KONSPEKT WYKŁADY Z PRZEDMIOTU

WENTYLACJA WYBRANYCH OBIEKTÓW PODZIEMNYCH

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

WYKŁAD 3/WOP

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

PROJEKTOWANIE WENTYLACJI TUNELI KOMUNIKACYJNYCH

W tunelach komunikacyjnych systemy wentylacji powinny zapewnić:
1) wymianę powietrza – aby nie zostały przekroczone stężenia zanieczyszczeń powietrza zagrażające przebywającym w tunelu użytkownikom,
2) 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,
3) bezpieczeństwo i komfort jazdy – przez usuwanie dymów i sadzy ograniczających widoczność oraz regulowanie temperatury i ruchu powietrza,
4) 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:

1) gazami wydzielanymi z silników spalinowych pojazdów,
2) zadymieniem powietrza przez frakcje stałe znajdujące się w spalinach silnikowych,
3) cieplnego powstałego w wyniku wydzielania ciepła przez górotwór i urządzenia stałe i poruszające się pojazdy w tunelu,
4) 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:

1) parametry depresji naturalnej i mechanicznej w tunelu,

2) lokalizację i parametry urządzeń wentylacyjnych, takich jak wentylatory i tamy regulacyjne,
3) rozpływy 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 w wykorzystane także w przypadkach projektowania wentylacji dla innych rodzajów tuneli komunikacyjnych w stopniu dostosowanym do występujących zagrożeń.

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:

1. tlenek węgla CO;
2. węglowodory C_xH_y;
3. aldehydy RCHO, z których największe stężenie posiada formaldehyd,
4. sadza C;
5. 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;
6. dwutlenek siarki SO_2.

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

1. gazowej: tlenek węgla, tlenki azotu, część węglowodorów i aldehydów oraz dwutlenek siarki,
2. ciekłej: niektóre węglowodory i aldehydy,
3. 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 0.1
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	Dwutlenek węgla	%	1,0-10,0	duszący
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 0.2
Skład procentowy spalin silnika wysokoprężnego [4]

L.p.	Składnik gazów	Jednostki	Skład procentowy spalin	Ocena toksyczności
1	Tlenek węgla (max)	%	0,100	toksyczny
2	Tlenek węgla (min)	%	0,020	toksyczny
3	Dwutlenek węgla	%	9,000	duszący
4	Tlenki azotu	%	0,040	toksyczne
5	Dwutlenek siarki	%	0,020	toksyczny
6	Aldechydy	%	0,002	toksyczne
7	Formaldechydy	%	0,001	toksyczne

METODY WYZNACZANIA WYDATKU POWIETRZA W TUNELU

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

Metoda M. Pulsforta

Jedną z metod wyznaczenia minimalnego wydatku strumienia powietrza w tunelu jest metoda M. Pulsforta [30]. Metoda ta określa 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.

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

$$Q_z = \frac{q_{CO} \cdot x_v \cdot x_i \cdot x_w}{3600} \cdot D \cdot \frac{10^2}{CO_{dop}} \cdot L \qquad (0.1)$$

gdzie:

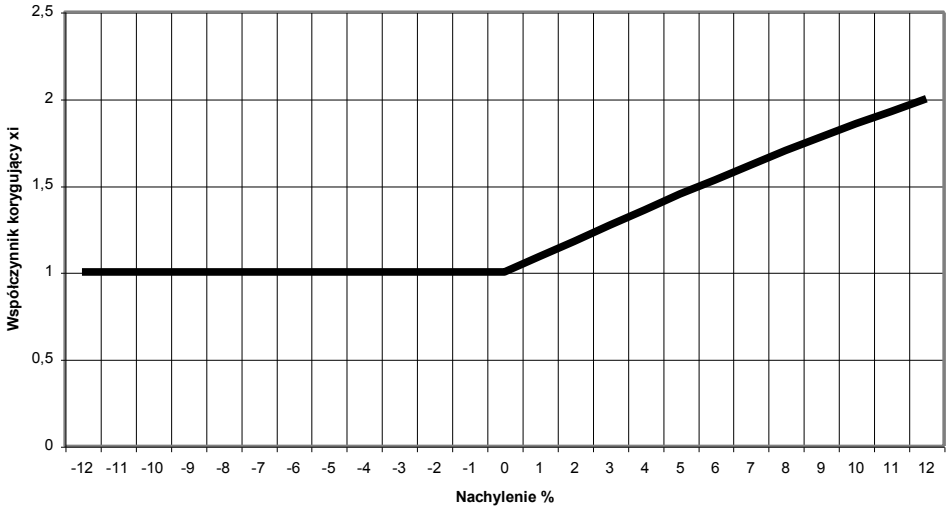
- q_{co} – wydatek tlenku węgla w spalinach emitowanych przez samochód w ciągu godziny, $m^3/h/sam$,
- x_v – współczynniki korygujący ze względu na prędkość pojazdów,
- x_i – współczynniki korygujący ze względu na nachylenie tunelu,
- x_w – współczynniki korygujący ze względu na wysokość tunelu,
- D – 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 0.3
Wartości emisji

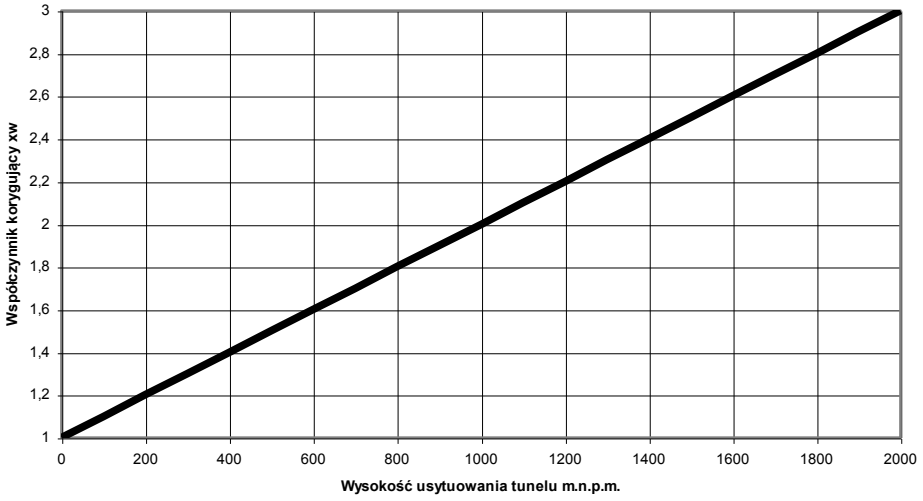
Wartości emisji						
	Samochody z rocznika 1995		Samochody z rocznika 2000		Samochody z rocznika 2010	
	CO ($m^3/h/sam$)	Dym ($m^2/h/sam$)	CO ($m^3/h/sam$)	Dym ($m^2/h/sam$)	CO ($m^3/h/sam$)	Sadza ($m^2/h/sam$)
Samochody osobowe	0,25	40	0,14	20	0,14	15
Samochody	0,25	190	0,14	160	0,14	130

