



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
AGH UNIVERSITY OF KRAKOW

Wentylacja tuneli drogowych - Symulacje jednowymiarowe i pomiary eksperymentalne jako narzędzie projektowe i weryfikacyjne

**Marek Borowski,
Klaudia Zwolińska-Gładys,
Zbigniew Kuczera**

Rzeszów, 21.10.2025

Wprowadzenie

Plan prezentacji

1. Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

2. Wentylacja tuneli drogowych na etapie eksploatacji: projekt, modelowanie, walidacja.

Lötschberg / Switzerland



Semmering
/ Austria



Railway Tunnel /
Norway



Raron Steg /
Lötschberg

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Zadaniem wentylacji w fazie drążenia tuneli drogowych jest:

- zapewnienie odpowiedniej wymiany powietrza,
- utrzymanie stężeń szkodliwych zanieczyszczeń na dopuszczalnym poziomie,
- odprowadzanie ciepła wydzielanego m.in. przez pracujące w tunelu maszyny i pojazdy,
- umożliwienie bezpiecznej ewakuacji pracowników z tunelu oraz sprawne ugaszenie pożaru.



Źródło: CFT Polska.

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Przy **projektowaniu wentylacji tuneli drogowych** będących w fazie drążenia należy szczegółowo przeanalizować:

- warunki geologiczne oraz technologie górnicze zastosowane podczas budowy tunelu (TBM, NATM, ADECO-RS),
- zagrożenie czynnikami naturalnymi m.in.: dopływy gazów z górotworu (CH_4 , CO_2 , H_2S), dopływy wody, dopływy ciepła, działanie czynników atmosferycznych (wiatr, temperatura), zagrożenie sejsmiczne,



Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

- zagrożenia czynnikami technologicznymi, takimi jak np.:
 - gazy odstrzałowe (CO , NO_x),
 - gazy emitowane przez silniki spalinowe maszyn i urządzeń technicznych (CO , CO_2 , NO_x)
 - zapylenie powietrza spowodowane procesami technologicznymi (urabianie i transport skały),
- zagrożenie pożarowe.

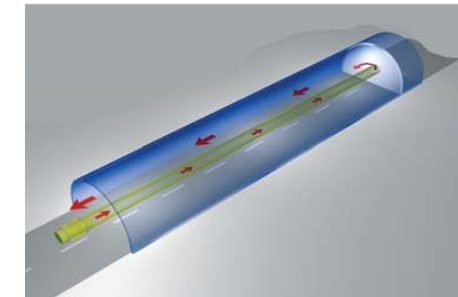


Źródło: CFT Polska.

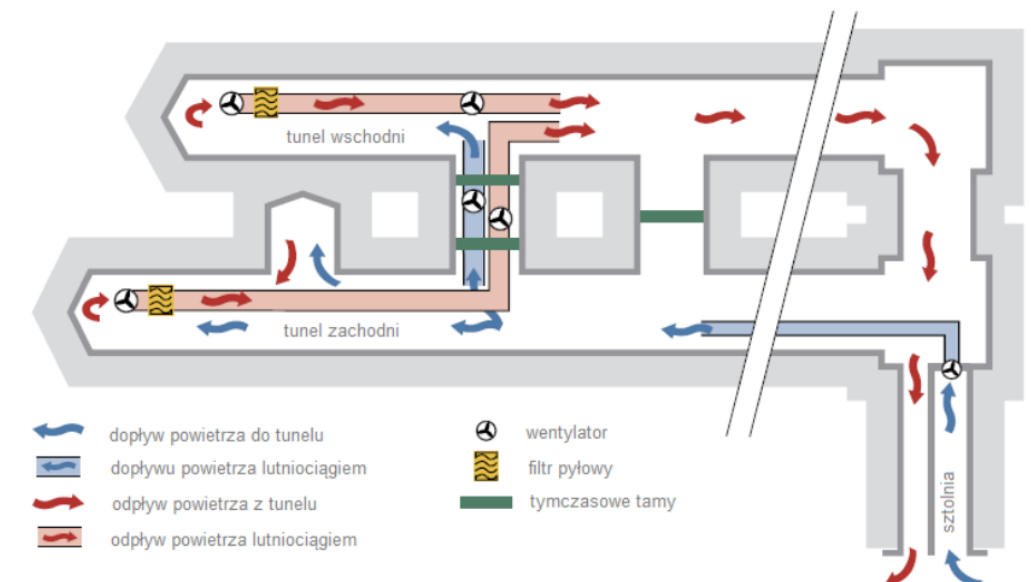
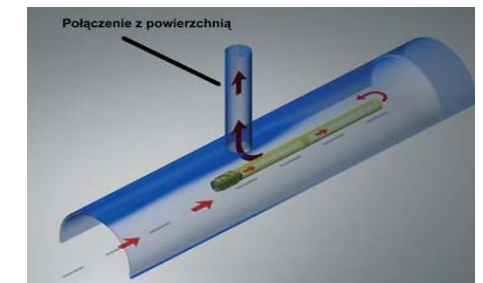
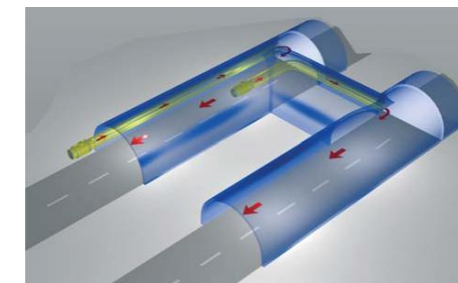
Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Przewietrzanie tuneli w fazie drążenia może być prowadzone za pomocą:

- **lutniociągów** wykonanych z lutni metalowych lub z tworzyw sztucznych:
 - ssące (powietrze zasysane z przodka),
 - tłoczące (świeże powietrze tłoczone do przodka),
 - kombinowane (np. ssące z wspierającym systemem tłoczącym lub tłoczące z systemem ssącym do odpylacza).
- **otworów wentylacyjnych** (wiertniczych wielkośrednicowych),
- **lutniociągów i tuneli równoległych.**

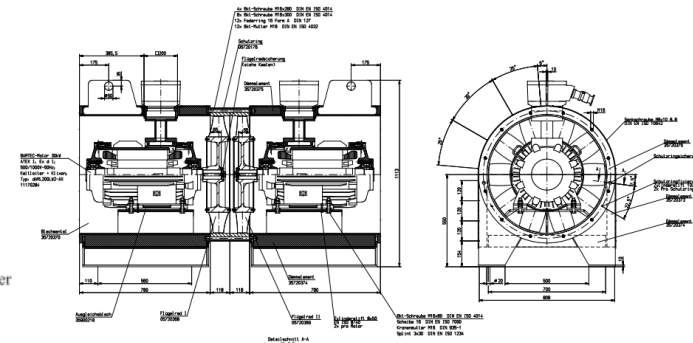
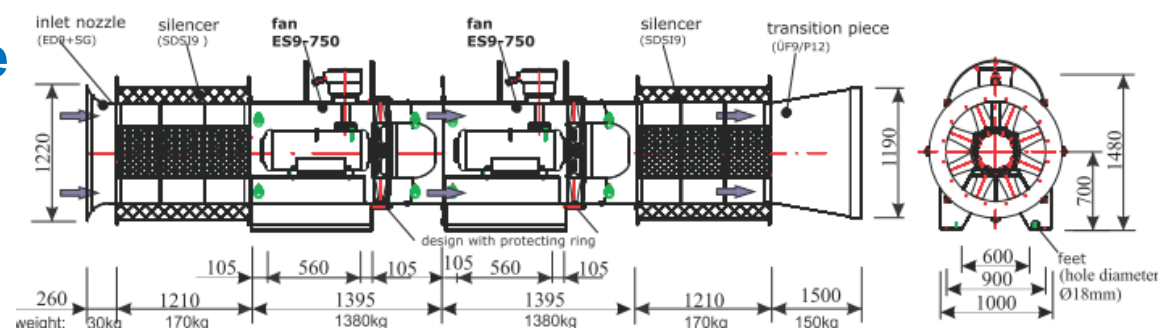
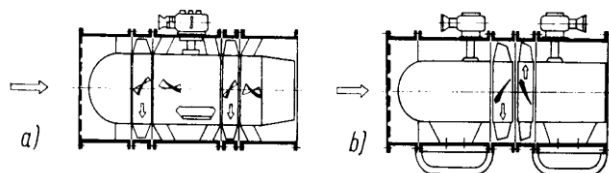


Rys.1.1. Systemy przewietrzania w fazie drążenia tuneli drogowych
Źródło: Nawrat, Napieraj 2005.



Wentylacja tuneli drogowych na etapie drażenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Możliwości projektowe



Rodzaj lutni	Średnica lutni – D, m	Fabryczny opór jednostkowy lutni r_{el} , kg/m³
lutnie elastyczne niezbrojone, przewidziane do wentylacji tłoczącej	0,4	1,000
	0,5	0,237
	0,6	0,120
	0,8	0,039
	1,0	0,020
	1,2	0,008
Lutnie elastyczne zbrojone, przewidziane do wentylacji ssącej	0,2	75
	0,3	9
	0,5	1,5
	0,8	0,6
	1,0	0,2



Podciśnienie i ciśnienie max. pracy lutni (kPa)		Klasa wykonania											
		Klasa wykonania											
Średnica lutni (mm)	A		B		C				0				
	Średnica drutu	Śłok spiral	Średnia masa 5 mb	Średnica drutu	Śłok a	Średnia masa 5 mb	Średnica drutu	Śłok spiral	Średnia masa 5 mb	Średnica drutu	Śłok spiral	Średnia masa 5 mb	
	mm	mm	kg	mm	mm	kg	mm	mm	kg	mm	mm	kg	
	Ø 200	2.0	100	4.6	2.0	75	4.7	2.0	50	5.6	2.0	150	3.7
	Ø 250	2.5	100	5.8	2.5	75	6.4	2.5	50	8.0	2.5	150	4.9
	Ø 315	3.0	100	8.8	3.0	75	10.5	3.0	50	13.8	3.0	150	7.3
	Ø 400	4.0	100	13.9	4.0	75	16.5	4.0	50	21.7	4.0	150	11.5
	Ø 500	5.0	100	21.6	5.0	75	26.6	5.0	50	35.8	5.0	150	17.2
	Ø 600	5.0	100	26.0	5.0	75	31.8	5.0	50	42.8	5.0	150	20.5
	Ø 700	6.0	100	37.8	6.0	75	47.1	6.0	50	65.2	6.0	150	28.9
	Ø 800	6.0	100	43.1	7.0	75	53.7	6.0	50	74.5	6.0	150	33
	Ø 1000	7.0	100	70.6	7.5	75	88.3	7.0	50	115	7.0	150	53.8
	Ø 1200	7.5	85	100	7.5	65	125	7.5	45	160	7.0	150	67.2
Ø 1400	7.5	85	117	7.5	65	146	7.5	45	187	7.5	150	78.4	
Temperatura pracy (°C)		-15 + 70											
Druk wg. PN-EN 10270-1, DIN 17223, PN-7118-80057													

Średnica lutni D [mm]	Ø200	Ø400	Ø500	Ø600	Ø800	Ø1000	Ø1200	Ø1400
Jednostkowy opór aerodynamiczny r_0 [kg/m8]	39,8176	1,1588	0,3269	0,0949	0,0325	0,00952	0,00457	0,00165



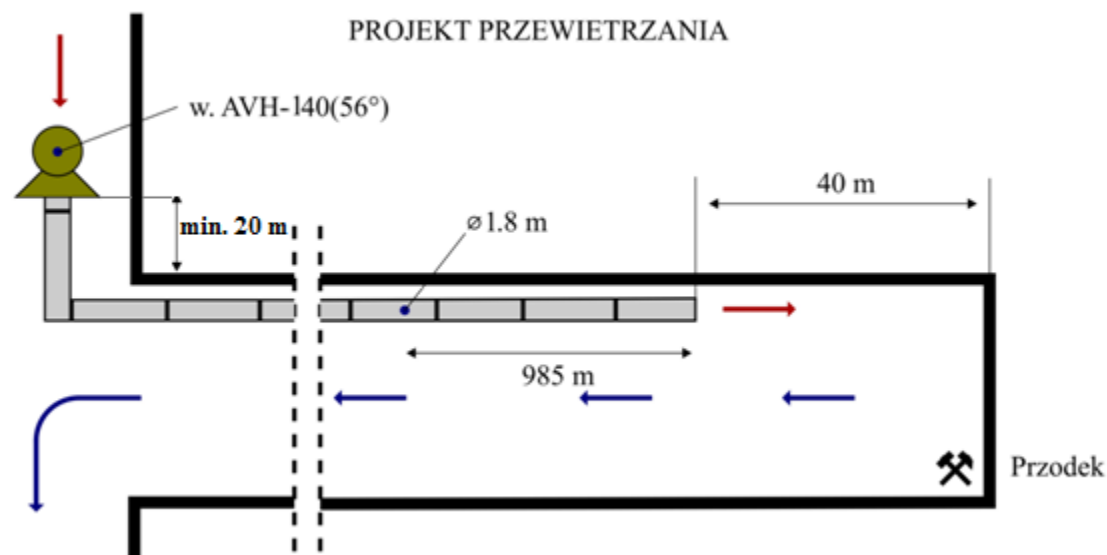
***Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt,
modelowanie, walidacja.***

Studium przypadku

- Tunel TD 2.1 i TD 2.2 Węgierska Górka

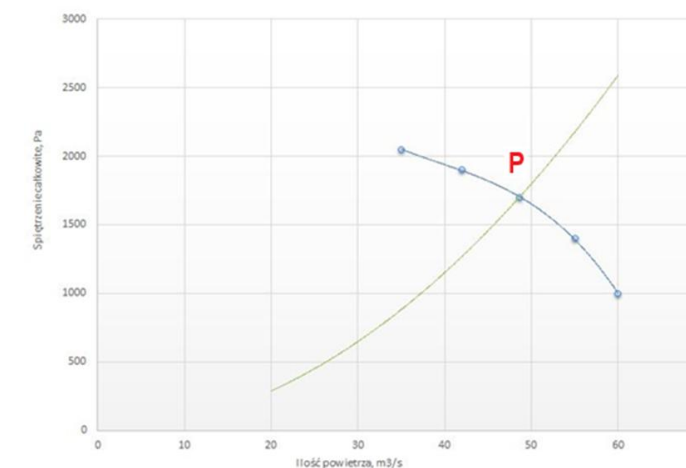
Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunel TD 2.1 i TD 2.2 Węgierska Górka



Rysunek 1.1 Projekt przewietrzania dla tunelu TD 2.1 (schemat wentylacji lutniowej, założenia i obliczenia projektowe, punkt pracy P wentylatora Atlas Copco AVH140).
Źródło: opracowanie własne.

