

XIX Seminarium Naukowo – Techniczne  
"OCHRONA PRZECIWPOŻAROWA OBIEKTÓW  
BUDOWLANYCH" - ZAKOPANE 2024  
SITP Oddział Małopolski

## Wentylacja tuneli drogowych - od koncepcji po odbiór

mgr inż. Ewa Sztarbała  
dr inż. Grzegorz Sztarbała





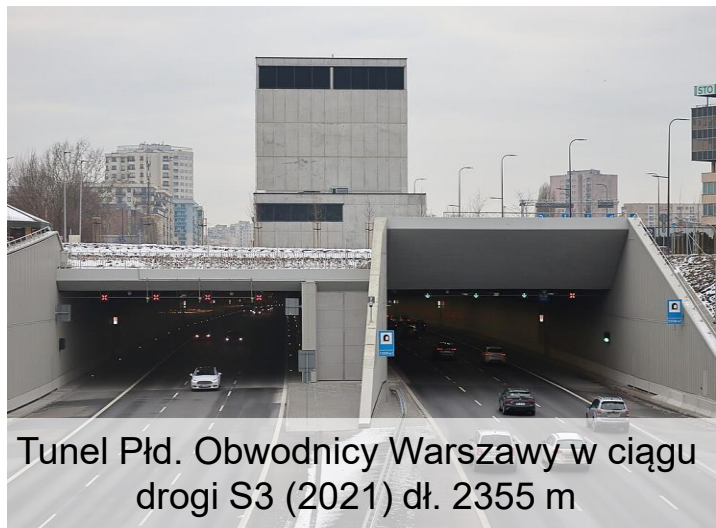
Tunel TS-26 w ciągu drogi S3 (2024)  
dł. 2301 m / 2273 m



Tunel pod Świną (2023),  
dł. 1800 m



Tunel pod Górami Mały Luboń w ciągu  
drogi S7 (2024) dł. 2058 m



Tunel Półd. Obwodnicy Warszawy w ciągu  
drogi S3 (2021) dł. 2355 m

# Tunele drogowe w Polsce – stan na 10.2024



**Użytkowane: 28 tuneli**  
**(w 15 tuneli o dł. powyżej 500 m)**

**Realizowane: 5 tuneli (wszystkie o**  
**dł. powyżej 500 m)**



**Projektowane: 6 tuneli,**  
**(4 tunele o dł. powyżej 500 m**  
**i 1 tunel o dł. 5000 m)**

# Pożary w tunelach drogowych w Polsce – stan na 10.2024

---

**18.05.2011 r.** – nawa w kierunku półn. (Tunel Świętokrzyski, Warszawa)

**26.05.2013 r.** – nawa w kierunku połd. (Tunel Świętokrzyski, Warszawa)

**7.06.2018 r.** – nawa w kierunku półn. (Tunel Świętokrzyski, Warszawa)

**12.08.2019 r.** – przejazd drogowy / tunel Radunia, Gdańsk

**27.01.2024 r.** – tunel drogowy Emilia w ciągu drogi S1, Laliki



# Cel stosowania systemów wentylacji tuneli drogowych

## W warunkach normalnej eksploatacji:

- kontrolować poziom zanieczyszczeń emitowanych przez pojazdy drogowe,
- kontrolować przejrzystości powietrza w tunelu.

## W warunkach pożaru:

- zapewnić możliwość ewakuacji ludzi,
- uwzględnić bezpieczeństwo ekip ratowniczo-gaśniczych,
- zapewnić kontrolowanie rozprzestrzeniania się dymu i ciepła.



fol. ARDOR Ewa Sztarbała, 2020.



źródło: [www.dziennikbaltycki.pl](http://www.dziennikbaltycki.pl)

# Wybór system wentylacji tunelu

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych (Dz. U. 2022 poz. 1518)

System wentylacji	Długość tunelu	
	prowadzącego jezdnię dwukierunkową	o oddzielnych konstrukcjach dla różnych kierunków ruchu
Naturalna	* nie większa niż 500 m	* nie większa niż 700 m
Mechaniczna wzdłużna	nie większa niż 1000 m	nie większa niż 3000 m
Mechaniczna poprzeczna	większa niż 1000 m	
Mechaniczna półpoprzeczna	większa niż 250 m, ale nie większa niż 1000 m	

\* pod warunkiem, że analiza ryzyka wykazała skuteczność działania w warunkach normalnej eksploatacji i w warunkach pożaru. W innym przypadku maksymalna dopuszczalna długość wynosi 250 m.

## **Przykład praktyczny**

**Tunel XX o oddzielnych konstrukcjach  
dla różnych kierunków ruchu  
w miejscowości AAA**

## Dane techniczne tunelu drogowego

Parametr	Nawa N	Nawa S
Długość nawy (L)	318,00 m	318,00 m
Długość od wjazdu do przełamania (L1)	277,61 m	40,39
Długość od przełamania do wyjazdu (L2)	40,39 m	277,61
Pochylenie nawy tunelu na odcinku L1	-1,42%	-1,12%
Pochylenie nawy tunelu na odcinku L2	1,12%	1,42%
Szerokość nawy	ok. 10,6 m	ok. 10,6 m
Wysokość nawy	5,20 m	5,20 m
Wysokość skrajni drogi	4,90 m	4,90 m
Obliczeniowe pole przekroju poprzecznego tunelu	57,74 m <sup>2</sup>	57,74 m <sup>2</sup>
Obliczeniowy obwód tunelu	32,68 m	32,68 m
Liczba pasów ruchu w nawie	2	2



## Przyjęta koncepcja wentylacji w warunkach pożaru

Parametr projektowy systemu wentylacji	Nawa N	Nawa S
Długość nawy (L)	318,00 m	318,00 m
System wentylacji	...	

# Wybór system wentylacji tunelu

Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych (Dz. U. 2022 poz. 1518) oraz wytycznymi WR-M 42 „Wytyczne projektowania wentylacji drogowych tuneli”

94. Wentylację tuneli projektuje się w szczególności jako:

- 1) naturalną;
- 2) mechaniczną:
  - a) wzdłużną – z wzdłużnym przepływem powietrza na całej długości tunelu,
  - b) poprzeczną – z poprzecznym ruchem powietrza na całej długości tunelu,
  - c) półpoprzeczną – z poprzeczno-wzdłużnym lub wzdłużno-poprzecznym przepływem powietrza w tunelu.

95. Wentylację naturalną, działającą dzięki różnicy ciśnień między głowicami tunelu oraz w wyniku ruchu pojazdów, stosuje się w tunelu prowadzącym jezdnię:

- 1) dwukierunkową – o długości nieprzekraczającej 500 m;
- 2) jednokierunkową – o długości nieprzekraczającej 700 m.

96. Dopuszcza się zastosowanie wentylacji naturalnej w tunelu o długości większej niż 250 m, pod warunkiem potwierdzenia skuteczności jej działania w analizie ryzyka, o której mowa w ust. 98 pkt 1.

