (0,025%).

Wydatek strumienia emitowanego CO w spalinach wynosi $195 \text{ m}^3/\text{h}$ w związku z czym dla rozrzedzenia CO do dopuszczalnego poziomu stężenia tlenu węgla należy doprowadzić $780\,000 \text{ m}^3$ powietrza/h ($260 \text{ m}^3/\text{s}$).

System Programów Inżyniera Wentylacji „Ventgraph” został zastosowany do symulacji sytuacji awaryjnej – pożaru w projektowanym tunelu. Miejsce pożaru zostało założone w znacznej odległości (1100 m od portalu) od wlotu oraz wylotu tunelu, tak aby zasymulować trudną do opanowania sytuację awaryjną.

Dla ogniska pożaru przyjęto:

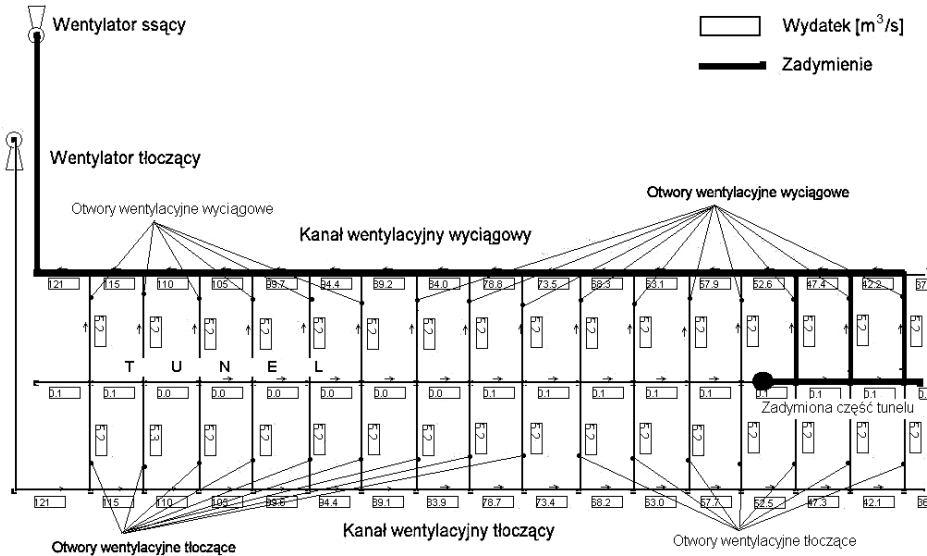
- moc cieplna pożaru 5 MW [intensywność – „10” (w skali 1–10)];
- długość strefy ognia – 50 m;
- rodzaj paliwa oleje, jako substancje mogące symulować materiały palne, biorące udział w pożarze pojazdów w tunelu;
- stała czasowa narastania powierzchni pożaru – 1,0 s.

Wyniki badań symulacyjnych pożaru

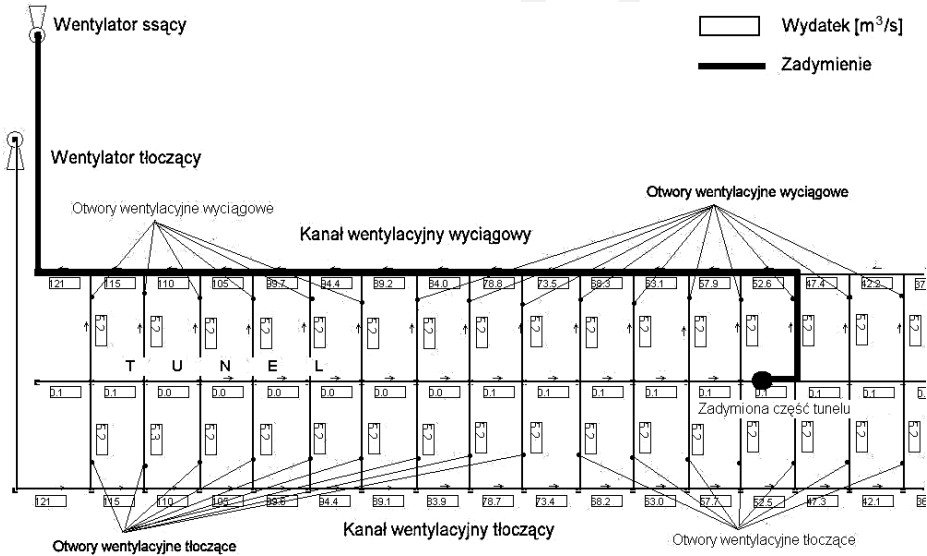
Do zobrazowania stanu przewietrzania i rozwoju pożaru w tunelu użyto wydruków wyników obliczeń przeprowadzonych przez System Programów Inżyniera Wentylacji „Ventgraph”.

Rysunek 5.12 przedstawia stan rozptyłu powietrza i dymów po 1 h od momentu wystąpienia pożaru. W tym czasie zadymiona została część tunelu o długości 100 m.

Rysunek 5.13 pokazuje rozprzestrzenianie się powietrza i gazów pożarowych przy założeniu zaistnienia pożaru w części przyśrodkowej tunelu, dokładnie w miejscu poprzedniej symulacji pożarowej, przy czym podczas tej symulacji zastosowano regulację rozptyłu powietrza i gazów za pomocą zasuw w otworach wentylacyjnych.



Rys. 5.12. Obraz komputerowy wyników symulacji pożaru dla stanu po 1 h, bez regulacji zasuw regulacyjnych



Rys. 5.13. Symulacja pożaru, z regulacją zasuw wentylacyjnych, po 4 min

Wykorzystany został system automatycznego otwierania zasuw kanału wentylacyjnego w rejonie najbliższego miejsca pożaru. Należy zauważyć, że już w ciągu 4 min od czasu powstania pożaru, po otwarciu zasuw kanału wentylacyjnego wyciągowego, zostały usunięte wszystkie gazy pożarowe z części pomiędzy otworami wentylacyjnymi.

6. Eurotunel

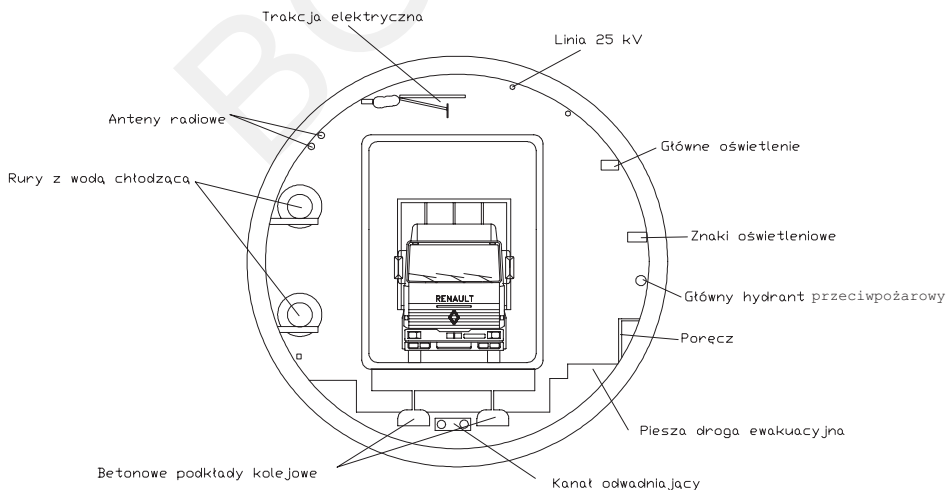
10 grudnia 1993 roku brytyjsko-francuskie konsorcjum budowlane Trans Manche Link (TML), właściciel tunelu i posiadacz koncesji na ruch szynowo-osobowo-towarowy, po siedmiu latach budowy oddało do użytku długi, około 50 km tunel.

6 maja 1994 roku na swoich stacjach załadunkowych na terminalach w Calais (Francja) i Folkestone (Wielka Brytania) został uroczystie otwarty przez francuskiego prezydenta Francois Mitteranda i brytyjską królową Elżbietę II tunel, któremu nadano nazwę Eurotunel.

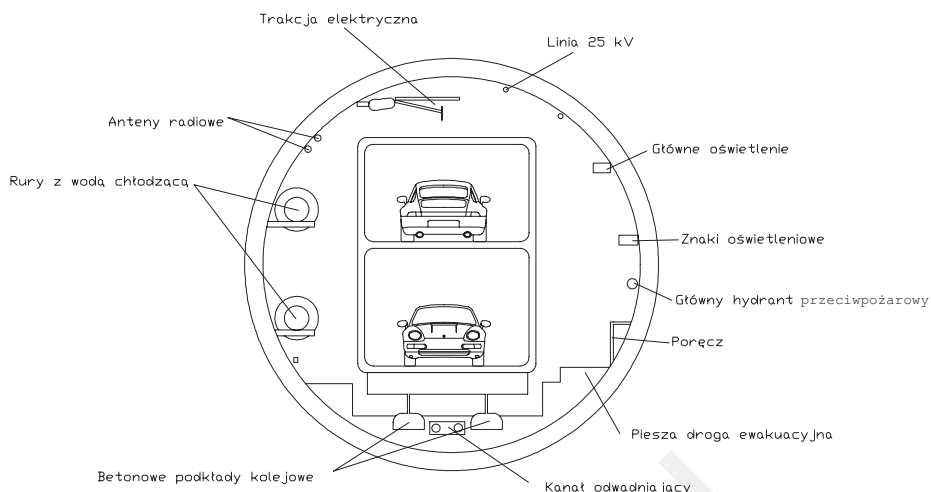
Wydarzenie to było historyczne dlatego, że po raz pierwszy od czasu epoki lodowcowej powstało połączenie lądowe pomiędzy brytyjską wyspą i europejskim kontynentem.