Założenia projektowe		
Długość lutniociągu L=	985	m
Współczynnik nieszczelności lutni k=	5,00E-03	$\frac{m^3}{S\sqrt{N}}$
Opór jednostkowy lutni r=	0,000869	$\frac{Ns^2}{m^9}$
Ilość powietrza przodek Q _o =	2250	m ³ /min
Ilość powietrza przodek Q _o =	37,5	m ³ /s
WYNIKI OBLICZEŃ		
Ilość pow. went. Q _{wen} =	2913,5	m ³ /min
Ilość pow. went. Q _{wen} =	48,6	m ³ /s
Depresja went. S _{wen} =	1699	Pa
Opór lutni R _{lut} =	0,72	kg/m ⁷
Sprawność lutniociągu η=	77,23	%

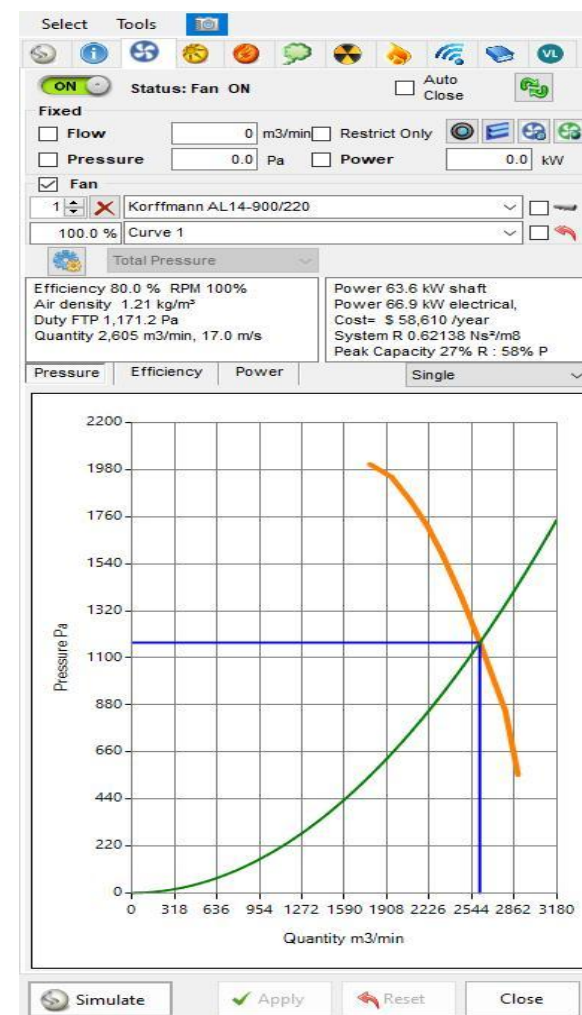


Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunel TD2.1 i TD2.2 Węgierska Górka

Założenia brzegowe do modelu numerycznego tuneli na etapie drążenia przy przewietrzaniu wentylacją lutniową tłoczącą (program Ventsim):

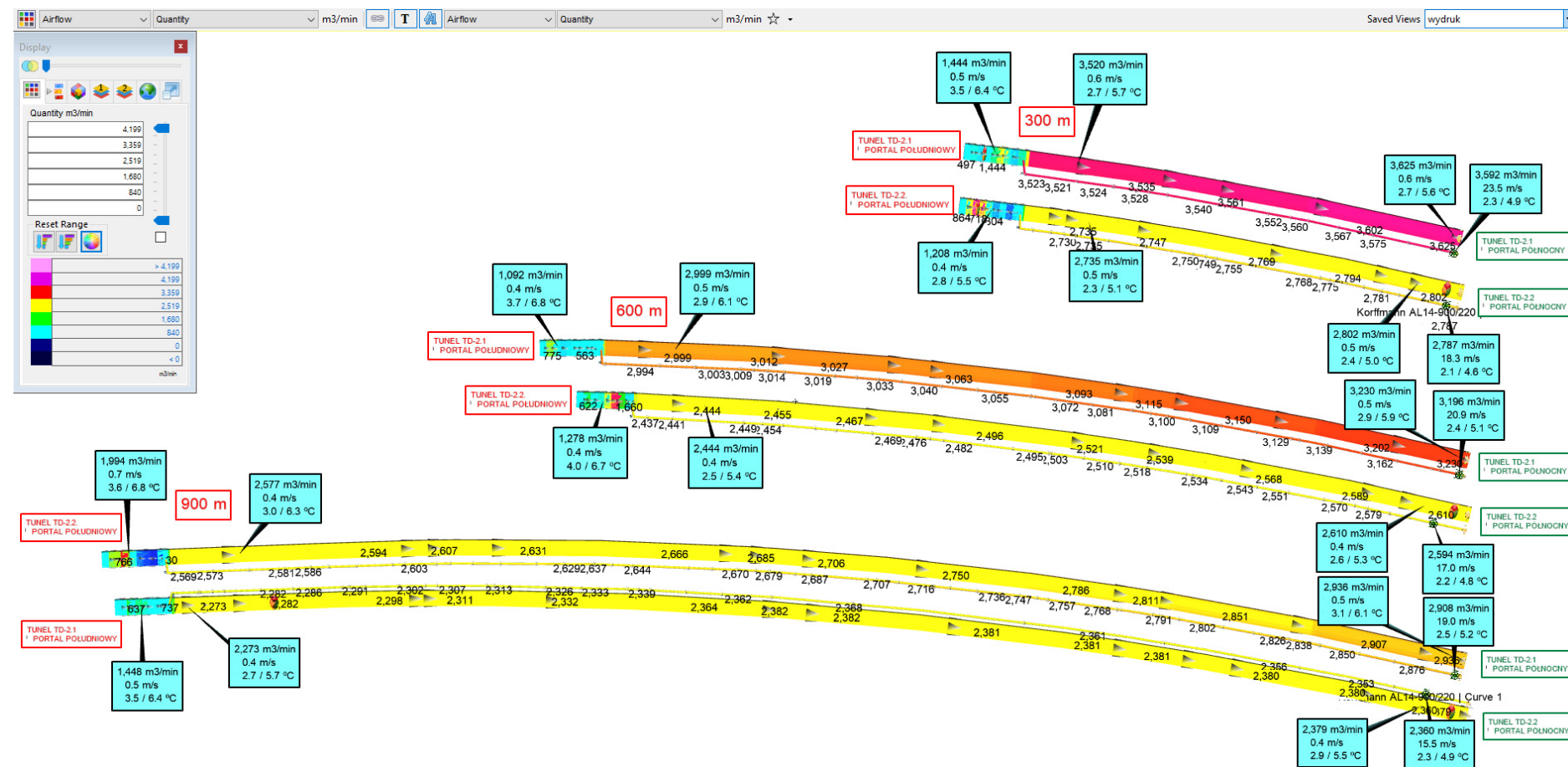
- przekrój poprzeczny tunelu: 100m²
- temperatura pierwotna górotworu zgodna z lokalnymi warunkami czyli ok. 6°C.
- budowa geologiczna: łupki z gliną
- czas przewietrzania - średni dla tunelu 1/2 roku
- praca ładowarki w przodku (190 kW silnik diesla – praca ciągła)
- szczelność lutniociągu: dobra (dla tunelu TD-2.1 wprowadzono charakterystykę wentylatora Atlas Copco AVH140, dla tunelu TD-2.2 wentylatora Korfmann AI-14 900/220 rys. 1.2).



Rysunek 1.2 Parametry wentylatora lutniowego Korfmann AI-14 900/220 w programie Ventsim.
Źródło: opracowanie własne.

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunel TD2.1 i TD2.2 Węgierska Górka



Rysunek 1.3 Symulacja rozkładu strumienia objętościowego powietrza w [m³/min] dla trzech wybiegów drążonych tuneli TD2.1 i TD2.2: 300m, 600m, 900m oraz średniorocznych parametrów termodynamicznych powietrza atmosferycznego. Źródło: opracowanie własne.

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drażenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunele drogowe Węgierska Górka



Rysunek 1.4 Pomiary wentylacyjne w drażonych tunelach drogowych w Węgierskiej Górcie (anemometr Benetech GT8907 oraz μ As4, mierniki gazów MX6, barometr elektroniczny μ Bar, psychrometr Assmanna). Źródło: Mirbud, opracowanie własne.

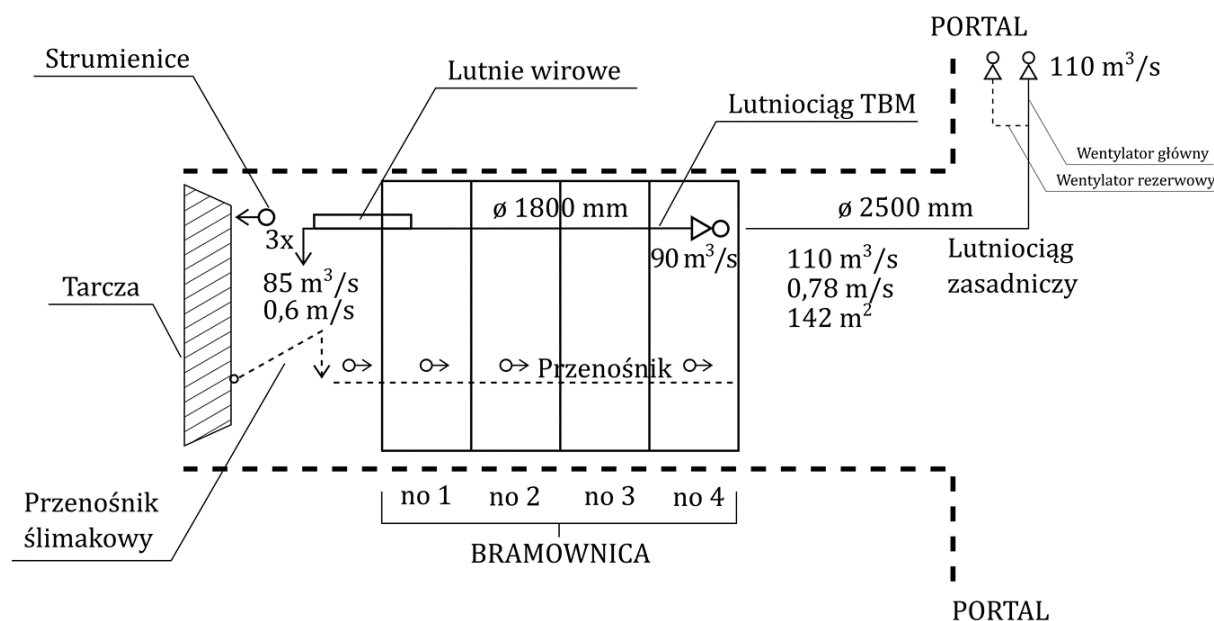
***Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt,
modelowanie, walidacja.***

Studium przypadku

- Tunel drogowy T1 S-19 Babica

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunel drogowy T1 S-19 Babica



Projekt wentylacji lutniowej Tunel S-19 Babica

- Kategoria zagrożeń naturalnych:
kategoria zagrożenia metanowego: metanowe,
stopień niebezpieczeństwa wybuchu metanu: a / b / c
- Prognostyczna metanowość bezwzględna wyrobiska: 10 [m³CH₄/min].
- Krytyczny czas potencjalnej przerwy w przewietrzaniu: 2 godziny.
- Temperatura pierwotna skał: 15 [°C].
- Docelowa długość wyrobiska: 2200 [m].
- Powierzchnia przekroju poprzecznego w świetle obudowy: 142.0 [m²].
- Sposób drążenia wyrobiska: Maszyna TBM.
- Maksymalny ładunek odpalanego materiału wybuchowego: nie dotyczy [kg].
- Wypożyczenie przodka w urządzeniu do schładzania powietrza, zwalczania zapylenia i hałasu:
chłodnica powietrza: brak,
odpylacz: brak,
tłumiki hałasu: tak.
- Rodzaj wentylacji lutniowej oraz rodzaj i średnicę lutni, długości lutniociągu:
rodzaj wentylacji lutniowej: tłocząca,
rodzaj lutni: tłoczne elastyczne,
średnica: 2500; [mm],
długość lutniociągu: 2205; [m].
- Typ i parametry punktu pracy wentylatora, wydajność i napięcie (minimalne):
Typ: Wentylator ~~Zitropo~~,
Parametry punktu pracy wentylatora:
wydajność: 110 [m³/s],
wydajność: 6600 [m³/min],
napięcie: 2500 [Pa],
- Sprawność lutniociągu: 83 [%]
- Ilość powietrza:
a. Niezbędna ilość powietrza w przodku wyrobiska ze względu na:

prędkość powietrza (0,3 m/s):	zawartość metanu (max. 0,5%):
42,6 [m³/s]	33,3 [m³/s]
2556 [m³/min]	2000 [m³/min]

- Sposób zawieszenia lutniociągów wraz z wentylatorami do obudowy wyrobisk:
- lutniociąg zawieszony na obudowie tunelu o średnicy 2500mm oraz o średnicy 1800 mm umieszczony na konstrukcji TBM,
- wentylator zewnętrzny posadowiony na konstrukcji przed wlotem do portalu tunelu w odległości 50m. .