ciężarowe do 15 t						
Samochody ciężarowe do 30 t	0,25	250	0,14	215	0,14	180

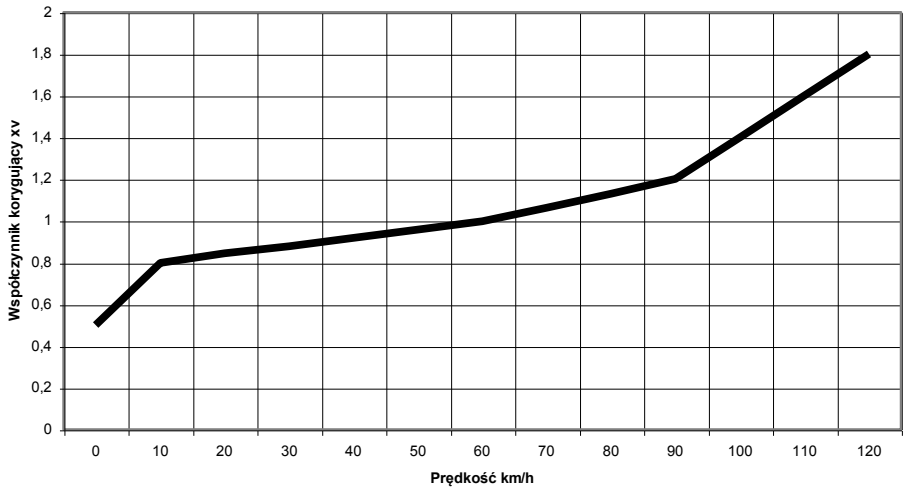
Wartości współczynników korygujących przedstawiają rys.3.1.,3.2. i 3.3.



Rys. 0.1. **Współczynniki x_i, dla samochodów osobowych w zależności od różnych nachyleń niwelety drogi**



Rys. 0.2. **Współczynniki x_w, ze względu na wysokość usytuowania tunelu, dla samochodów ciężarowych i osobowych**



Rys. 0.3. Współczynniki x_v, dla samochodów osobowych, w zależności od prędkości jazdy 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 0.4

Maksymalne wartości natężenia ruchu pojazdów samochodowych [30]

	Prędkość km/h	Maksymalne wartości natężenia ruchu pojazdów samochodowych/km/pas ruchu	
		Pozamiejskie tunele	
		Jednokierunkowe	Dwukierunkowe
Płynny ruch	60	30	23
Utrudniony	10	70	60
Korek	0	150	150
		Miejskie tunele	
		Jednokierunkowe	Dwukierunkowe
Płynny ruch	60	33	25
Utrudniony	10	100	85
Korek	0	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 0.5
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 tlenku węgla należy przyjmować, uwzględniając odpowiednie przepisy prawne i wielkości przedstawione w tabeli 3.6. Przy projektowaniu wentylacji tuneli należy także uwzględniać zawartość CO 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.

Tabela 0.6
Wartości dopuszczalnych koncentracji CO i współczynnika s [30]

Stan ruchu	**Koncentracja CO** (%)	**Współczynnik K 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

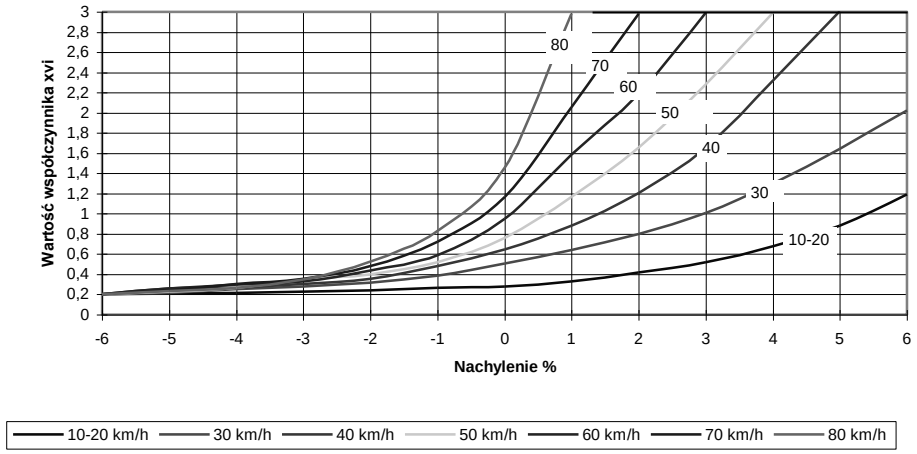
Minimalny wydatek strumienia powietrza Q_D (m^3/s) w tunelu biorąc za kryterium widoczność i rozrzedzenie dymu można wyznaczyć z zależności:

$$Q_D = \frac{q_D \cdot x_{vi} \cdot x_w}{3600} \cdot D \cdot \frac{1}{K_{dop}} \cdot L \qquad (0.2)$$

gdzie:

q_D – emisja dymu przez samochód w ciągu godziny, m^2/h/sam,
x_{vi} – współczynnik korygujący prędkości i nachylenie,
x_w – współczynnik 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.

