

KONSPEKT WYKŁADY Z PRZEDMIOTU

WENTYLACJA WYBRANYCH OBIEKTÓW PODZIEMNYCH

**OPRACOWAŁ DR HAB.INŻ. STANISŁAW NAWRAT –
PROF.AGH**

WYKŁAD 2/WOP

TEMAT: Wentylacja tuneli w fazie ich budowy: zagrożenie gazami toksycznymi i pożarowymi, zagrożenie klimatyczne, obliczanie koniecznego wydatku strumienia powietrza, dobór urządzeń wentylacyjnych i klimatyzacyjnych, prewencja przeciwpożarowa i przeciwwybuchowa (3h).

WENTYLACJA TUNELI

Prawidłowa wentylacja stanowi podstawę bezpiecznej eksploatacji tuneli komunikacyjnych i powinna zapewnić przede wszystkim:

- wymianę powietrza w stopniu powodującym obniżenie szkodliwych koncentracji 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 ludzi korzystających z tunelu.

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

Na świecie zagadnienia wentylacji i bezpieczeństwa w tunelach komunikacyjnych są przedmiotem wielu analiz badań oraz doświadczeń wykorzystywanych w pracach projektowych i budowlanych.

2.1. WYBRANE WYMAGANIA PRAWNE DOTYCZĄCE BUDOWLI TUNELOWYCH

Tunele są specyficznymi budowlami łączącymi elementy budownictwa podziemnego wykorzystującego technikę górniczą

i budownictwa powierzchniowego, co ma także wyraźne odbicie w aktach prawnych.

Istniejąca infrastruktura, kolejowa i drogowa, stwarza problemy związane z jej zużyciem technicznym i moralnym (80% tuneli kolejowych zostało wybudowanych w XIX wieku), oraz napotyka na coraz większe trudności w opanowaniu wzrastającego natężenia ruchu towarowego i pasażerskiego. Obecne legislacje krajowe dotyczące budownictwa tunelowego cechują się dużą różnorodnością. Niektóre kraje członkowskie Unii Europejskiej posiadają dobre prawo odnoszące się do bezpieczeństwa w tunelach, podczas gdy w innych krajach, jest ono szczątkowe, a nawet nieistniejące. Legislacja w Unii Europejskiej może przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa w tunelach tak na poziomie technicznym jak i eksploatacyjnym.

Etap drażenia tunelu

W okresie drażenia tunelu mają zastosowanie głównie przepisy 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) a w szczególności regulacje prawne 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:

Tabela 0.1

Najwyższe dopuszczalne stężenia gazów w powietrzu

Rodzaj gazu	NDS mg/m ³ (objętościowo i %)	NDSC mg/m ³ (objętościowo i %)
Dwutlenek węgla	1,0 (1,0)	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. Skróty wymienione w ust. 2 oznaczają:

- 1) NDS – najwyższe dopuszczalne stężenie średnio ważone,
- 2) NDSC – 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. Prawdliwość 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 niemetanowych 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 niemetanowych 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 wentylację 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 niemetanowych – 10 m,
 - b) w polach metanowych – 8 m,
- 3) przy wentylacji kombinowanej odległość lutniociągu ssącego od czoła przodka nie powinna być większa niż 6m, 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 zagrausza.

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) przepuszcie - 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.

2. 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:

- 1) kontynuację ruchu drogowego,
- 2) właściwe warunki pracy konstrukcji obiektu,
- 3) odpowiednie ukształtowanie przestrzeni pod obiektem mostowym w zależności od rodzaju przeszkody i zagospodarowania terenu,
- 4) stabilność nasypu drogowego i terenu,
- 5) 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 0.2
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	0,025	0,025

przy wentylacji podłużnej		
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 0.3
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	

2. 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:

- a) wzdłużna,
- b) poprzeczna,
- c) 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,
- 1) 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 umieszczanych 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 odstęp, 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 drążenia

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

Głównymi źródłami zanieczyszczenia powietrza w tunelu są gazy postrzałowe zawierające znaczne ilości głównie dwutlenku węgla, tlenku 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 drążenia, tunel jest wyrobiskiem górniczym w związku, z czym 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 koszty.

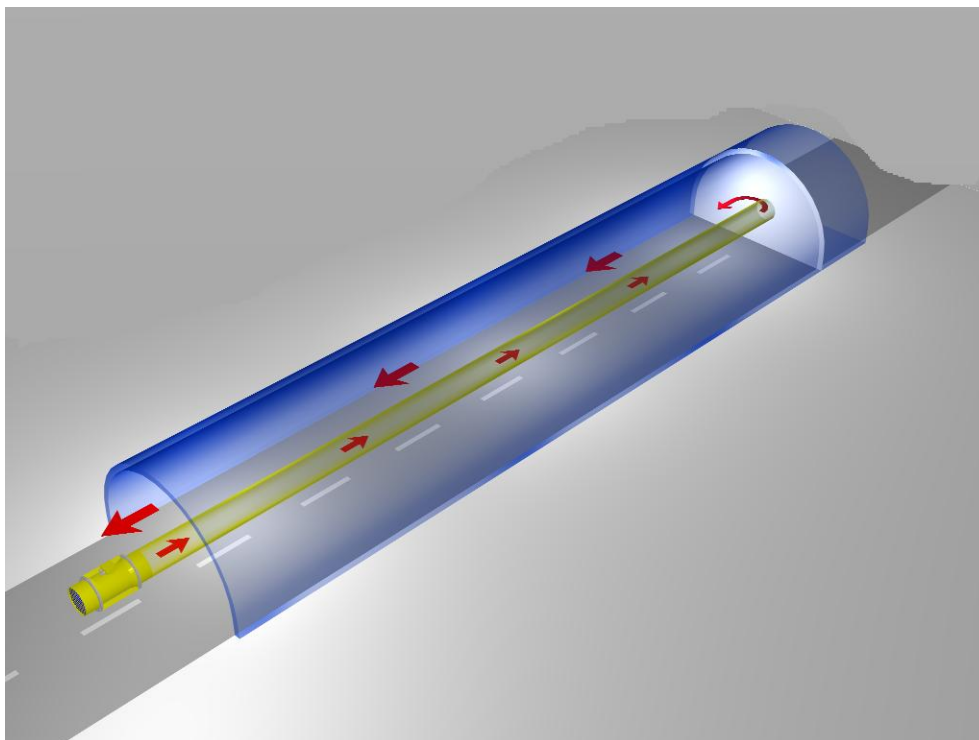
Przepływ powietrza w lutniociągach i otworach wiertniczych może odbywać się pod wpływem depresji naturalnej lub depresji mechanicznej wentylatora lub układu wentylatorów.

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.)

