



James Matley – Codel International
Krzysztof Filipowski – Pentol-Enviro Polska

Obecne trendy i kierunki rozwoju aparatury do monitoringu atmosfery w tunelach – aspekty techniczne i legislacyjne

V Międzynarodowe Forum Tunelowe
Warszawa, 6 – 8 lutego 2023 r.

Cel prezentacji

Niniejsza prezentacja jest próbą odpowiedzi na kilka pytań związanych ze stosowaniem systemów ciągłego monitoringu stanu atmosfery w tunelach.

Autorzy dołożyli starań, aby treść prezentacji była możliwie uniwersalna, chociaż będzie ilustrowana przykładami aparatury konkretnego producenta.

Podstawy prawne międzynarodowe

W odróżnieniu od precyzyjnie skodyfikowanego systemu monitoringu zanieczyszczeń do atmosfery do niedawna nie było międzynarodowego aktu prawnego ani normatywnego dotyczącego monitoringu atmosfery w tunelach (nie licząc dawno nie aktualizowanych niemieckich wytycznych RABT wcześniej nieformalnie przywoływanych w projektach), ale ostatnio pojawiła się norma ISO 23431:2021 *Pomiary jakości powietrza w tunelach drogowych*. Głównym celem tej normy jest zapewnienie procedur kalibracji i kontroli zainstalowanych mierników. Procedury i metody opisane w normie są bardzo rozbudowane i czasochłonne.

Podstawy prawne międzynarodowe

W końcowej fazie opracowania jest alternatywna norma europejska EN 50545-2 *Ogólne wymagania eksploatacyjne i metody badań dla pomiarów zanieczyszczeń gazowych i pochodzących z powietrza w tunelach*, która będzie określać kryteria jakościowe które mają być spełnione przez przyrządy monitorujące i precyzować metody testów służących do wykazania zgodności z wymaganiami normy. Prawdopodobnie pojawi się wymóg certyfikacji. Będzie to pierwsza norma europejska dedykowana dla monitoringu atmosfery w tunelach. Przygotowuje ją grupa specjalistów pod auspicjami CENELEC (Europejskiego Komitetu Standaryzacji Elektrotechnicznej). W jej skład wchodzi też przedstawiciele producentów, między innymi Codela. Uzgodniony projekt normy powinien zostać opublikowany jeszcze w bieżącym roku.

Podstawy prawne krajowe

- Rozporządzenie nr 735 Ministra Transportu Gospodarki Morskiej z dnia 30 maja 2000r w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie (Rozporządzenie zmieniające Ministra Infrastruktury z dnia 1 sierpnia 2019 r.)

Cel stosowania monitoringu atmosfery w tunelach

Monitoring atmosfery w tunelach jest częścią systemu sterowania wentylacją tunelu. Służy do

- Uruchomienia odpowiedniej sekcji wentylacji w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości stężeń monitorowanych substancji
- W przypadku pożaru zapewnia powietrze nadające się do oddychania w strefach przebywania ludzi, a jednocześnie zapobiega podsycaniu pożaru