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



Rys. 0.4. **Współczynniki x_{vi} zależny od prędkości i nachylenia niwelety tunelu dla samochodów ciężarowych**

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

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: tlenku 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:

$$N_R = \frac{3600}{T_S} \tag{0.3}$$

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:

$$N_R = \frac{v_s}{l_s} \tag{0.4}$$

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:

$$G_R = \frac{N_R}{v} \tag{0.5}$$

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 tlenku węgla w spalinach samochodowych przez pojazdy osobowe do tunelu można wyznaczyć z zależności:

$$\dot{V}O_{co} = V_{so} \cdot L \cdot G_R \cdot k_w \cdot k_{vi} \cdot k_r \qquad (0.6)$$

gdzie:

$\dot{V}O_{co}$ – średni wydatek strumienia tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy osobowe do tunelu, m^3/h,

V_{so} – wydatek strumienia tlenku 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. 3.6.),

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 tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy ciężarowe do tunelu można wyznaczyć z zależności:

$$\dot{V}C_{co} = V_{sc} \cdot L \cdot G_R \cdot k_w \cdot k_{vi} \cdot k_r \qquad (0.7)$$

gdzie:

$\dot{V}C_{co}$ – średni wydatek strumienia tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy ciężarowe do tunelu, m^3/h,

V_{sc} – wydatek strumienia tlenku 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 zależność 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. 3.6.),

k_v – 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 tlenku węgla emitowanego do tunelu przez samochody osobowe i ciężarowe można wyznaczyć z zależności:

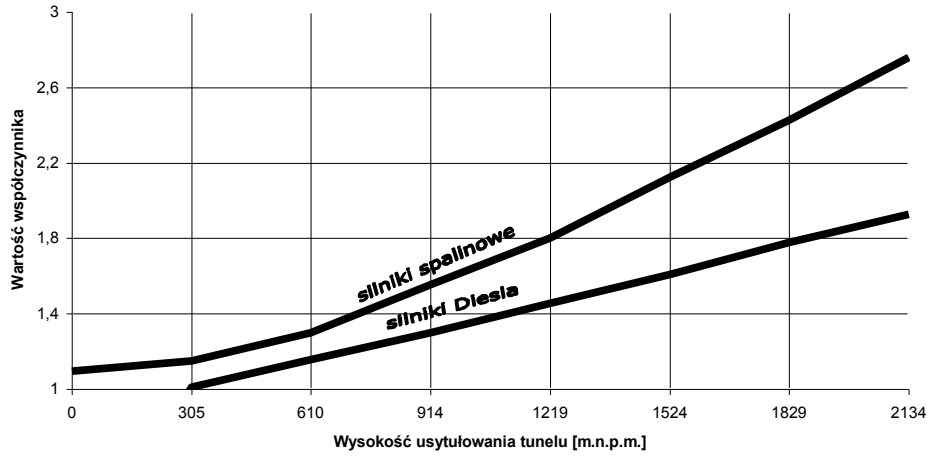
$$\dot{V}_{co} = \dot{V}O_{co} + \dot{V}C_{co} \tag{0.8}$$

gdzie:

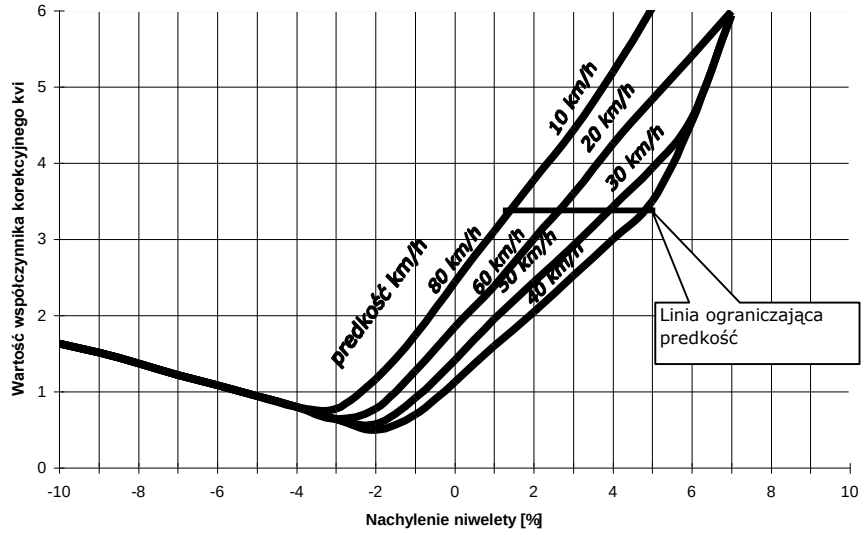
$\dot{V}_{co}$ – całkowity wydatek strumienia tlenku węgla w tunelu, m^3/h,

$\dot{V}O_{co}$ – średni wydatek strumienia tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy osobowe do tunelu, m^3/h,

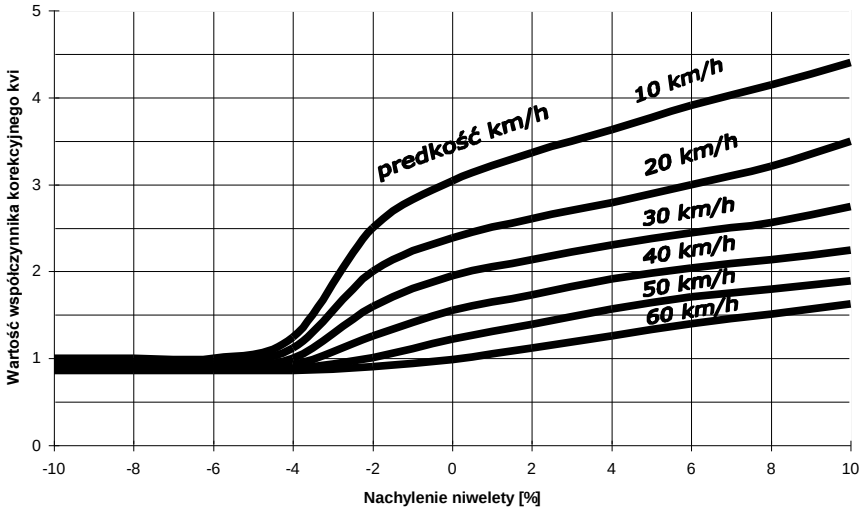
$\dot{V}C_{co}$ – średni wydatek strumienia tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy ciężarowe do tunelu, m^3/h.



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



Rys. 0.5. Współczynniki k_{vi} dla samochodów ciężarowych zależne od prędkości jazdy i nachylenia niwelety drogi



Rys. 0.6. Współczynniki k_{vio} dla samochodów ciężarowych zależne od prędkości jazdy i nachylenia niwelety tunelu

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

$$\dot{V}_{pco} = \frac{100\dot{V}_{co}}{(C_d - C_z)} \qquad (0.9)$$

gdzie:

$\dot{V}_{pco}$ – minimalny wydatek strumienia powietrza w tunelu ze względu na emisję tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy w tunelu, m^3/h,

$\dot{V}_{co}$ – całkowity wydatek strumienia tlenku węgla, m^3/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:

$$\dot{V}_D = \frac{\dot{V} C_D}{K_D} \qquad (0.10)$$

gdzie:

$\dot{V}_D$ – minimalny wydatek strumienia powietrza w tunelu ze względu na emisję dymów w spalinach emitowanych przez pojazdy w tunelu, m^3/h,

$\dot{V} C_D$ – koncentracja dymów spalinowych samochodów ciężarowych, m^2/h,

K_D – współczynnik dopuszczalnej wielkości określającej widoczność, 1/m.