6.1. Wprowadzenie

Eurotunel pod kanałem La Manche jest przeznaczony do komunikacji kolejowej i składa się z trzech równoległe biegnących rur. Odstęp pomiędzy portalami tunelu po stronach brytyjskiej i francuskiej wynosi 50,5 km. Odcinek tunelu będący pod wodą ma długość około 38 km i leży od 25 do 38 metrów pod dnem morskim.



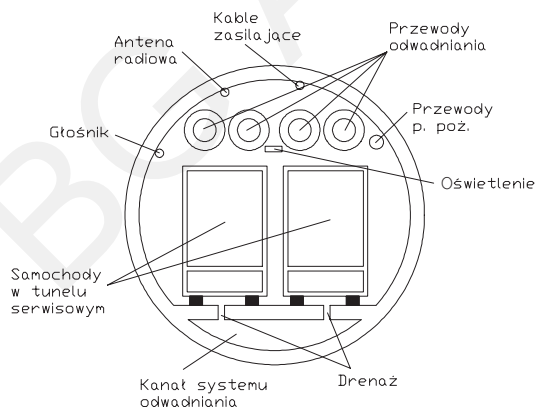
Rys. 6.1. Jeden z dwóch tuneli przeznaczony do komunikacji kolejowej samochodów ciężarowych o średnicy 7,6 m



Rys. 6.2. Jeden z dwóch tuneli przeznaczony do komunikacji kolejowej samochodów osobowych o średnicy 7,6 m

Obydwie zewnętrzne rury tunelu są jednorurowymi tunelami kolejowymi (rys. 6.1 i 6.2) z 30 metrową odległością pomiędzy rurami.

Leżąca pośrodku rura tunelu ma 4,8 m średnicy wewnętrznej i służy zarówno jako tunel konserwacyjny, jak i tunel ratunkowy dla obu tuneli kolejowych (rys. 6.3).



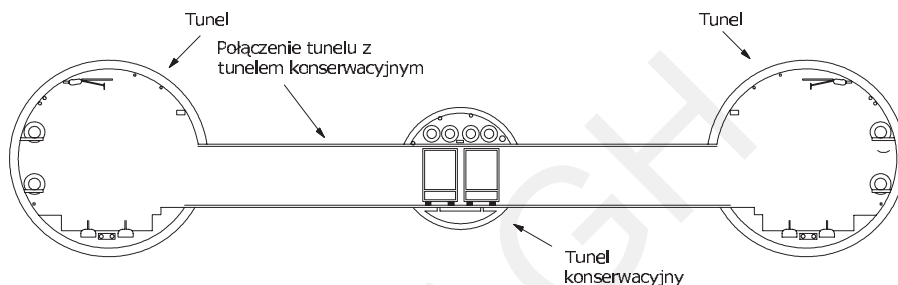
Rys. 6.3. Tunel konserwacyjny o średnicy 4,8 m z obudową tubingową, służący jako tunel ratunkowy dla obydwu tuneli komunikacyjnych

Pomiędzy trzema rurami tunelu istnieje wiele wzajemnych połączeń poprzecznych (tab. 6.1). Są to:

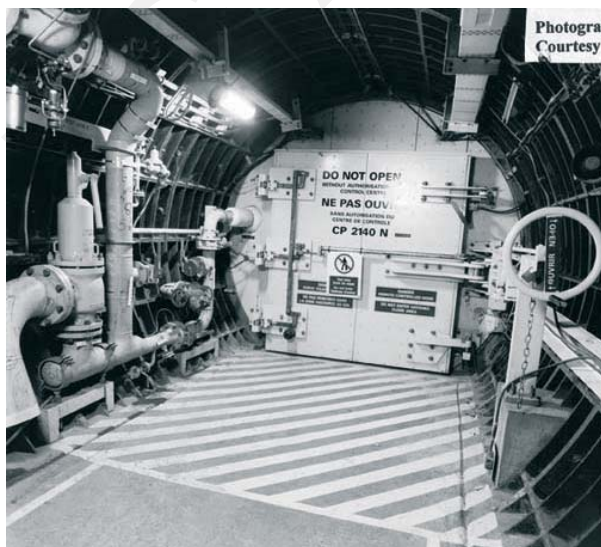
- połączenia tuneli komunikacyjnych z tunelem konserwacyjny (rys. 6.4 i 6.5),
- połączenia pomiędzy tunelami komunikacyjnymi wyrównujące ciśnienie powietrza (rys. 6.6).

Tabela 6.1
Przekroje pomiędzy trzema tunelami kanału

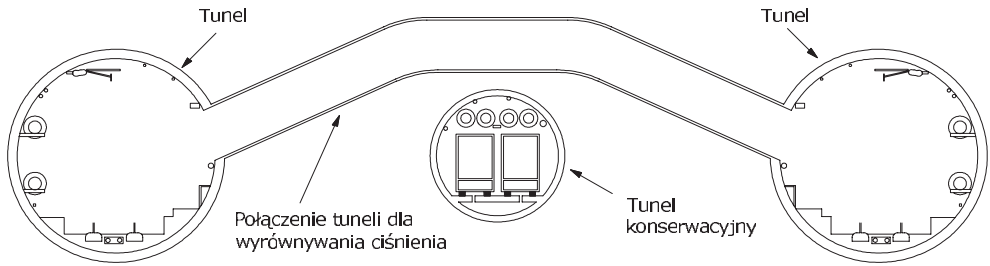
| Część połączenia tunelu | Liczba | Średnica wewnętrzna | Odstęp | Długość pojedynczego tunelu |
|--|--------|---------------------|--------|-----------------------------|
| Połączenia tuneli komunikacyjnych z tunelem konserwacyjnym | 130 | 3,30 m | 375 m | 17,60 m |
| Połączenia pomiędzy tunelami komunikacyjnymi wyrównujące ciśnienie powietrza | 150 | 2,00 m | 250 m | 23,40 m |



Rys. 6.4. Przekrój przez połączenie tuneli komunikacyjnych z tunelem konserwacyjnym przeznaczone na drogę ewakuacyjną



Rys. 6.5. Widok kanału pomiędzy dwoma tunelami kolejowymi wraz z hermetycznie zamykanymi drzwiami do tunelu konserwacyjno-ucieczkowego [5]



Rys. 6.6. Połączenia poprzeczne pomiędzy dwoma tunelami komunikacyjnymi wyrównujące ciśnienie powietrza

Przewóz ludzi i pojazdów odbywa się w specjalnie urządzonych wagonach. W jednej trzeciej długości tunelu – zarówno od strony brytyjskiej, jak i francuskiej – istnieją punkty skrzyżowania torów. Podobne punkty są jeszcze umieszczone przed wjazdem do tunelu na francuskim brzegu i w tunelu po brytyjskiej stronie. Skrzyżowania te umożliwiają zmianę organizacji transportu w tunelach w przypadkach prowadzenia robót remontowych i akcji ratunkowych (przeciwpożarowych).

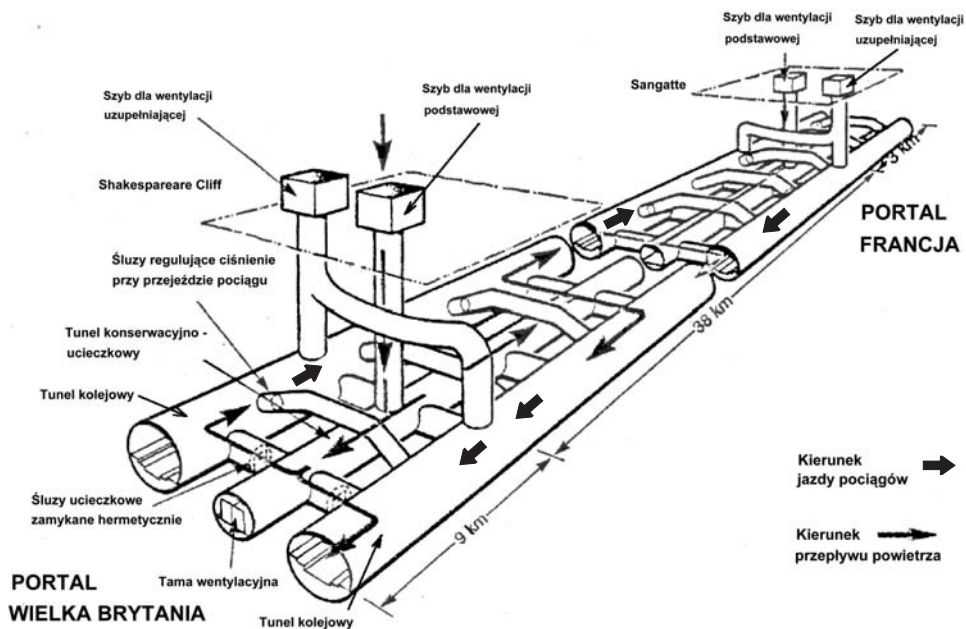
Załadunek pojazdów samochodowych na pociągi wahadłowe odbywa się w specjalnie urządzonych terminalach po stronach francuskiej i brytyjskiej, połączonych z krajowymi sieciami autostrad.