Rysunek 1.5 Projekt przewietrzania dla tunelu S-19 Babica
(schemat wentylacji lutniowej, projekt wentylacji lutniowej).
Źródło: opracowanie własne.

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunel drogowy T1 S-19 Babica

Parametry brzegowe wentylacji lutniowej modelu numerycznego tunelu S-19 w programie VentSim:

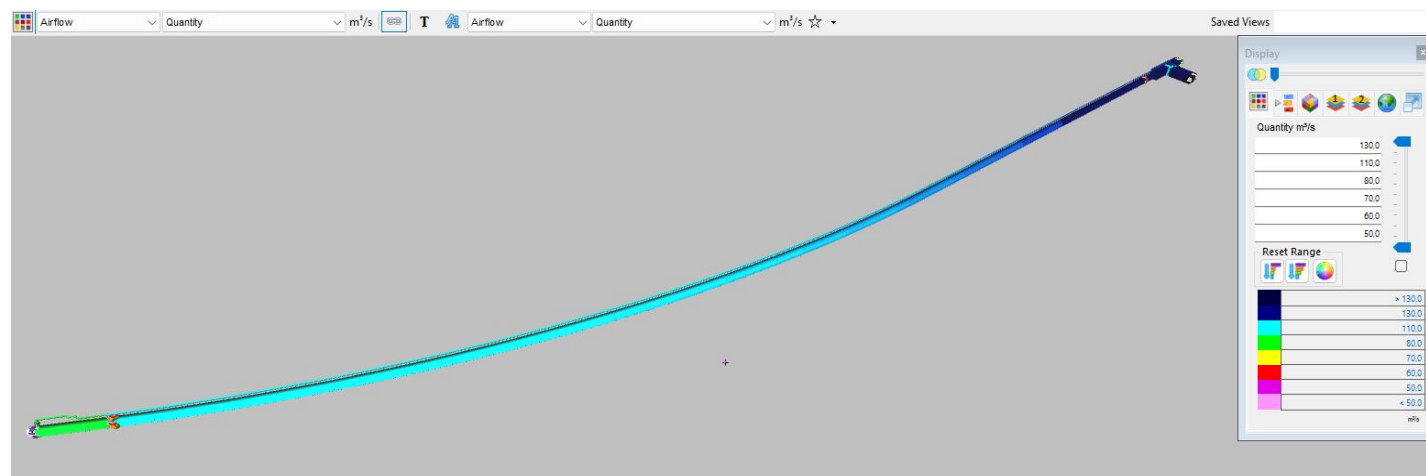
- obliczenia prowadzono dla pojedynczego tunelu drążonego TBM o długości 2200 m.

- model składa się z bocznic (odcinków tunelu oraz lutniociągu pomiędzy węzłami - punktami) o wymiarach poprzecznych i oporach jednostkowych odpowiednich dla projektowanego tunelu w fazie drążenia oraz lutniociągu tłocznego podzielonego na segmenty o średnicy 2500 mm (2130 m) – wentylacja główna i 1800 mm (85 m) - wentylacja maszyny TBM.

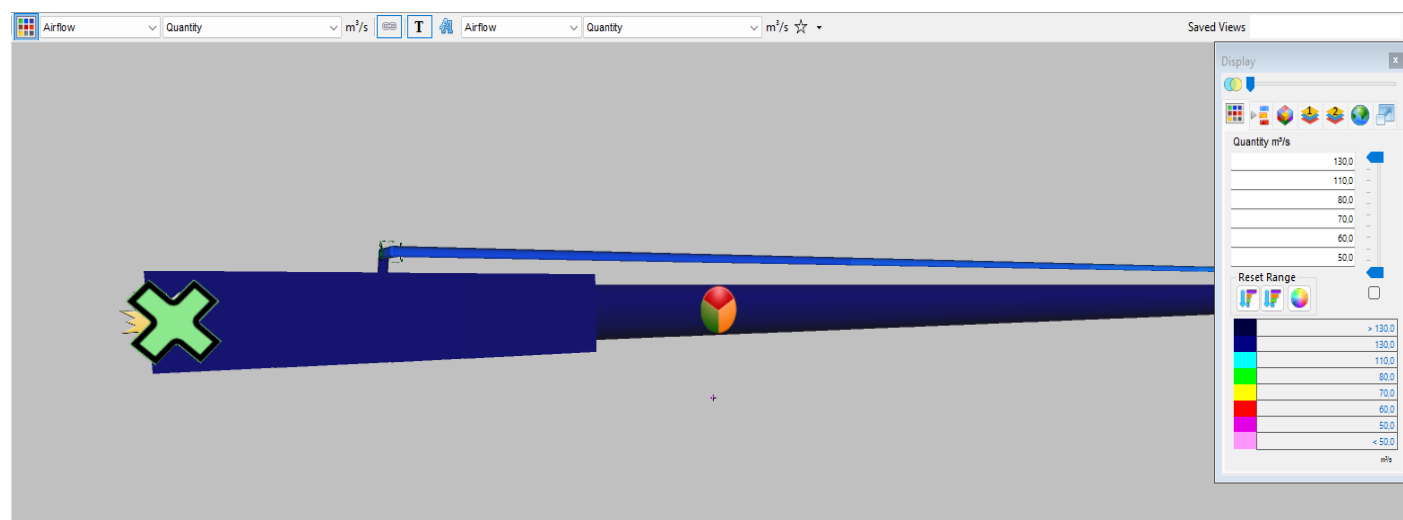
- wylot lutniociągu nie powinien być w większej odległości od tarczy maszyny TBM niż 20 m (rys. 1.6),

- w odległości 50 m od wlotu do portalu tunelu podłączony został główny wentylator osiowy o mocy 2 x 450 kW firmy Zitron (rys. 1.7), w celu zapewnienia braku recyrkulacji powietrza usuwanego z tunelu.

- zabudowano również drugi wentylator pomocniczy (ATEX) o mocy 250 kW firmy Korfmann na potrzeby przewietrzania maszyny TBM, który będzie pobierał powietrze z kasety w bramownicy (gantry) nr 4 i doprowadzał je do tarczy. W maszynie zabudowany zostanie lutniociąg o średnicy Ø1800 mm.



Rysunek 1.6 Widok modelu tunelu i lutniociągu tłoczącego. Źródło: opracowanie własne.



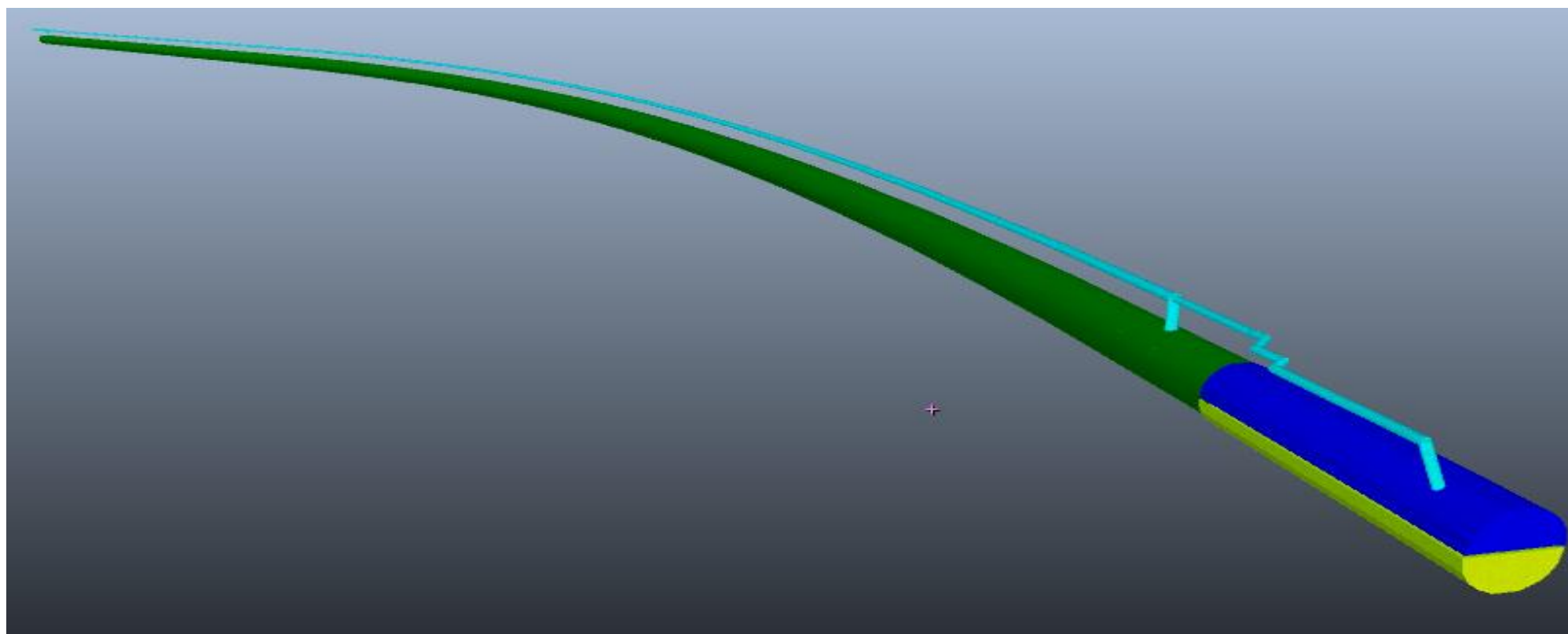
Rysunek.1.7 Lokalizacja wentylatora wraz z jego charakterystyką przed wlotem tunelu

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunel drogowy T1 S-19 Babica

Parametry brzegowe modelu numerycznego tunelu S-19 w programie Ventsim:

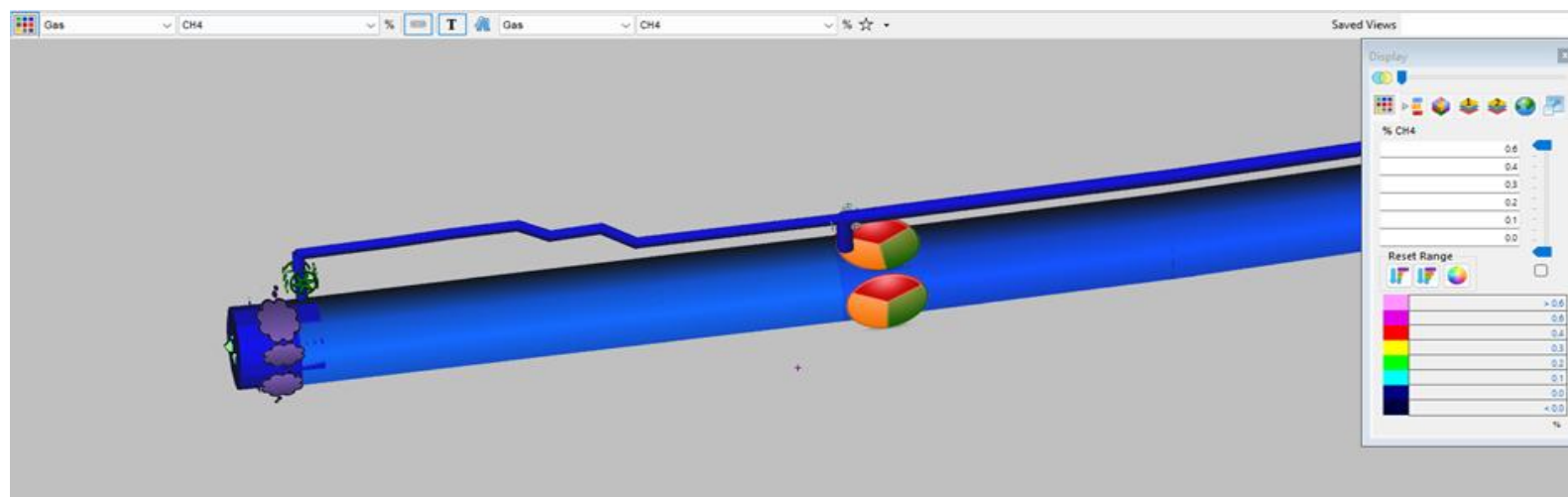
-część przodkowa przy tarczy maszyny TBM, dla lepszego zobrazowania wyników została podzielona na warstwę przystropową oraz przyspągową (rys. 1.8).



