



Naturalne przepływy powietrza w tunelu drogowym

Natural airflows in a road tunnel



Dr hab. inż. Aleksander Król, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0003-4152-8859](https://orcid.org/0000-0003-4152-8859)
Wydział Transportu i Inżynierii
Lotniczej
Politechnika Śląska



Dr hab. inż. Małgorzata Król, prof. PŚ

ORCID ID: [0000-0003-0645-4815](https://orcid.org/0000-0003-0645-4815)
Wydział Inżynierii Środowiska
i Energetyki
Politechnika Śląska
malgorzata.król@polsl.pl

Słowa kluczowe: tunel drogowy, pomiary prędkości przepływu, analizy CFD, przepływy naturalne

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów przepływu powietrza w skali rzeczywistej, przeprowadzonych w tunelu drogowym, który znajduje się w Gdańsku, pod jednym z ramion Wisły. Całkowita długość tunelu wynosi 1378 m, a jego środkowa część znajduje się najniżej. Nachylenie jezdni wynosi 3% i 4% w obu kierunkach od najniższego punktu. Badania obejmowały pomiary przepływu powietrza w 56 oddzielnych punktach pomiarowych i pozwoliły na określenie ciągu naturalnego. W artykule omówiono również teoretyczne metody określania ciągu naturalnego w tunelach. Zaprezentowano także wzór analityczny służący do obliczania średniej prędkości przepływu powietrza w tunelach, generowanej przez efekt tłoka. Istniejące zależności zostały przeanalizowane i zmodyfikowane w celu lepszego uwzględnienia efektu tłoka pojazdów poruszających się w kolumnie, co pozwala powiązać prędkość przepływu powietrza nie tylko ze średnią prędkością pojazdów, ale także z natężeniem ruchu i jego strukturą. Podejście to zostało zweryfikowane przy użyciu danych zarejestrowanych przez czujniki w tunelu w Gdańsku.

Keywords: road tunnel, flow velocity measurements, CFD analysis, natural flows

Abstract

This article presents the results of full-scale airflow measurements carried out in a road tunnel located in Gdańsk, beneath one of the branches of the Vistula River. The total length of the tunnel is 1.378 m, and its central section is at the lowest level. The road gradient is 3% and 4% in both directions from the lowest point. The study involved airflow measurements at 56 separate measurement points and enabled the determination of natural draught. The article also discusses theoretical methods for determining natural draught in tunnels. An analytical formula for calculating the average airflow velocity in tunnels generated by the piston effect is also presented. Existing relationships were analysed and modified to better account for the piston effect of vehicles moving in a convoy, which allows the airflow velocity to be linked not only to the average vehicle speed, but also to traffic volume and its structure. This approach was verified using data recorded by sensors in the Gdańsk tunnel.

Wstęp

Tunele drogowe są nieodłączną częścią nowoczesnych sieci transportowych. Znajdują się one w obszarach górskich, aby umożliwić przejazd przez góry, na terenach zabudowanych oraz w centrach miast, aby odciążyć ruch miejski. Tunele drogowe wyposażone są w wiele systemów technicznych, wśród których jednym z najważniejszych jest system wentylacyjny. Jego zadaniem jest zapewnienie odpowiednich warunków w tunelu pod względem jakości powietrza i przejrzystości w czasie codziennej eksploatacji, a także odprowadzenia dymu w przypadku pożaru. Ponadto system musi zapewniać odpowiednie warunki do ewakuacji ludzi z tunelu, a także dla działania służb ratowniczych podczas pożaru. System wentylacji w tunelu może być zaprojektowany na różne sposoby, w zależności od długości tunelu, tego, czy w tunelu panuje

ruch jednokierunkowy czy dwukierunkowy oraz w zależności od przewidywanej intensywności i struktury ruchu. Najprostszym i najczęściej stosowanym rozwiązaniem są systemy wentylacji wzdłużnej, w których wentylatory strumieniowe są montowane pojedynczo lub w grupach pod sklepieniem tunelu. W przypadku dłuższych tuneli, projektowany powinien być system wentylacji półprzecnej, w którym działanie wentylatorów strumieniowych jest wspomagane przez boczne otwory nawiewne.

Oprócz systemów wentylacji mechanicznej, na przepływy powietrza w tunelu mają wpływ warunki zewnętrzne. Biorąc pod uwagę zmiany przepływu powietrza, stwierdza się, że kluczową rolę odgrywa wiatr (Król i in., 2017a). Drugim ważnym aspektem jest nachylenie tunelu, które może prowadzić do wystąpienia efektu kominowego, a w konsekwencji do naturalnego przepływu powietrza w tunelu (Sulc i in., 2016; Li i in., 2017; Król & Król,

2017b). Naturalny przepływ powietrza w tunelu może być również spowodowany nasłonecznieniem jednego z portali. Odnosi się to głównie do tuneli pozamiejskich. Wymienione powyżej dwa zjawiska prowadzą do powstania naturalnego ciśnienia generującego przepływ powietrza nazywanego ciągiem naturalnym.