6.2. Komunikacja i wentylacja

Pojazdy i pasażerowie transportowani są przez pociągi wahadłowe pomiędzy terminalami w Calais i Folkestone oraz pociągi osobowe i towarowe poszczególnych przedsiębiorstw kolejowych korzystających z tych samych torów. Przy pełnym wykorzystaniu może jednocześnie przejeżdżać przez kanał 12 pociągów.

Eurotunel przewietrzany jest systemem mieszanym wzdłużnym (rys. 6.7). W tunelu działają dwa systemy wentylacji. Podstawowy system zapewnia w tunelu konserwacyjno-ucieczkowym wydatek strumienia powietrza wynoszący $88 \text{ m}^3/\text{s}$ wytworzony przez dwie stacje wentylatorów tłoczących zlokalizowane po obu stronach tunelu. Drugi uzupełniający system wentylacji dostarcza powietrze bezpośrednio do tuneli kolejowych za pomocą stacji wentylatorów, zlokalizowanych po stronie francuskiej, o wydatku strumienia powietrza wynoszącym $300 \text{ m}^3/\text{s}$ i stację wentylatorów po stronie brytyjskiej o wydatku strumienia powietrza wynoszącym $260 \text{ m}^3/\text{s}$. Pozwala to zapewnić odpowiednie chłodzenie powietrza i ograniczyć zagrożenie gazami toksycznymi i dymami w przypadku pożaru.

Kolejowe tunele połączone są przecinkami (194), zlokalizowanymi w odstępach co 250 m, które służą wyrównywaniu ciśnienia powietrza w tunelach i są wyposażone w tamy regulacyjne.



Rys. 6.7. System wentylacji z nadciśnieniem w tunelu konserwacyjno-ucieczkowym [22]

Tunele kolejowe są połączone także przecinkami (135) z tunelami remontowo-konserwacyjnymi, zlokalizowanymi w odstępach co 375 m, które służą do ewakuacji ludzi i dojścia służb ratowniczych. Wszystkie są zamknięte tamami, za wyjątkiem 38, które są otwarte dla doprowadzenia powietrza z tunelu remontowo-konserwacyjnego do tuneli kolejowych.

6.3. Zasady bezpieczeństwa

Wszystkie środki bezpieczeństwa stosowane w Eurotunelu muszą być zatwierdzone przez komisję brytyjskiego i francuskiego rządu (Intergovernmental Commission IGC). Komisja IGC kieruje się opinią doradców z odpowiednich urzędów bezpieczeństwa [5].

Podstawowe zasady bezpieczeństwa założone w fazie projektowania

Głównym założeniem komunikacji w Eurotunelu jest bardzo wysoki poziom bezpieczeństwa oraz niezawodność systemu pociągu wahadłowego (Le Shuttle) i eksploatowanych przez poszczególne państwowe przedsiębiorstwa kolejowe pociągów towarowych i osobowych. Dla całego systemu opracowano kompleksową strategię bezpieczeństwa. W fazie projektowania analizowano i badano prawdopodobieństwo wystąpienia wszystkich możliwych zagrożeń. Uwzględniono ryzyko trzęsienia ziemi, powódź przy braku zasilania, zderzenie się pociągów, wykolejenie, pożary i kombinację tych zagrożeń.

Wypadki kolejowe

Zagrożenie wystąpienia wypadku wskutek zderzenia się pociągów zostało w sposób zasadniczo ograniczone w Eurotunelu poprzez budowę dwóch jednotorowych tuneli, z jednokierunkowym ruchem pociągów. Wewnątrz tunelu, z obydwóch stron, zostały wybudowane betonowe zabezpieczenia na obrzeżach torów, które uniemożliwiają przewrócenie się wykolowanych wagonów. Ludzka zawadność jest najczęstszą przyczyną kolizji pociągów. Dlatego też w obydwóch tunelach kolejowych pracuje automatyczny nadzór kolejowy.

Zagrożenie pożarowe

W celu ograniczenia ryzyka powstania pożaru do transportu samochodów osobowych, autobusów, motocykli i tego typu pojazdów zastosowano specjalny typ pociągów wahadłowych, które zostały wykonane z materiałów ogniotrwałych niewydzielających dymu i związków toksycznych w czasie palenia.

Zapobieganie ryzyku pożaru

Pierwszym krokiem prewencji przeciwpożarowej jest oczywiście zapobieganie możliwości powstania pożaru. Z tego powodu, zarówno palenie tytoniu, jak i otwieranie silników pojazdów w pociągu jest zabronione. Transport stwarzających niebezpieczeństwo towarów takich jak paliwa, trujące lub zapalne gazy lub chemikalia, które w zamkniętym systemie tunelu stwarzają zbyt duże ryzyko, także jest zabroniony.

Detekcja pożaru

Drugim krokiem prewencji jest możliwie jak najwcześniejsze wykrycie ognia. Do tego celu zastosowano automatyczne detektory niebezpiecznych związków gazowych, dymu i płomienia ognia wyzwalające sygnały alarmowe i wzywające pasażerów oraz personel do ewakuacji z zagrożonych wagonów.

Pożar w samochodzie ciężarowym jest wykrywany natychmiast przez czujniki umieszczone na pokładzie pociągu. Ponadto ulatniający się dym powinien zostać wykryty przez detektory znajdujące się w regularnych odstępach w tunelu. W przypadku wykrycia dymu centrum kontroli może nakazać natychmiastowe zwolnienie biegu lub zatrzymanie ruchu pociągów jadących w obydwóch kierunkach, a także uruchomienie urządzeń zamykających przewody wentylacyjne zainstalowane w tunelu w celu uniemożliwienia rozprzestrzeniania się dymu.

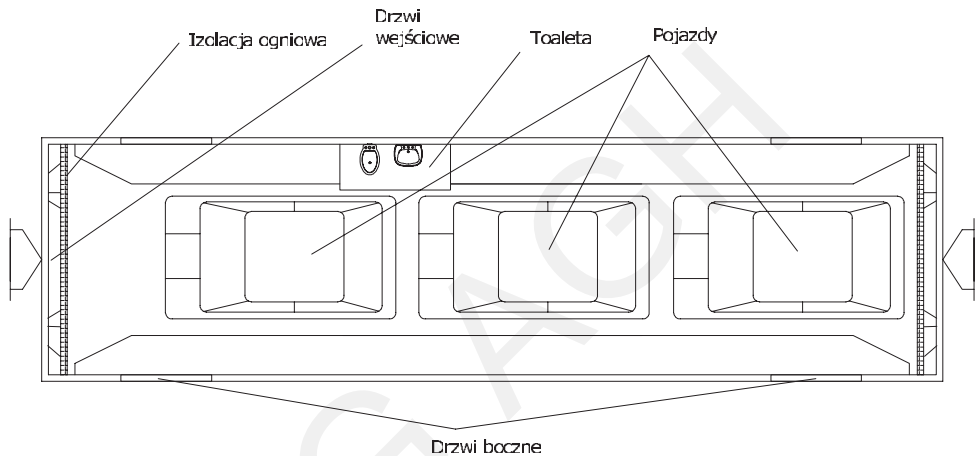
Gaszenie pożaru

Trzecim krokiem zapobiegawczym jest gaszenie pożaru. Samochody osobowe i autobusy stoją w wagonach w płaskich zagłębieniach z rynienkami odpływowym dla ewentualnie wypływającego paliwa i olejów. W przypadku zapłonu paliwa, automatycznie są uruchamiane pianowe urządzenia gaśnicze. Oprócz tego zamontowano ręczne gaśnice do użytku pasażerów i personelu pociągu. Tylko w przypadku pożaru zagrażającego życiu stosowany jest system automatycznego gaszenia pożaru za pomocą Halonu 1301 o małym stężeniu, które nie stanowi niebezpieczeństwa dla ludzi.

Pociągi towarowe z płonącym wagonem albo częścią pociągu nie powinny być zatrzymywane w tunelu ze względu na to, że zwalczenie pożaru lepiej przeprowadza się na zewnątrz tunelu. W przypadku, kiedy płonący wagon jest niezdolny do dalszej jazdy pozostałe wagony towarowe są odczepiane i usuwane z terminalu. Powstały pożar jest gaszony przy pomocy gaśnic lub wody z hydrantów w zależności od rodzaju ładunku.