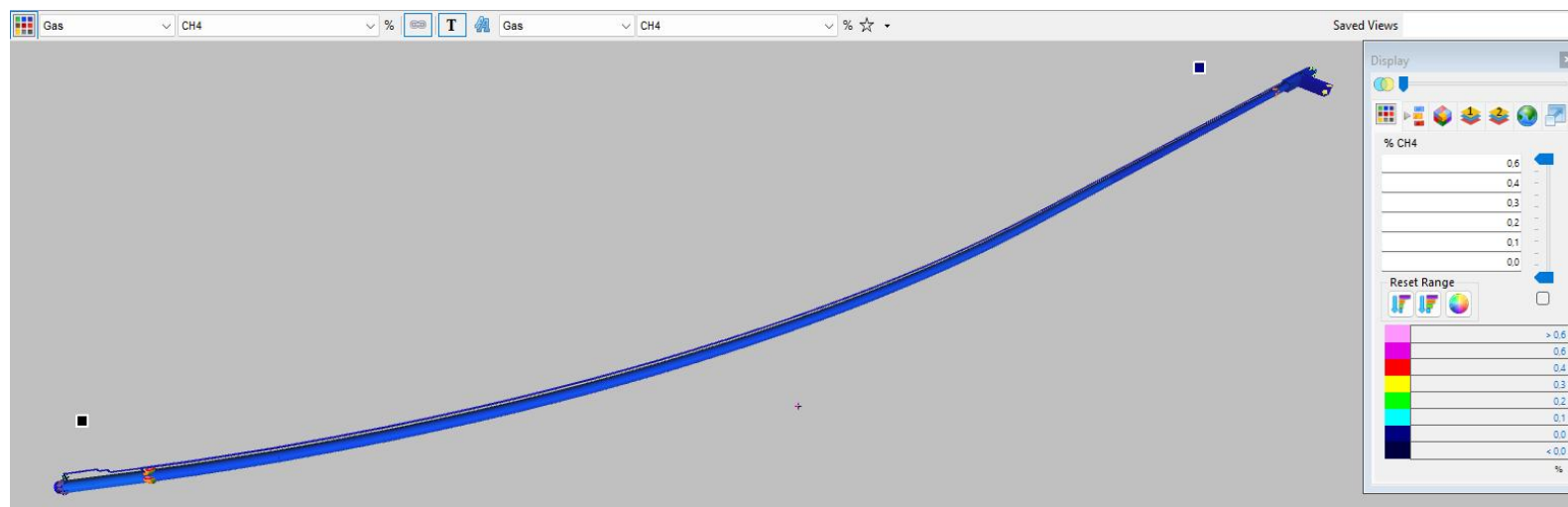
Rysunek 1.8 Model tunelu (kolor: jasno niebieski - lutniociąg, zielony - tunel, niebieski - część przystropowa przodka, żółty - część przyspągowa przodka). Źródło: opracowanie własne.

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunel drogowy T1 S-19 Babica



Rysunek 1.9 Procentowy rozkład stężenia metanu w części przodkowej maszyny TBM oraz na całej długości tunelu.
Źródło: opracowanie własne.



Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

Studium przypadku Tunel drogowy T1 S-19 Babica



Rysunek 1.10 Pomiary wentylacyjne w drążonym maszyną TBM tunelu S-19 Babica (anemometr Benetech GT8907 oraz μ As4, mierniki gazów MX6, barometr elektroniczny μ Bar, psychrometr Assmanna). Źródło: GDDKIA.

Wentylacja tuneli drogowych na etapie drążenia: projekt, modelowanie, walidacja.

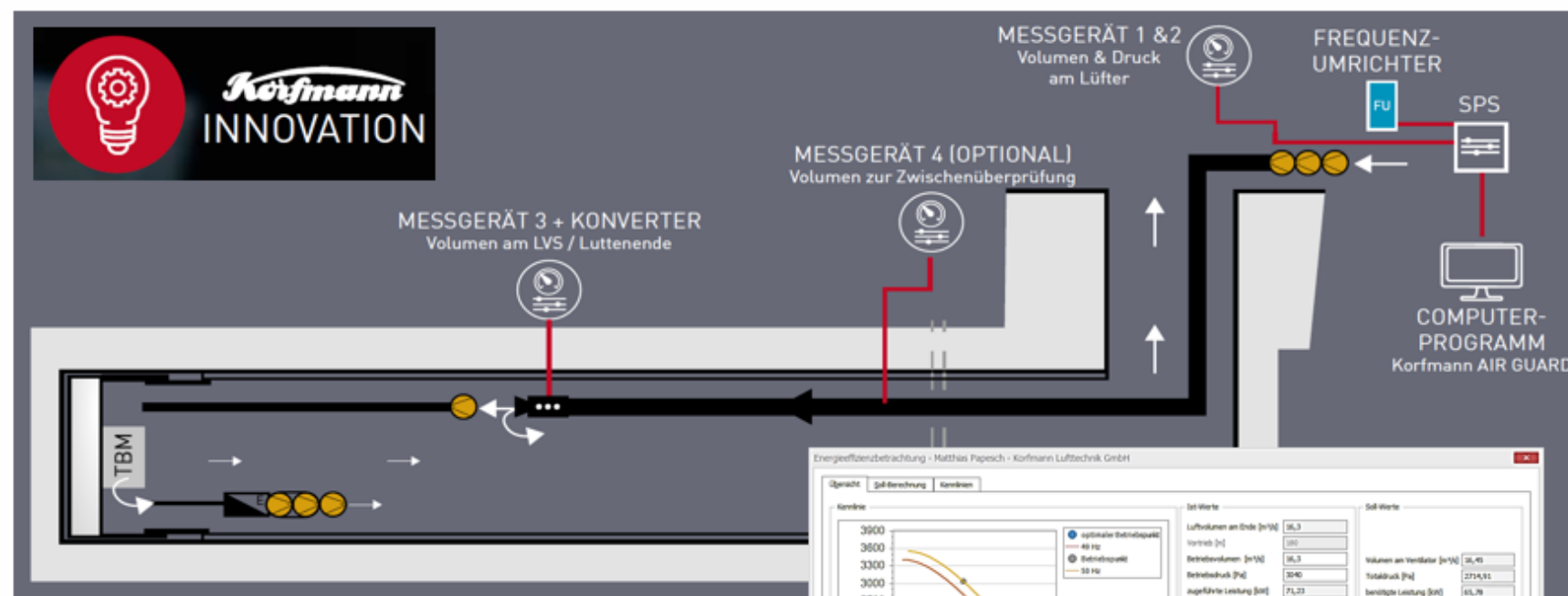
Studium przypadku Tunel drogowy T1 S-19 Babica



Rysunek 1.11 Pomiary wentylacyjne w drążonym maszyną TBM tunelu S-19 Babica (anemometr Benetech GT8907 oraz μ As4, mierniki gazów MX6, barometr elektroniczny μ Bar, psychrometr Assmanna, analiza chemiczna gazów). Źródło: Mostostal Acciona, opracowanie własne.

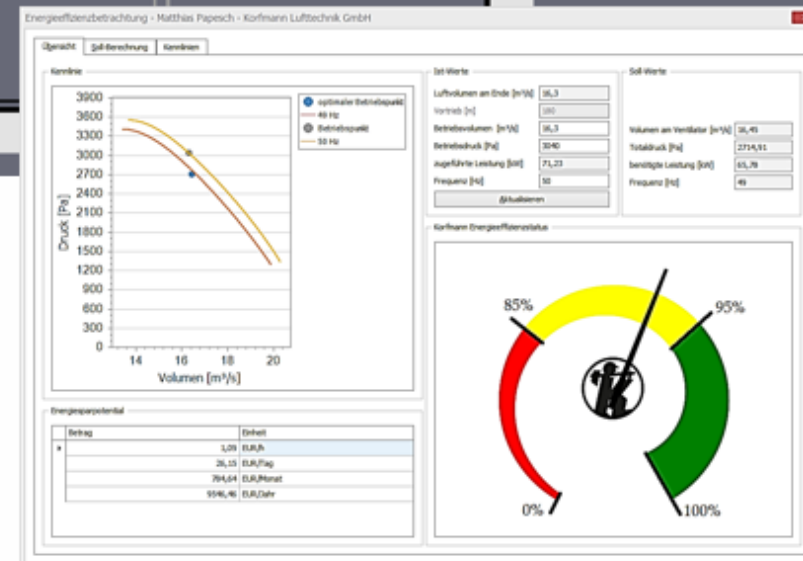
Kontrola procesu przewietrzania

Higher-level control type: Korfmann – Air Guard



Application:

Intelligent control system for energy-efficient ventilation including fault monitoring



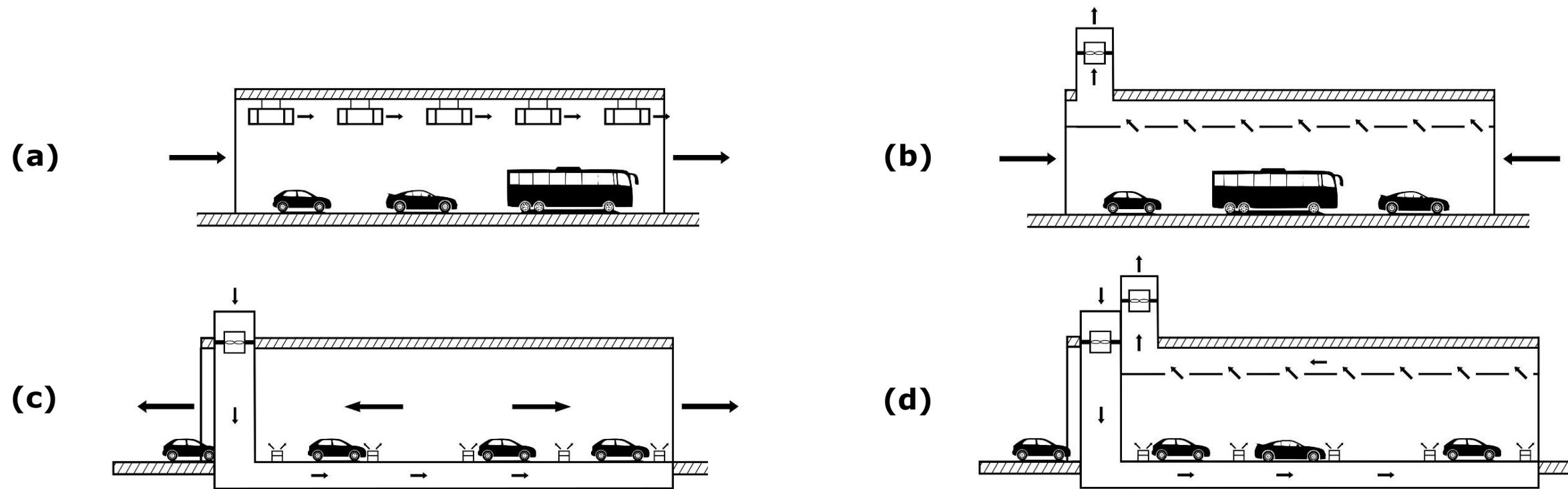
Wentylacja tuneli drogowych na etapie eksploatacji: projekt, modelowanie, walidacja.

Prawidłowo zaprojektowana wentylacja, pozwala na **kontrolę stężeń** zanieczyszczeń emitowanych przez pojazdy i ich **rozzredzanie** powietrzem świeżym oraz **odprowadzenie** strumienia zanieczyszczonego powietrza z przestrzeni komunikacyjnej. Wśród kluczowych parametrów opisujących efektywność pracy systemu wymienić można **przejrzystość oraz stężenia tlenków azotu i tlenku węgla**.

W celu zapewnienia bezpiecznych warunków użytkowania, niezbędne jest również dostosowanie pracy systemu do warunków wystąpienia **pożaru**. W tej sytuacji, największe zagrożenie obok **ognia i temperatury gazów pożarowych**, stanowi rozprzestrzeniający się **dym**, zmniejszający widoczność, a w konsekwencji utrudniający szybką i skuteczną ewakuację. Kluczowym zadaniem systemu wentylacji w sytuacji wystąpienia pożaru jest **odpowiednie kierowanie** rozprzestrzeniających się gazów pożarowych i dymu oraz ich odprowadzenie w sposób umożliwiający bezpieczną ewakuację osób znajdujących się w tunelu przy jednoczesnym zapewnieniu dostępu i bezpieczeństwa ekip ratowniczo-gaśniczych.

Wentylacja tuneli drogowych na etapie eksploatacji: projekt, modelowanie, walidacja.

System wentylacji, obok innych systemów bezpieczeństwa, stanowi jeden z najważniejszych elementów wyposażenia tunelu drogowego.



Rysunek 2.1 Schemat działania wentylacji mechanicznej: a) wzdłużnej, b) półpoprzecznej z kanałem wywiewnym, c) półpoprzecznej z kanałem nawiewnym, d) poprzecznej pełnej. Na podstawie (NFPA 502, 2014).

Wentylacja tuneli drogowych na etapie eksploatacji: projekt, modelowanie, walidacja.

- **System wentylacji wzdłużnej** tuneli drogowych polega na wymuszeniu przepływu powietrza w strefie komunikacyjnej wzdłuż osi tunelu. Powietrze może być wprowadzane lub usuwane z tunelu w ograniczonej liczbie punktów, takich jak portale lub szyby wentylacyjne. Ruch ten generowany jest za pomocą urządzeń mechanicznych, najczęściej wentylatorów strumieniowych (jet fan) zlokalizowanych pod stropem tunelu.
- **Wentylacja poprzeczna**, dzięki rozprowadzonym kanałom nawiewnym i wywiewnym, zapewnia równomierne rozprowadzenie powietrza na całej długości obiektu. Kanał nawiewny zlokalizowany jest w dolnych partiach tunelu, najczęściej pod jezdnią tunelu. Wówczas kratki nawiewne służące doprowadzeniu świeżego powietrza do przestrzeni komunikacyjnej rozmieszczone są bezpośrednio nad jezdnią. Kanały wyciągowe zlokalizowane są w górnej części tunelu, co szczególnie istotne jest w przypadku odprowadzania gorących gazów pożarowych o niższej gęstości od powietrza, co wraz z siłami konwekcyjnymi wpływa na ich utrzymywanie się w górnych partiach nawy.
- **Wentylacja półpoprzeczna** jest połączeniem dwóch opisanych wcześniej systemów. W zależności od konstrukcji, w tunelu rozprowadzane są kanały nawiewne, gdzie powietrze jest usuwane przez portale lub kanały wywiewne, a kompensacja powietrza odbywa się przez portale.