# Wybór system wentylacji tunelu

Zgodnie z Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 24 czerwca 2022 r. w sprawie przepisów techniczno-budowlanych dotyczących dróg publicznych (Dz. U. 2022 poz. 1518) oraz wytycznymi WR-M 42 „Wytyczne projektowania wentylacji drogowych tuneli”

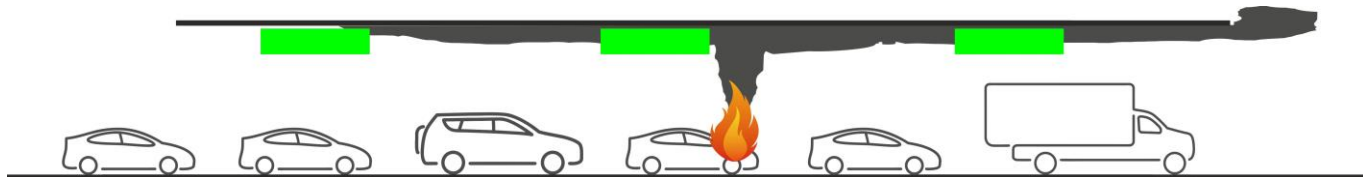
97. Zakres stosowania systemów wentylacji mechanicznej, działającej dzięki wymuszaniu przepływu powietrza wzdłuż lub w poprzek osi tunelu, z zastrzeżeniem ust. 98, określa tabela.

System wentylacji mechanicznej	Długość tunelu	
	prowadzącego jezdnię dwukierunkową	o oddzielnych konstrukcjach dla różnych kierunków ruchu
wzdłużnej	<del>nie większa niż 1000 m</del>	nie większa niż 3000 m
półpoprzecznej	większa niż 250 m, ale nie większa niż 1000 m	większa niż 250 m, ale nie większa niż 1000 m
poprzecznej	większa niż 1000 m	większa niż 1000 m

## Przyjęta koncepcja wentylacji w warunkach pożaru

Parametr projektowe systemu wentylacji	Nawa N	Nawa S
Długość nawy (L)	318,00 m	318,00 m
System wentylacji	wentylacja wzdłużna z wentylatorami strumieniowymi	

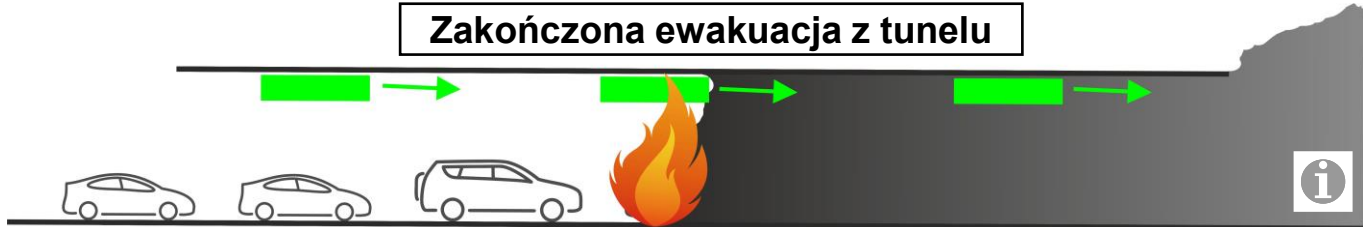
# System wentylacji wzdłużnej



**Ewakuacja z tunelu**



**Zakończona ewakuacja z tunelu**

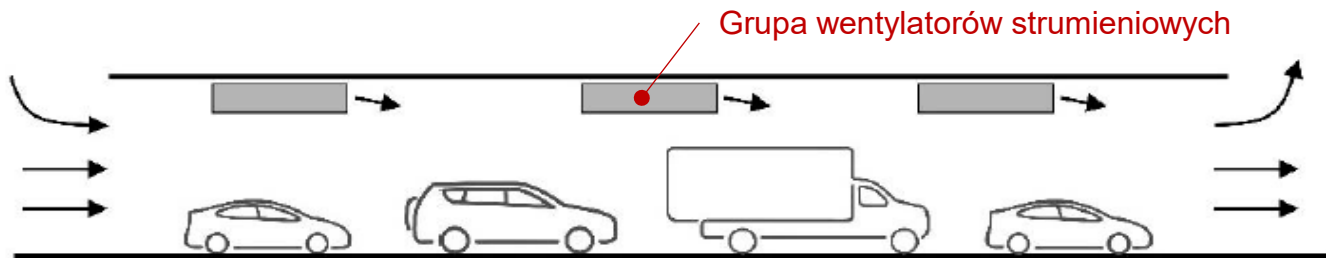


# System wentylacji wzdłużnej – prędkość krytyczna



*fol. ARDOR Ewa Sztarbała, 2019*

# System wentylacji wzdłużnej – teoretyczna siła ciągu



$$F_j = V_j \cdot v_{out} \cdot \rho$$

gdzie:

$F_j$  – teoretyczna siła ciągu wentylatora strumieniowego (N),

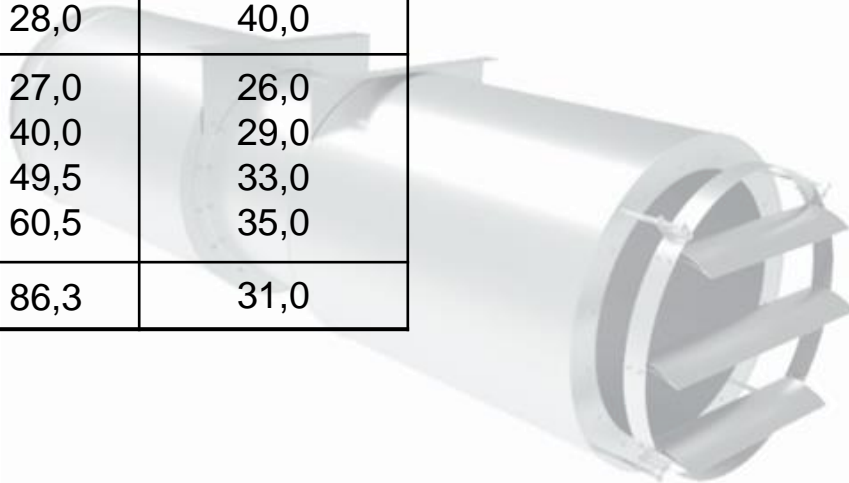
$V_j$  – strumień objętości powietrza przepływającego przez wentylator ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),

$v_{out}$  – prędkość powietrza na wylocie z wentylatora strumieniowego (m/s),

$\rho$  – gęstość powietrza przepływającego przez wentylator strumieniowy ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

# Tunelowe wentylator strumieniowe

Średnica	Teoretyczna siła ciągu w 20°C	Moc silnika	Prędkość powietrza na wylocie
mm	N	kW	m/s
630	372	12,7	32,0
	631	28,0	41,0
710	441	12,7	31,0
	748	28,0	40,0
1250	1033	27,0	26,0
	1413	40,0	29,0
	1535	49,5	33,0
	1675	60,5	35,0
1600	2241	86,3	31,0





# Tunelowe wentylator strumieniowe

Średnica	Teoretyczna siła ciągu w 20°C	Moc silnika	Prędkość powietrza na wylocie	Teoretyczna siła ciągu w 400°C
mm	N	kW	m/s	N
630	372	12,7	32,0	<b>277</b>
	631	28,0	41,0	<b>471</b>
710	441	12,7	31,0	<b>329</b>
	748	28,0	40,0	<b>558</b>
1250	1033	27,0	26,0	<b>771</b>
	1413	40,0	29,0	<b>1054</b>
	1535	49,5	33,0	<b>1145</b>
	1675	60,5	35,0	<b>1249</b>
1600	2241	86,3	31,0	<b>1672</b>

# Moc pożaru projektowego

Table 8: Nominal thermal power

HGV km/day and tube	Thermal power	Amount of smoke Gas at 300° C
Up to 4000	30 MW	80 m <sup>3</sup> /s
Above 4000	50 MW	120 m <sup>3</sup> /s
Above 6000	Risk analysis and, if necessary, increasing of thermal power to 100 MW and amount of smoke gas to 200 m <sup>3</sup> /s	