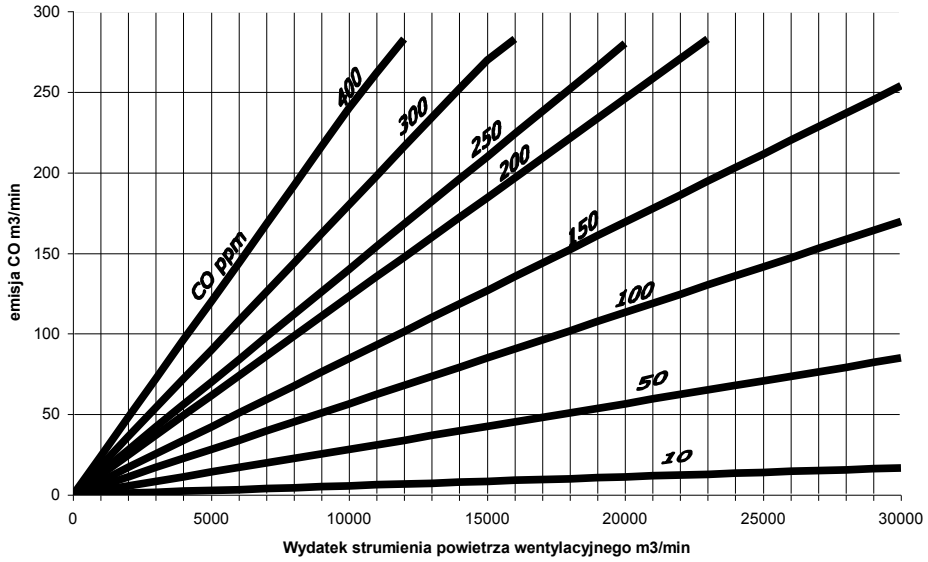
9. Minimalny wydatek powietrza konieczny do rozrzedzenia tlenków azotu do koncentracji dopuszczonej odpowiednimi przepisami prawnymi można określić z zależności:

$$\dot{V}_{pNz} = \frac{100\ \dot{V}_{nz}}{(C_{dNz} - C_{zNz})} \qquad (0.11)$$

gdzie:

$\dot{V}_{pNz}$ – minimalny wydatek strumienia powietrza w tunelu ze względu na emisję tlenku węgla w spalinach emitowanych przez pojazdy w tunelu, m^3/h,

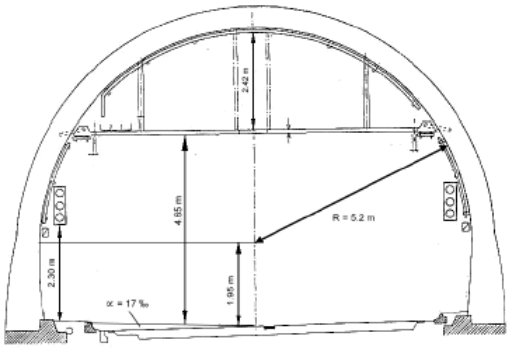
$\dot{V}_{Nz}$ – całkowity wydatek strumienia tlenku węgla, m^3/h,
C_{dNz} – dopuszczalna koncentracja tlenku węgla w tunelu określona przepisami prawnymi, %,
C_{zNz} – koncentracja tlenku węgla w powietrzu atmosferycznym doprowadzanym do tunelu, %.