Kolejnym zjawiskiem powodującym przepływ powietrza w tunelu, poza działaniem wentylatorów, jest zjawisko tłoka. Polega ono na tym, że ruch samochodów powoduje przemieszczanie się mas powietrza w tym samym kierunku co jadące samochody (Król i in., 2022). Efekt tłoka ma bardzo duże znaczenie dla przepływu powietrza w tunelach kolejowych lub tunelach metra, gdzie stosunek przekroju wagonu do przekroju tunelu jest wysoki. Poruszający się pociąg wypycha ogromne masy powietrza i rzeczywiście działa jak tłok. W przypadku tuneli drogowych efekt ten nie jest tak duży, ale jednak znaczący i przy analizie niewymuszonych przepływów powietrza, powinien być brany pod uwagę.

Prędkość powietrza rejestrowana przez czujniki zainstalowane w tunelach jest wynikiem działania wszystkich tych zjawisk oraz systemu wentylacji. Analizując przepływy powietrza w tunelach ważne jest rozróżnienie wpływu poszczególnych zjawisk na ostateczną prędkość przepływu powietrza. Równocześnie wskazuje się, że naturalny przepływ powietrza determinuje początkowy kierunek przepływu dymu w przypadku wybuchu pożaru w tunelu (Zhong i in., 2016).

W artykule przedstawiono charakterystykę zjawisk powodujących niewymuszone przepływy powietrza w tunelu. Opisano badania i analizy numeryczne pozwalające na określenie wielkości przepływu generowanego przez poszczególne zjawiska oraz zaproponowano model matematyczny działania efektu tłoka dla przepływu powietrza w tunelu.

Badania w tunelu pod Martwą Wisłą

Tunel położony jest w Gdańsku pod jedną z odnóg Wiśły (Rysunek 1). Całkowita długość tunelu wynosi 1378 m i obejmuje dwie nawy dla ruchu w obu kierunkach. Wysokość każdej z naw wynosi 7,03 m, a szerokość 10,09 m. Tunel biegnie z południowego wschodu (SE) na północny zachód (NW). Tunel jest obustronnie nachylony a jego najniższa część znajduje się mniej więcej w środku tunelu. Nachylenie z kierunku NW wynosi 4%, a z kierunku SE 3%. Nachylenie poprzeczne jezdni wynosi 2,5%. Nawy tunelu są połączone co 170 m wyjściami ewakuacyjnymi. Tunel jest wyposażony w system wentylacji wzdłużnej obsługiwany przez 11 wentylatorów osiowych w każdym tunelu oraz system nawiewu poprzecznego obejmujący 22 otwory nawiewne w każdej nawie i cztery wentylatory nawiewne umieszczone w pobliżu każdego z portali.

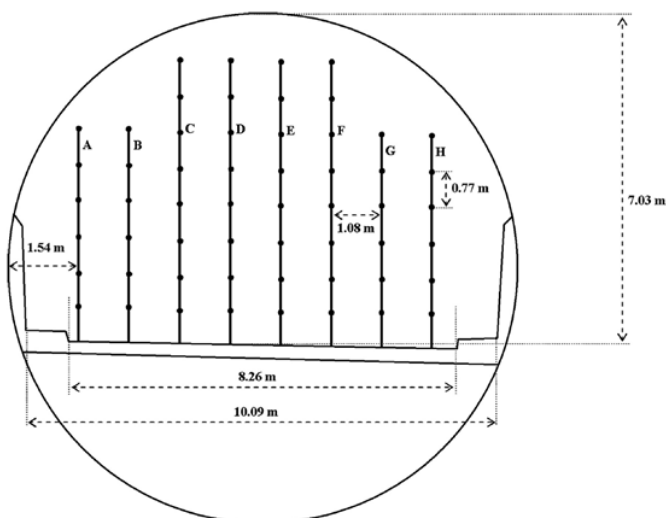
Celem badań było określenie profilu prędkości w poprzecznym przekroju tunelu (Król i in., 2018). W niniejszym artykule przedstawiono tylko wyniki obejmujące badania przy niepracującej instalacji wentylacyjnej tak, aby możliwe było określenie wielkości naturalnego przepływu powietrza. Do pomiarów prędkości powietrza wykorzystano dwa statywy pomiarowe. Ich wysokość wynosiła odpowiednio 6,1 m i 4,5 m (Rysunek 2). Na wyższym statywie zamontowano osiem anemometrów (firmy Sensor),



Rysunek 1. Lokalizacja tunelu pod Martwą Wisłą. Źródło: <https://www.openstreetmap.org>
Figure 1. Location of the tunnel beneath the Martwa Wisła. Source: <https://www.openstreetmap.org>



Rysunek 2. Statywy pomiarowe umieszczone w tunelu. Źródło: opracowanie własne
Figure 2. Stand poles positioned within the tunnel's measurement section. Source: authors' own study



Rysunek 3. Siatka pomiarowa. Źródło: opracowanie własne
Figure 3. Measurement grid. Source: authors' own study

Tabela 1. Warunki meteorologiczne zarejestrowane o godzinie 2:30. Źródło: opracowanie własne**Table 1.** Weather conditions recorded at 2.30 am. Source: authors' own study