Table 10: Critical longitudinal speed

Gradient	Tunnel cross section	Thermal power		
		30 MW	50 MW	100 MW
0 – 1%	Rectangle	2.3 m/s	2.6 m/s	2.9 m/s
	Vault	2.5 m/s	2.8 m/s	3.1 m/s
2 – 3%	Rectangle	2.5 m/s	2.8 m/s	3.1 m/s
	Vault	2.6 m/s	2.9 m/s	3.3 m/s
3 – 6%	Rectangle	2.7 m/s	3.0 m/s	3.3 m/s
	Vault	2.8 m/s	3.1 m/s	3.6 m/s

*Regulations for the equipment and operation of road tunnels, RABT 2006*

Tabelle 12: Kritische Geschwindigkeit  $u_{krit}$

Längsgefälle	Tunnelquerschnitt	Bemessungsbrandleistung		
		30 MW	50 MW	100 MW
		$u_{krit}$ [m/s]		
0 bis 1 %	Rechteck	2,3	2,6	2,9
	Gewölbe	2,5	2,8	3,1
> 1 % bis ≤ 3 %	Rechteck	2,5	2,8	3,1
	Gewölbe	2,6	2,9	3,3
> 3 % bis ≤ 5 %	Rechteck	2,7	3,0	3,3
	Gewölbe	2,8	3,1	3,6

Tabelle 11: Bemessungsbrandleistung

LKW x km/Tag und Röhre	Brandleistung	Rauchgasmenge ( $Q_{Rauch}$ ) bei 300° C
bis 4.000	30 MW	80 m <sup>3</sup> /s
über 4.000	50 MW	120 m <sup>3</sup> /s
über 6.000	Risikoanalyse und gegebenenfalls Erhöhung der Brandleistung auf 100 MW und der Rauchgasmenge auf 200 m <sup>3</sup> /s	

*Empfehlungen für die Ausstattung und den Betrieb von Strassentunneln mit einer Planungsgeschwindigkeit von 80 km/h oder 100 km/h Ausgabe 2018, EABT-80/100 R2*

## Przyjęta koncepcja wentylacji w warunkach pożaru

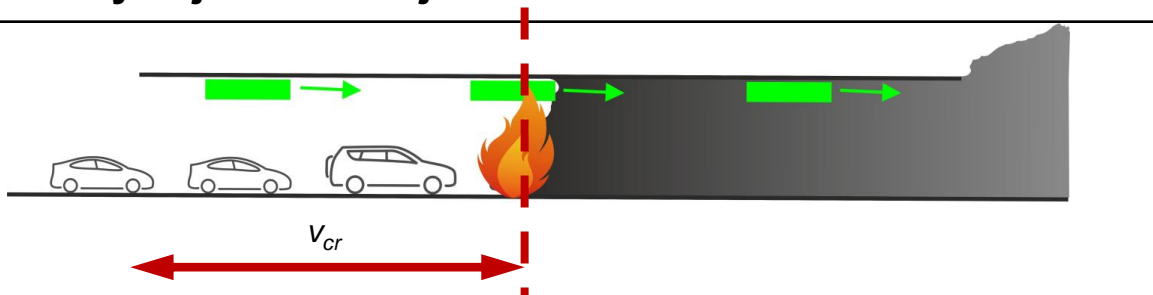
Parametr projektowy	Nawa N	Nawa S
Długość nawy (L)	318,00 m	318,00 m
System wentylacji	wentylacja wzdłużna z wentylatorami strumieniowymi	
Projektowana całkowita moc pożaru	30 MW	
Prędkość krytyczna przepływu powietrza	2,3 m/s	
Prędkość wiatru oddziałującego na portal, którym usuwany jest dym	7,0 m/s	

93. Wydajność wentylacji tunelu, która służy do usuwania dymu i ciepła, ustala się przy uwzględnieniu mocy pożaru projektowego nie mniejszej niż określona w tabeli.

Rodzaj pojazdów dopuszczonych do ruchu w tunelu	Całkowita moc pożaru projektowego	Procent całkowitej mocy pożaru przekazywany do gazów pożarowych
Wyłącznie pojazdy o masie całkowitej nie większej niż 3,5 t	5 MW	73%
Pojazdy o masie całkowitej nie większej niż 15,0 t oraz autobusy niezależnie od masy całkowitej	30 MW	64%
Pojazdy o masie całkowitej nie większej niż 23,0 t	50 MW	64%
Pojazdy o masie całkowitej powyżej 23,0 t oraz pojazdy przewożące towary niebezpieczne	100–200 MW <sup>1)</sup>	64%
Pojazdy z cysternami przewożącymi paliwa płynne lub gazowe	100–300 MW <sup>1)</sup>	64%

<sup>1)</sup> Odpowiednią wartość całkowitej mocy pożaru ustala się w odniesieniu do ilości materiałów palnych oraz ich charakterystyki pożarowej.

# System wentylacji wzdłużnej



$$v_{cr} = K_1 K_2 \left( \frac{g H Q_c}{c_p \rho_o A T_f} \right)^{\frac{1}{3}}$$

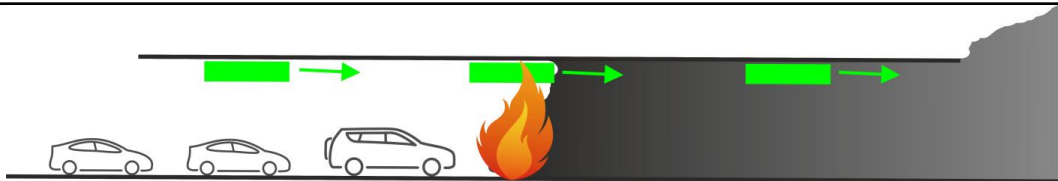
$$K_1 = Fr^{-\frac{1}{3}}$$

$$T_f = \frac{Q_c}{c_p \rho_o A v_{cr}} + T_o$$

$$K_2 = 1 + \left[ 0,0374 \cdot |\min(\psi, 0)|^{0,8} \right]$$

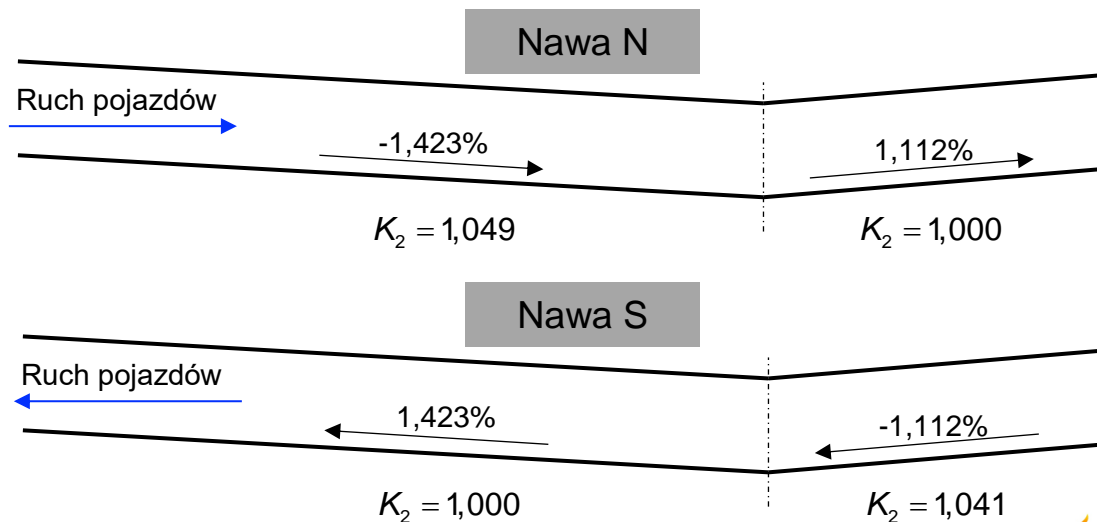
$v_{cr}$  - prędkość krytyczna powietrza w przekroju tunelu w sąsiedztwie źródła pożaru,  $K_2$  - współ. korekcyjny uwzględniający nachylenie tunelu,  $g$  - przyspieszenie ziemskie,  $H$  - wysokość tunelu,  $Q_c$  - strumień ciepła przekazany do powietrza po „zawietrznej” stronie źródła pożaru,  $c_p$  - ciepło właściwe powietrza przy stałym ciśnieniu w temp. otoczenia,  $\rho_o$  - gęstość powietrza w temp. otoczenia,  $A_T$  - pole przekroju porzecznego tunelu w sąsiedztwie źródła pożaru,  $T_f$  - przewidywana temperatura gazów pożarowych,  $\psi$  - pochylenia tunelu,  $T_o$  - temperatura otoczenia.