Wentylacja tuneli drogowych na etapie eksploatacji: projekt, modelowanie, walidacja.

- Rola wentylacji w utrzymaniu jakości powietrza i bezpieczeństwa użytkowników.
- Znaczenie zarządzania przepływem powietrza w warunkach normalnych i awaryjnych.
- Metody analizy efektywności systemu wentylacji - pomiary eksperymentalne i symulacje.

Tabela 2.1 Zakres stosowania systemów wentylacji mechanicznej.
Źródło: Rozporządzenie 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, z późn. zm.).

System wentylacji	Długość tunelu	
	prowadzącego jezdnię dwukierunkową	o oddzielnych konstrukcjach dla różnych kierunków ruchu
Wzdłużna	nie większa niż 1000 m	nie większa niż 3000 m
Półpoprzeczna	większa niż 250 m i mniejsza niż bądź równa 1500 m	większa niż 250 m i mniejsza niż bądź równa 3000 m
Poprzeczna	większa niż 1500 m	większa niż 3000 m

Wentylacja tuneli drogowych na etapie eksploatacji: projekt, modelowanie, walidacja.

Dobrze zaprojektowany system wentylacji wymaga **eksperymentalnego testowania i modelowania jego działania** podczas **normalnej pracy** i w **sytuacjach awaryjnych**.

Parametry uwzględniane na etapie projektowania wentylacji obejmują między innymi takie elementy jak:

- Geometria tunelu (wymiary, nachylenie, warunki eksploatacji),
- Lokalizacja, ukształtowanie terenu i geometria przejść,
- Czynniki meteorologiczne,
- Czynniki związane z ruchem drogowym,
- Lokalizacja i rozmiar pożaru.

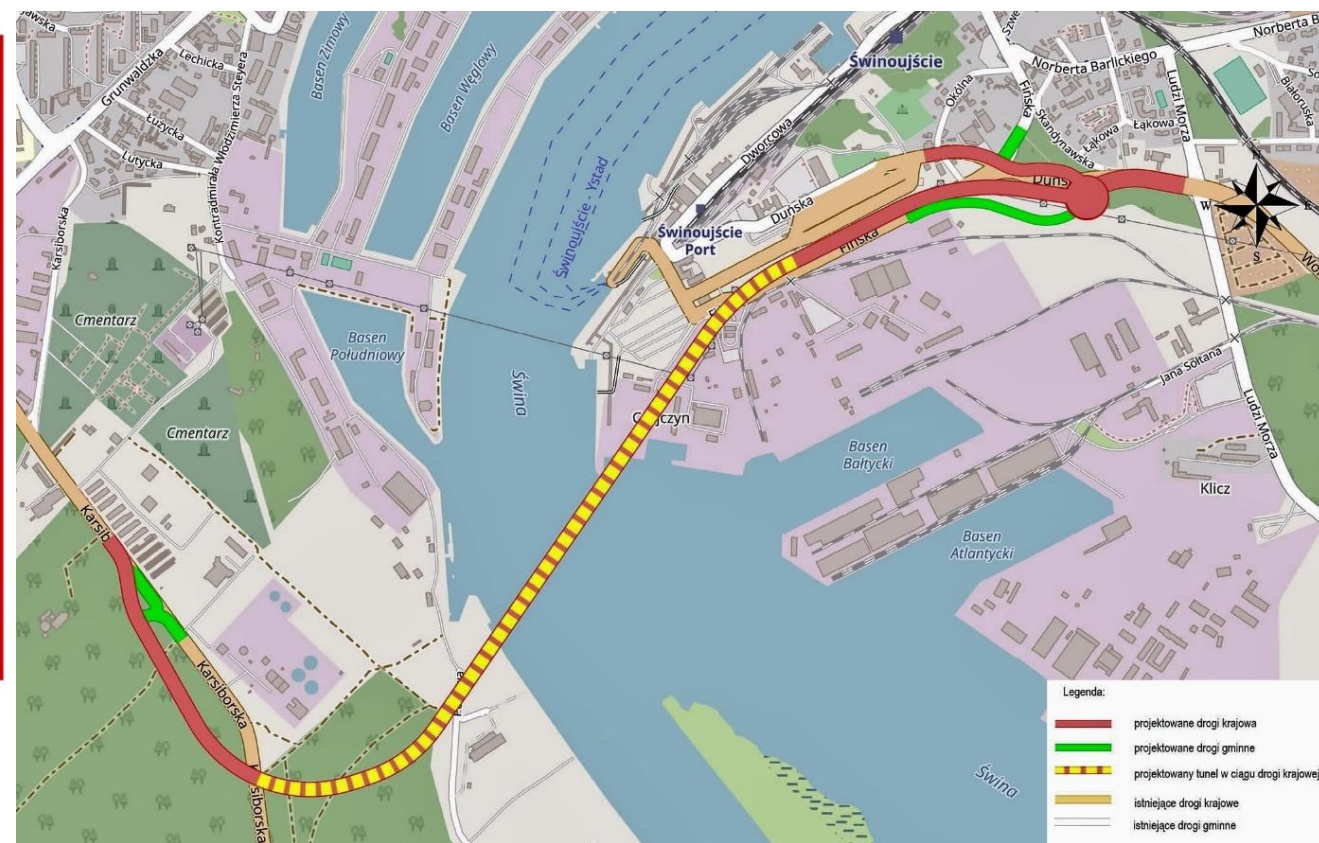
Studium przypadku

- Tunel pod Świną

Przedmiot analizy

- Lokalizacja: Kanał Świny, północno-zachodnia Polska. Łączy wyspy Wolin i Uznam
- Długość tunelu – 1780 metrów.
- System wentylacji – wentylacja półpoprzeczna z kanałem wyciągowym podstropowym i wentylatorami strumieniowymi.
- Termin realizacji projektu: marzec 2021 – wrzesień 2023.
- Ruch dwukierunkowy, tunel miejski.
- Wyzwania projektowe – środowisko miejskie, klimat nadmorski, zagrożenia pożarowe.

Metodyka – Pomiarzy in-situ



Rysunek 2.2 Tunel Świnoujście S-3 – schemat i widok.

Źródło: opracowanie własne.

Metodyka – Pomiary in-situ



Rysunek 2.3 Tunel Świnoujście S-3 – schemat i widok.

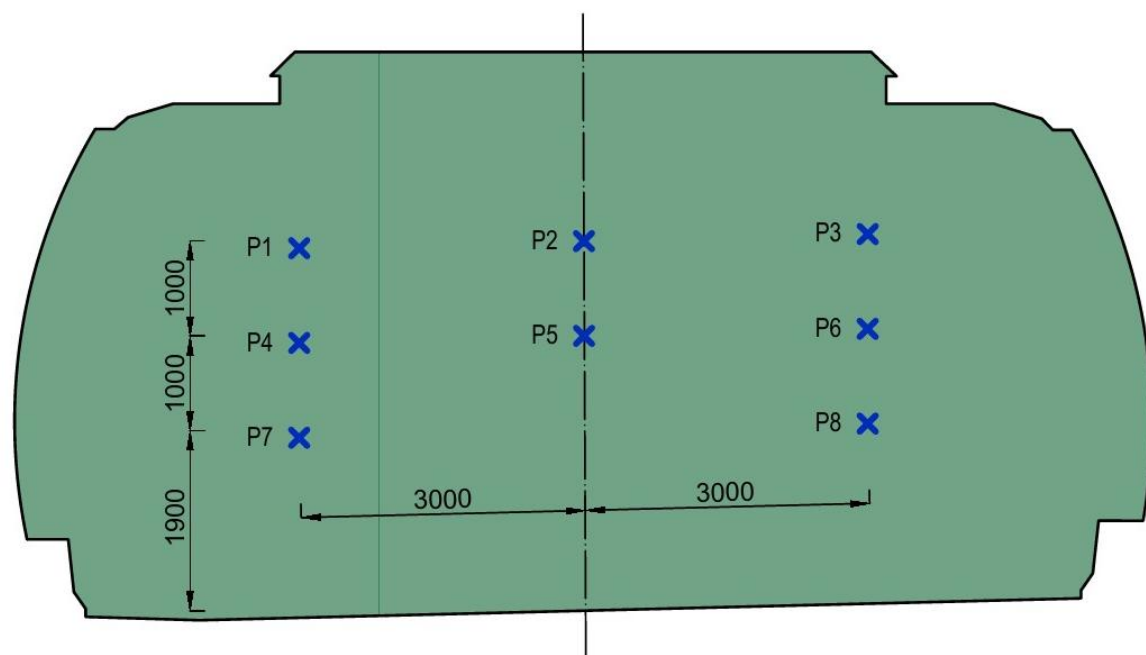
Źródło: opracowanie własne.

Metodyka

– Pomiaru in-situ

- Badania prędkości powietrza w tunelu z wentylacją mechaniczną i bez niej.
- Anemometry skrzydełkowe (8 punktów) umieszczone w sekcjach kontrolnych zlokalizowanych w wyznaczonych punktach charakterystycznych wzdłuż tunelu (pomiędzy klapami wyciągowymi).
 - Model Benetech GT8907
 - Katalogowy zakres pomiarowy: 0-45 m/s
 - Dokładność pomiaru: $\pm(3\%+0.1 \text{ m/s})$
- Pomiaru w dwóch scenariuszach:
 - Scenariusz A: Otwarte 3 klapy od strony wyspy Wolin
 - Scenariusz B: Otwarte 4 klapy w środku tunelu

Metodyka – Pomiary in-situ

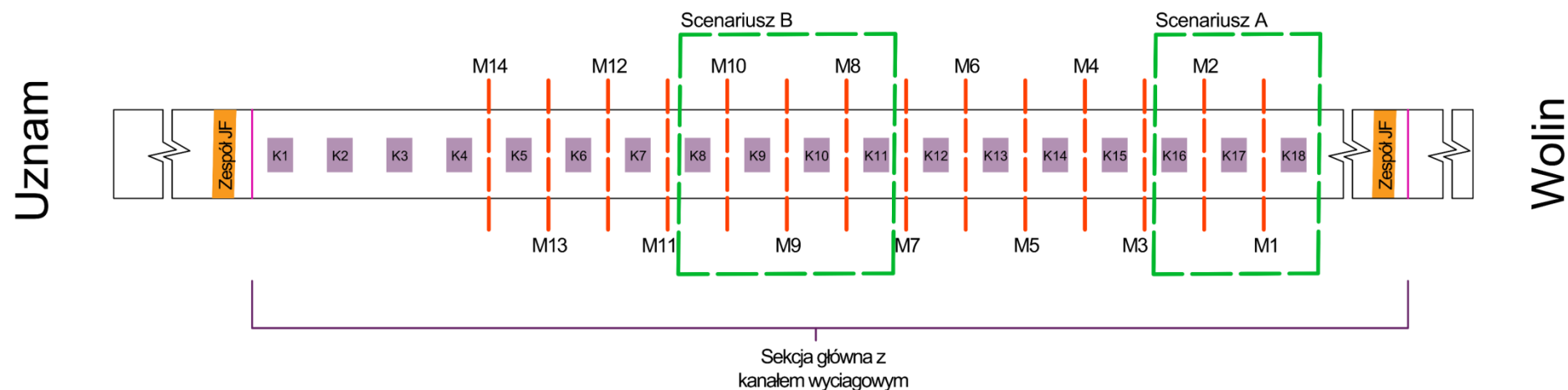


Rysunek 2.4 Tunel Świnoujście S-3 – Stanowisko testowe.

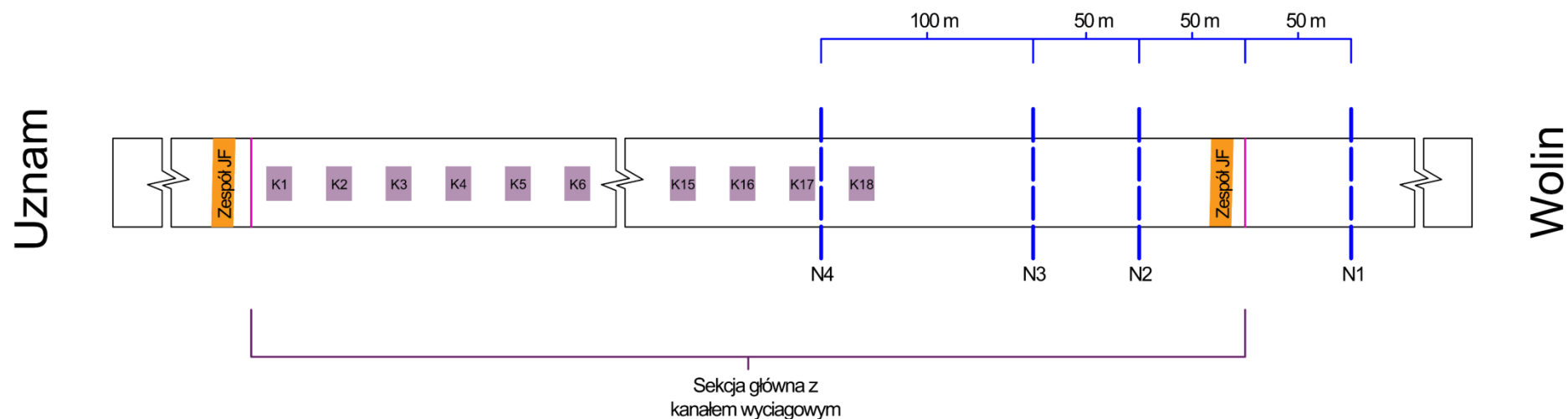
Źródło: opracowanie własne.