	Stacja meteorologiczna przy portalu NW	Stacja meteorologiczna przy portalu SE
Prędkość wiatru, m/s	2,3	3,6
Kierunek wiatru, °	267,8	284,5
Temperatura, °C	13,0	12,7
Ciśnienie, hPa	1020,7	1019,5

a na niższym – sześć. Odległość między anemometrami wynosiła 0,77 m. Statywy były przesuwane podczas pomiarów zgodnie z Rysunek 3. Prędkość powietrza rejestrowano po ustabilizowaniu się przepływu (kilka minut po każdym przesunięciu statywów). Umożliwiło to uzyskanie 56 punktów pomiarowych w badanym przekroju. Przekrój pomiarowy był usytuowany w odległości 520 m od portalu północno-zachodniego (NW).

Jedna z serii pomiarowych obejmowała pomiary prędkości przepływu powietrza przy niepracujących wentylatorach, pozwoliło to na zmierzenie ciągu naturalnego.

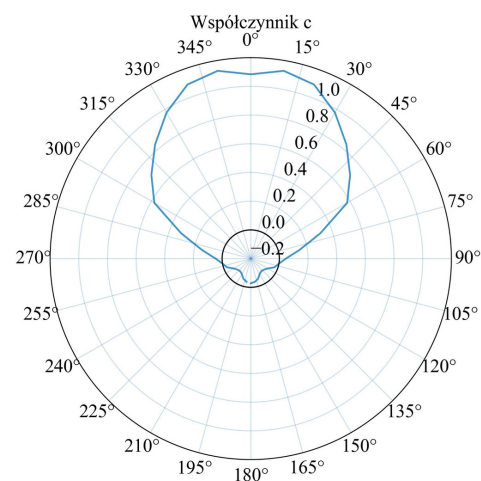
Równocześnie z pomiarami przepływu powietrza prowadzono pomiary warunków meteorologicznych. Na zewnątrz tunelu zlokalizowane były dwie stacjonarne stacje meteorologiczne firmy Lufft UMB Sensor. Pierwsza stacja znajdowała się w odległości 206 m od portalu południowo-wschodniego. Czujniki temperatury i ciśnienia znajdowały się na wysokości 2,5 m. Czujnik wiatru znajdował się na wysokości 7,0 m. Druga stacja znajdowała się w odległości 397 m od portalu północno-zachodniego. Czujniki temperatury i ciśnienia znajdowały się na tej samej wysokości jak przypadku pierwszej stacji, natomiast czujnik wiatru umieszczono na wysokości 11,0 m. Rozmieszczenie czujników wiatru pozwalało na wiarygodne pomiary prędkości i kierunku wiatru na zewnątrz tunelu.

Pomiar trwał około 15 minut, czas ten obejmował również zmiany położenia statywów. Każdy punkt pomiarowy składał się z sześciu pojedynczych pomiarów trwających 30 sekund, których wyniki uśredniono w czasie 3 minut. Wartości średnie i odchylenia standardowe stanowiły wyniki końcowe.

Badania wymagały całkowitego zamknięcia tunelu, dlatego były prowadzone w nocy. Pomiary, przy wyłączonych wentylatorach, rozpoczęły się o godzinie 2:40. Warunki meteorologiczne były monitorowane przez cały czas trwania badań. Poniżej przedstawiono parametry zarejestrowane o godzinie 2:30.

Identyfikacja ciągu naturalnego

Ciąg naturalny powstaje w wyniku działania wiatru i efektu kominowego. Wiatr napierający na portal nawietrzny powoduje powstanie nadciśnienia, a na portalu zawietrznym powstaje podciśnienie. Różnica ciśnienia na obu portalach jest przyczyną wzdłużnego przepływu powietrza. Wartość ciśnienia (p_{wiatr}) generowanego przez

**Rysunek 4.** Zależność współczynnika c od kąta napływu wiatru. Źródło: opracowanie własne**Figure 4.** Relationship between the coefficient c and the wind angle. Source: authors' own study

wiatr o prędkości v_{wiatr} może być opisana wzorem (1).

$$p_{\text{wiatr}} = c \frac{\rho v_{\text{wiatr}}^2}{2} \quad (1)$$

Współczynnik c silnie zależy od kierunku wiatru i ukształtowania otoczenia portalu. Jego dokładne określenie dla pełnej róży wiatrów wymaga z reguły przeprowadzenia serii symulacji numerycznych. Symulacje dla tunelu pod Martwą Wisłą przeprowadzono przy użyciu pakietu ANSYS Fluent, modelując wiernie portale tunelu wraz z otoczeniem w promieniu 100 m. W wyniku tych symulacji ustalono, że wartość podciśnienia na portalu zawietrznym jest co najmniej o rząd wielkości mniejsza od nadciśnienia na portalu nawietrznym i może być pominięta w rozważaniach. Otrzymaną zależność współczynnika c od kąta napływu wiatru na portal pokazano na Rysunku 4 (Król i in., 2022).