Ograniczenie pożaru

Czwartym krokiem prewencyjnym jest ograniczenie zasięgu pożaru: Zaraz po zakończeniu załadunku pojazdów osobowych w terminalu na końcu każdego z wagonów opuszczana jest przegroda z zamontowanymi przejściami dla pasażerów odgradzająca i chroniąca przed ogniem (rys. 6.8).



Rys. 6.8. Wagon transportowy z przegrodą przeciwpożarową

Ewakuacja

Piątym krokiem prewencyjnym jest ewakuacja – wszyscy podróżni i pracownicy w przypadku dużego zagrożenia pożarowego lub innego muszą zostać ewakuowani z tunelu w ciągu 90 minut. Wszystkie systemy bezpieczeństwa są w dużym stopniu zaprojektowane ze względu na ten warunek.

W przypadku, kiedy jest konieczna całkowita ewakuacja, na początku zostają wycofane wszystkie nadjeżdżające pociągi. Dlatego lokomotywa na końcu pociągów wahadłowych i przejeżdżających pociągów osobowych jest ciągle obsadzona przez motorniczego.

Urządzenia sygnałowe w tunelach kolejowych są zaprojektowane na wahadłową zmianę kierunku ruchu. Przejeżdżające pociągi towarowe opuszczają tunel zgodnie z kierunkiem ruchu jazdy.

Podróżni są ewakuowani do drugiego tunelu kolejowego, w którym wsiadają do pociągu. W przypadku, kiedy taki wariant jest niemożliwy do zastosowania, ewakuacja prowadzona jest tunelem konserwacyjno-ucieczkowym.

Przy ewakuacji pociągu kolejność działań jest następująca:

pociąg jest albo wyprowadzany z tunelu na specjalny tor zapasowy przed terminalem, albo zatrzymuje się na wysokości połączenia poprzecznego pomiędzy tunelami w celu ewakuacji pasażerów do tunelu konserwacyjno-ucieczkowego, w innym przypadku można odcepić platformy służące do przewożenia samochodów ciężarowych i wagon, w którym przybywają pasażerowie wraz z lokomotywą może opuścić tunel. W przypadku niezdolności pociągu do dalszej jazdy pasażerowie i personel mogą być ewakuowani przez połączenia poprzeczne pomiędzy tunelami.

Środki przeciwpożarowe

W tunelu kolejowym w celu zwalczania pożaru znajdują się w odstępach co 25 metrów hydranty z wodą. System przewodów ze względów bezpieczeństwa prowadzony jest w tunelu konserwacyjno-ucieczkowym. Oprócz tego pociągi wahadłowe wyposażone są w gaśnice.

Transport w tunelu konserwacyjno-ucieczkowym

Tunel konserwacyjno-ucieczkowy jest wyposażony w systemem torów, po których poruszają się niezależne od zewnętrznego systemu zasilania pojazdy transportowe (na bezdętkowych kołach). Dzięki nim służba ratownicza lub personel mogą dojechać na miejsce wypadku z prędkością około 80 km/h. Są to umieszczone na obu końcach tunelu jednolite pojazdy remontowe, ambulanse i pojazdy straży pożarnej napędzane przy pomocy silników dieslowskich.

Nadciśnienie w tunelu konserwacyjno-ucieczkowym

Wentylatory tłoczą ciągle powietrze do tunelu konserwacyjno-ucieczkowego, skąd kierowane są przez otwory wylotowe do tuneli kolejowych (rys. 6.7). Na obu końcach tunelu konserwacyjno-ucieczkowego są zamknięte tamy wentylacyjne, które powodują, że ciśnienie powietrza jest zawsze wyższe w nim niż w tunelach kolejowych. W przypadku pożaru tunel konserwacyjno-ucieczkowy pozostaje wolny od dymów oraz dostępny dla ewakuacji pasażerów i pracowników.

Zasilanie elektryczne

Zasilanie elektryczne jest zapewnione poprzez podwójne połączenie do francuskiej i brytyjskiej sieci elektrycznej. Nawet przy braku prądu po jednej stronie kanału pociągi mogą dalej jechać. W przypadku braku prądu elektrycznego po obu stronach kanału zasilanie zapewniają generatory spalinowe (dieslowskie) po obu stronach kanału dla utrzymania ważnych funkcji, takich jak oświetlenie i komunikacja. Także lokomotywy spalinowe (dieslowskie) zlokalizowane w obydwóch terminalach tuneli mogą być użyte do odholowania pociągów z tuneli kolejowych.

Komunikacja

Pomiędzy centrami kontroli w obydwóch terminalach i pracownikami w tunelu oraz w pociągu istnieją wydajne połączenia komunikacyjne. Te częściowo bezprzewodowe i częściowo przewodowe systemy są tak zaprojektowane, aby w przypadku awarii jednego z systemów natychmiast dostępny był inny.

Dyspozytornie (sztab kryzysowy)

W każdym z terminali znajduje się dyspozytornia (rys. 6.9) i urządzone pomieszczenie sztabu kryzysowego, które w przypadku zagrożenia jest wykorzystywane jako centrum działań przez pracowników służby ratowniczej i personel Eurotunelu.

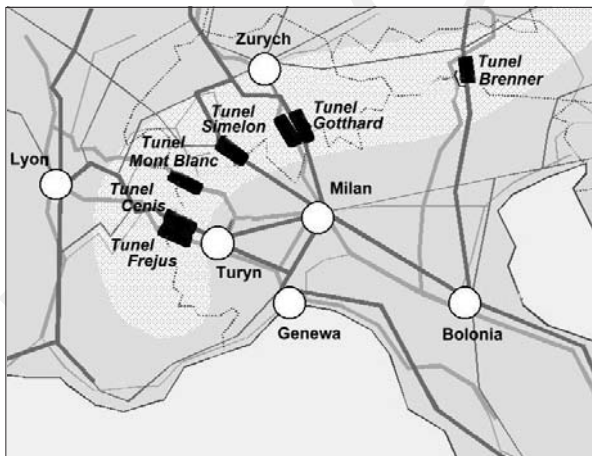


Rys. 6.9. Centrum kontroli Eurotunelu w Folkestone i Calais [5]

7. Tunel Mont Blanc

7.1. Charakterystyka

Tunel Mont Blanc został zbudowany w latach 1956–1964 i funkcjonuje w nim jeden pas jezdni z ruchem dwukierunkowym w każdą stronę. Przez tunel prowadzi najkrótsza droga z Paryża do Rzymu, łącząc Chamonix (Francja) i Courmayeur (Włochy) (rys. 7.1). Z tego względu obsługuje on około 50% transportu kołowego między Francją i Włochami. Wielkość ruchu wynosi około 5000 samochodów/dziennie, w tym 50% ciężarowych.



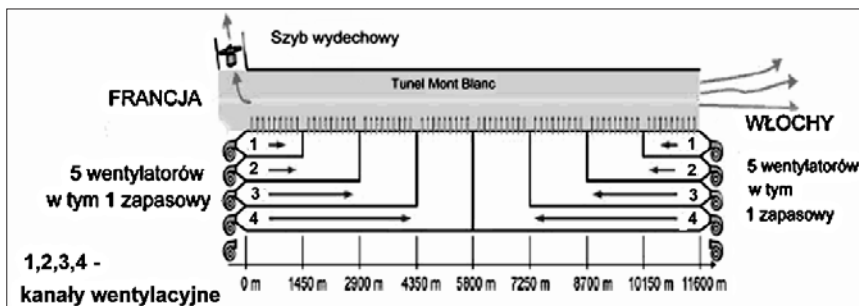
Rys. 7.1. Mapa obrazująca lokalizację tunelu Mont Blanc [20]

Główne cechy geometryczne tunelu Mont Blanc:

- długość 11 600 m,
- nachylenie (Włochy → Francja):
 - +0,25% 0–5800 m,
 - –1,2% 5800–8700 m,
 - –2,4% 8700–11 600 m,
- przekrój poprzeczny 46 m².

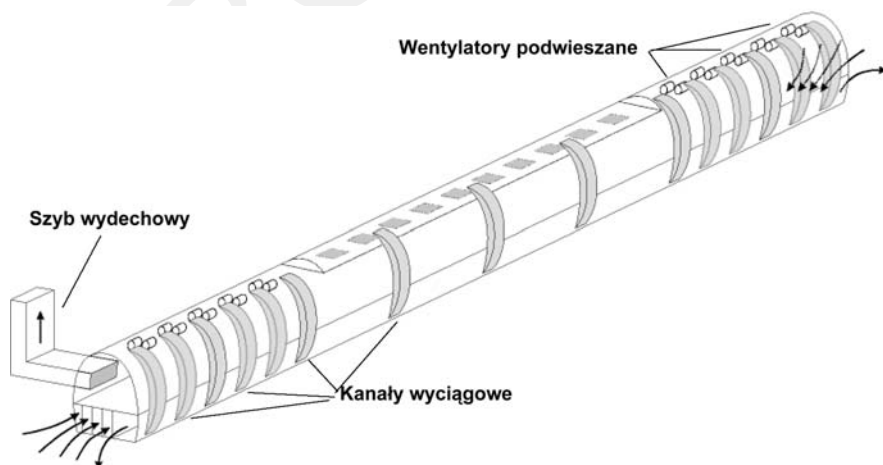
7.2. Wentylacja

System wentylacji tunelu Mont Blanc (rys. 7.2) jest mieszany: wzdłużny i poprzeczny, a przepływ powietrza odbywa się pod wpływem depresji mechanicznej wentylatorów, przy czym jest także duże i zmienne w czasie oddziaływanie depresji naturalnej. Zarówno kanały doprowadzające świeże powietrze do tunelu, jak i kanały odprowadzające spaliny, umieszczone są pod powierzchnią jezdni. System wentylacji tunelu został w znaczącym stopniu zmodernizowany w wyniku ustaleń po pożarze w 1999 r.