Metodyka – Pomiary in-situ

(a)



(b)



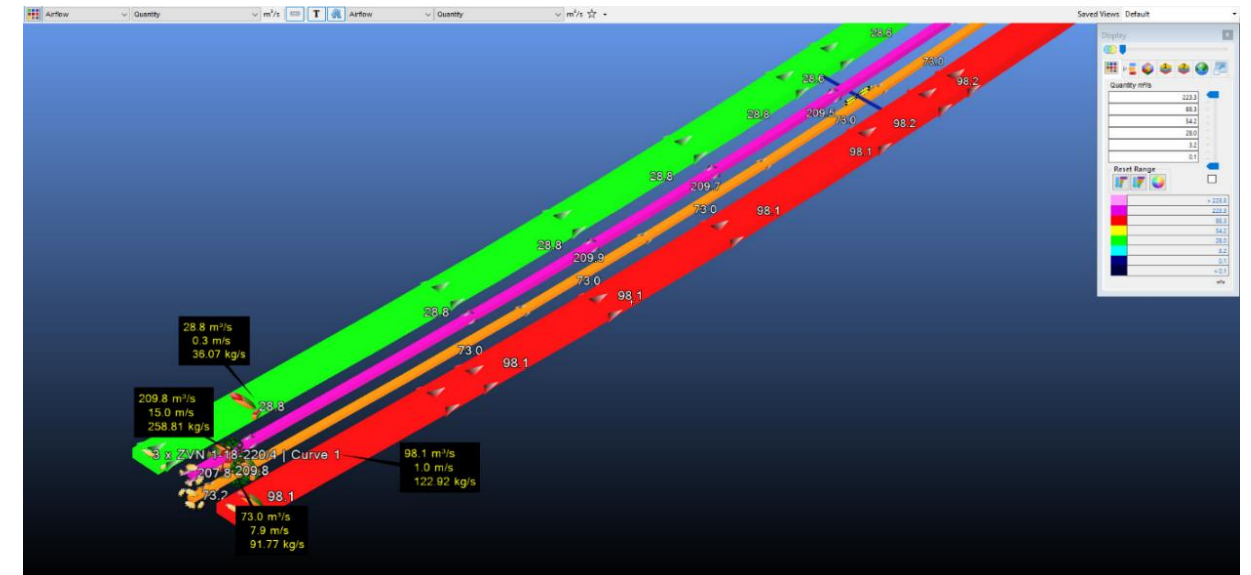
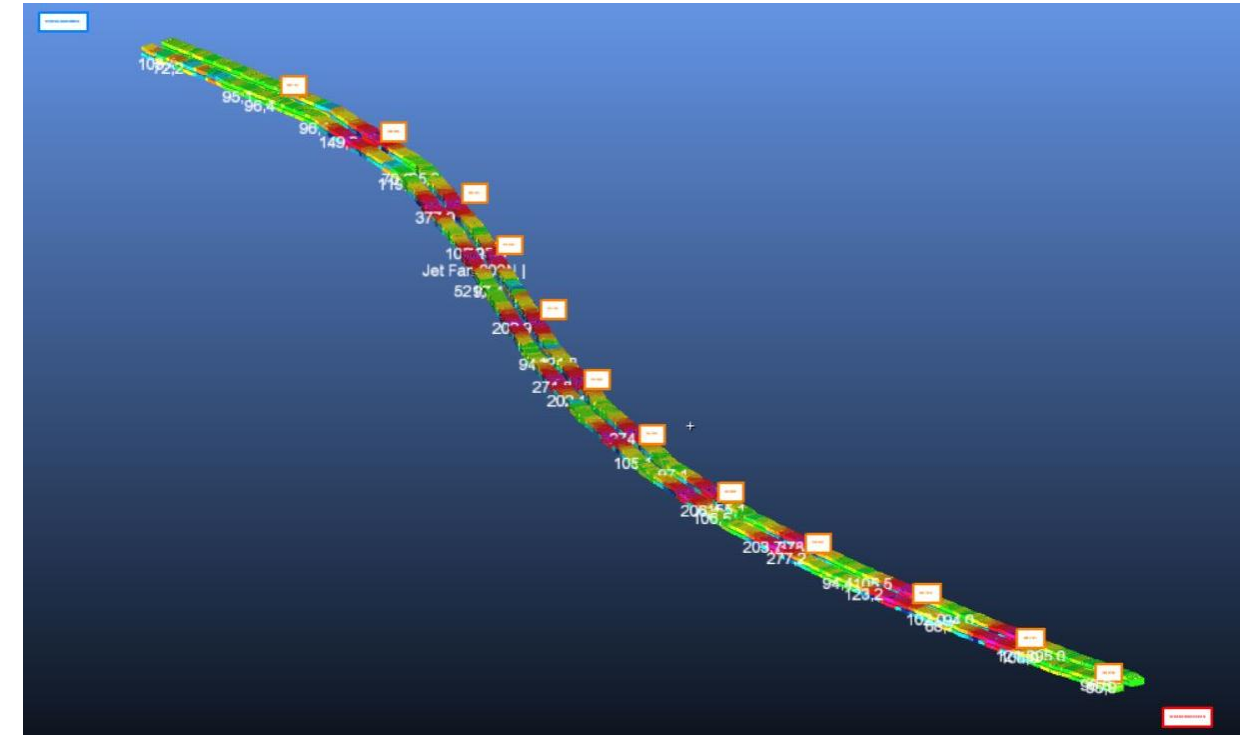
Rysunek 2.5 Tunel Świnoujście S-3 – Lokalizacja przekroji kontrolnych wzdłuż tunelu: (a) wentylacja mechaniczna, (b) wentylacja naturalna.

Źródło: opracowanie własne.

Metodyka

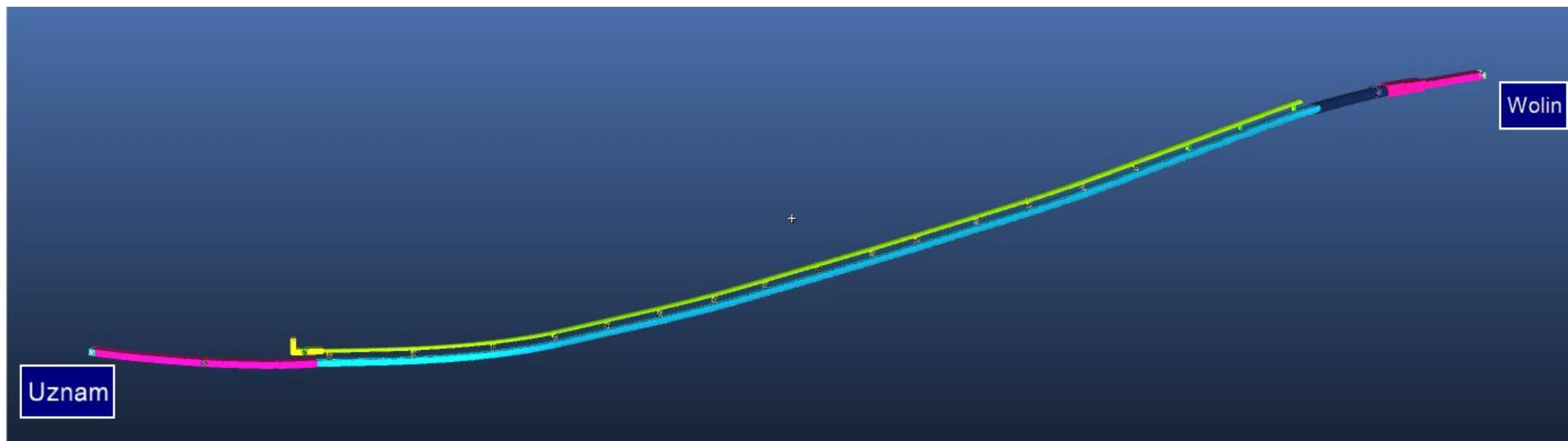
– Oprogramowanie

- Ventsim™ DESIGN
- Pakiet oprogramowania do symulacji wentylacji obiektów podziemnych: kopalń i tuneli.
- Symulacje jednowymiarowe (1D).
- Funkcje:
 - Projektowanie i przegląd projektu/optymalizacja,
 - Symulacja efektu tłokowego, ciepła i przepływu gazów.



Metodyka

– model jednowymiarowy

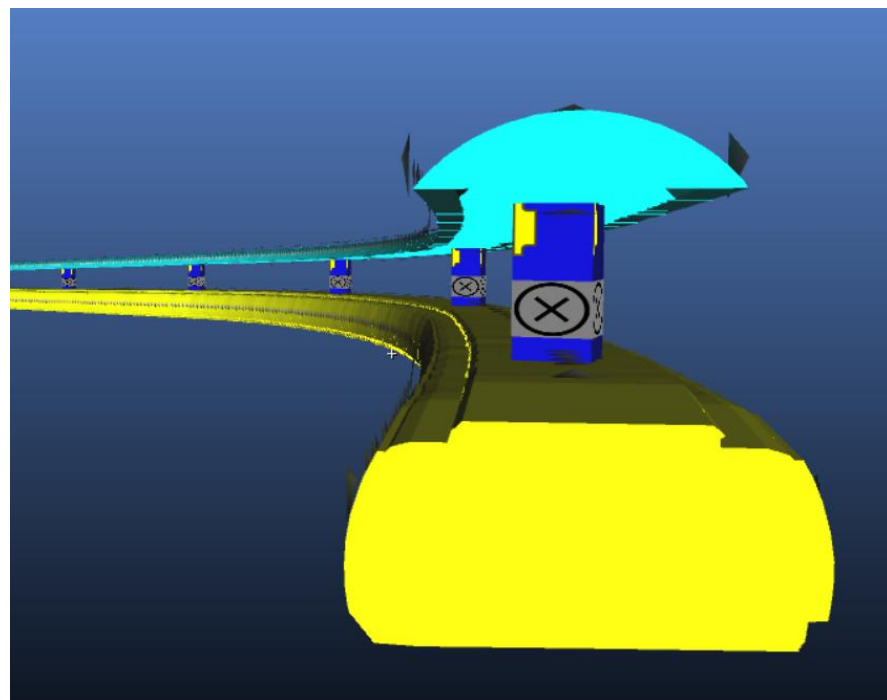


Rysunek 2.6 Model geometryczny tunelu drogowego pod Świną.

Źródło: opracowanie własne.

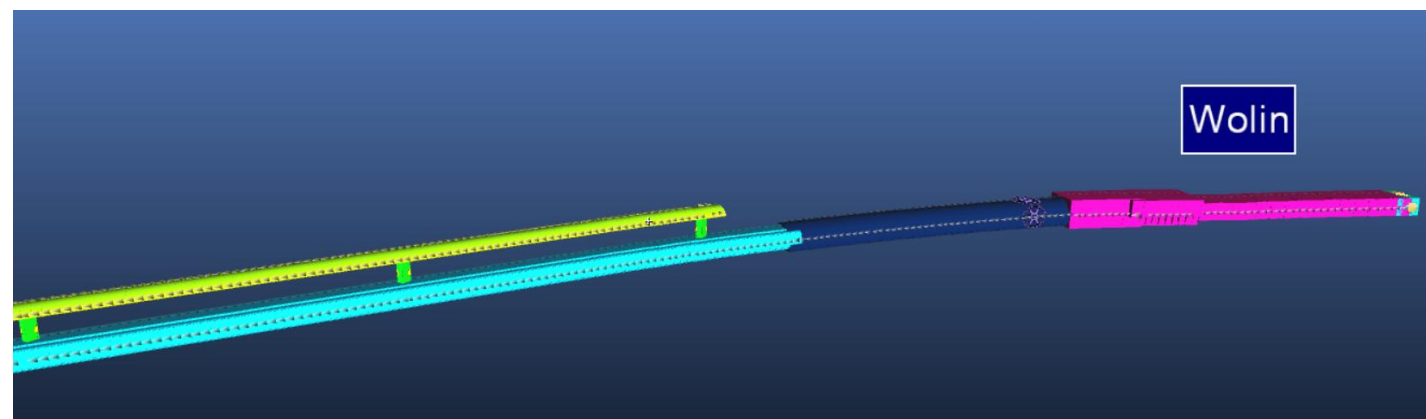
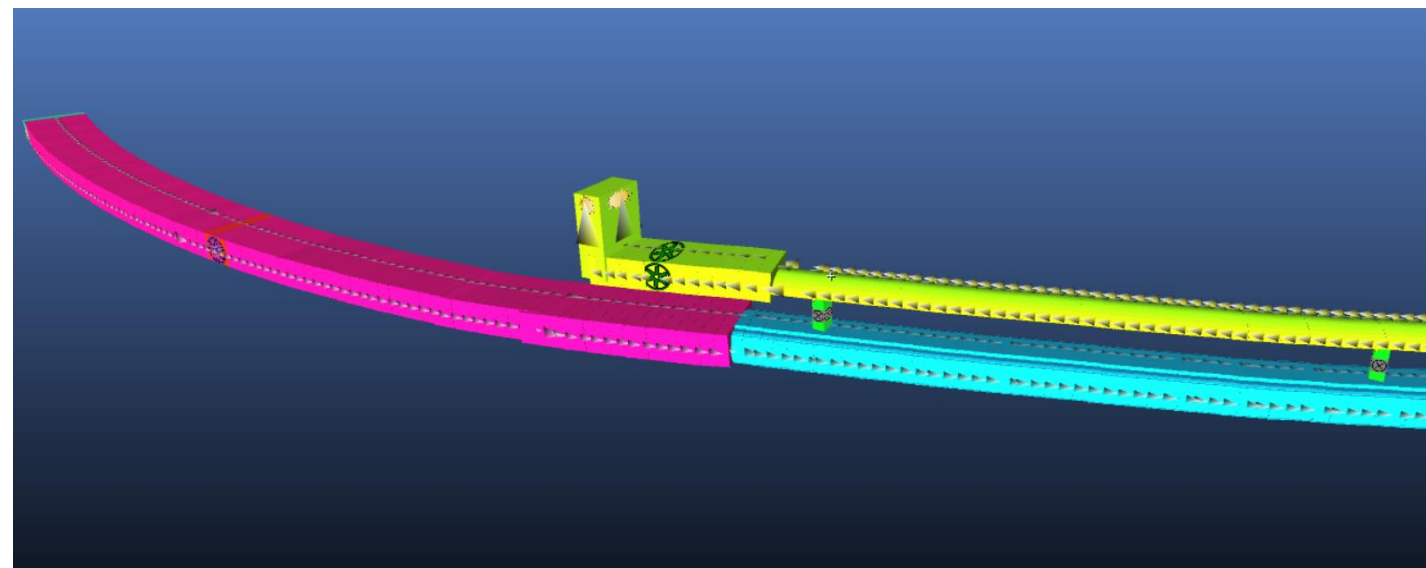
Metodyka