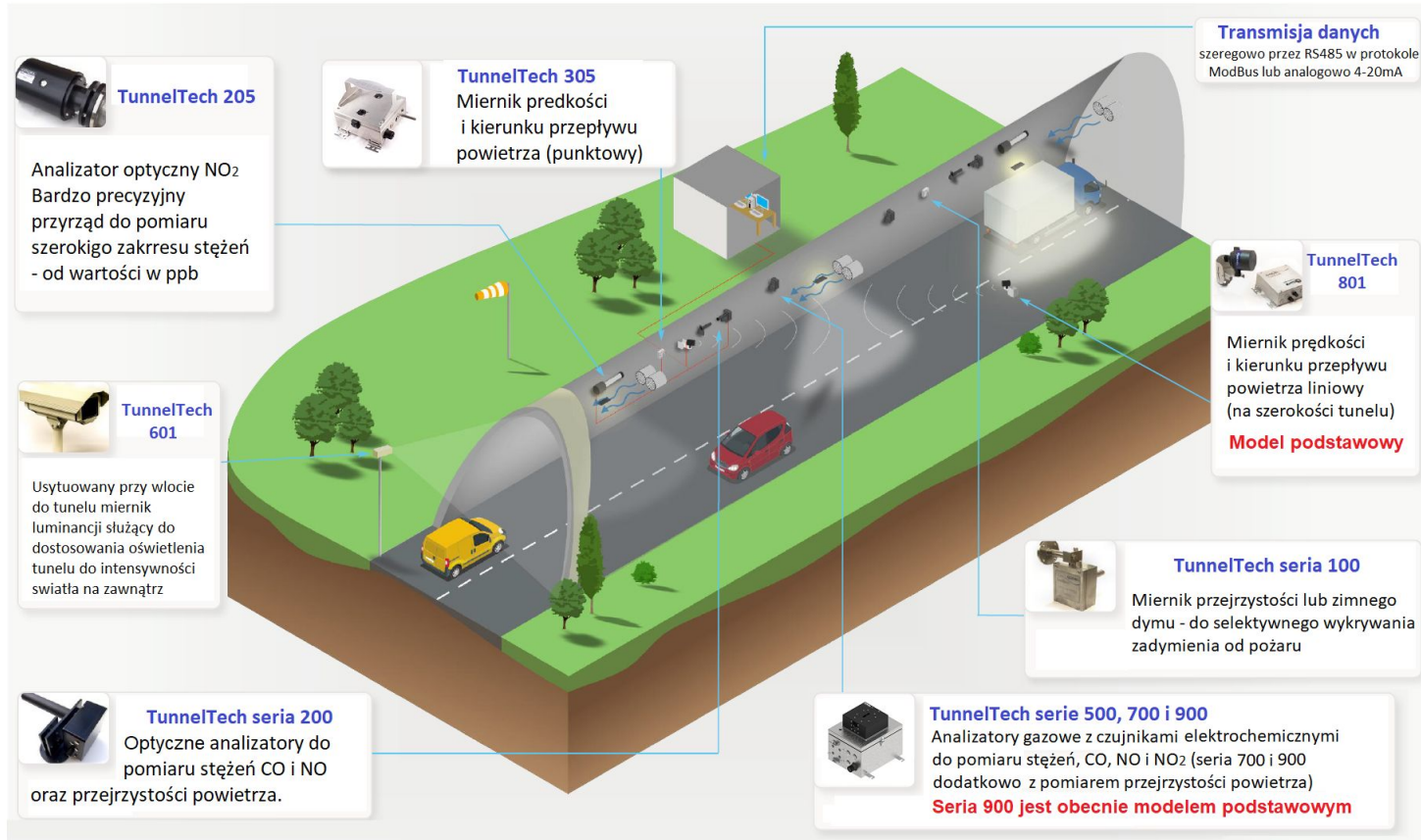
Wielkości mierzone w ramach monitoringu atmosfery w tunelach

- Przejrzystość powietrza (widoczność) – pośrednio mierzy się zawartość cząstek stałych
- Tlenek węgla
- Tlenki azotu (NO i NO_2)
- Prędkość i kierunek przepływu powietrza
- Temperatura i ciśnienie (wielkości pomocnicze)

Zakres pomiarów tunelowych na przykładzie firmy Codel International

- Seria TunnelTech 100** – Widoczność lub „zimny dym”
- Seria TunnelTech 200** – Optyczne monitory CO / NO / widoczności i NO₂
- Seria TunnelTech 300** – Punktowy pomiar prędkości i kierunku przepływu powietrza
- Seria TunnelTech 400** – Elektrochemiczne jednogazowe monitory CO, NO lub NO₂
- Seria TunnelTech 500** – Elektrochemiczne monitory wielogazowe CO/NO/NO₂
- Seria TunnelTech 600** – Czujniki luminancji i oświetlenia
- Seria TunnelTech 700** – Elektrochemiczne monitory CO,NO,NO₂ i optyczne widoczności
- Seria TunnelTech 800** – Liniowy pomiar prędkości i kierunku przepływu powietrza
- Seria TunnelTech 900** – Elektrochemiczne monitory CO,NO,NO₂ i optyczne rozproszeniowe widoczności

Zakres pomiarów tunelowych na przykładzie firmy CodeL International



Tlenek węgla

- Spowodowane głównie niezupełnym spalaniem paliwa w silnikach
- CO jest gazem bardzo toksycznym
 - +100ppm jest szkodliwe
 - +4000ppm może być śmiertelne