# System wentylacji wzdłużnej



$$v_{cr} = K_1 K_2 \left( \frac{gHQ_c}{c_p \rho_o AT_f} \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$K_2 = 1 + \left[ 0,0374 \cdot |\min(\psi, 0)|^{0,8} \right]$$

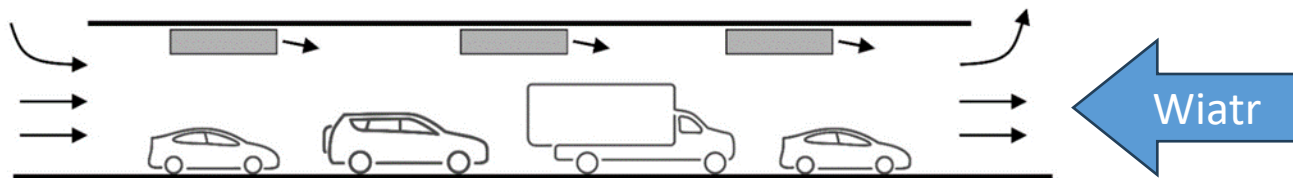


## Dane techniczne projektowanego tunelu drogowego

	Nawa N	Nawa S
Całkowita moc pożaru projektowego $Q = 30,0$ MW		
Prędkość krytyczna odcinek L1	2,05 m/s	2,03 m/s
Przewidywana temperatura gazów pożarowych w sąsiedztwie źródła pożaru – odcinek L1	421,39 K	422,64 K
Prędkość krytyczna odcinek L2	1,94 m/s	1,94 m/s
Przewidywana temperatura gazów pożarowych w sąsiedztwie źródła pożaru – odcinek L2	428,91 K	428,91 K
Całkowita moc pożaru projektowego $Q = 100,0$ MW		
Prędkość krytyczna – odcinek L1	2,67 m/s	2,65 m/s
Przewidywana temperatura gazów pożarowych w sąsiedztwie źródła pożaru – odcinek L1	628,13 K	630,69 K
Prędkość krytyczna – odcinek L2	2,52 m/s	2,52 m/s
Przewidywana temperatura gazów pożarowych w sąsiedztwie źródła pożaru – odcinek L2	648,36 K	648,36 K

## Dane techniczne projektowanego tunelu drogowego

W celu uzyskania obliczonej wymaganej prędkości krytycznej przepływu powietrza w tunelu, należy zastosować urządzenia wentylacyjne, które będą w stanie wytworzyć taki **przyrost ciśnienia powietrza, aby zostały pokonane opory przepływu powietrza od portalu, którym napływa powietrze zewnętrzne do portalu, którym wypływa dym z tunelu, w odniesieniu do najbardziej niekorzystnej lokalizacji pożaru projektowego w tunelu.**



$$\Delta p_{jet} = \Delta p_{wlot} + \Delta p_{tunnel} + \Delta p_{sam} + \Delta p_{pozar} + \Delta p_{komin} + \Delta p_{konstr} + \Delta p_{wylot} + \Delta p_{wiatr}$$



# Przyjęta koncepcja wentylacji w warunkach pożaru

Parametry projektowe	Nawa N	Nawa S
Długość nawy (L)	318,00 m	318,00 m
System wentylacji	wentylacja wzdłużna z wentylatorami strumieniowymi	
Projektowana całkowita moc pożaru	30 MW	
Prędkość krytyczna przepływu powietrza	2,3 m/s	
Prędkość wiatru oddziałującego na portal, którym usuwany jest dym	7,0 m/s	
Liczba wentylatorów strumieniowych	8 szt.	8 szt.
Liczba wentylatorów strumieniowych w grupie	2 szt.	2 szt.
Siła ciągu wentylatora strumieniowego *	430 N	430 N
Sumaryczna siła ciągu wentylatorów strumieniowych	3 440 N	3 440 N

\* - wartość teoretycznej siły ciągu określona przy gęstości powietrza wynoszącej 1,204 kg/m<sup>3</sup>.

# Przyjęta koncepcja wentylacji w warunkach pożaru

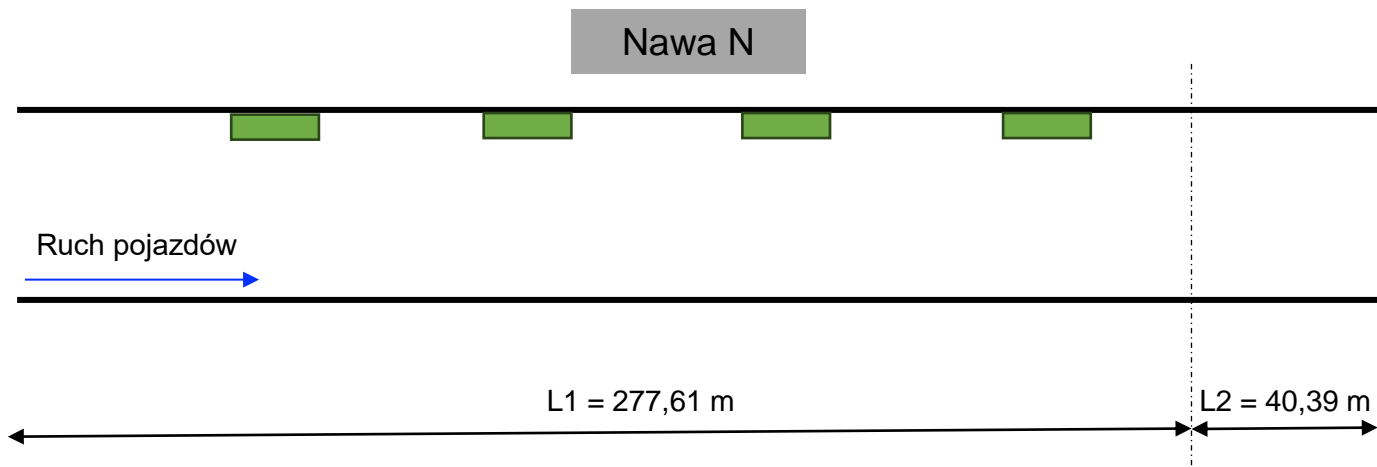
” Wymagana liczba wentylatorów strumieniowych zainstalowanych w tunelu powinna uwzględniać, że wentylatory znajdujące się w obszarze objętym pożarem ulegną awarii w wyniku pożaru, a wentylatory strumieniowe po stronie „zawietrznej” źródła pożaru pracują w strumieniu gorącego dymu.