– model jednowymiarowy



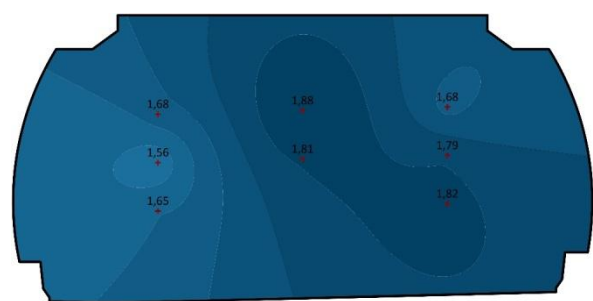
Rysunek 2.7 Model geometryczny tunelu drogowego pod Świną – widok sekcji.

Źródło: opracowanie własne.

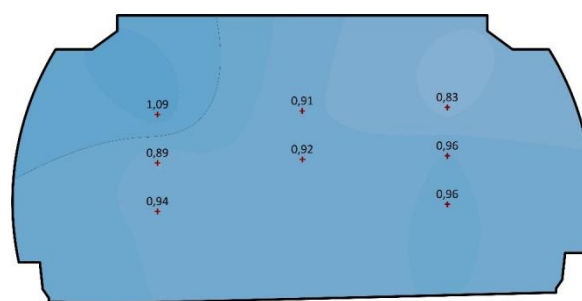


Wyniki

– Badania in-situ – Scenariusz A



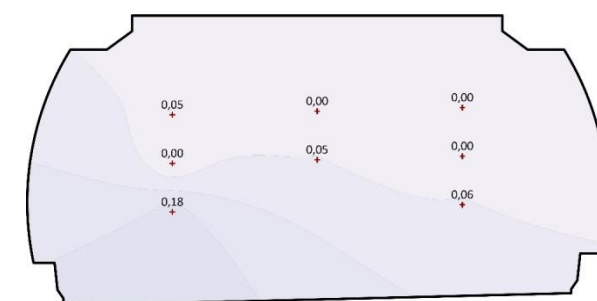
M1



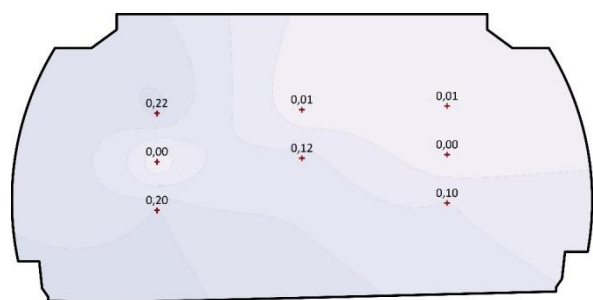
M2



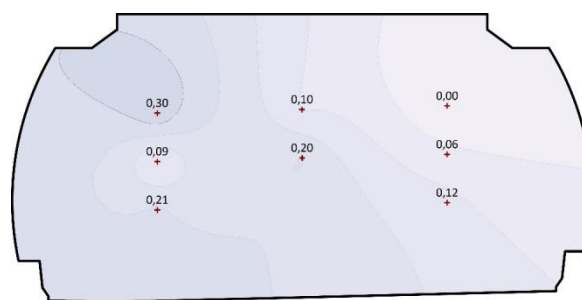
M3



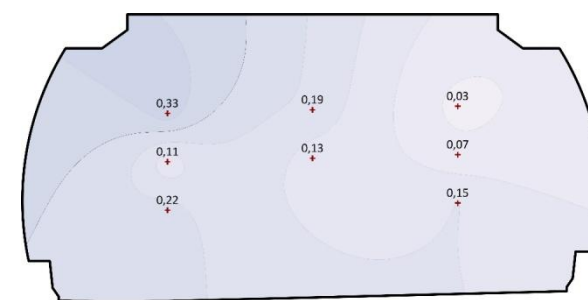
M4



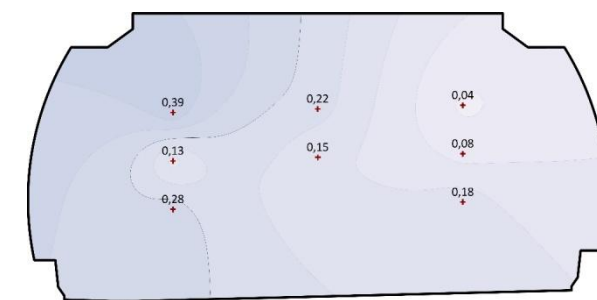
M5



M7



M8



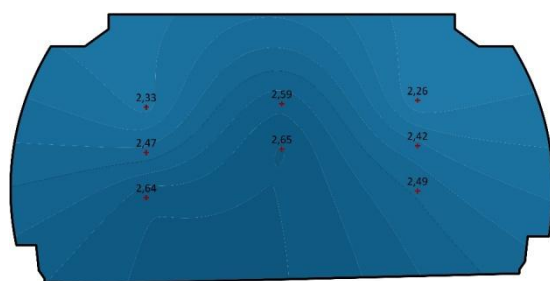
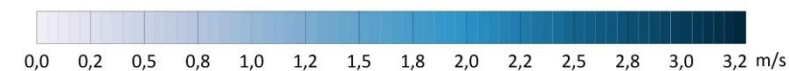
M9

Rysunek 2.8 Pola prędkości w analizowanych przekrojach – scenariusz A.

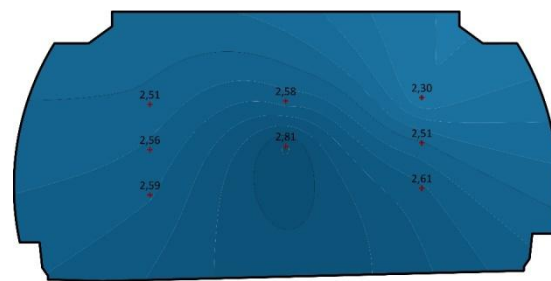
Źródło: opracowanie własne.