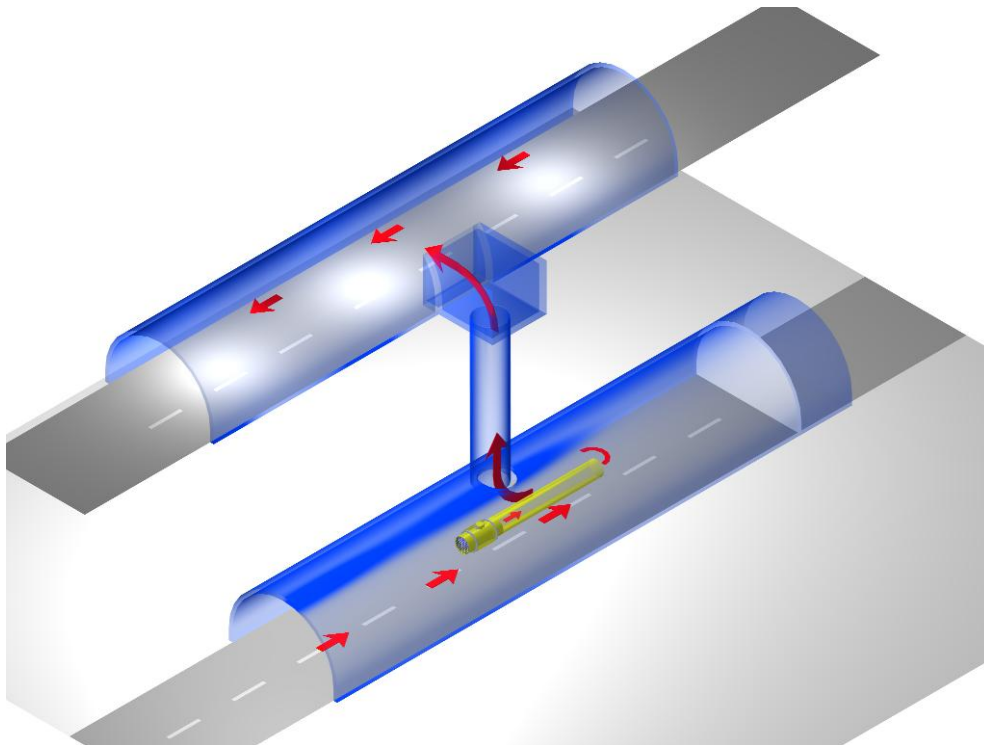


Rys. 0.1. Wentylacja tunelu lutniociągiem

- otworów wiertniczych wielkośrednicowych,

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

Wentylację tuneli za pomocą lutniociągów i otworów wiertniczych przedstawia rys. 2.2.

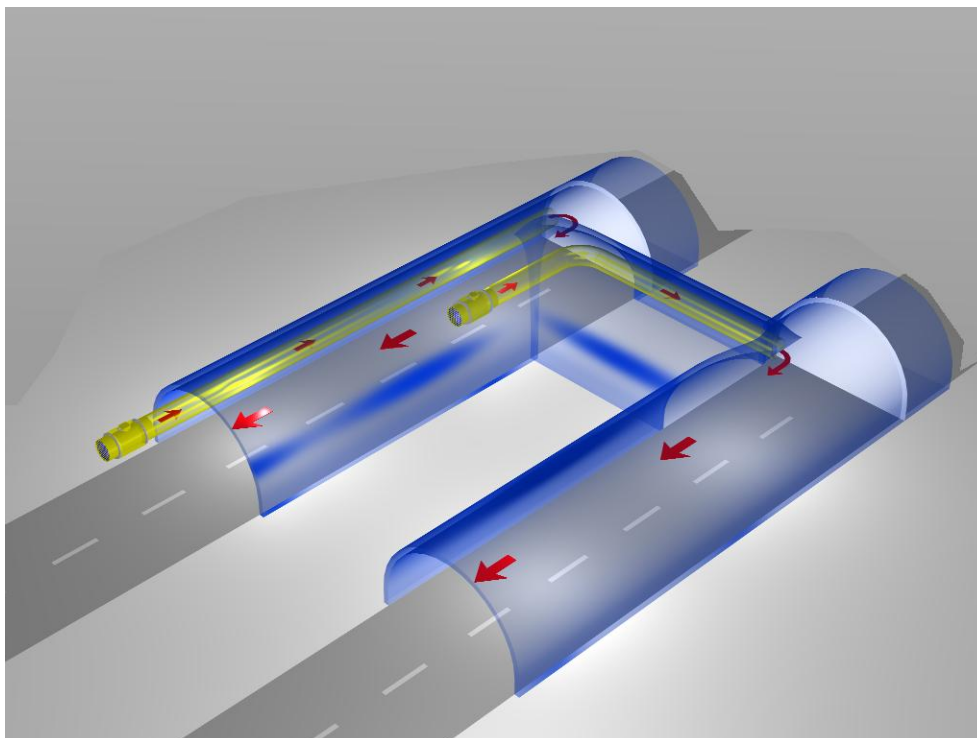


Rys. 0.2. Wentylacja tuneli za pomocą otworów wielkośrednicowych

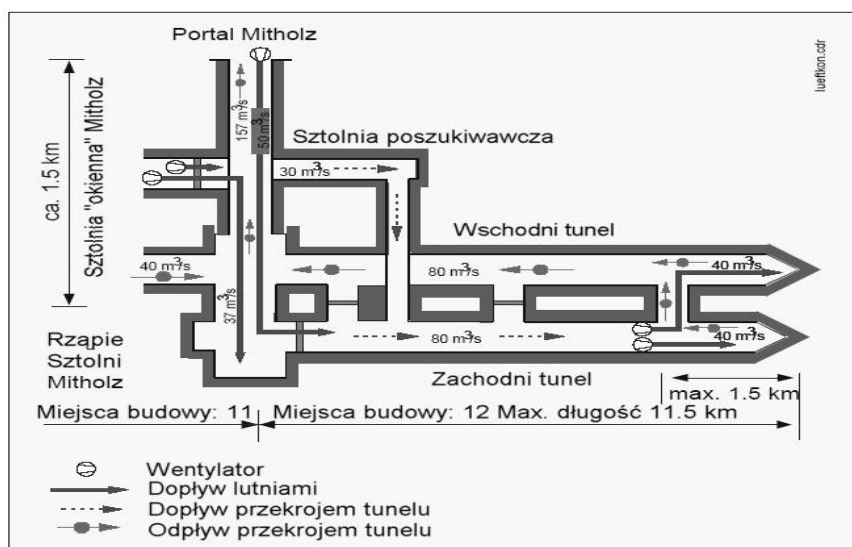
- lutniociągów i tuneli równoległych

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. Wentylacja za pomocą tuneli równoległych i lutniociągów przedstawia rys. 2.3.