Efekt kominowy pojawia się w nachylonych tunelach, gdy ściany tunelu mają inną temperaturę niż otoczenie. Napływające do tunelu zewnętrzne powietrze ogrzewa się, jego gęstość zmniejsza się i jest wypierane ku górze. Wielkość efektu kominowego można liczbowo wyrazić jako różnicę ciśnienia pomiędzy portalami tunelu, powodującą wzdłużny ruch powietrza. Wartość tego ciśnienia może być określona z równania wyrażającego pracę wytworzoną w całym cyklu na jednostkę masy (2) (Budryk, 1961).

$$H_t = - \oint \frac{dp}{\rho} \quad (2)$$

W praktyce obliczenia byłyby łatwiejsze, gdyby używane wielkości były mierzalne w sposób bezpośredni. Zatem zamiast gęstości powietrza należy uwzględnić jego temperaturę, co można osiągnąć stosując zależność dla gazu idealnego (3).

$$\rho = \frac{\mu p}{kT} \quad (3)$$

Teraz równanie (2) może być przedstawione w postaci zależnej tylko od ciśnienia i temperatury, które mogą być łatwo zmierzone (4).

$$H_t = -\frac{k}{\mu} \oint T \frac{dp}{p} \quad (4)$$

Po przeprowadzeniu całkowania przez części, wprowadzeniu ciśnienia odniesienia p_o ($p = p_o + \Delta p$, $\Delta p \ll p_o$) oraz przyjęciu przybliżenia $\ln(1+x) \approx x$ dla $x \ll 1$ otrzymano ostatecznie (5).

$$H_t \approx -\frac{k}{\mu p_o} \oint p dT \quad (5)$$

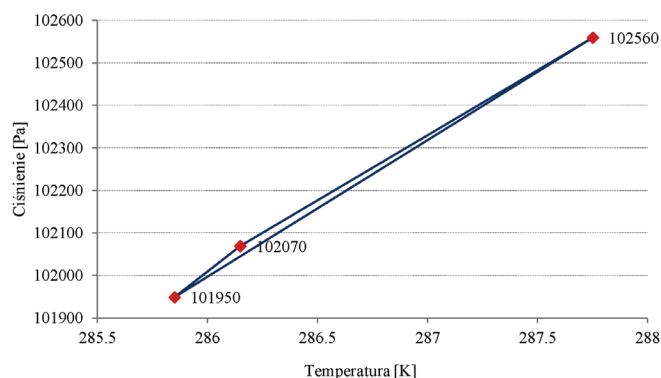
Podczas pomiarów ciągu naturalnego zmierzono wartości temperatury i ciśnienia powietrza w trzech punktach tunelu: na obu portalach i w miejscu położonym najniżej (M0) (Tabela 2).

Wartości te przedstawiono również na Rysunku 5. Pole powierzchni wykreślonego trójkąta jest równe wartości całki z równania (5). Jak widać, trójkąt jest wąski i bardzo skośny. W takiej sytuacji nawet niewielkie przesunięcie dowolnego z wierzchołków trójkąta może spowodować znaczną zmianę jego pola powierzchni. To właśnie dlatego ciąg naturalny jest bardzo wrażliwy na niewielkie zmiany warunków otoczenia.

Zakładając, że I_{pT} oznacza wartość tej całki, wyrażoną w jednostkach Pa·K. Opisany cykl przebiega między temperaturą ściany tunelu (źródło ciepła) a temperaturą otoczenia (chłodnica). Jeśli oznaczy się tą różnicę temperatur jako ΔT , wówczas iloraz $I_{pT}/\Delta T$ można uznać za uśrednioną wartość naturalnego ciśnienia termicznego, będące źródłem efektu kominowego (równanie 6).

$$p_t = \frac{I_{pT}}{\Delta T} \quad (6)$$

Dla danych z Tabeli 2 (i Rysunku 5) otrzymano wartości $I_{pT} = 22,5$ Pa·K, $\Delta T = 1,9$ K, co odpowiada ciśnieniu $p_t = 11,08$ Pa oraz pracy technicznej właściwej $H_t = 6,33$ J/kg. Największa wartość prędkości powietrza na stronie nawietrznej (portal NW) była równa 2,3 m/s, więc wartość ciśnienia dynamicznego wiatru, zgodnie z równaniem (1) i przy odpowiednio dobranej wartości współczynnika c (Rysunek 4), została określona jako 3,22 Pa, stąd całkowite ciśnienie generujące naturalny przepływ wynosi 14,30 Pa. Ta wartość może zostać użyta do oszacowania średniej prędkości powietrza w tunelu wynikającej z ciągu naturalnego. Wykorzystać tutaj należy klasyczny wzór Darcy-Weisbacha, który określa straty ci-



Rysunek 5. Diagram dla zmierzonych wartości ciśnienia i temperatury. Źródło: opracowanie własne

Figure 5. A graph showing the measured pressure and temperature values. Source: authors' own study

śnienia przy przepływie płynu przez przewód rurowy (7).

$$\Delta P_{D-w} = \lambda \frac{\rho L v_a^2}{2 D_h} \quad (7)$$

gdzie:

- λ – współczynnik oporu hydraulicznego, –
- L – długość tunelu, m,
- D_h – średnica hydrauliczna, m,
- v_a – prędkość powietrza, m/s.