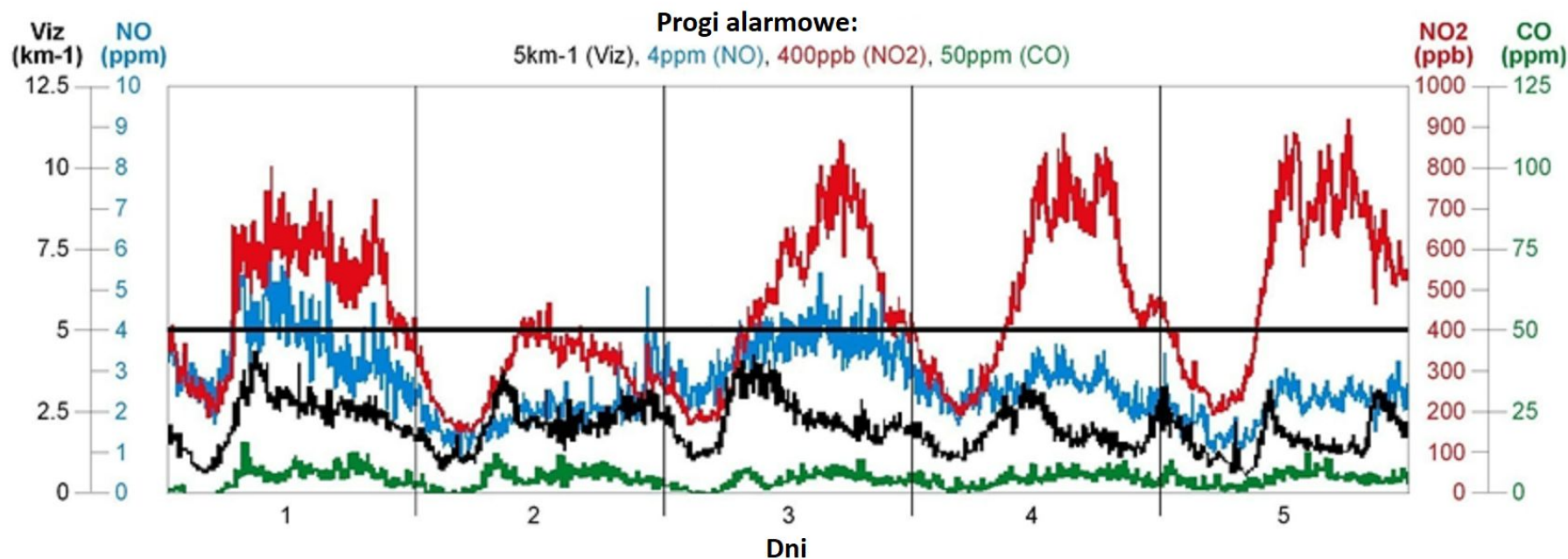
Tlenki azotu

- Emitowane przez wszystkie typy silników ale głównie przez silniki diesla
- Dwutlenek azotu (w odróżnieniu od tlenku azotu) jest wysoko toksyczny już w niskich dawkach, mimo że nie zagraża śmiercią w krótkim czasie jak CO a „tylko” powoduje przedwczesne zgony
- Stężenia NO₂ wyższe od 1ppm już są szkodliwe dla zdrowia
- Dla astmatyków próg szkodliwości NO₂ jest niższy i wynosi 0,1ppm

Czy potrzebny jest pomiar dwutlenku azotu (NO₂)?

- Konieczność pomiaru NO₂ uzasadniona jest wysoką toksycznością tego gazu (tlenek azotu NO w stężeniach występujących w tunelu nie uchodzi za toksyczny).
- Wcześniej zakładano, że pomiar NO, technicznie i cenowo łatwy w realizacji wystarczy, ponieważ na jego podstawie będzie również można oszacować poziom stężenia NO₂. Badania wykazały jednak, że proporcja NO i NO₂ może zmieniać się w bardzo szerokim zakresie. Pokazano to na następnym slajdzie przedstawiającym przykładowe wyniki takiego badania w jednym z tuneli we Francji.