Rys. 7.2. Schemat wentylacji tunelu Mont Blanc

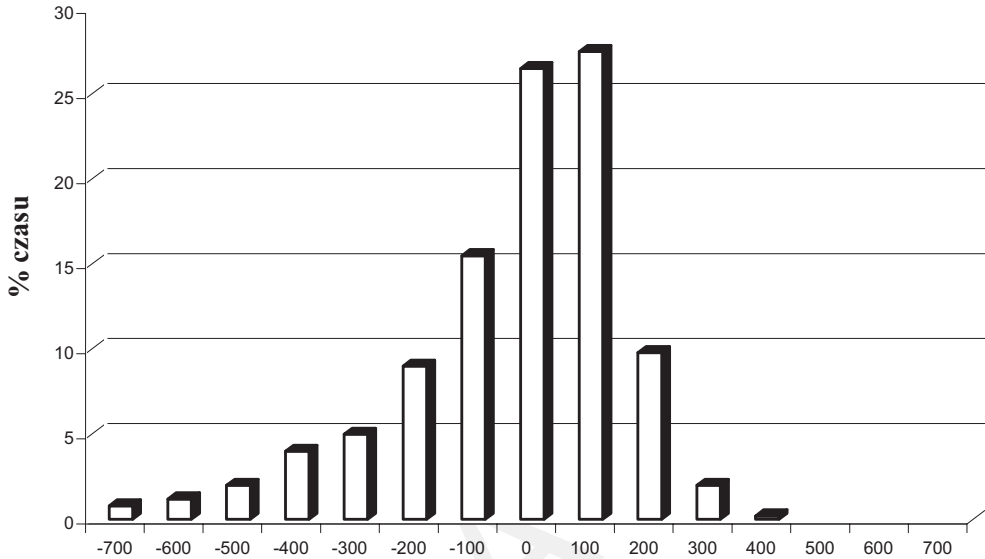
Świeże powietrze jest wciągane do tunelu za pomocą dziesięciu odśrodkowych wentylatorów (dwa wentylatory jako zapasowe) umieszczonych przy obydwu portalach tunelu (po stronie francuskiej i włoskiej) (rys. 7.3). Powietrze dalej jest rozprowadzane równomiernie w tunelu przez kanały wentylacyjne (w odstępach co 1450 m). Sumaryczny wydatek strumieni powietrza wynosi $82,5 \text{ m}^3/\text{s}$ i zapewnia utrzymywanie jego prawidłowych parametrów jakościowych. Powietrze odprowadzane jest wzdłużnie w stronę portali do kanału spalinowo-dymnego.



Rys. 7.3. System wentylacji tunelu Mont Blanc dla stanu normalnego

W tunelu jest generowana depresja naturalna, która w niektórych okresach roku może osiągać nawet wielkość 1000 Pa i powoduje zaburzenia w stabilności wielkości przepływu strumienia powietrza.

Różnicę ciśnienia między dwoma portalami ilustruje rysunek 7.4.



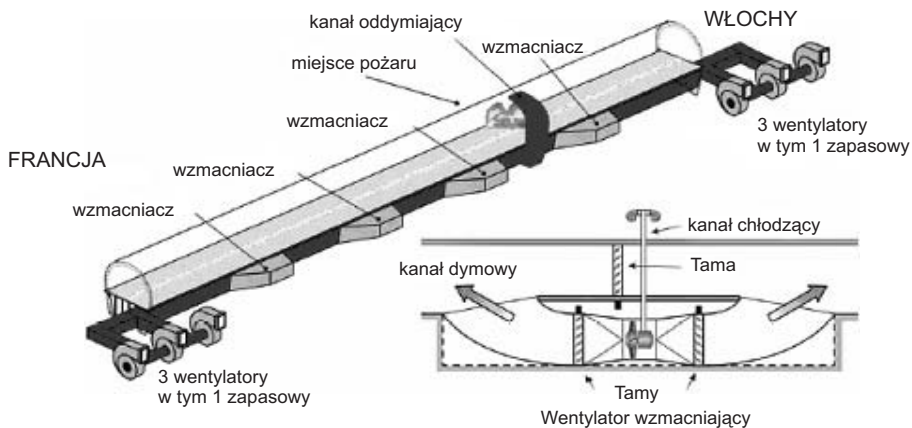
Rys. 7.4. Różnica ciśnień pomiędzy portalami (Francja – Włochy)

Depresja naturalna wraz z depresją cieplną pożaru („efekt kominowy”) były główną przyczyną wystąpienia trudności w ustabilizowaniu zadymienia w tunelu w czasie pożaru.

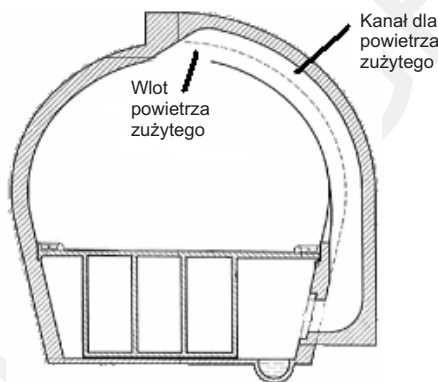
W przypadku pożaru dym powinien być odprowadzony z tunelu kanałami spalinowo-dymnymi przez sześć wentylatorów odśrodkowych (dwa są zapasowymi) umieszczonych przy portalach tunelu, oraz cztery wentylatory osiowe (wzmacniające) zainstalowane wzdłuż kanału spalinowo-dymnego (rys. 7.5 i 7.6). Tunel jest wyposażony w system kanałów odprowadzających zużyte powietrze, a także dymy spalinowe w przypadku zaistnienia pożaru. Kanały są rozmieszczone wzdłuż tunelu w odstępach 100 m. Ponadto w tunelu zostało zainstalowanych przy stropie siedemdziesiąt sześć wentylatorów wspomagających i regulujących przepływ powietrza w tunelu. Moc zainstalowanych urządzeń wentylacyjnych wynosi 18,5 MW.

W normalnych warunkach wentylacji prędkość wzdłużna powietrza zanika w centralnej części tunelu i rośnie linearnie w stronę portali, gdzie wartość prędkości 6–7 m/s zwykle jest przekroczona. W przeszłości wartości prędkości dochodziły aż do 15 m/s.

W przypadku pożaru prędkość wzdłużna powietrza musi zostać zmniejszona bardzo szybko do wartości niższych niż 1–2 m/s, aby uniknąć rozchodzenia się dymów pożarowych i poprawić skuteczność systemu oddymiania. Przy zastosowaniu obecnego systemu regulacji wentylacji, wzdłużną prędkość można ograniczyć do ok. 1,5 m/s w miejscu pożaru w ciągu 5 minut.



Rys. 7.5. Schemat instalacji oddymiającej



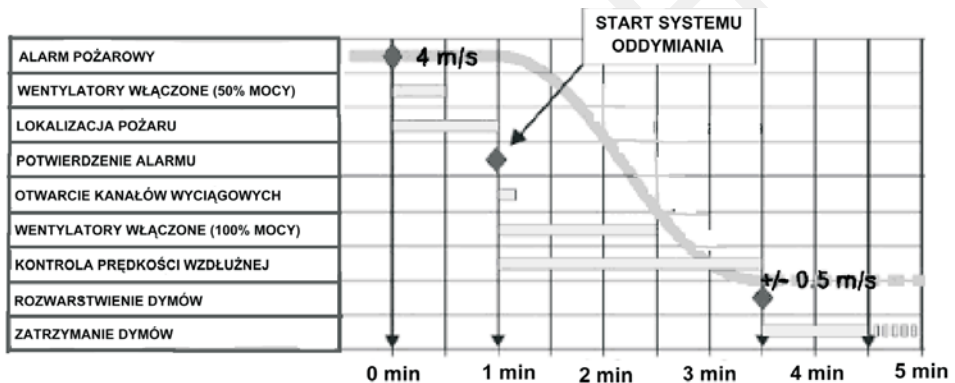
Rys. 7.6. Przekrój poprzeczny przez tunel z zaznaczeniem kanałów wentylacyjnych

W tunelu są zainstalowane następujące automatyczne urządzenia kontrolno-pomiarowe, służące zbieraniu danych dla systemu kontroli wentylacji:

- anemometry mierzące wzdłużną prędkość powietrza rozmieszczone w 20 punktach tunelu,
- sensory zanieczyszczenia (widoczność, tlenek węgla i tlenek azotu),
- przepływomierze (rurki Pitotta–Prandla) dostarczające informacje o wielkości wydatku strumienia powietrza doprowadzanego i odprowadzanego z tunelu w miejscach charakterystycznych, jak wloty każdego kanału wentylacyjnego ze świeżym powietrzem, wloty każdego kanału z powietrzem zużyтым oraz w miejscu instalowania wentylatorów osiowych dla powietrza zużytego,
- precyzyjne barometry dostarczające informacji o aktualnym ciśnieniu bezwzględnym przy portalach tunelu.