Wyniki

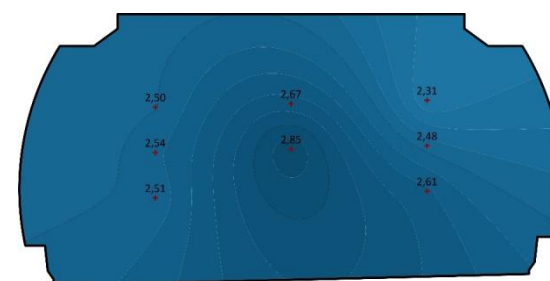
– Badania in-situ – Scenariusz B



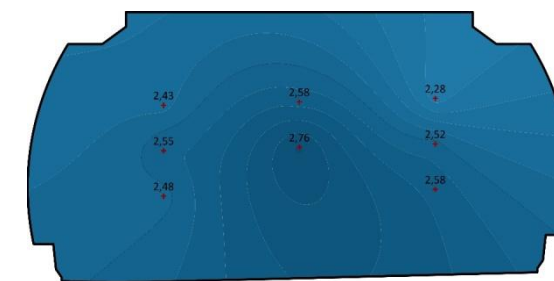
M2



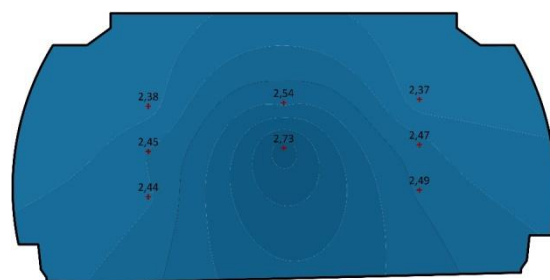
M4



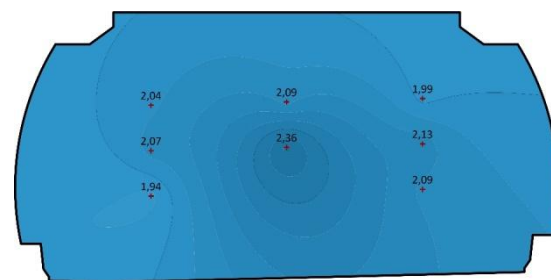
M5



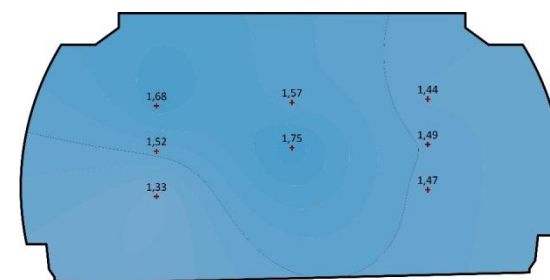
M6



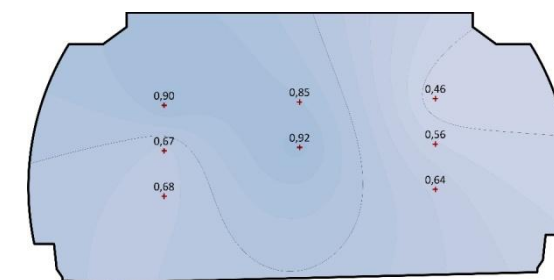
M7



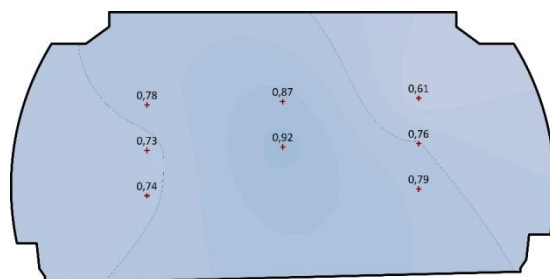
M8



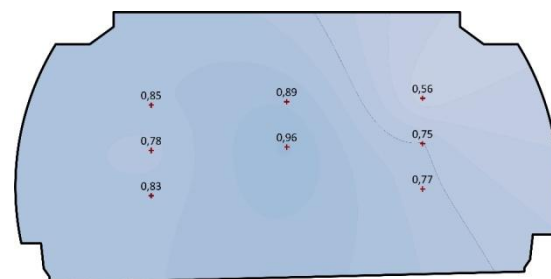
M9



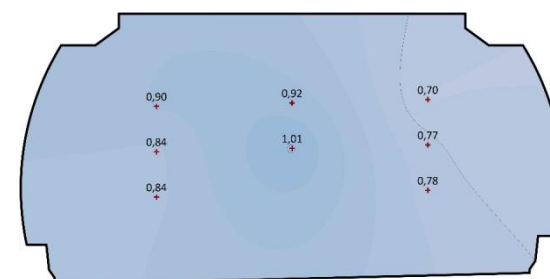
M10



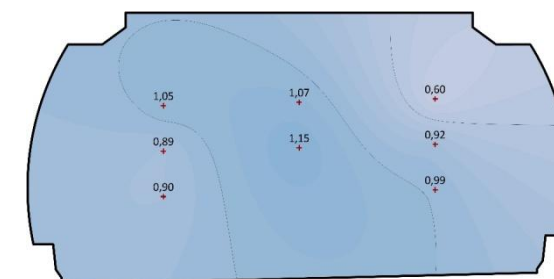
M11



M12



M13

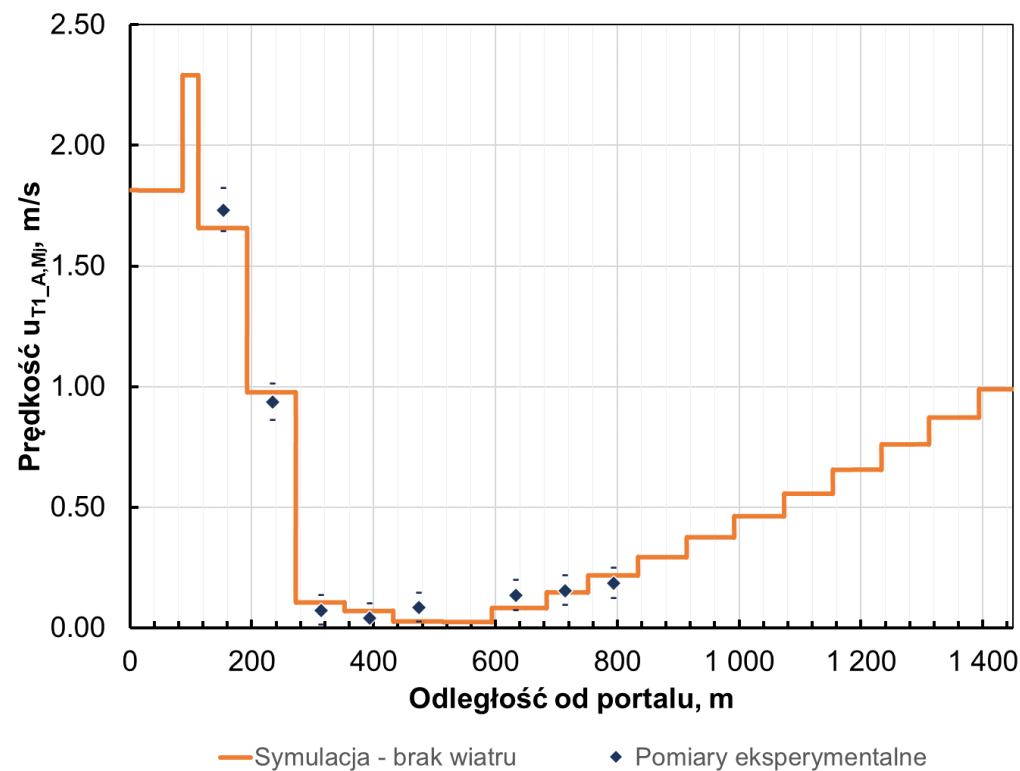


M14

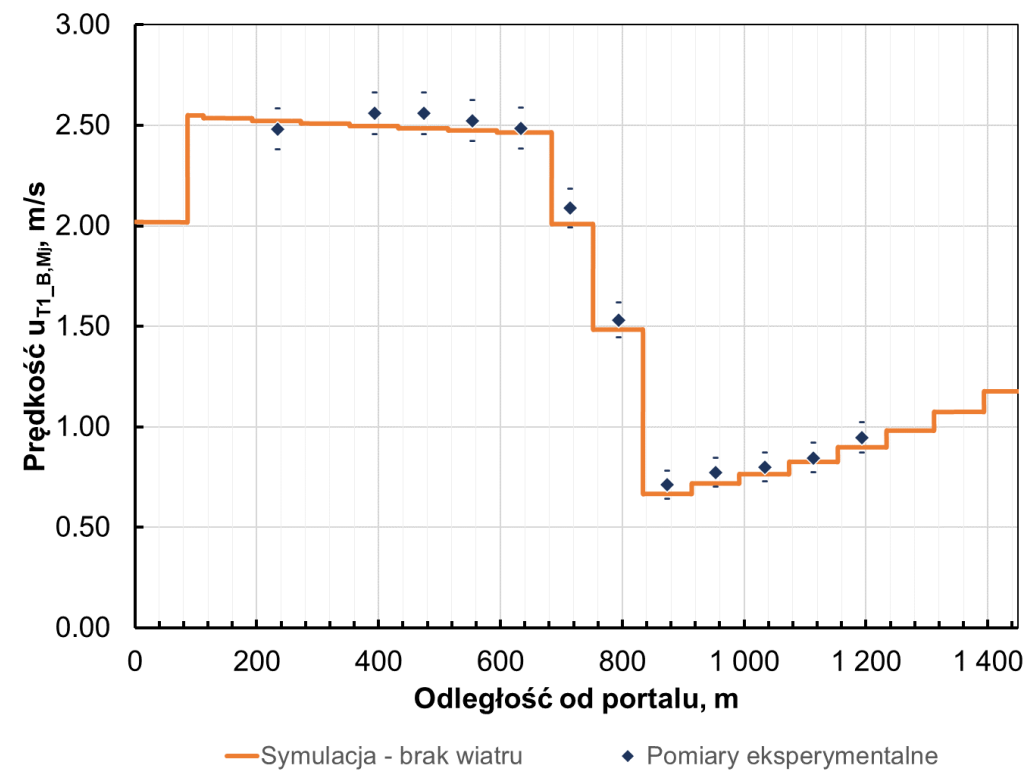
Rysunek 2.9 Pola prędkości w analizowanych przekrojach – scenariusz B. Źródło: opracowanie własne.

Wyniki i analiza

– Symulacje 1D – Tunel T1



(a)

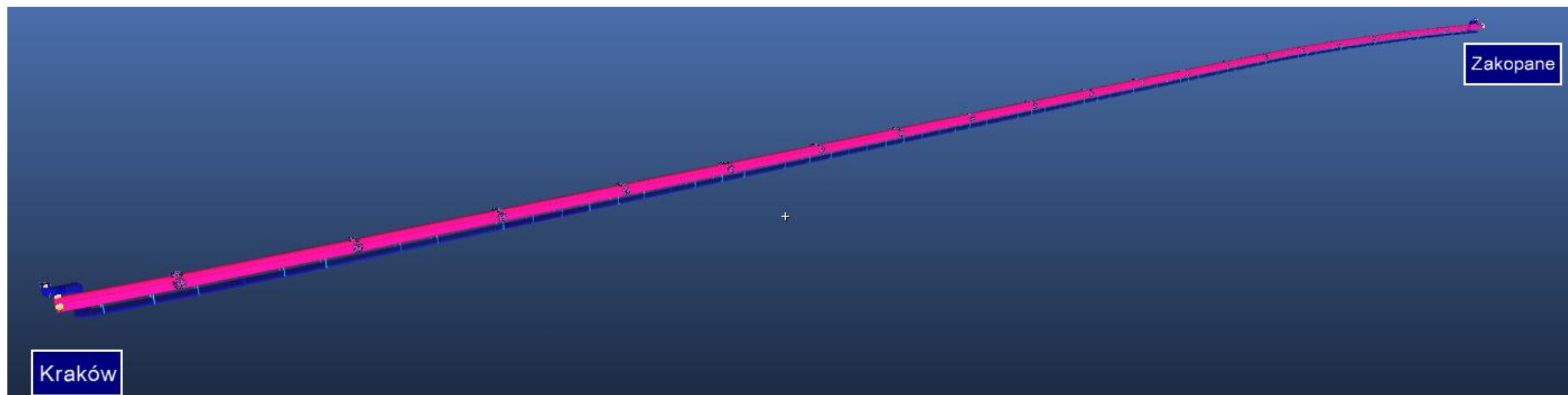
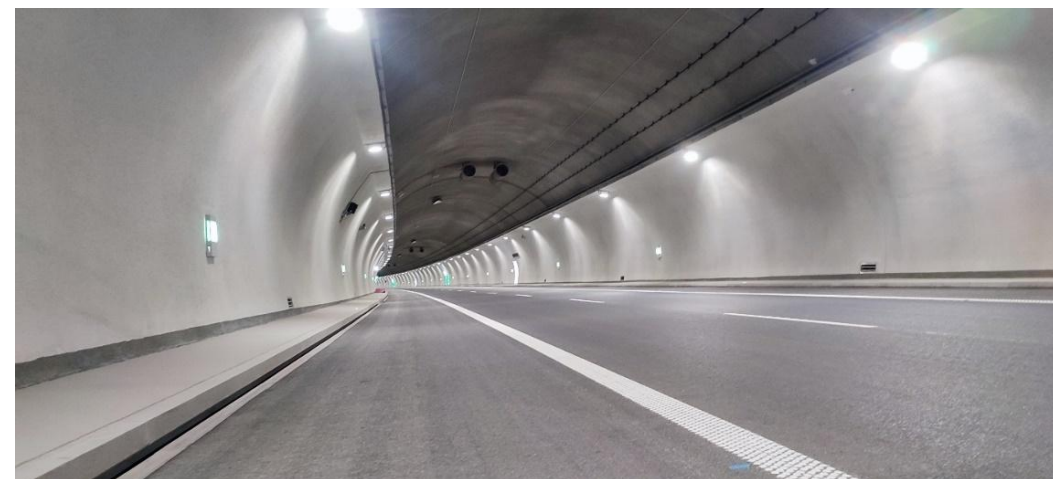


(b)

Rysunek 2.10 Zestawienie średnich prędkości przepływu w przekrojach i wyników symulacji jednowymiarowych:
(a) Scenariusz A; (b) Scenariusz B.

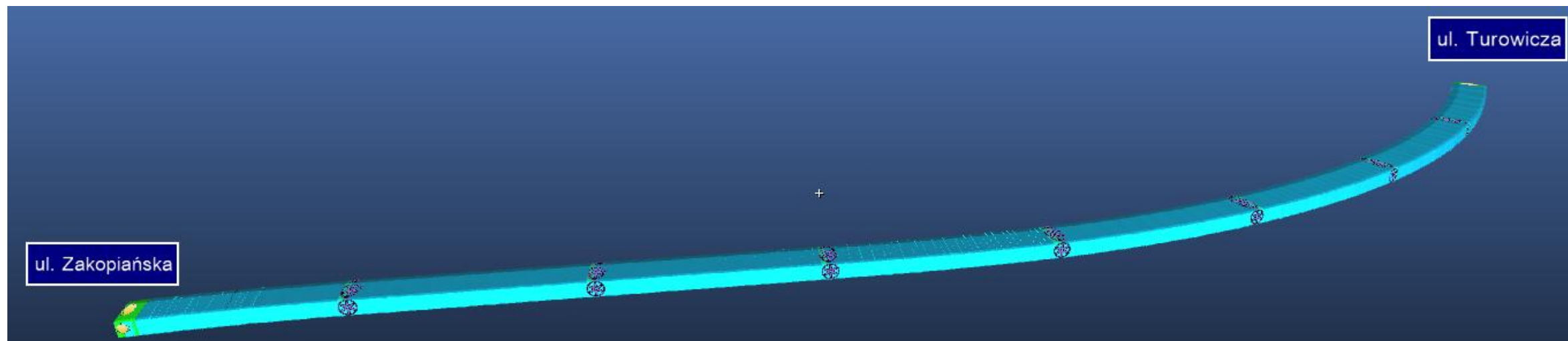
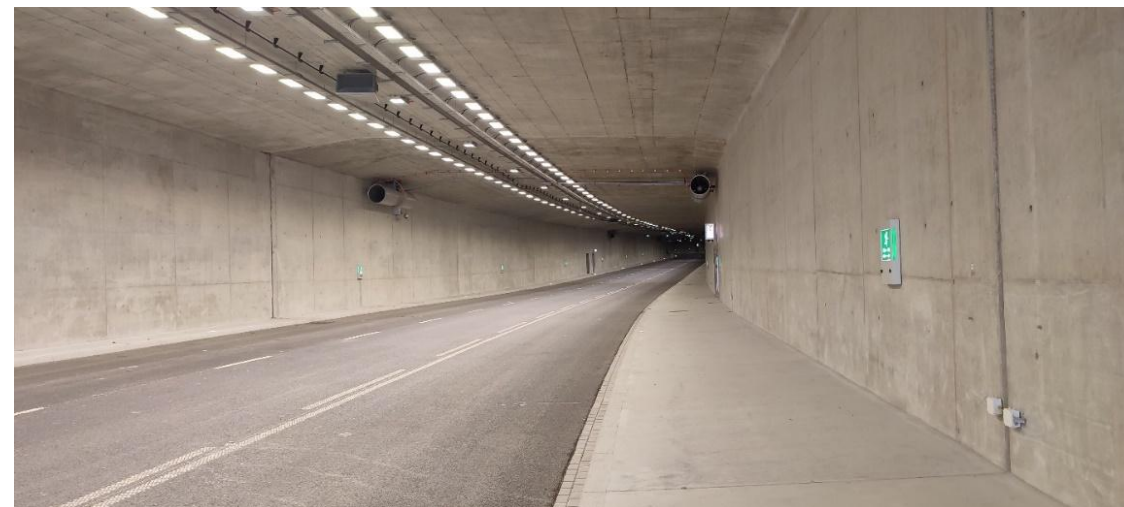
Źródło: opracowanie własne.

Analogiczne doświadczenia



Rysunek 2.11 Tunel T2 w ciągu drogi ekspresowej S7 – widok. Źródło: opracowanie własne.

Analogiczne doświadczenia



Rysunek 2.12 Tunel T3 w ciągu Trasy Łagiewnickiej – widok. Źródło: opracowanie własne.

Wnioski

- Znajomość czynników wpływających na przepływ powietrza w tunelach drogowych oraz odpowiednie zdefiniowanie parametrów charakterystycznych na etapie projektowania pozwala na zaprojektowanie **efektywnie działającego systemu wentylacji**.
- Zastosowanie symulacji jednowymiarowych na etapie projektowania systemu wentylacji w tunelach drogowych pozwalają na określenie z dużą dokładnością **warunków przepływowych w rzeczywistych obiektach**.

Dziękuję za uwagę