Dla typowego tunelu drogowego wartość współczynnika została wyznaczona jako 0,039 i uwzględnia również opory generowane przez elementy infrastruktury (Król i in., 2018). Podstawiając pozostałe dane charakteryzujące badany tunel otrzymano wartość 1,82 m/s, która jest o 21% większa od wartości zmierzonych. Taka zgodność może być uznana za akceptowalną, biorąc pod uwagę względną prostotę modelu i pominięcie wielu czynników, które mogą mieć wpływ na rozważane zjawisko.

Dla głębszego zbadania tego zagadnienia przeprowadzono szereg symulacji numerycznych przy użyciu pakietu FDS. Dla uproszczenia założono prostokątny przekrój tunelu o wymiarach 10×6 m, a długość tunelu wynosi 400 m. Siatka numeryczna zawierała 768000 komórek wymiarach 0,25×0,25×0,50 m, co typową gęstością dla obliczeń w tunelach. Siatkę podzielono na 4 podsiatki w celu zrównoleglenia obliczeń. Zbadano 6 przypadków różniących się wzdłużnym nachyleniem oraz różnicą temperatury pomiędzy ścianami tunelu i otaczającym powietrzem

Tabela 2. Zmierzone wartości ciśnienia i temperatury. Źródło: opracowanie własne

Table 2. Measured pressure and temperature values. Source: authors' own study

Punkt	Położenie	Wysokość, m	Temperatura, °C	Ciśnienie, hPa
1	Portal NW	– 4	13,0	1020,7
2	M0	– 35	14,6	1025,2
3	Portal SE	0	12,7	1019,5

Tabela 3. Zbadane przypadki. Źródło: opracowanie własne

Table 3. Cases investigated. Source: authors' own study

Przypadek	Nachylenie, %	Różnica temperatury, °C	Prędkość powietrza, m/s	Ciśnienie p_o , Pa
1	2.5	5	0,78	0,39
2	2.5	10	1,10	0,79
3	5.0	5	1,15	0,86
4	5.0	10	1,57	1,62
5	0.0	10	0,00	0,00
6	5.0	0	0,00	0,00

Wynikiem każdej symulacji była średnia prędkość powietrza w przekroju tunelu. Podsumowanie wyników symulacji pokazano w Tabeli 3.

Przypadki 5 i 6 są przypadkami kontrolnymi dla sprawdzenia słuszności założeń modelu. Ich wyniki pokazują jednoznacznie, że bez różnicy temperatury pomiędzy powietrzem zewnętrznym a ścianami tunelu oraz bez nachylenia wzdłużnego tunelu efekt kominowy nie występuje.

Model teoretyczny przepływów generowanych przez efekt tłoka

Przepływ powietrza, wywołany ruchem pojazdów w tunelu, jest często pomijany w analizach przepływów powietrza czy pracy instalacji wentylacyjnej. Tymczasem zjawisko to ma duże znaczenie dla rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń komunikacyjnych w tunelu, czy dla efektywności wentylacji.

Opracowany model opiera się na analizie równowagi między siłami generowanymi przez poruszające się pojazdy a oporami przepływu powietrza w tunelu. Przyjęto uproszczony, jednowymiarowy opis przepływu (model 1D) oraz stan ustalony.

Podstawowym źródłem ruchu powietrza jest różnica ciśnienia powstająca przed poruszającym się pojazdem. Różnica ta zależy od prędkości pojazdu względem powietrza w tunelu i opisana jest równaniem (8) (Liang i in., 2021; Tong i in., 2014).

$$\Delta P_V = \frac{1}{2} c_x \rho (v_v - v_a)^2 \quad (8)$$

gdzie:

- c_x – współczynnik oporu aerodynamicznego pojazdu, –
- ρ – gęstość powietrza, kg/m³,
- v_v – prędkość pojazdu, m/s,
- v_a – prędkość powietrza, m/s.

W przypadku wielu pojazdów poruszających się jednocześnie przez tunel, całkowity pęd przekazywany powietrzu w jednostce czasu zależy od liczby pojazdów oraz ich parametrów geometrycznych (9).

$$\Delta p_{veh} = \frac{1}{2} n A_v c_x \rho (v_v - v_a)^2 \Delta t \quad (9)$$

gdzie:

- n – oznacza liczbę pojazdów w tunelu,
- A_v – pole przekroju poprzecznego, m².

Przepływ powietrza generowany ruchem samochodów w tunelu napotyka opory wynikające z tarcia o ściany oraz elementy infrastruktury. Opory te można wyrazić jako ciśnienie korzystając ponownie ze wzoru Darcy-Weisbacha. Można powiedzieć, że opór powstający wskutek tarcia powoduje „odbieranie” pędu z przepływającego powietrza (10).

$$\Delta p_{air} = \lambda \frac{\rho L v_a^2}{2 D_h} A_t \Delta t \quad (10)$$

gdzie:

- A_t – pole przekroju tunelu, m².