System komputerowego [17] sterowania wentylacją w tunelu Mont Blanc, dzięki urządzeniom przesyłającym dane wentylacyjne *on-line* pozwala na kontrolę parametrów wentylacyjnych w czasie rzeczywistym. Oczywiście w razie sytuacji awaryjnych kontroler obsługujący system wentylacji może przełączyć sterowanie na ręczne i samodzielnie podejmować decyzje. Czas reakcji urządzeń działających automatycznie został skrócony do minimum. System jest oparty na scentralizowanej bazie danych wentylacyjnych, co może być traktowane jako jego wada. Awaryjność urządzeń komputerowych jest relatywnie duża, co może wpływać bezpośrednio na stan bezpieczeństwa w tunelu. Dlatego zostały zainstalowane dwa komputery po obydwu stronach tunelu, aby w razie awarii jednego z nich, kontrolę mógł przejąć drugi. Czas przełączenia pomiędzy jednym a drugim komputerem wynosi około dwóch minut, a w tym czasie kontrolę przejmują odpowiednie osoby w ręcznym trybie pracy.

System komputerowy z założenia ma działać bez pomocy ludzkiej, całkowicie automatycznie. Oznacza to, że system musi zlokalizować źródło ognia i odpowiednio na nie zareagować. W tym celu zakłada się, że każda informacja o potencjalnym zaistnieniu pożaru, traktowana jest jak sam pożar.



Rys. 7.7. Kolejność i typowa synchronizacja kroków przy automatycznie działającym systemie oddymiania [18]

Działania regulacyjne przedstawione na rysunku 7.7 wykonywane przez system automatycznie po wykryciu pożaru i obejmują:

- wyłączenie wszystkich wentylatorów wzdłużnych umieszczonych pod stropem tunelu, aby nie zaburzać przepływu dymu;
- zamykanie wszystkich kanałów pożarowych;
- podwyższanie mocy wszystkich wentylatorów do 50% wydajności w celu ustalenia laminarnego przepływu dymu;
- redukcja dotłaczania świeżego powietrza do $25 \text{ m}^3/\text{s}$;
- podwyższanie ciśnienia w schronach przeciwpożarowych;
- ustawianie wszystkich urządzeń w pozycji „pożar”.

Cała operacja trwa około jednej minuty i daje gwarancję gotowości systemu do opanowania ewentualnego pożaru oraz dymów pożarowych.

Miejsce pożaru wykrywane jest za pomocą światłowodowych detektorów temperatury, rozmieszczonych wzdłuż stropu tunelu. Podwyższenie temperatury w danym miejscu wskazuje miejsce pożaru.

Gdy operator dostaje informację o zmianie parametrów wentylacyjnych mogących świadczyć o zaistnieniu pożaru, ma możliwość:

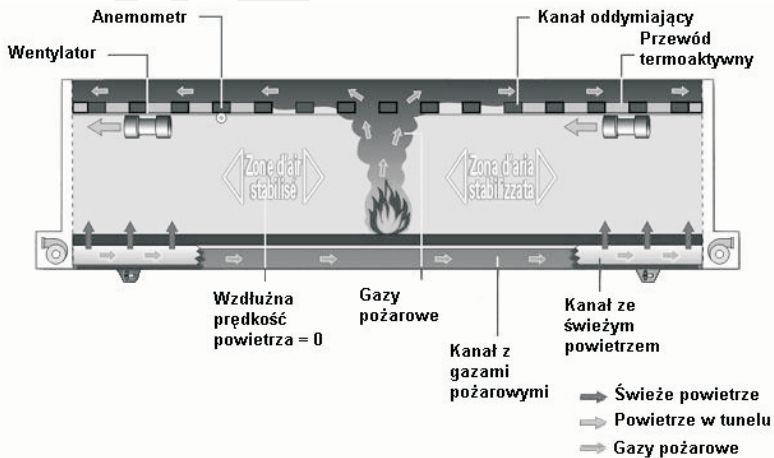
- rozmowy telefonicznej z użytkownikiem tunelu;
- bezpośredniej obserwacji przez kamery wideo;
- obserwacji zatrzymania się pojazdu (automatyczne wykrycie pojazdów zatrzymujących się);
- określenia czy alarm był spowodowany złą widocznością powietrza;
- ograniczenia rozprzestrzeniania dymu i kontroli wzdłużnej prędkości;

Gdy miejsce pożaru zostanie zlokalizowane, system zaczyna następującą procedurę:

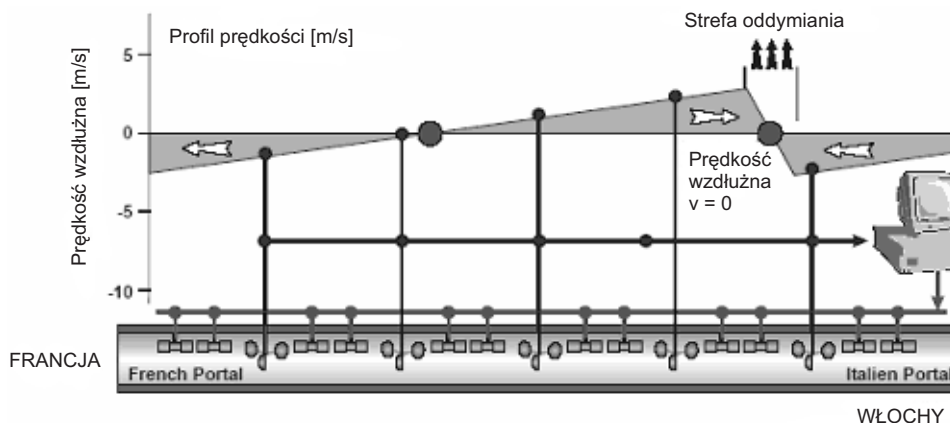
1. otwarcie siedmiu kanałów pożarowych dookoła ogniska pożaru;
2. zatrzymanie prędkości wzdłużnej w tunelu przez wentylatory wzdłużne mające możliwość pracy rewersyjnej;
3. odprowadzanie kanałami spalinowo-dymnymi wydatku strumienia powietrza (wynoszącego co najmniej $150 \text{ m}^3/\text{s}$) przez wentylatory instalacji przeciwpożarowej.

Wszystkie procedury są wykonywane automatycznie przez system który reaguje bez ingerencji człowieka.

Aby porównać wyniki symulacji komputerowych z rzeczywistym pożarem, 30 stycznia 2002 r. wykonano próbę pożaru o mocy 8 MW. W tym czasie system był sterowany automatycznie oraz testowany. Wyniki, jakie otrzymano potwierdziły przydatność systemu automatycznego sterowania wentylacją (rys. 7.8 i 7.9).



Rys. 7.8. Zautomatyzowany system oddymiania w razie pożaru [18]

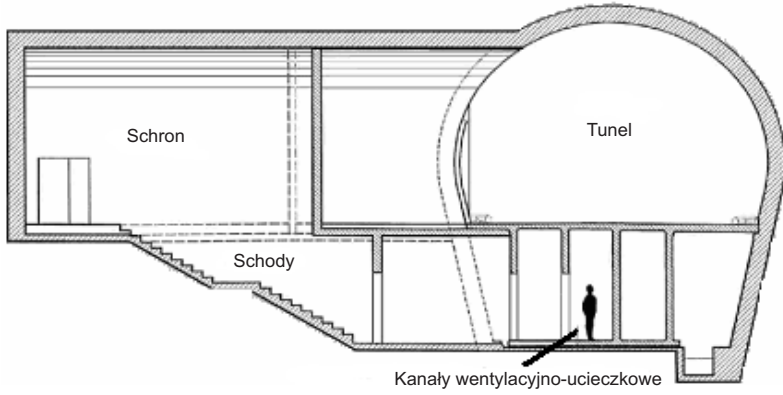


Rys. 7.9. Schemat sterowania prędkością wzdłużną powietrza w tunelu [18]

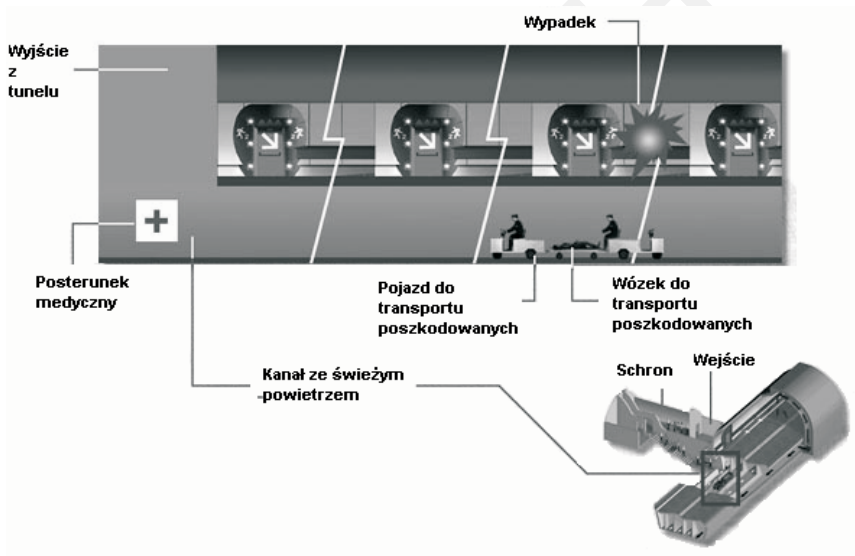
System bezpieczeństwa w tunelu Mont Blanc zawiera wszystkie elementy zabezpieczeń, jakie powinny posiadać tunele, dzięki czemu może posłużyć on jako przykład budowy tego typu.