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

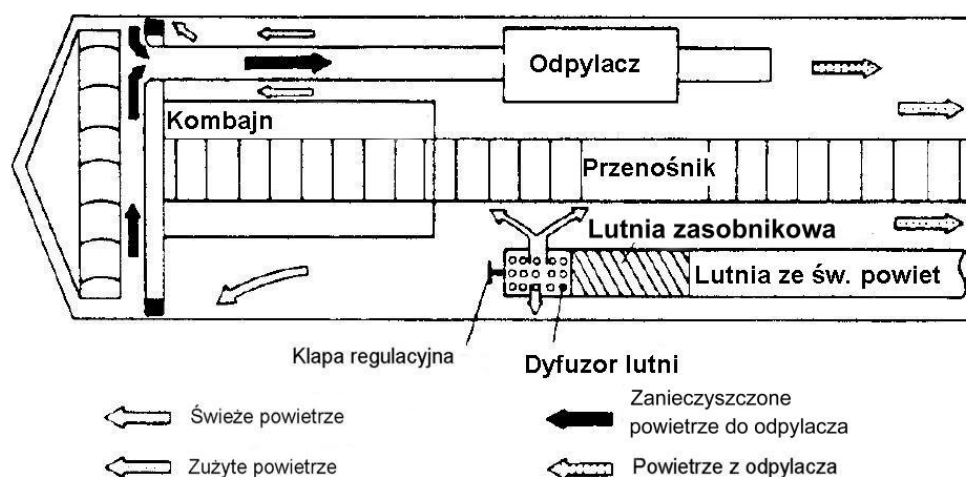


Rys. 0.3. Wentylacja za pomocą tuneli równoległych i przecinek



Rys. 0.4. Sposób przewietrzania tunelu Mitholtz w czasie drążenia [30]

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



Rys. 0.5. Schemat wentylacji tunelu drążonego kombajnem tarczowym pełoprzekrojowym

2.2.2. Projektowanie wentylacji tuneli podczas drążenia

Projektując wentylację dla fazy drążenia 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. Rozeznania zagrożenia czynnikami technologicznymi takimi jak np.:
 - gazy odstrzałowe (tlenek węgla, tlenki azotu),

- gazy emitowane przez silniki spalinowe urządzeń technicznych,
- zapylenie powietrza spowodowane procesami technologicznymi jak urabianie i transport skały.

3. Analizę wymagań higienicznych określonych w prawie.

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

1. Minimalny wydatek powietrza w tunelu $\dot{V}_v$ (m³/s) ze względu na zapewnienie minimalnej prędkości powietrza wyznacza się na podstawie wzoru:

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

gdzie:

F – pole przekroju poprzecznego tunelu, m²,
 $v_{\min}$ – 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 koncentracji bezpiecznych np. określonych w przepisach prawa na podstawie wzoru:

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

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
względem na rozrzedzenie gazów odstrzałowych**

Wydatek powietrza może być obliczony w oparciu o wzory
określone w Poradniku Górnika t. III [28].

**4. Minimalny wydatek powietrza w tunelu V_p (m³/s) ze
względem 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
tunelu, mg/s,
 C_d – dopuszczalna koncentracja określona przepisami
prawa, mg/m³.

**5. Minimalny wydatek powietrza w tunelu $\dot{V}_c$ (m³/s) ze
względem na ciepłe warunki pracy można wyznaczyć w
oparciu o odpowiednie prognozy klimatyczne [38].**

**6. Wydatek strumienia powietrza $\dot{V}_T$ w przodku tunelu musi
spełniać zależność:**

$$\dot{V}_T = \max f \left(\dot{V}_v, \dot{V}_r, \dot{V}_0, \dot{V}_p, \dot{V}_t \right) \quad (2.4)$$

2.3. Systemy wentylacji tuneli

Tunele komunikacyjne z punktu widzenia wentylacji są definiowane, jako zamknięte przestrzenie naziemne, podziemne, jak i podwodne, przez które przemieszczają się pojazdy i ludzie oraz przepływa powietrze w wyniku, czego zachodzi szereg 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:

1. wzdłużna :

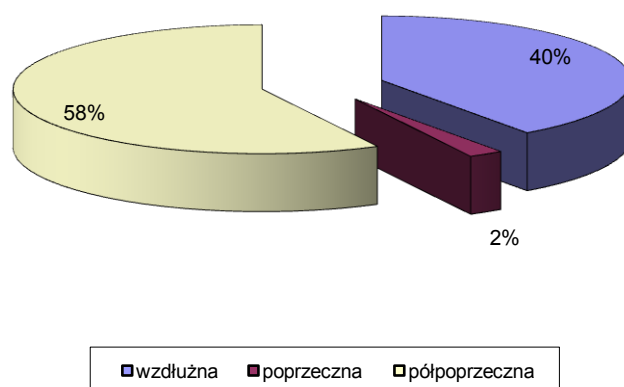
- wentylacja naturalna,
- wentylacja naturalna z szybem,
- wentylacja naturalna z wentylatorami,
- wentylacja mechaniczna,
- system Saccardo Nozzle,

2. poprzeczna:

- wentylacja mechaniczna półpoprzeczna,
- wentylacja mechaniczne półpoprzeczna odwrócona,

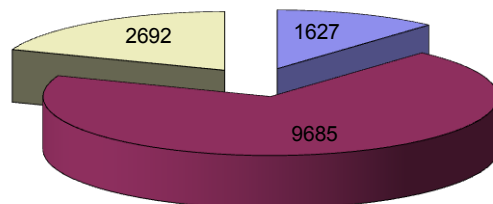
- pełna mechaniczna wentylacja poprzeczna,
3. mieszana,
 4. specjalne.

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 rys. 2.6. i rys. 2.7. [12]. Dla wentylacji tuneli komunikacyjnych najczęściej stosowane są systemy wentylacji półpoprzecznej i poprzecznej.



Rys. 2.6. Procentowe udziały systemów wentylacji tuneli

Tunele o długości małej i średniej przewietrzane są przy zastosowaniu systemów wzdłużnych i półpoprzecznych.



■ wentylacja podłużna ■ wentylacja poprzeczna ■ wentylacja półpoprzeczna

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

Dla tuneli długich i o dużym natężeniu ruchu jest wymagane stosowanie wentylacji poprzecznej lub mieszanych systemów wentylacji wzdłużnej i poprzecznej.

W zależności od stopnia zagrożenia ludzi głównie przez emisję spalin z silników pojazdów samochodowych, wielkości emisji ciepła od ludzi i urządzeń technicznych a także zagrożenia pożarowego stosowane są odpowiednie systemy wentylacji tuneli komunikacyjnych, które powinny gwarantować wysoki poziom bezpieczeństwa.