W stanie ustalonym pęd przekazywany przez pojazdy jest równoważony przez straty wynikające z oporów przepływu powietrza (11).

$$\frac{1}{2} n A_v c_x \rho (v_v - v_a)^2 = \lambda \frac{\rho L v_a^2}{2 D_h} A_t \quad (11)$$

Jest to podstawowe równanie modelu, z którego możliwe jest wyznaczenie prędkości powietrza w tunelu. Można je rozwiązać analitycznie w następujący sposób (odrzucono ujemne pierwiastki) (12).

$$v_a = \frac{v_v}{\sqrt{B+1}} \quad (12)$$

gdzie parametr zawiera stałe współczynniki oraz zmienną, która oznacza liczbę pojazdów w tunelu (13).

$$B = \frac{1}{n} \frac{\lambda L A_t}{D_h A_v c_x} \quad (13)$$

W rzeczywistości liczba pojazdów w tunelu nie jest bezpośrednio znana, dlatego wyraża się ją przez natężenie ruchu TI (14).

$$n = \frac{TI}{3600} \cdot \frac{L}{v_v} \quad (14)$$

Po podstawieniu uzyskuje się końcową postać parametru (15).

$$B(TI, v_v) = \frac{3600}{TI} \cdot \frac{\lambda A_t v_v}{D_h A_v c_x} \quad (15)$$

Ostateczny wzór pozwalający obliczyć prędkość powietrza wywołaną ruchem pojazdów ma postać (16).

$$v_a(TI, v_v) = \frac{v_v}{\sqrt{B(TI, v_v)+1}} \quad (16)$$

W praktyce wzór ten został dodatkowo zmodyfikowany przez uwzględnienie współczynnika zwiększającego opór aerodynamiczny w tunelu oraz korektę uwzględniającą jazdę pojazdów w kolumnach (efekt śladu aerodynamicznego).

Ponieważ ruch drogowy składa się z różnych typów pojazdów, w modelu stosuje się wartości efektywne:

- średnią prędkość (17)

$$v_v = \frac{TI_{RL} v_{RL} + TI_{LL} v_{LL}}{TI_{RL} + TI_{LL}} \quad (17)$$

- efektywne pole przekroju (18)

$$A_v = \eta_{PC} A_{PC} + (1 - \eta_{PC}) A_{HGV} \quad (18)$$

- efektywny współczynnik oporu (19)

$$c_x = \eta_{PC} c_{x,PC} + (1 - \eta_{PC}) c_{x,HGV} \quad (19)$$

gdzie:

- η_{PC} – udział samochodów osobowych.

Opracowany model teoretyczny został następnie zwalidowany. Polegało to na porównaniu jego wyników z rzeczywistymi pomiarami prędkości powietrza w tunelu drogowym pod Martwą Wisłą. Kluczowym elementem było wykorzystanie dużego zbioru danych pomiarowych (tzw. *bulk data*) rejestrowanych przez system monitoringu tunelu.

Dane obejmowały m.in.:

- prędkość powietrza (z czujników ultradźwiękowych),
- natężenie ruchu i strukturę pojazdów,
- prędkości pojazdów (dla obu pasów),
- warunki atmosferyczne (wiatr, temperatura, ciśnienie),
- informacje o pracy systemu wentylacji.

Rejestracja odbywała się co 1 sekundę, a następnie dane zostały uśrednione (do 10 s i 5 min).

Aby walidacja była wiarygodna, konieczne było odfiltrowanie wpływu czynników innych niż efekt tłoka. W tym celu usunięto wszystkie okresy, w których działała wentylacja mechaniczna, ograniczono wpływ bardzo krót-

kotrwących zaburzeń i zastosowano uśrednianie danych w czasie.

Największym wyzwaniem było jednak uwzględnienie wpływu warunków atmosferycznych, zwłaszcza wiatru oraz różnic temperatury, które również generują przepływ powietrza w tunelu.

Ponieważ nie można było wyeliminować wpływu wiatru z danych pomiarowych, opracowano dodatkowy model numeryczny opisujący oddziaływanie wiatru na portale tunelu. Model ten wspomniano wcześniej, omawiając wpływ wiatru na przepływy w tunelach. Pozwoliło to na obliczenie różnicy ciśnienia wywołanej wiatrem dla zadanych warunków (prędkość i kierunek wiatru). Wyznaczano odpowiadającą jej składową prędkość powietrza w tunelu, a następnie odejmowano jej wartość od wartości

zmierzonych. W efekcie uzyskano skorygowane wartości prędkości powietrza, które można było traktować jako wynik działania samego efektu tłoka.

Ostatecznie dla określonego przedziału czasowego obliczano teoretyczną prędkość powietrza na podstawie modelu i porównywano ją z wartością zmierzoną (po korekcie o wiatr). Porównanie wykazało bardzo dobrą zgodność między modelem a rzeczywistością. Zaobserwowano jednak, że przy dużym natężeniu ruchu model teoretyczny gorzej odwzorowuje warunki rzeczywiste. Wynikało to z pominięcia zjawiska jazdy pojazdów w śladzie aerodynamicznym innych pojazdów (tzw. *wake effect*).