(9) Przewidywana wielkość obszaru objętego pożarem zależy od jego mocy i została przedstawiona w tab. 5.3.1.2:

**Tab. 5.3.1.2. Przewidywana długość tunelu objęta pożarem projektowym o danej mocy [7]**

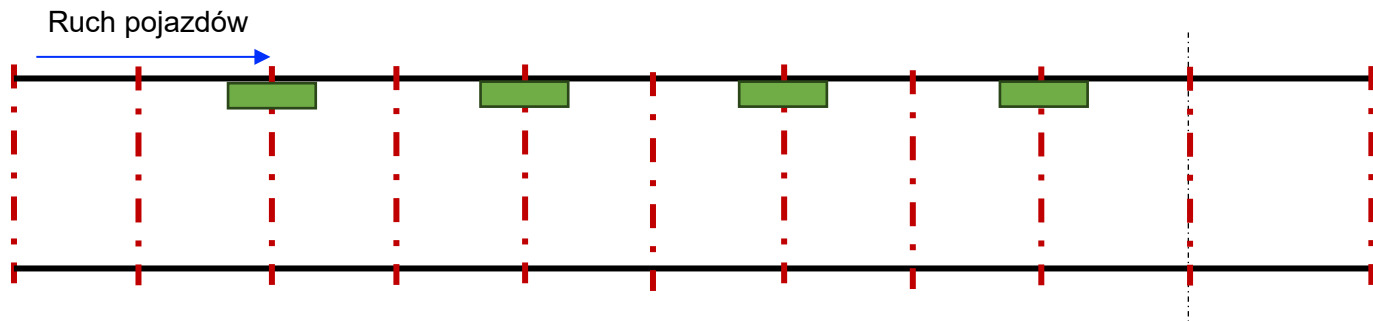
<b>Całkowita moc pożaru projektowego [MW]</b>	<b>Przewidywana długość tunelu objęta pożarem [m]</b>
5	5
30	15
50	20
100	65

# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji



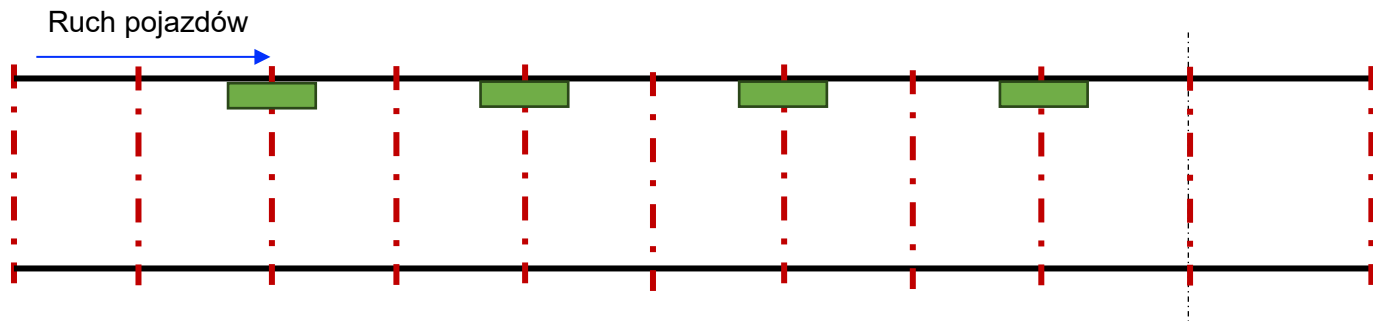
**W którym miejscu tunelu lokalizacja pożaru będzie najbardziej niekorzystna dla systemu wentylacji wzdłużnej ?c**

# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji



**Model analityczny Tunel1D firmy ARDOR  
dla tuneli z systemem wentylacji wzdłużnej**

# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji

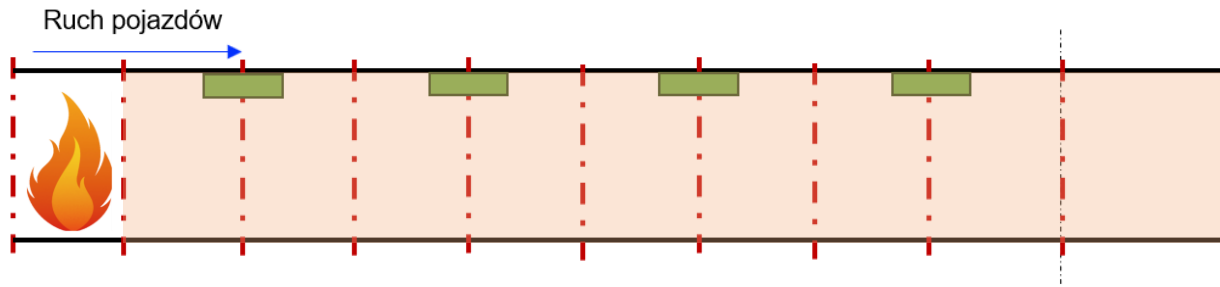


**Przyrost ciśnienia powietrza w tunelu spowodowany  
pracą wentylatorów strumieniowych**

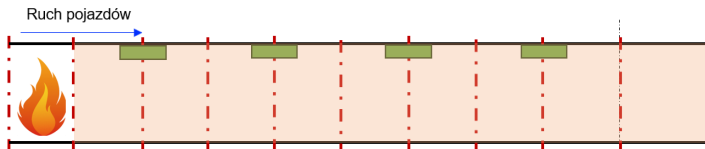
**musi być większy**

**oporów przepływu powietrza oraz mieszaniny dymu  
i powietrza przez tunel z obliczoną prędkością krytyczną**

# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji

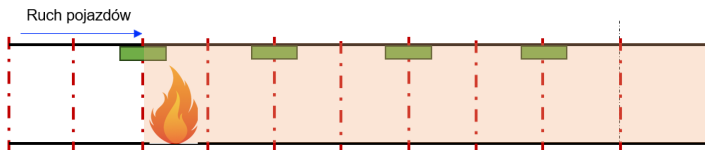


# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji



Sekcja tunelu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Wylot z tunelu	
Długość sekcji	30	30	30	30	30	30	30	30	37.61	40.39		
Początek sekcji	0	30	60	90	120	150	180	210	240	278	318	
Pole przekroju sekcji	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74		
Temperatura powietrza [°C]	133.40	124.25	114.24	105.19	97.01	89.61	82.93	76.89	71.42	65.71	59.95	
Gęstość powietrza [kg/m <sup>3</sup> ]	0.861	0.88	0.90	0.93	0.95	0.97	0.98	1.00	1.02	1.03	1.05	
Prędkość powietrza [m/s]	3.25	3.17	3.09	3.02	2.95	2.90	2.84	2.79	2.75	2.70	2.66	
<b>SUMA</b>												
R_wlot	-1.607											-1.61 Pa
R_ścian	-0.481	-0.470	-0.458	-0.448	-0.438	-0.429	-0.421	-0.414	-0.511	-0.540		-4.61 Pa
R_pożar	-10.611											-10.61 Pa
R_konst	-0.428	-0.418	-0.408	-0.398	-0.389	-0.382	-0.375	-0.368	-0.455	-0.480		-4.10 Pa
R_komin	-1.482	-1.399	-1.303	-1.213	-1.127	-1.047	-0.971	-0.900	-1.045	0.808		-9.68 Pa
R_wylot												-3.779
R_wiatr												-29.768
R_sam												0.00 Pa
<b>SUMA:</b>	-14.609	-2.287	-2.170	-2.059	-1.955	-1.858	-1.767	-1.682	-2.010	-0.212	-33.547	
Obliczeniowy wymagany przyrost ciśnienia												
Wymagana siła ciągu wentylatorów strumieniowych												
<b>-64.15 Pa</b>												
<b>3704.28 N</b>												
Liczba wentylatorów	0	0	2	0	2	0	2	0	2	0		<b>8 szt.</b>
Zmierzona siła ciągu [N]	0.0	0.0	430.0	0.0	430.0	0.0	430.0	0.0	430.0	0.0		
Prędkość powietrza na wylocie [m/s]	0.0	0.0	36.0	0.0	36.0	0.0	36.0	0.0	36.0	0.0		
Efektywność instalacji [%]	0.00	0.00	0.85	0.00	0.85	0.00	0.85	0.00	0.85	0.00		
Kierownice powietrza [%]	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00		
Zainstalowana siła ciągu [N]	0	0	618	0	647	0	673	0	695	0		<b>2 633.73 N</b>
Przyrost ciśnienia przez wentylatory	0.00	0.00	10.71	0.00	11.21	0.00	11.65	0.00	12.04	0.00		<b>45.61 Pa</b>

# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji



Sekcja tunelu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Wylot z tunelu	
Długość sekcji	30	30	30	30	30	30	30	30	37.61	40.39		
Sumaryczna długość	0	30	60	90	120	150	180	210	240	278	318	
Pole przekroju sekcji	57.7	57.7	57.7	57.7	57.7	57.7	57.7	57.7	57.7	57.7		
Temperatura powietrza [°C]	15.00	15.00	133.40	124.25	114.24	105.19	97.01	89.61	82.93	75.94	68.89	
Gęstość powietrza [kg/m <sup>3</sup> ]	1.215	1.215	0.861	0.88	0.90	0.93	0.95	0.97	0.98	1.00	1.02	
Prędkość powietrza [m/s]	2.30	2.30	3.25	3.17	3.09	3.02	2.95	2.90	2.84	2.79	2.73	
<b>SUMA</b>												
R_wlot	-1.607											-1.607 Pa
R_ścian	-0.341	-0.341	-0.481	-0.470	-0.458	-0.448	-0.438	-0.429	-0.528	-0.556		-4.492 Pa
R_pożar			-7.52									-7.521 Pa
R_konst	-0.303	-0.303	-0.428	-0.418	-0.408	-0.398	-0.389	-0.382	-0.470	-0.494		-3.993 Pa
R_komin			-1.482	-1.399	-1.303	-1.213	-1.127	-1.047	-1.217	0.943		-7.845 Pa
R_wylot											-3.81	-3.815 Pa
R_wiatr											-29.7675	-29.768 Pa
R_sam	-0.779	-0.779										-1.559 Pa
<b>SUMA:</b>	<b>-3.030</b>	<b>-1.424</b>	<b>-9.911</b>	<b>-2.287</b>	<b>-2.170</b>	<b>-2.059</b>	<b>-1.955</b>	<b>-1.858</b>	<b>-2.215</b>	<b>-0.108</b>	<b>-33.582</b>	
Obliczeniowy wymagany przyrost ciśnienia												
Wymagana siła ciągu wentylatorów strumieniowych												
<b>-60.599 Pa</b>												
<b>3498.975 N</b>												
Liczba wentylatorów	0	0	0	0	2	0	2	0	2	0		
Zmierzona siła ciągu [N]	0.0	0.0	430.0	0.0	430.0	0.0	430.0	0.0	430.0	0.0		
Prędkość powietrza na wylocie [m/s]	0.0	0.0	36.0	0.0	36.0	0.0	36.0	0.0	36.0	0.0		
Efektywność instalacji [%]	0.00	0.00	0.85	0.00	0.85	0.00	0.85	0.00	0.85	0.00		
Kierownice powietrza [%]	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00		
Zainstalowana siła ciągu [N]	0	0	0	0	509	0	533	0	554	0	1 595 N	
Przyrost ciśnienia przez wentylatory	0.00	0.00	0.00	0.00	8.82	0.00	9.23	0.00	9.59	0.00	28 Pa	

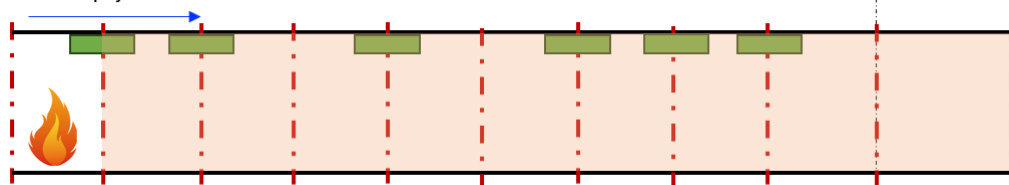


# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji

Tunel Nawa N										
Sekcja w tunelu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Opory przepływu powietrza w nawie [Pa]	64.15	63.93	60.60	60.28	59.87	59.38	58.78	58.09	57.27	55.91
Przyrost ciśnienia przez wentylatory [Pa]	45.61	36.79	27.63	38.88	29.89	41.32	32.52	44.15	35.55	57.60
Bilans ciśnienia [Pa]	-18.54	-27.14	-32.97	-21.40	-29.98	-18.06	-26.26	-13.94	-21.72	1.68
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	UWAGA
Wymagana siła ciągu wentylatorów strumieniowych [N]	3 704	3 691	3 499	3 481	3 457	3 428	3 394	3 354	3 307	3 229
Zainstalowana siła ciągu [N]	2 634	2 124	1 595	2 245	1 726	2 386	1 878	2 549	2 053	3 326

# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji

Ruch pojazdów



Sekcja tunelu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Wylot z tunelu
Długość sekcji	30	30	30	30	30	30	30	30	37.61	40.39	
Początek sekcji	0	30	60	90	120	150	180	210	240	278	318
Pole przekroju sekcji	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	
Temperatura powietrza [°C]	133.40	124.25	114.24	105.19	97.01	89.61	82.93	76.89	71.42	65.71	59.95
Gęstość powietrza [kg/m3]	0.861	0.88	0.90	0.93	0.95	0.97	0.98	1.00	1.02	1.03	1.05
Prędkość powietrza [m/s]	3.25	3.17	3.09	3.02	2.95	2.90	2.84	2.79	2.75	2.70	2.66

SUMA

R_wlot	-1.607										-1.61 Pa
R_ścian	-0.481	-0.470	-0.458	-0.448	-0.438	-0.429	-0.421	-0.414	-0.511	-0.540	-4.61 Pa
R_pożar	-10.611										-10.61 Pa
R_konst	-0.428	-0.418	-0.408	-0.398	-0.389	-0.382	-0.375	-0.368	-0.455	-0.480	-4.10 Pa
R_komin	-1.482	-1.399	-1.303	-1.213	-1.127	-1.047	-0.971	-0.900	-1.045	0.808	-9.68 Pa
R_wylot											-3.779 Pa
R_wiatr											-29.768 Pa
R_sam											0.00 Pa
<b>SUMA:</b>	<b>-14.609</b>	<b>-2.287</b>	<b>-2.170</b>	<b>-2.059</b>	<b>-1.955</b>	<b>-1.858</b>	<b>-1.767</b>	<b>-1.682</b>	<b>-2.010</b>	<b>-0.212</b>	<b>-33.547</b>