2.3.1. Systemy wentylacji wzdłużnej

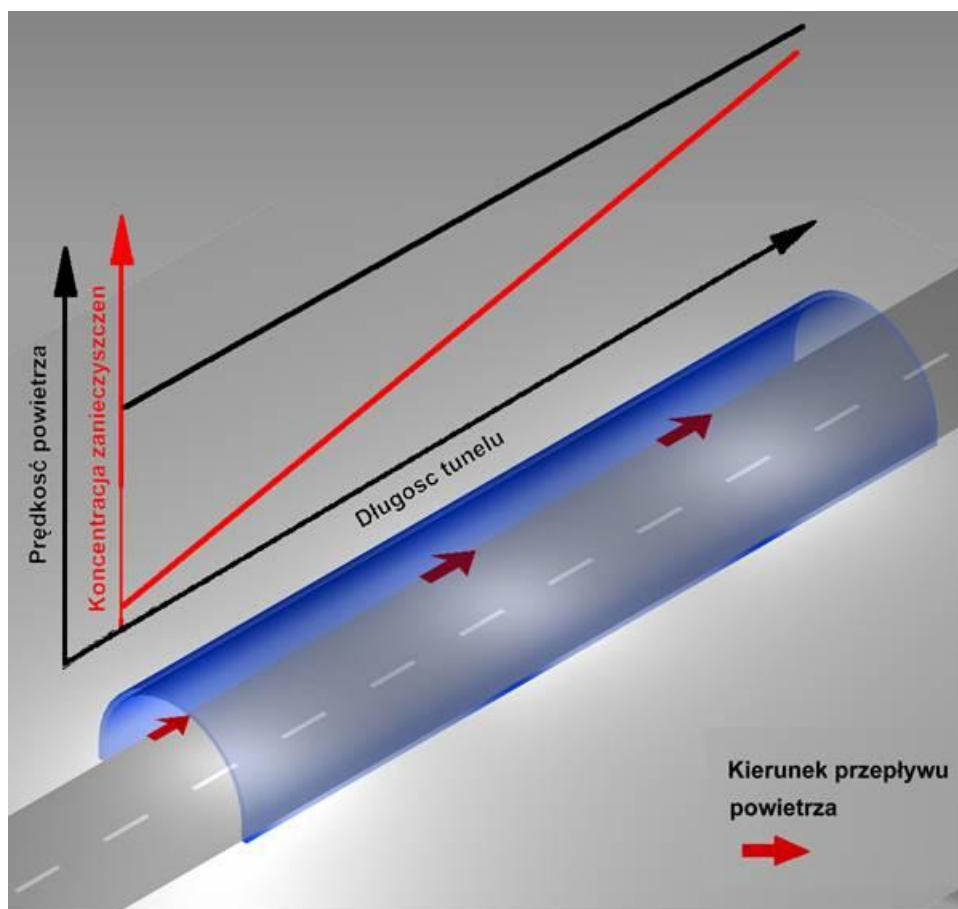
W systemach wentylacji wzdłużnej powietrze płynie od portalu wlotowego w kierunku zgodnym z osią tunelu w stronę portalu wylotowego, głównie pod wpływem działania depresji naturalnej i mechanicznej, przy czym mogą wystąpić modyfikacje w przypadkach wykonania innych połączeń np. szybów skracających poszczególne odcinki z wentylacją wzdłużną.

2.3.1.1. Wentylacja naturalna wzdłużna

W systemie wentylacji naturalnej wzdłużnej (rys. 2.8.) przepływ powietrza jest wywołany depresją naturalną powstającą w wyniku różnicy gęstości powietrza występującej na portalu wlotowym i wylotowym tunelu. Wielkość wydatku strumienia powietrza w tunelu jest zależna także od warunków atmosferycznych (intensywności oraz kierunku wiatru) i „tłokowego” działania przejeżdżających pojazdów.

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.



Rys. 2.8. Wentylacja naturalna wzdłużna

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 szczególnie jest ważne w przypadkach zagrożenia pożaru. Koncentracja zanieczyszczeń powietrza narasta w kierunku portalu wylotowego.

2.3.1.2. Wentylacja naturalna wzdłużna z szybem

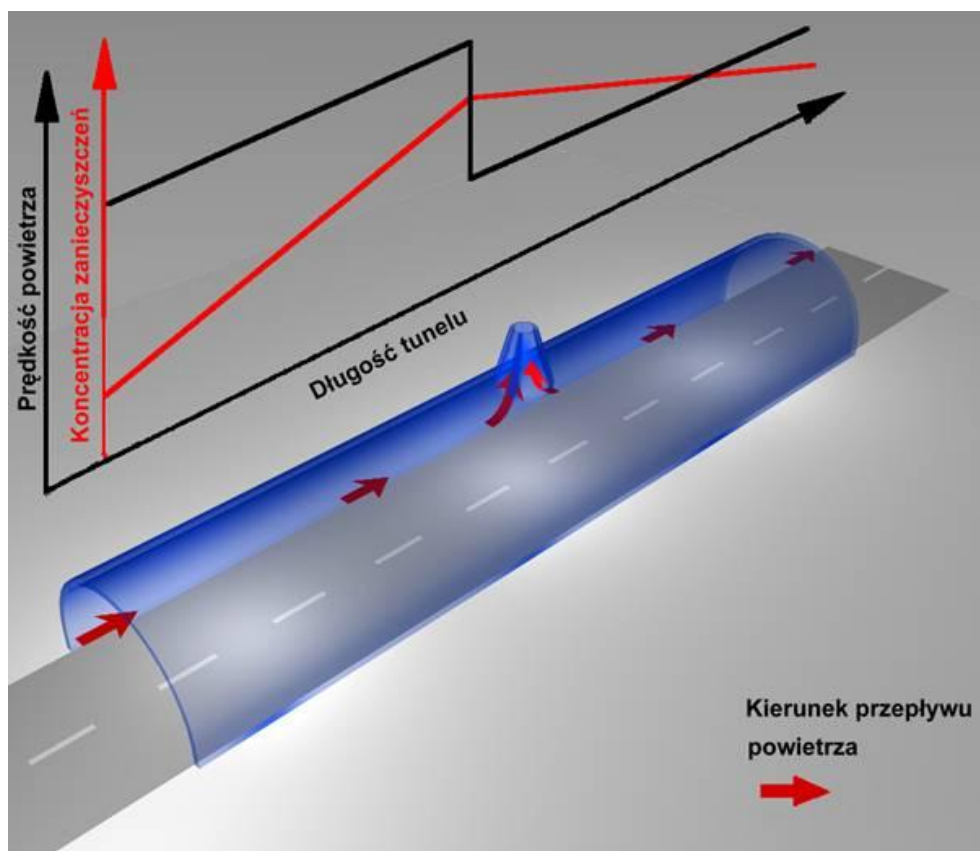
W przypadkach długich tuneli i znacznego natężenia ruchu pojazdów w celu zwiększenia wielkości strumienia powietrza (rys. 2.9.), a także umożliwienia usuwania zanieczyszczeń powietrza, stosuje się połączenia tunelu jednym lub kilkoma dodatkowymi połączeniami z powierzchnią, najczęściej w formie szybu.

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.