Do wyposażenia tunelu należą następujące środki:

- zatoki parkingowe o długości 30 m rozmieszczone co 300 m, pozwalające na zatrzymanie pojazdu w razie awarii lub zawrócenie;
- informacje radiowe przekazywane kierowcom w razie awarii za pomocą specjalnego systemu komunikacji radiowej. Częstotliwość, na której odbiera radio podana jest przy wjeździe do tunelu oraz na tablicach rozmieszczonych co 600 m;
- oświetlenie (czerwone lampy) nakazujące zatrzymanie pojazdu w razie awarii w tunelu, rozmieszczone co 300 m;
- szlabany opuszczane automatycznie w przypadku wypadku, pozwalające zatrzymać ruch w tunelu, oraz nie dopuszczać do zderzeń kolejnych pojazdów;
- oznaczenia świetlne rozmieszczone co 600 m, pozwalające na kierowanie ruchem i zawierające informacje o zmianie dopuszczalnej prędkości, zablokowaniu pasa ruchu, wypadku w tunelu, korkach itp.;
- schrony (rys. 7.10. i 7.11) rozmieszczone co 300 m, o powierzchni wynoszącej 37,5 m² pozwalającej jednocześnie 50 osobom na schronienie się w razie pożaru (w schronach znajdują się urządzenia łączności jak wideotelefon, a także połączenia z kanałami wentylacyjno-ucieczkowymi);
- oznaczenia dróg ucieczkowych rozmieszczone co 50 m;
- pomieszczenia co 100 m o wymiarach 1,5 × 1,2 × 2,2 zawierające telefon alarmowy i gaśnicę;
- trzy stacje pomocy medycznej rozmieszczone przy portalach tunelu oraz w środku;
- zmienne przekroje dróg ucieczkowych na całej długości tunelu.



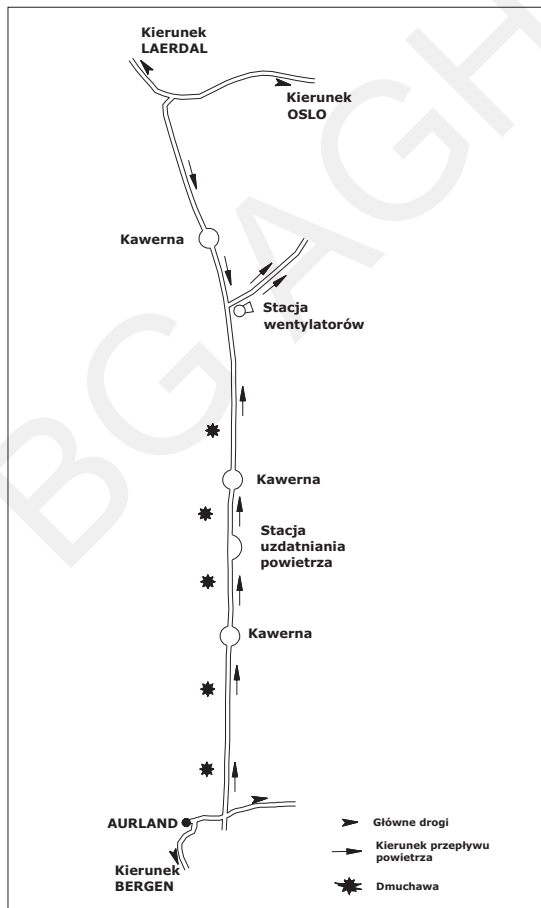
Rys. 7.10. Przekrój poprzeczny przez tunel, schron oraz kanały wentylacyjno-ucieczkowe



Rys. 7.11. Ewakuacja pasażerów w czasie pożaru [18]

8. Tunel Laerdal

W Norwegii w latach 1995–2000 został wybudowany tunel Laerdal [16], który jest obecnie najdłuższym tunelem drogowym na świecie – 24 510 m (rys. 8.1).



Rys. 8.1. Przekrój podłużny tunelu Laerdal

Jest to bardzo ważne połączenie pomiędzy Bergen a Oslo, które posiada kluczowe znaczenie, szczególnie w czasie zimy, dla ruchu drogowego w Norwegii, gdyż właśnie w tym czasie większość dróg zostaje zamknięta z powodu dużej ilości śniegu. Góry nad tunelem sięgają 1800 m, droga poprzez te wzniesienia jest czynna tylko przez pięć miesięcy w roku w lecie.

Prace prowadzone podczas budowy zostały zaplanowane tak, aby maksymalnie skrócić czas drążenia tunelu. Najpierw wydrążono tunel technologiczny o długości 2,1 km prowadzący do środkowej części tunelu właściwego po to, by można było drążyć tunel jednocześnie z czterech stron, który następnie wykorzystano jako tunel wentylacyjny.

8.1. Wentylacja i oczyszczanie powietrza

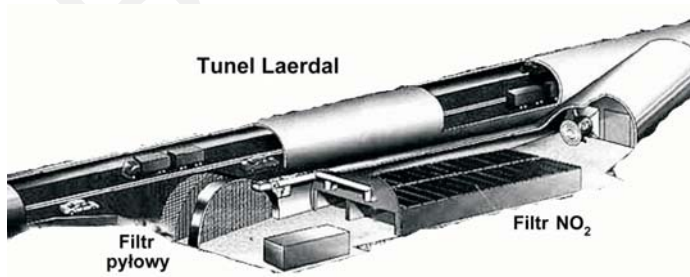
Tunel Leardal jest przewietrzany systemem wzdłużnym. Powietrze dociera z obu portali do tunelu wentylacyjnego i dalej otworem pod wpływem działania ssących wentylatorów na powierzchnię góry w Tynjadalen. Główna stacja wentylatorów składa się z dwóch pracujących wentylatorów typu Howden wytwarzających wydatek strumienia powietrza wynoszący $480 \text{ m}^3/\text{s}$ przy spiętrzeniu 1300 Pa.

Dodatkowo zostały zainstalowane w tunelu 32 wentylatory w 5 grupach pomiędzy portalem w Aurland a tunelem wentylacyjnym.

Jakość powietrza jest stymulowana przez dwa systemy:

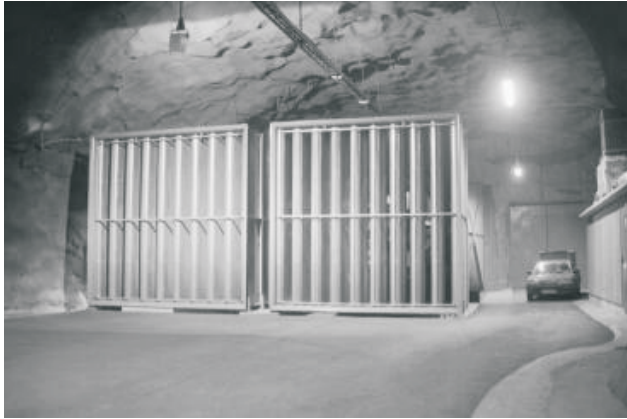
- 1) wentylacyjny,
- 2) oczyszczający.

Tunel Laerdal jest pierwszym na świecie tunelem wyposażonym w specjalne wyrobiska (100 m długości), w których zainstalowano urządzenia do oczyszczania powietrza z tlenków azotu oraz pyłu (rys. 8.2 i 8.3).



Rys. 8.2. Schemat stacji uzdatniania powietrza w tunelu [29]

Za pomocą dwóch wentylatorów powietrze jest zasysane i oczyszczane, przechodząc przez filtr elektrostatyczny, w którym osadza się pył, a następnie przepuszcza się je przez kolejne filtry oczyszczający je z dwutlenku azotu.