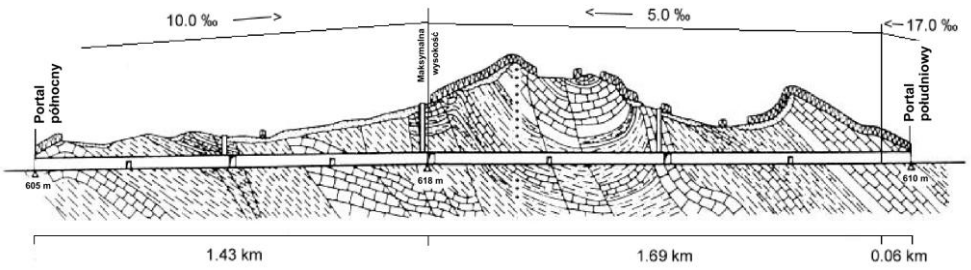
Rys. 0.7. Wydatek strumienia powietrza zależny od emisji tlenku węgla w gazach spalinowych i koncentracji tlenku węgla w tunelu

Przykłady obliczeń

Obliczenia wentylacyjne przeprowadzono dla warunków techniczno – ruchowych występujących w tunelu Belchen.



Rys. 0.8. Przekrój poprzeczny tunelu Belchen



Rys. 0.9. Przekrój podłużny tunelu Belchen

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 tlenku 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	$Q_z = \frac{0.25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1{,}5}{3600} \cdot 26{,}16 \cdot \frac{10^2}{0{,}015}$	18,2
3	$Q_z = \frac{0.25 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1{,}5}{3600} \cdot 26{,}16 \cdot \frac{10^2}{0{,}015}$	18,2

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

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

2. Obliczenia minimalnego wydatku powietrza ze względu na kryterium widoczności świeżego dymu Q_D ($m^3/s/km$)

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

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

3. Wniosek: W tunelu należy zapewnić wydatek strumienia powietrza wynoszący co najmniej 70 m^3/s

Obliczanie minimalnego wydatku powietrza w tunelu metodą A.G. BendeliusA

1. Gęstość ruchu
a) samochody osobowe

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

b) samochody ciężarowe

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

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

Część tunelu	Kierunek Północ – Południe	Wartość wydatku strumienia CO przez samochody ciężarowe (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 ciężarowe (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:

$$\dot{V}_{co} = (11{,}6 + 13{,}8 + 3{,}8) + (4{,}36 + 5{,}03 + 2{,}03) = 40{,}62 \ \text{m}^3/\text{h}$$

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

$$\dot{V}_{pco} = \frac{100 \cdot 40{,}62}{(0{,}015 - 0{,}001)} = 290142 \ \text{m}^3/\text{h} = 80{,}59 \ \text{m}^3/\text{s}$$

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

$$\dot{V}_D = \frac{250}{0{,}005} = 50000 \ \text{m}^3/\text{h} = 13{,}88 \ \text{m}^3/\text{s}$$

7. Wniosek: W tunelu należy zapewnić wydatek strumienia powietrza co najmniej
81 m^3/s

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 uchwytne 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]:

$$h_n = (p_w - p_d) - g\varsigma (z_w - z_d) \qquad (0.12)$$

gdzie:

- h_n – depresja naturalna, Pa,
- p_w – 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,
- ς – średnia gęstość masy powietrza w tunelu, kg/m^3 ,
- g – przyśpieszenie ziemskie, m/s^2 .

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:

1. wentylatory promieniowe, zwane także odśrodkowymi,
2. wentylatory osiowe.

Zależności pomiędzy wytwarzaną przez wentylator depresją a jego wydatkiem często są graficzne 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 przy pomocy:

1) zmian prędkości obrotowej wirnika,
2) kąta nachylenia łopatek wirnika,
3) aparatu kierowniczego.

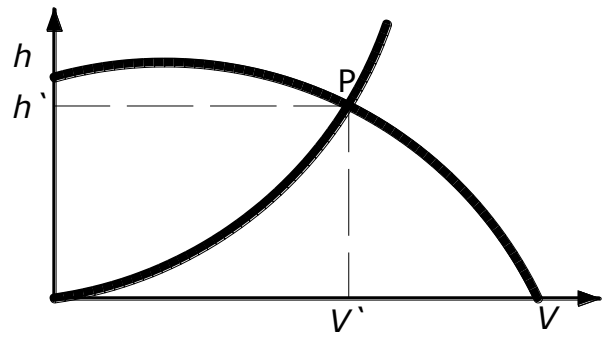
Charakterystykę przepływową tunelu można opisać równaniem:

$$\Delta h = RV^2 \qquad (0.13)$$

gdzie:

- Δh – spadek naporu aerodynamicznego powietrza w tunelu Pa,
- R – opór aerodynamiczny tunelu Ns^2/m^8,
- V – wydatek strumienia przepływu powietrza w tunelu m^3/s.