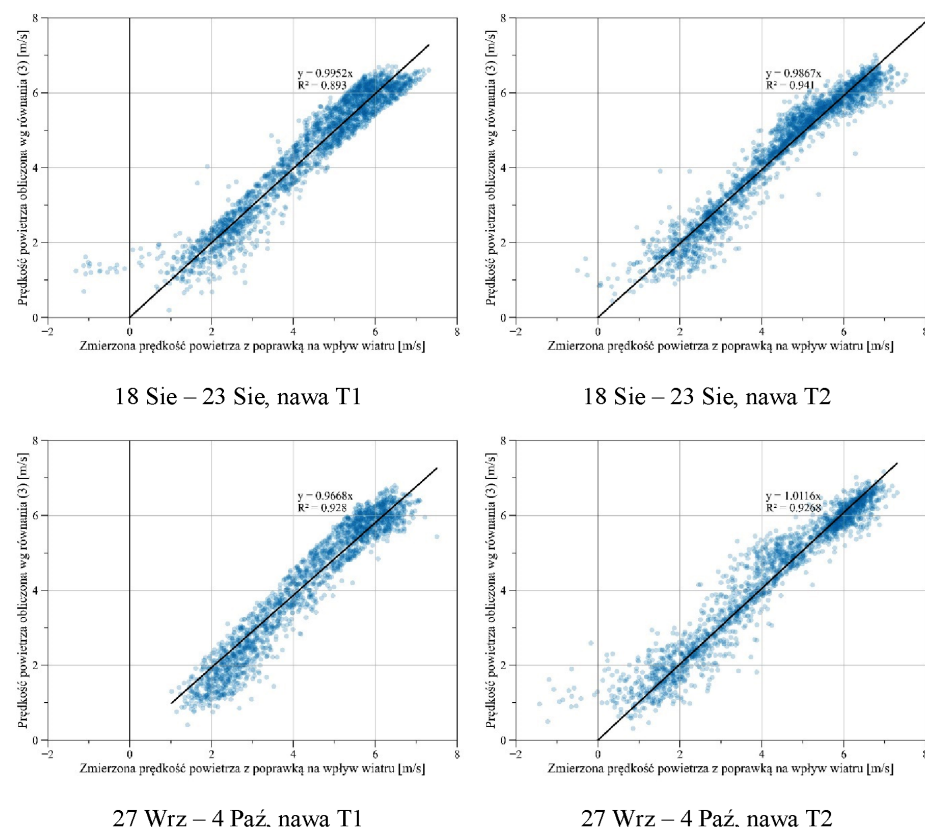
Aby uwzględnić to zjawisko w modelu teoretycznym przeprowadzono dodatkowe symulacje numeryczne dla dwóch pojazdów poruszających się jeden za drugim. Po-

zwoliło to na modyfikację współczynnika oporu aerodynamicznego dla dużych natężeń ruchu. Kolejnym krokiem było przeprowadzenie powtórnej walidacji. Po wprowadzeniu korekty zgodność modelu z danymi uległa poprawie (Rysunek 6), współczynnik osiągał wartości powyżej 0,89–0,9 dla wszystkich zbiorów danych.

Zależność opisaną równaniem (16) wraz z wspomnianymi modyfikacjami współczynnika oporu aerodynamicznego pojazdu można przedstawić graficznie na Rysunku 7.

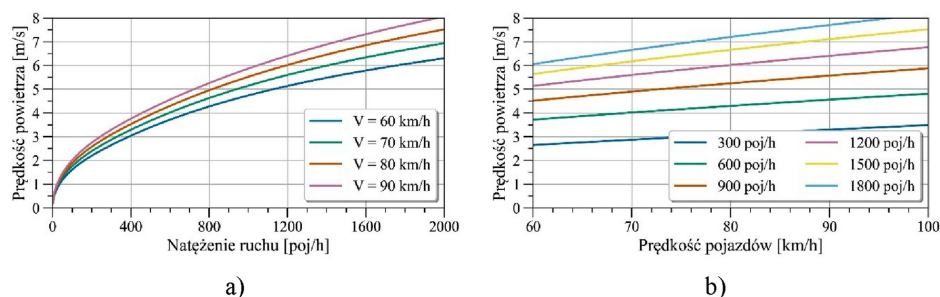
Podsumowanie

Przedstawione pomiary potwierdziły występowanie silnego ciągu naturalnego, który generowany jest przez warunki meteorologiczne (wiatr i temperaturę) oraz geometrię tunelu (głównie jego nachylenia). Podczas typowej eksploatacji tunelu należy również uwzględnić efekt tłoka powstający w wyniku ruchu pojazdów. Intensywność naturalnego ciągu jest zasadniczo zmienna, co może nieoczekiwanie wpływać na działanie systemu wentylacyjnego. Jednak ze względu na geometrię tunelu i jego otoczenie kierunek ciągu naturalnego może być często stały dla danego tunelu. W przypadku krótkiego tunelu drogowego z wentylacją naturalną naturalny ciąg jest dominującym mechanizmem determinującym przepływ powietrza. Zjawisko ciągu naturalnego powinno być uwzględnione na etapie projektowania systemu wentylacji tunelu. Powinno ono obejmować analizę typowych warunków pogodowych w pobliżu tunelu (w szczególności należy określić różę wiatrów).