Rys. 8.3. Stacja uzdatniania powietrza w tunelu [20]

8.2. Środki bezpieczeństwa

W przypadku zaistnienia wypadku, także pożaru, zainstalowano następujące systemy bezpieczeństwa:

- telefony alarmowe rozmieszczone w odległości 250 m, oznaczone symbolem SOS;
- gaśnice przeciwpożarowe rozmieszczone w odległości 125 m;
- światła „STOP” oraz „ZAWRÓĆ” włączane automatycznie, gdy używany jest jeden z telefonów alarmowych;
- zbudowano piętnaście zatok, służących do zawracania, także dla ciężarówek z naczepami;
- dodatkowo w górotworze zostały wydrążone trzy hale, oraz wybudowane co 500 m specjalne pomieszczenia ewakuacyjne;
- telefon alarmowy łączący z policją, strażą pożarną i szpitalem;
- połączenie z centrum ochrony w Laerdal i Bergen, jest czynne przez całą dobę;
- urządzenia pozwalające komunikować się za pomocą radia samochodowego i telefonu komórkowego;
- system liczenia wszystkich pojazdów wjeżdżających i wyjeżdżających do tunelu, za pomocą kamer;
- ograniczenie natężenia ruchu do 1000 pojazdów dziennie, co pozwala utrzymywać odpowiednio duże odległości pomiędzy pojazdami.

8.3. Dodatkowe wyposażenie

Aby zmniejszyć monotonię 20-minutowej jazdy w tunelu, wybudowano trzy duże kawerny, dzielące tunel na cztery części. Dużą uwagę zwrócono na oświetlenie, gdyż białe światło zostało użyte do oświetlenia tunelu, a niebieskie i żółte do oświetlenia kawern. Daje to

iluzję wjeżdżania w światło dzienne, co 6 km (w odległości kawern), a żółte światło umieszczone przy spągu jest podobne do wschodzącego słońca.

Aby nie dopuścić do zderzeń czołowych oraz zasypiania kierowców, dwa pasy ruchu zostały oddzielone od siebie specjalnymi wypustkami powodującymi głośny huk podczas zmiany pasa ruchu.

Zagrożenie pożarowe

Możliwość wystąpienia pożaru istnieje realnie nawet w tak dobrze zabezpieczonych tunelach, o czym świadczy pożar powstały na kilka godzin przed formalnym otwarciem tunelu w dniu 27 listopada 2000 roku. Zapaleniu uległ wentylator w autobusie wiozącym 50 pasażerów z Voss do Laerdal.

Dymiący autobus wywieziono poza tunel, a żaden z pasażerów nie uległ wypadkowi.

9. Zakończenie

Monografia jest próbą analizy i syntezy kompleksu zagadnień dotyczących wentylacji i bezpieczeństwa w tunelach komunikacyjnych opracowana w oparciu o doświadczenia uzyskane w budownictwie tunelowym na świecie.

Autorzy mają nadzieję, że stanie się ona przyczynkiem do prowadzenia w Polsce badań naukowych dotyczących wentylacji i bezpieczeństwa w tunelach komunikacyjnych, zwłaszcza gdy na świecie tematyka ta od dawna jest badana przez naukowców i praktyków.

Monografia zawiera podstawowy materiał na temat wentylacji i bezpieczeństwa w tunelach, który może być wykorzystany przez projektantów i praktyków, a także dla celów edukacji studentów specjalizujących się w budownictwie tunelowym.

Autorzy dziękują recenzentowi prof. zw. dr. hab. inż. Andrzejowi Strumińskiemu za wnikliwe uwagi wniesione w recenzji.

Autorzy szczególnie dziękują Jego Magnificencji Rektorowi Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie prof. zw. dr hab. inż. Antoniemu Tajdusiowi za inspirację i dyskusje, które spowodowały powstanie tej książki.

Literatura

- [1] ADAC – *Test tuneli*. 2003, 2004
- [2] Bartoszewski J., Lessaer S.: *Tunele i przejścia podziemne w miastach*. Warszawa, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 1970
- [3] Bettelini M., Brandt R., Riess I.: *Progress in Tunnel Ventilation – The Mont-Blanc Tunnel*. World Tunnel Congress AITES-ITA HBIHAERTER LTD, Zurich 2001
- [4] Bickel J., Kuesel T., King E.: *Tunnel Engineering Handbook*. Chapman & Hall, 1996
- [5] Brux G.: *Sicherheitssysteme für den Tunnel unter dem Ärmelkanal*. Tunnel 1994
- [6] Damien T.: *The use of flow visualizations and numerical simulations in the study of back flow development in tunnel fires*. 2001 (prezentacja)
- [7] De Souza: *Application of tunnel ventilation concepts to mine ventilation design Mine Ventilation*. Swet & Zeitlinger, Lisse ISBN 9058093875 I.J. Duckworth & D.G. Newnan 2002
- [8] Dziurzyński W., Pałka T.: *Komputerowy system monitoringu zagrożenia pożarowego i wyznaczania dróg ucieczkowych w warunkach pożaru w kopalni podziemnej*
- [9] Dyrektywa Komisji Europejskiej 2004/54/EC z dnia 29 kwietnia 2004 dotycząca wyposażenia tuneli wchodzących w skład TEN (Trans European Network)
- [10] Elliot I., Howard A.: *Podmorskie budownictwo tunelowe – jaka przyszłość?* Kwartalnik Naukowo-Techniczny Budownictwo Tunelowe, 1997
- [11] Haack A.: *Current safety issues in traffic tunnels*. Tunneling and Underground Space Technology 2002
- [12] Halbach G., Rhyn H.: *Sichtweitemessung in Straßentunneln*. Tunnel 1995
- [13] HBI: *Reference list of road-tunnel ventilation system (extract)*. 2001
- [14] <http://europa.eu.int/>
- [15] http://haivan.cup.com/07_gallery/CG/pages/ventilation.htm
- [16] <http://home.no.net/lotsberg/>
- [17] <http://www.adac.de/>
- [18] <http://www.atmb.net/cdrom/html/prevent.htm>
- [19] <http://www.romankoch.ch/cgi-bin/gds.asp?aktion=liste&liste=tunnel>
- [20] ITA Open Session Fire and Life Safety 2002

- [21] Pawiński J., Roszkowski J., Strzemiński J.: *Przewietrzanie kopalń*. Katowice, „Śląsk” 1972
- [22] Kirkland C.: *The fire in the Channel Tunnel*. Halcrow Consulting Engineers
- [23] Kosno B.: *Drogi w głąb ziemi*. Fokus, nr 11(62), listopad 2000
- [24] Napieraj S.: *Zasady przewietrzana, klimatyzacji i bezpiecznej eksploatacji podziemnych tuneli komunikacyjnych*. Praca dyplomowa 2002 (niepublikowana)
- [25] Nawrat S., Ligęza I.: *Niektóre problemy bezpieczeństwa w tunelach komunikacyjnych w aspekcie możliwości wykorzystania doświadczeń z górnictwa podziemnego*. Materiały XXV Zimowej Szkoły Górniczej, Kraków 2002
- [26] Piechota S.: *Podstawy górnictwa kopalni stałych*. Kraków, Wydawnictwa AGH, Skrypty uczelniane 1460, 1996
- [27] Praca zbiorowa: *Poradnik Górnika*. Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1959
- [28] Praca zbiorowa: *Poradnik Górnika*. t. 3, Katowice, Wydawnictwo Śląsk 1972
- [29] Praca zbiorowa: *Wielka Encyklopedia Multimedialna WIEM 2004*
- [30] Pulsfort M., Walz B.: *Tunnelbauverfahren*. Unterirdischen Bauen, Grundbau, Bodenmechanik, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal 1999
- [31] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U.02.139.1169)
- [32] Rozporządzeniem 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)
- [33] Stachoń W.: *Kierunki rozwoju XIX-wiecznego budownictwa tunelowego*. Budownictwo podziemne 2000, Kraków 25–27 września 2000
- [34] Stamatello H.: *Tunele i miejskie budowle podziemne*. Warszawa, Arkady 1970
- [35] Szlązak N.: *Rozprzestrzenianie się gazów spalinowych w wyrobiskach górniczych w świetle badań teoretycznych i doświadczalnych*. Rozprawy i monografie 2. Kraków, Wydawnictwa AGH 1994
- [36] Vuilleumier F., Weatherill A., Crausaz B.: *Safety aspects of railway and road tunnel: example of Lotschberg railway tunnel and Mont-Blanc road tunnel*. PERGAMON 2002
- [37] Zbinden P., Sala A., Busslinger A.: *Probleme der Klimatisierung bei Vortrieb und Betrieb von Tunneln mit hoher Überdeckung: Lösungskonzepte für den Gotthard-Basis-tunnel*. AlpTransit Gotthard AG, Luzern; Amberg Engineering AG, Regensburg; HBI Haerter AG, Bern Regensburg August 2002
- [38] Madeja-Strumińska B., Strumiński A.: *Projektowanie naturalno-wymuszonych rozpyłów powietrza w kopalniach podziemnych*. Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej 2004
- [39] Waclawik J., Roszczyński W.: *Aerologia górnicza*. Warszawa, Państwowe Wydawnictwa Naukowe 1983