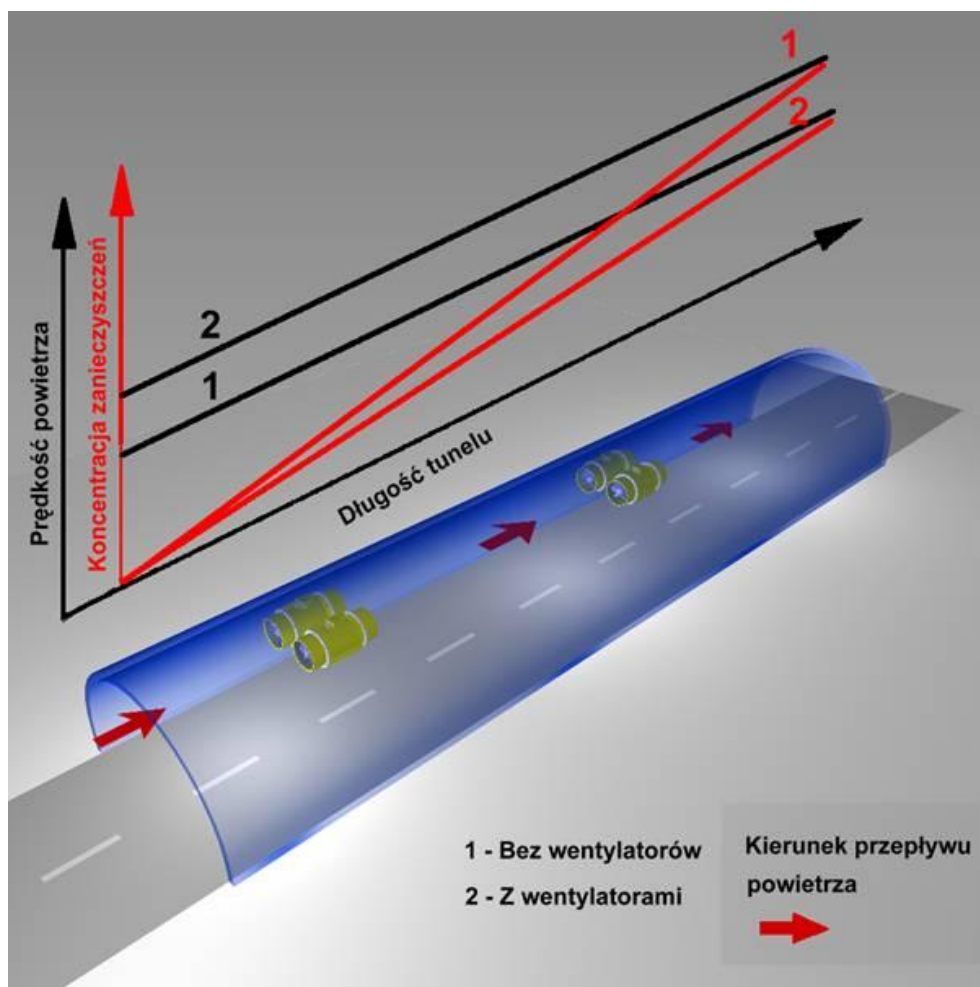
Koncentracja zanieczyszczeń powietrza narastają od portali wlotowych w stronę szybu.



Rys. 2.9. Wentylacja naturalna z szybem umieszczonym pośrodku

2.3.1.3. Wentylacja wzdłużna naturalna 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, oraz w odstępach około 50 – 200m w zależności od mocy wentylatorów.

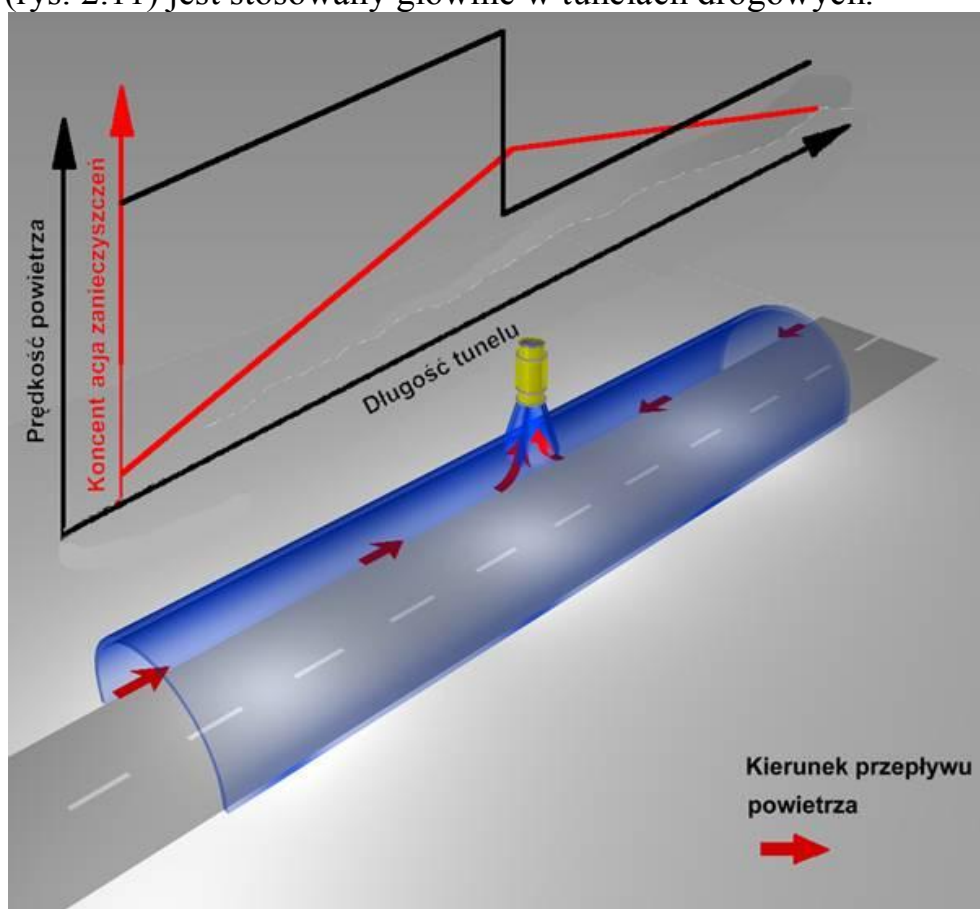


Rys. 2.10. Wentylacja wzdłużna wspomagana wentylatorami

Wentylatory umożliwiają okresowe lub stałe zwiększenie przepływu powietrza w tunelu, który pozwala ograniczyć wysokie koncentracje zanieczyszczeń w powietrzu..

2.3.1.4. Wentylacja wzdłużna naturalna z szybem wspomagana depresją mechaniczną

Wentylacja naturalna w wielu przypadkach nie zapewnia uzyskania wymaganego wydatku strumienia powietrza w tunelu w związku, z czym 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.