Obliczeniowy wymagany przyrost ciśnienia

Wymagana siła ciągu wentylatorów strumieniowych

**-64.15 Pa**

**3704.28 N**

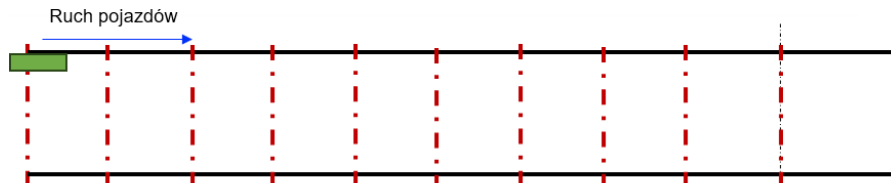
Liczba wentylatorów

Liczba wentylatorów	0	2	2	0	2	0	2	2	2	0	<b>12 szt.</b>
Zmierzona siła ciągu [N]	0.0	430.0	430.0	0.0	430.0	0.0	430.0	430.0	430.0	0.0	
Prędkość powietrza na wylocie [m/s]	0.0	36.0	36.0	0.0	36.0	0.0	36.0	36.0	36.0	0.0	
Efektywność instalacji [%]	0.00	0.85	0.85	0.00	0.85	0.00	0.85	0.85	0.85	0.00	
Kierownice powietrza [%]	0.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	
Zainstalowana siła ciągu [N]	0	603	618	0	647	0	673	684	695	0	<b>3 921.01 N</b>
Przyrost ciśnienia przez wentylatory	0.00	10.44	10.71	0.00	11.21	0.00	11.65	11.85	12.04	0.00	<b>67.91 Pa</b>

**3 921.01 N**

**67.91 Pa**

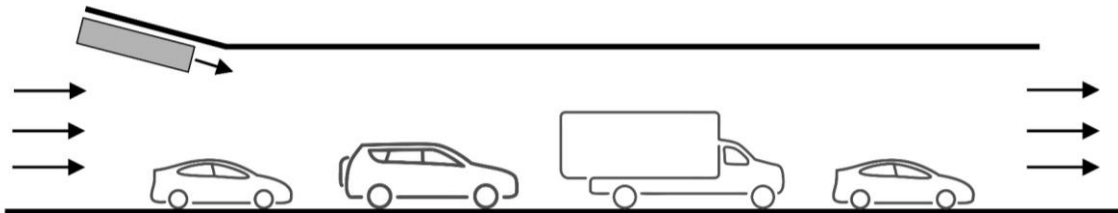
# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji



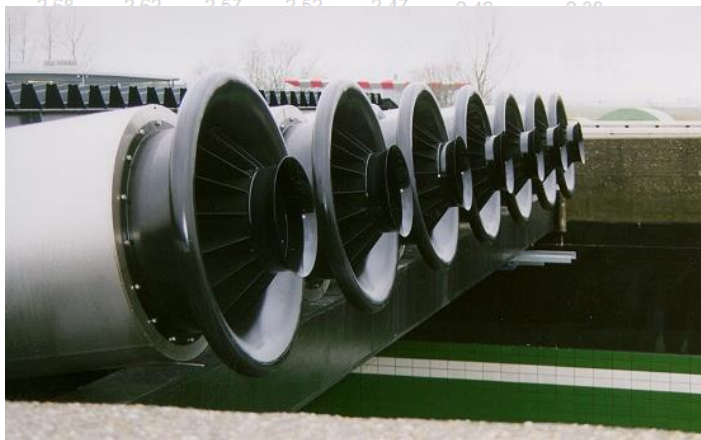
Sekcja tunelu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Wylot z tunelu	
Długość sekcji	30	30	30	30	30	30	30	30	37.61	40.39		
Sumaryczna długość	0	30	60	90	120	150	180	210	240	278	318	
Pole przekroju sekcji	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74		
Temperatura powietrza [°C]	147.84	136.68	124.57	113.71	103.99	95.27	87.45	80.45	74.18	67.67	61.19	
Gęstość powietrza [kg/m <sup>3</sup> ]	0.832	0.85	0.88	0.90	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05	
Prędkość powietrza [m/s]	3.00	2.92	2.83	2.75	2.68	2.62	2.57	2.52	2.47	2.42	2.38	
SUMA												
R_wlot	-1.277											-1.277 Pa
R_ścian	-0.396	-0.385	-0.374	-0.364	-0.355	-0.346	-0.339	-0.332	-0.409	-0.431		-3.732 Pa
R_pożar	-9.793											-9.793 Pa
R_konst	-0.352	-0.343	-0.332	-0.323	-0.315	-0.308	-0.301	-0.296	-0.364	-0.384		-3.318 Pa
R_komin	-1.606	-1.511	-1.402	-1.298	-1.201	-1.109	-1.022	-0.942	-1.087	0.835		-10.342 Pa
R_wylot												-3.020 Pa
R_wiatr												-29.768 Pa
R_sam												0.000 Pa
<b>SUMA:</b>	<b>-13.423</b>	<b>-2.239</b>	<b>-2.108</b>	<b>-1.985</b>	<b>-1.870</b>	<b>-1.763</b>	<b>-1.663</b>	<b>-1.570</b>	<b>-1.860</b>	<b>0.020</b>	<b>-32.787</b>	<b>-61.249 Pa</b>
Obliczeniowy wymagany przyrost ciśnienia												
Wymagana siła ciągu wentylatorów strumieniowych <b>3 536.529 N</b>												
Liczba wentylatorów	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
Zmierzona siła ciągu [N]	764.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Prędkość powietrza na wylotcie [m/s]	40.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0		
Efektywność instalacji [%]	0.90	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Kierownice powietrza [%]	7.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		
Zainstalowana siła ciągu [N]	3914	0	0	0	0	0	0	0	0	0		3 914.16 N
Przyrost ciśnienia przez wentylatory	67.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00		67.79 Pa

# Obliczenia sprawdzające – weryfikacja koncepcji

Ruch pojazdów



Pole przekroju sekcji	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74	57.74
Prędkość	0.71	103.99	95.27	87.45	80.45	74.18	67.67	61.19		
Przyrost ciśnienia przez wentylatory	0.90	0.93	0.95	0.97	0.99	1.01	1.03	1.05		
Prędkość	0.75	2.68	2.62	2.57	2.52	2.47	2.42	2.38		