Rysunek 6. Wartości rzeczywiste pochodzące z monitoringu oraz prędkości przepływu powietrza według modelu teoretycznego, w podziale na tygodnie i nawy tunelu. Źródło: opracowanie własne

Figure 6. Actual values from monitoring and airflow velocities according to the theoretical model, broken down by week and tunnel tube. Source: authors' own study



Rysunek 7. Teoretyczna zależność między natężeniem ruchu a prędkością powietrza z powodu efektu tłoka, a) zależność od natężenia ruchu, b) zależność od prędkości pojazdu. Źródło: opracowanie własne

Figure 7. The theoretical relationship between traffic volume and air velocity due to the crowding effect: a) relationship with traffic volume, b) relationship with vehicle speed. Source: authors' own study

Podziękowania

Praca była wspierana w ramach subwencji badawczej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego dla Politechniki Śląskiej w 2026 roku.

Bibliografia

- Budryk, W. (1961). Wentylacja kopalń. *Wydawnictwo Górniczo-Hutnicze*, Katowice
- Król, A., & Król, M. (2017b). Impact of the factors determining the natural stack effect on the safety conditions in a road tunnel. In *Lecture notes in networks and systems* (pp. 85–95). https://doi.org/10.1007/978-3-319-64084-6_8
- Król, A., Król, M., & Węgrzyński, W. (2022). A study on airflows induced by vehicle movement in road tunnels by the analysis of bulk data from tunnel sensors. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 132, 104888. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2022.104888>
- Król, M., Król, A., Koper, P., & Wrona, P. (2017a). Full scale measurements of the operation of fire ventilation in a road tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 70, 204–213. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2017.07.016>
- Król, M., Król, A., Koper, P., & Wrona, P. (2018). The influence of natural draught on the air flow in a tunnel with longitudinal ventilation. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 85, 140–148. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.12.008>
- Li, A., Gao, X., & Ren, T. (2017). Study on thermal pressure in a sloping underground tunnel under natural ventilation. *Energy and Buildings*, 147, 200–209. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.060>
- Liang, C., Nan, S., Shao, X., & Li, X. (2021). Calculation method for air resistance coefficient of vehicles in tunnel with different traffic conditions. *Journal of Building Engineering*, 44, 102971. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102971>
- Šulc, J., Ferkl, L., Cigler, J., Záparka, J. (2016). Model-based airflow controller design for fire ventilation in road tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 60, 121–134. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2016.08.006>
- Tong, Y., Wang, X., Zhai, J., Niu, X., & Liu, L. (2014). Theoretical predictions and field measurements for potential natural ventilation in urban vehicular tunnels with roof openings. *Building and Environment*, 82, 450–458. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.003>
- Zhong, M., Shi, C., He, L., Shi, J., Liu, C., & Tian, X. (2016). Smoke development in full-scale sloped long and large curved tunnel fires under natural ventilation. *Applied Thermal Engineering*, 108, 857–865. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.07.141>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.



POLSKIE ZRZESZENIE
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW
SANITARNYCH

Kim jesteśmy?

PZITS to ogólnopolska organizacja skupiająca ok. 3 200 techników, inżynierów i naukowców działających w obszarze inżynierii sanitarnej i środowiska. Misją PZITS jest działalność na rzecz społeczeństwa poprzez rozwój rozwiązań technicznych służących ochronie zdrowia i środowiska naturalnego. PZITS jest jedynym polskim członkiem REHVA oraz International Gas Union, co umożliwia aktywną współpracę międzynarodową.

Więcej szczegółów:

www.pzits.pl/czlonkostwo



Zostań członkiem Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych

Członkostwo w PZITS obejmuje:

Otrzymywanie:

- zaproszeń na seminaria, konferencje i szkolenia organizowane przez PZITS,
- dostępu do nagrań z wydarzeń organizowanych przez Zarząd Główny PZITS,
- zaproszeń do udziału w wycieczkach technicznych oraz spotkaniach integracyjnych,
- bieżących informacji o zmianach w przepisach i legislacji branżowej,
- informacji o ofertach pracy w branży.

Możliwość:

- Udziału w opracowywaniu przepisów oraz zgłaszania propozycji zmian w obowiązujących regulacjach,
- nawiązywania bezpośrednich kontaktów z ekspertami i przedstawicielami branży,
- uzyskiwania porad i opinii w sprawach technicznych związanych z zakresem działalności PZITS,
- współpracy i wymiany doświadczeń z organizacjami zrzeszonymi m.in. w REHVA i IGU,
- publikowania artykułów w czasopismach PZITS,
- aktywnego udziału w pracach sekcji branżowych,
- otrzymania odznaczeń honorowych PZITS.

Dostęp do:

- materiałów, poradników i wytycznych opracowywanych przez PZITS,
- działalności szkoleniowej i rozwojowej organizowanej w całej Polsce,
- stowarzyszeniowej wspólnoty i wsparcia środowiska inżynierskiego.