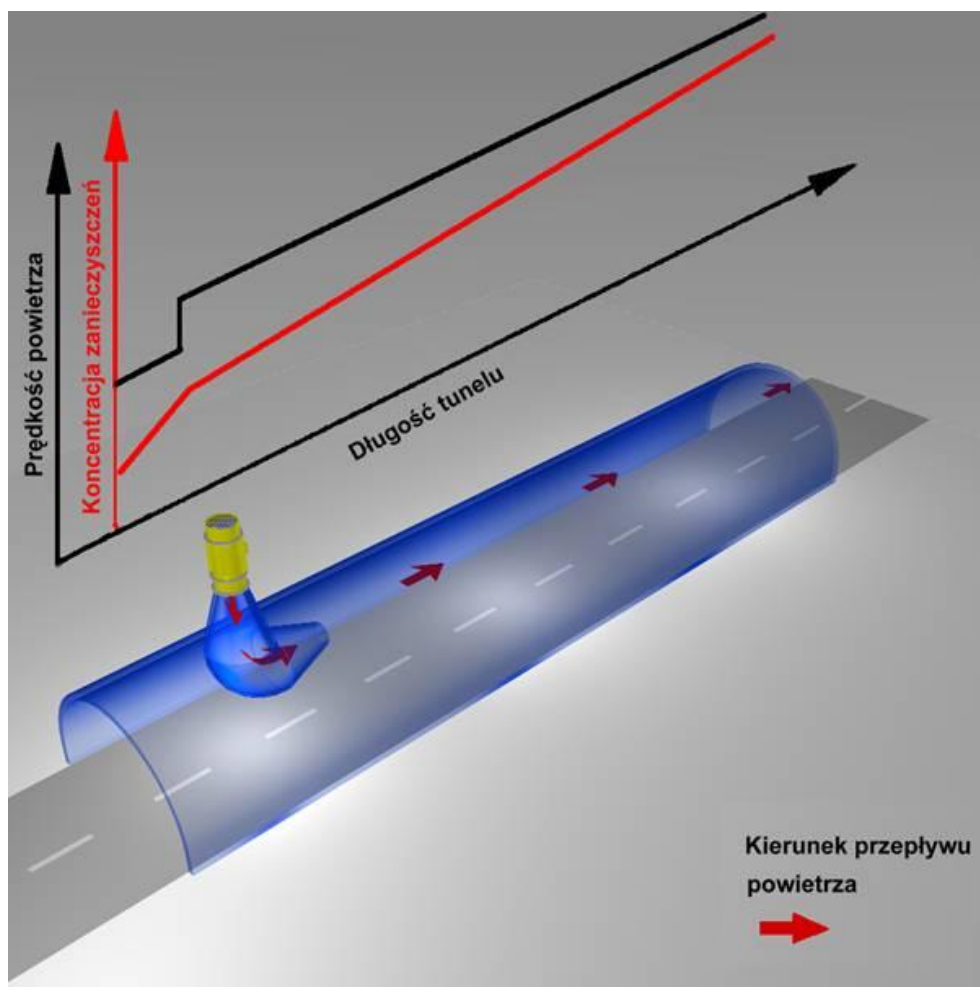


Rys. 2.11. Wentylacja tuneli z szybem i wentylatorem

System ten jest korzystny przy dwukierunkowym ruchu pojazdów, gdyż umożliwia odprowadzenie zanieczyszczeń powietrza z poszczególnych odcinków tunelu do szybu 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 do tunelu jest włączane za pomocą wentylatora i specjalnego przewodu w formie dyszy intensyfikującej w tunelu 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 dolotowych 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 przyspągowa

W systemie wentylacji mechanicznej półpoprzecznej przyspągowej (rys. 2.13.) powietrze jest doprowadzane do wnętrza tunelu kanałami przyspągowymi i rozdzielane odpowiednio na całej długości tunelu za pomocą regulowanych otworów wentylacyjnych umieszczonych w niewielkiej wysokości od poziomu jezdni lub toru.

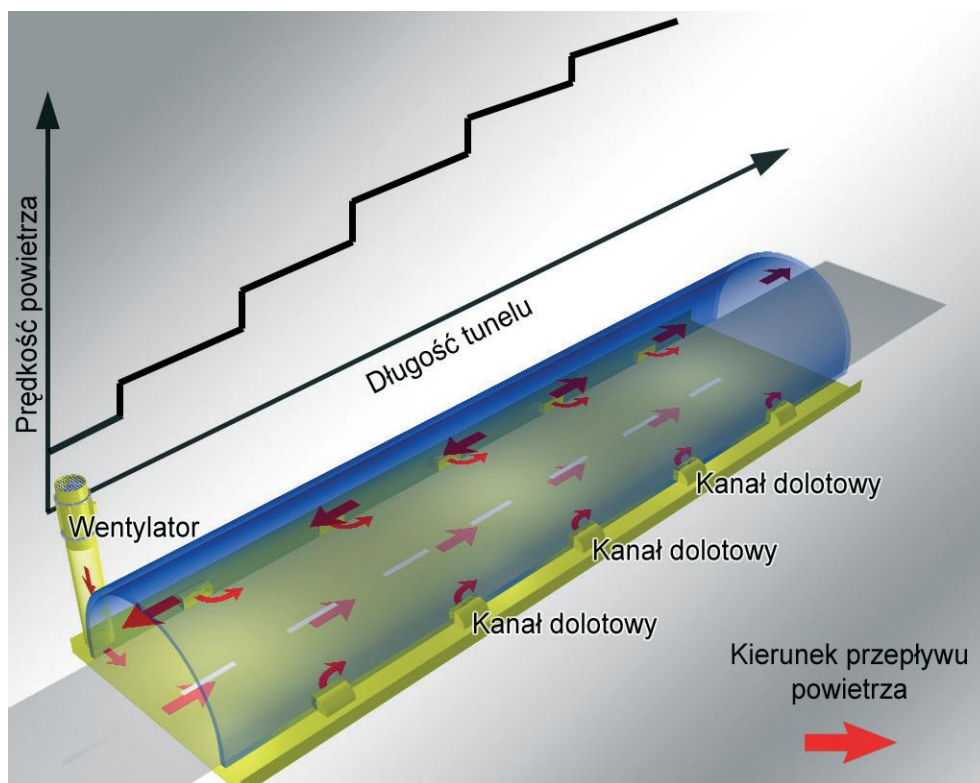
Wentylacja półpoprzeczna przyspągowa zapewnia jednolity rozdział powietrza na całej długości tunelu [4].

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 nam 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.