Punkt P przecięcia charakterystyk wentylatora i tunelu nosi nazwę punktu pracy wentylatora.



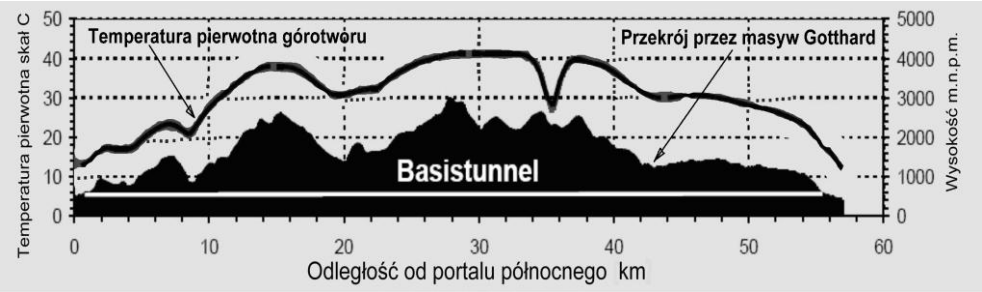
Rys. 0.10. Charakterystyka przepływowa wentylatora i tunelu

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

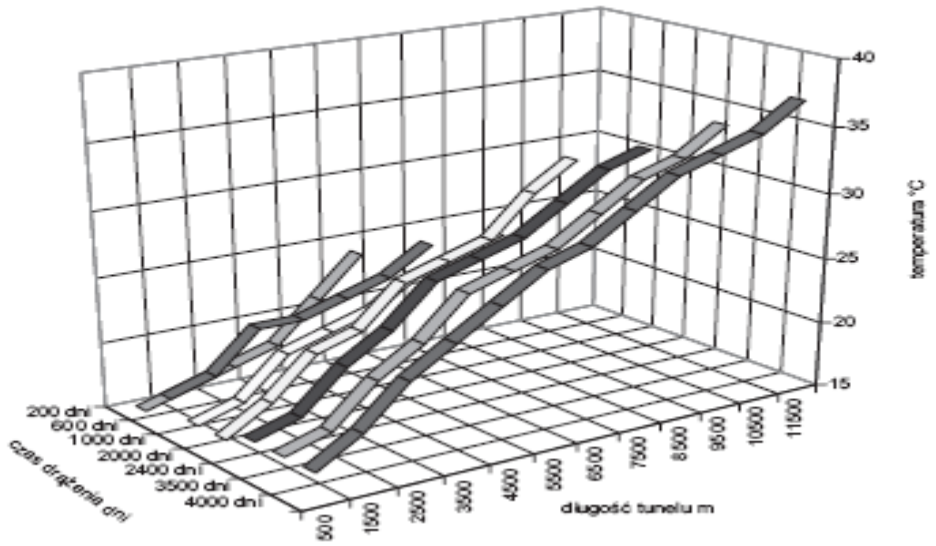
KLIMATYZACJA TUNELI KOMUNIKACYJNYCH

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.
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 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. 0.11. **Rozkład temperatury pierwotnej górotworu w tunelu [36]**



Rys. 0.13. Sezonowe zmiany temperatury powietrza w drążonym tunelu [36]

Znanych jest wiele metod i sposobów określenia bilansu cieplnego w tunelach 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 stosowana jest klimatyzacja sprowadzająca się do chłodzenia i ogrzewania powietrza doprowadzanego do tuneli.