0.64  
0.323  
0.298  
0.985

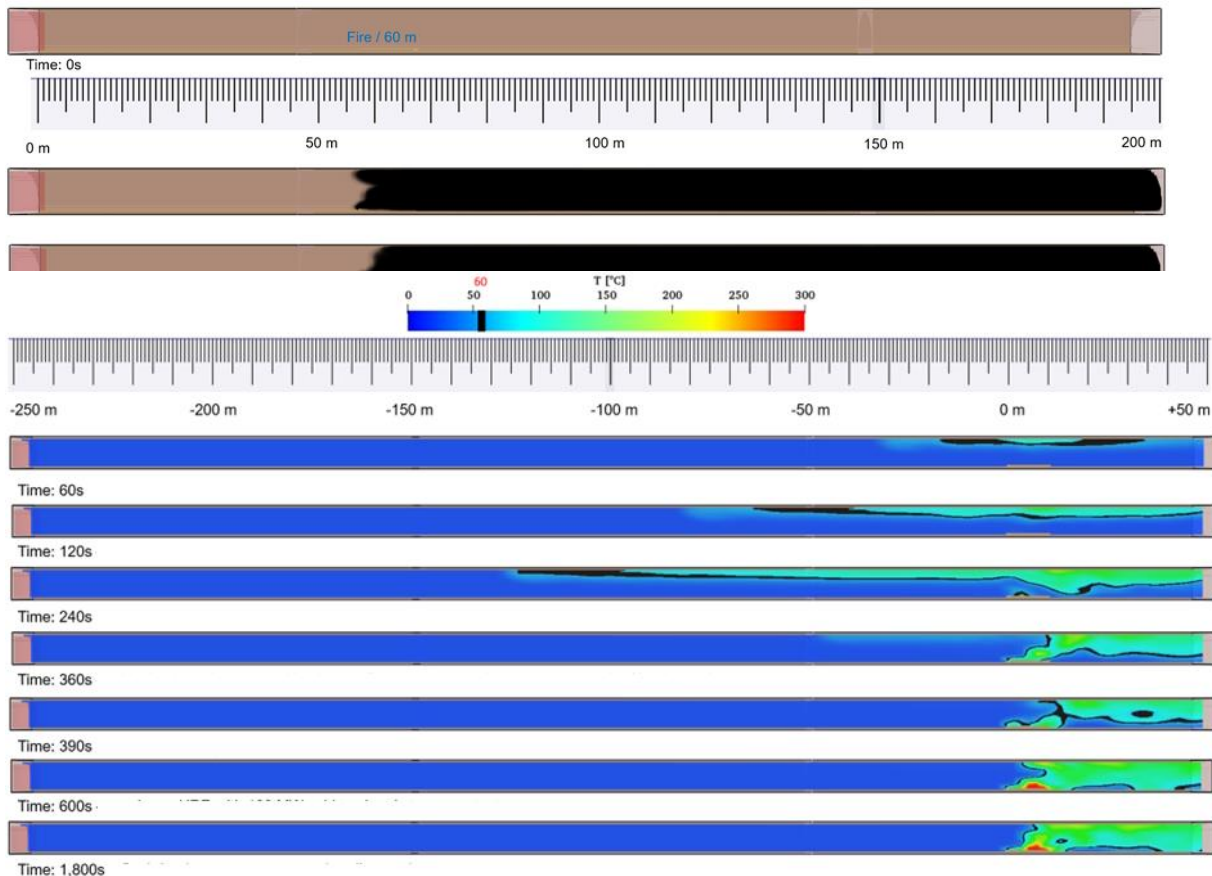
Prędkość

0.00  
0.00  
0.00  
0.00  
0.00  
0.00  
0.00

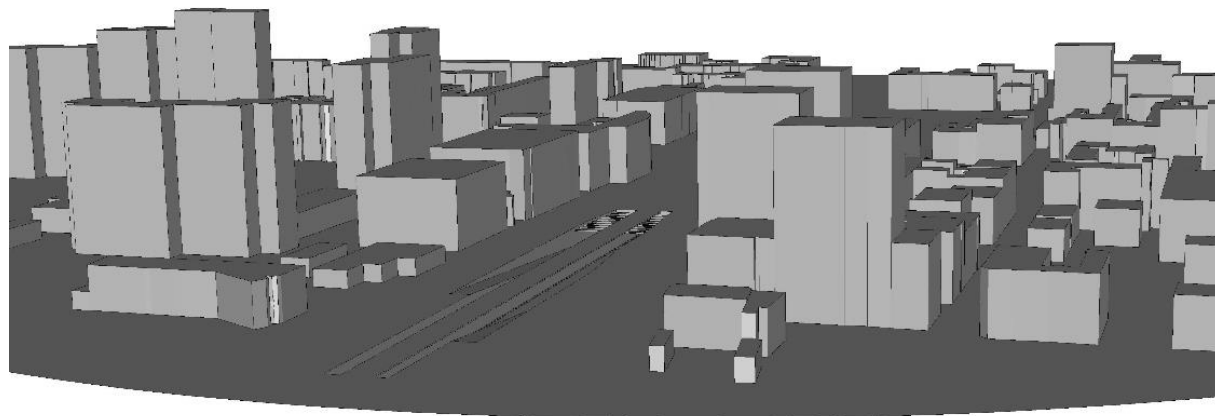
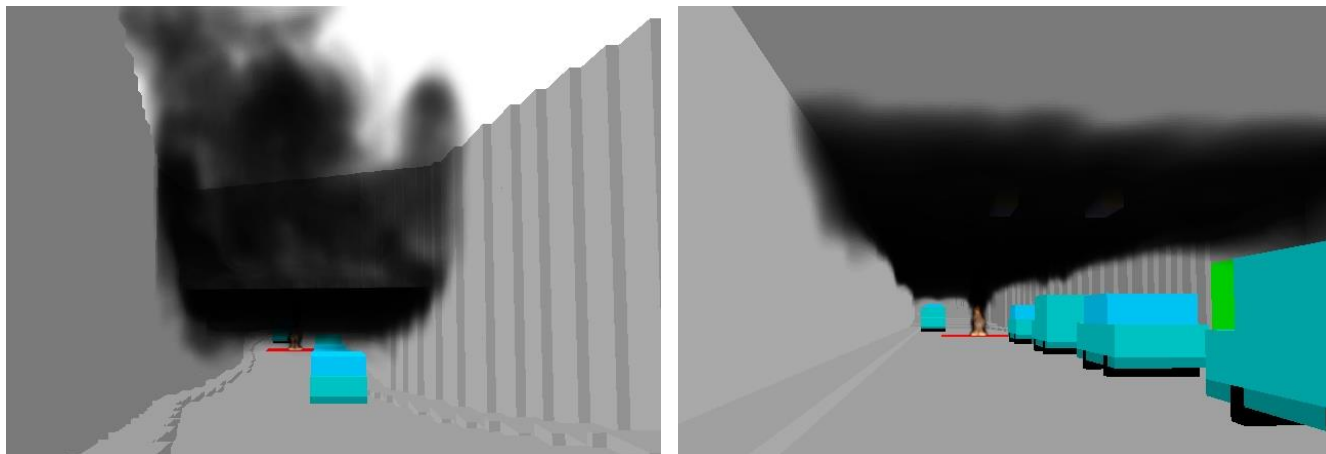
Przyrost ciśnienia przez wentylatory 0.719 0.60 0.60 0.60

3 914.16 N  
67.79 Pa

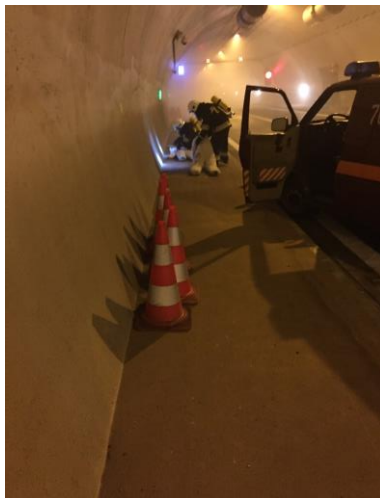
# Symulacje CFD jako weryfikacja koncepcji wentylacji tunelu



# Symulacje CFD jako weryfikacja koncepcji wentylacji tunelu



# Próby z gorącym dymem



# Pożar wszystko zweryfikuje



18.05.2011 r., Warszawa

Źródło: warszawa.wyborcza.pl



26.05.2013 r., Warszawa

Źródło: warszawa.wyborcza.pl

7.06.2018 r., Warszawa



Źródło: warszawa.wyborcza.pl



# Pożar wszystko zweryfikuje

12.08.2019 r., Gdańsk



Źródło: [www.dziennikbałtycki.pl](http://www.dziennikbałtycki.pl)



Źródło: [www.dziennikbałtycki.pl](http://www.dziennikbałtycki.pl)

# **Dziękujemy za uwagę i zapraszamy do współpracy**

**mgr inż. Ewa Sztarbała  
dr inż. Grzegorz Sztarbała**

**e-mail: [ardor@ardor.waw.pl](mailto:ardor@ardor.waw.pl)**