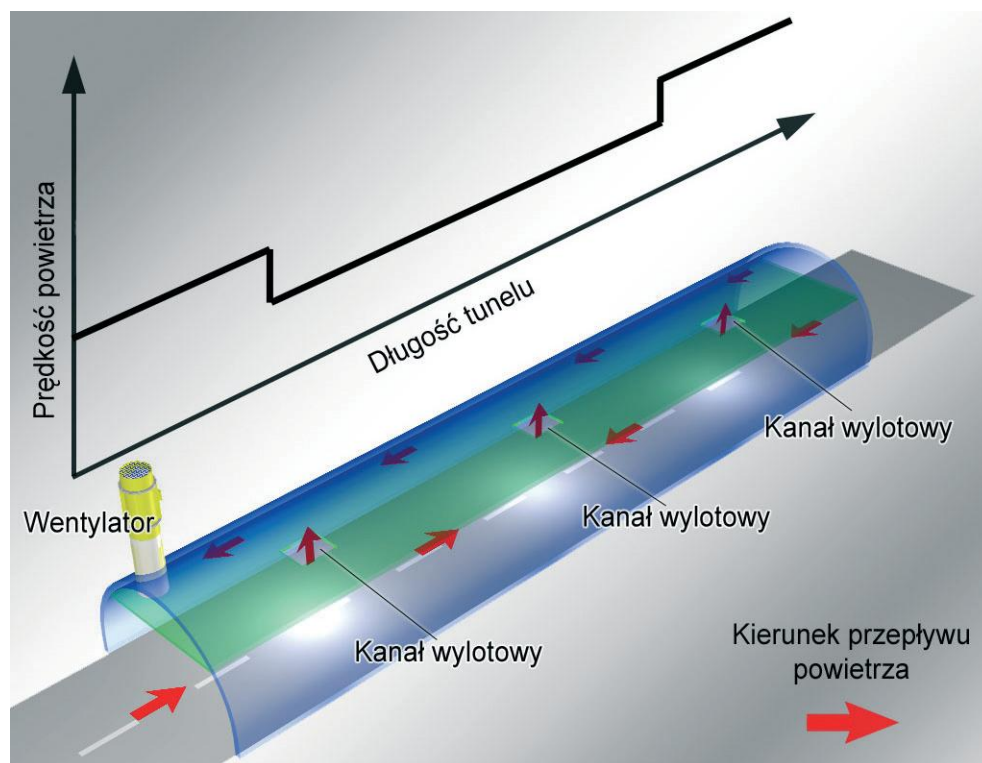


Rys. 2.13. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przyspągowa

2.3.2.2. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przystropowa

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

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



Rys. 2.14. Wentylacja mechaniczna półpoprzeczna przystropowa

W przypadku pożaru można otworzyć otwory wentylacyjne usytuowane w bezpośredniej bliskości miejsca pożaru tak umożliwić odprowadzanie dymów i gazów pożarowych do kanałów wentylacyjnych i uniemożliwić rozprzestrzenianie się dymów i gazów na większej długości tunelu, a w innych miejscach tunelu pozwala zwiększyć intensywność przewietrzania dla rozrzedzenia dymu gazów.

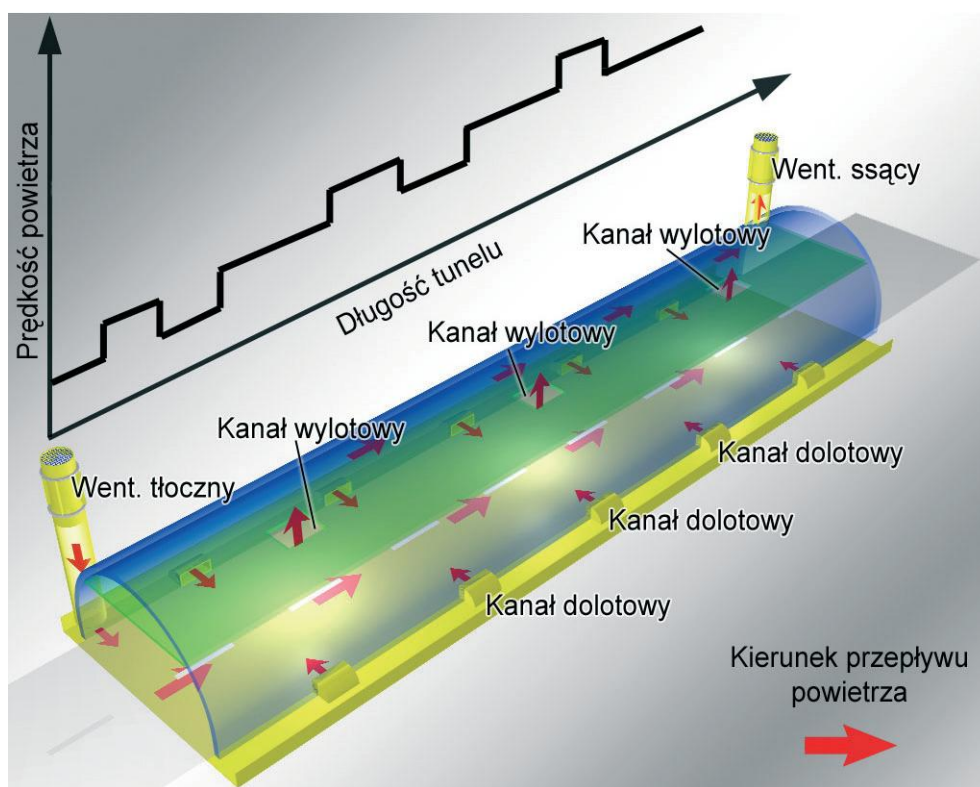
2.3.2.3. Wentylacja mechaniczna poprzeczna pełna

System wentylacji mechanicznej poprzecznej pełnej (rys. 2.15.) jest połączeniem wentylacji półpoprzecznej przyspągowej i wentylacji półpoprzecznej przystropowej. Powietrze zawierające zanieczyszczenia stałe i gazowe jest odprowadzane

przez kanały wylotowe znajdujące się przy stropie, a powietrze świeże jest doprowadzane przez kanały wlotowe rozmieszczone przy spągu.

Wentylacja mechaniczna poprzeczna pełna zazwyczaj jest stosowana dla przewietrzania długich tuneli i zagrożonych dużymi ilościami zanieczyszczeń stałych i gazowych.

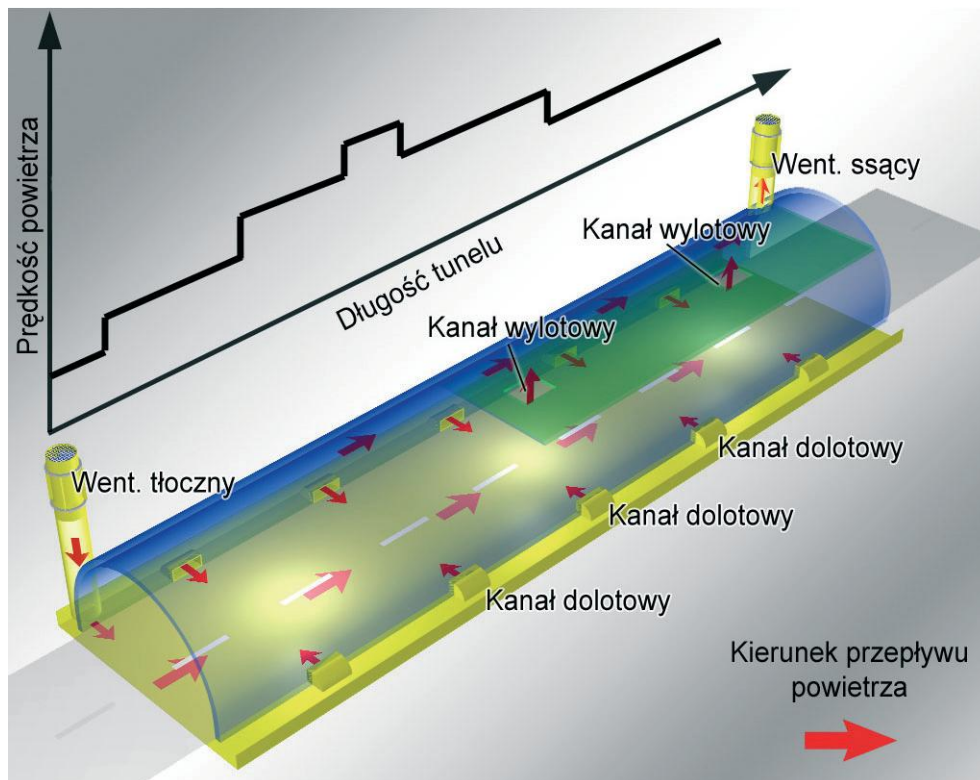
System ten zapewnia wysoki poziom bezpieczeństwa szczególnie w przypadkach wystąpienia zagrożenia pożarowego.



Rys. 2.15. Wentylacja mechaniczna poprzeczna pełna

2.3.3. Mieszane systemy wentylacji

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



Rys. 2.16. Wentylacja mechaniczna mieszana

Wiele tuneli, które dla normalnych operacji 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 zastosowany w Eurotunelu.

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

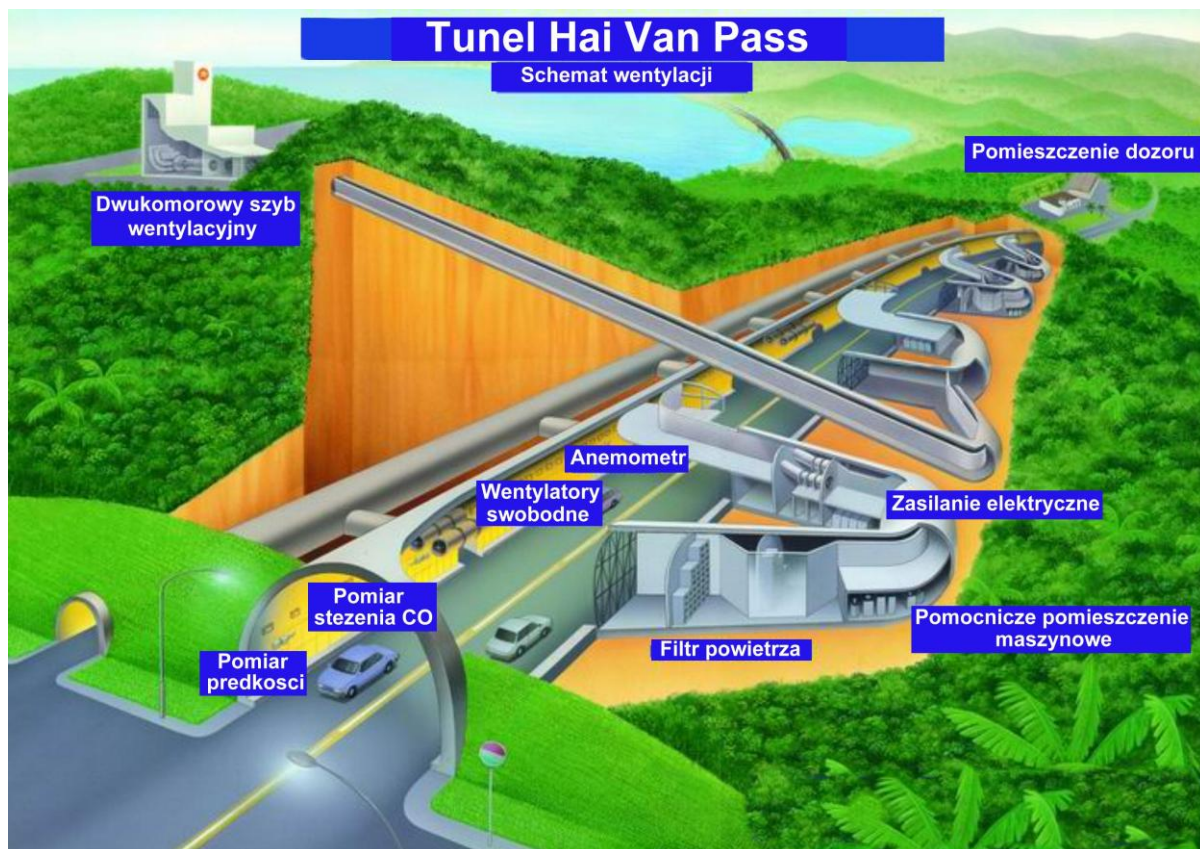
Tunel HAI VAN PASS (rys. 2.17.) jest położony na odcinku autostrady A1 łączącej prowincję Thua Thien z Danang w centralnym Wietnamie [15]. Tunel jest położony na wysokości 1172 m n. p. m., pomiędzy dwoma mostami, oraz posiada długość 6,3 km. Tunel w przekroju poprzecznym posiada wymiary: szerokość 11,5 m oraz wysokość 7,5 m. Wzdłuż tunelu podstawowego biegnie tunel konserwacyjny, który posiada 11 połączeń 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 pochyłym szybem dwukomorowym, powoduje zasysanie zużytego powietrza poprzez jedną komorę sztolni, a doprowadzenie świeżego powietrza poprzez drugą komorę sztolni. System posiada wentylatory tłoczące oraz ssące umieszczone w stacji wentylatorów na wzgórzu, do którego biegnie szyb wentylacyjny. Wentylatory osiowe posiadają średnicę 3m a ich wydatek jest regulowany poprzez zmianę kąta nachylenia łopatek wirnika.

System wentylatorów (32 sztuki) rozmieszczonych przy stropie tunelu, powoduje wzdłużny ruch powietrza w tunelu. Każdy z

wentylatorów wzdłużnych posiada średnicę 1.5m. System filtrów elektrostatycznych redukuje zanieczyszczenia stałe i gazowe.

Tunel jest wyposażony w system kontroli wentylacji, korzystający z danych o wielkości ruchu, widoczności, oraz stężeniu tlenku węgla w powietrzu, oraz 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.



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