Porównanie stężeń NO i NO₂



Typowe poziomy zanieczyszczeń w tunelu
(dane z tunelu de Fourvière we Francji)

Konkluzja: pomiar stężenia NO nie jest miarodajny do określenia stężenia NO₂

- Zakładając „tradycyjną” proporcję stężeń NO₂ i NO wynoszącą 1:10 uzyskujemy długie czasy znacznych przekroczeń stężeń NO₂ podczas gdy stężenia NO utrzymują się w dopuszczalnych granicach.
- Optymalnym rozwiązaniem jest pomiar NO₂.

Co na to polska legislacja?

§ 292 aktualnej wersji (z 2019 r.)
wspomnianego wcześniej Rozporządzenia
nr 735 Ministra Transportu i Gospodarki
Morskiej z dnia 30 maja 2000 r. w sprawie
warunków technicznych, jakim powinny
odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie
i ich usytuowanie mówi:

„§ 292. 1. Wentylacja tuneli drogowych powinna być ustalona na podstawie wartości progowych stężeń tlenku węgla (CO) i ditlenku azotu (NO₂) w powietrzu w tunelu oraz widoczności, określonych w tabeli:

Rodzaj ruchu pojazdów w tunelu	Stężenie tlenku węgla (CO)	Stężenie ditlenku azotu (NO ₂) ¹⁾	Widoczności	
			współczynnik absorpcji <i>K</i>	transmitancja światła <i>S</i> ²⁾
Płynny z prędkością 50–100 km/h	70 ppm	1 ppm	0,005 m ⁻¹	60%
Utrudniony codziennie zatorami, zatrzymany na wszystkich pasach ruchu	70 ppm	1 ppm	0,007 m ⁻¹	50%
Ograniczony wyjątkowo zatorem, zatrzymany na wszystkich pasach ruchu	100 ppm	1,5 ppm	0,009 m ⁻¹	40%
Długotrwale prace w tunelu	30 ppm	0,3 ppm	0,003 m ⁻¹	75%
¹⁾ Średnie stężenie na całej długości tunelu. ²⁾ Dla odcinka 100 m.				

2. Tunel drogowy z wentylacją mechaniczną powinien być wyposażony w urządzenia monitorujące jakość powietrza w tunelu i urządzenia służące do zamykania go dla ruchu w przypadku, gdy:

- 1) stężenie tlenku węgla (CO) przekroczy wartość 200 ppm,
- 2) stężenie ditlenku azotu (NO₂) przekroczy wartość 4 ppm,
- 3) współczynnik absorpcji *K* przekroczy wartość 0,012 m⁻¹,
- 4) wartość transmitancji światła *S* spadnie poniżej 30%.

Co na to polska legislacja?

Wniosek:

- Pomiar NO₂ (obok pomiaru CO) jest zgodnie z polskim prawem obowiązkowy
- Pomiar NO nie jest wprowadzie obowiązkowy, ale oczywiście nie ma żadnych przeszkód, aby stosować go razem z pomiarami CO i NO₂

Pomiar stężeń gazowych optyczny czy elektrochemiczny?

- Od lat stosowaną i sprawdzoną metodą pomiarów stężeń gazów w powietrzu jest pomiar optyczny przeswietleniowy na zasadzie absorpcji w podczerwieni (w przypadku NO_2 również w ultrafiolecie).
- Wadą analizatorów prześwietleniowych jest konstrukcja złożona z dwóch głowic z koniecznością ich precyzyjnego osiowania oraz mało precyzyjna weryfikacja za pomocą gazów wzorcowych

Pomiar stężeń gazowych optyczny czy elektrochemiczny?

- Do pomiaru NO_2 może służyć unikalny, jednogazowy prześwietleniowy analizator optyczny Codel TunnelTech 205 pracujący w ultrafiolecie i zapewniający precyzyjny pomiar bardzo niskich stężeń NO_2 .
- Mimo stosunkowo wysokiej ceny do samej Francji producent dostarczył ok. 60 analizatorów tego typu.

Pomiar stężeń gazowych optyczny czy elektrochemiczny?

- W ostatnich latach pełne prawo obywatelstwa zdobyły sobie pomiary metodą elektrochemiczną o zwartej jednobryłowej konstrukcji. **Możliwy jest więc pomiar CO, NO i NO₂ jednym analizatorem.**
- Najnowsza generacja czujników zapewnia stabilne wskazania w całym okresie żywotności wynoszącym 1,5 do 2 lat, (wymagana jest okresowa wymiana ogniów) a wymiana oraz kalibracja ogniów za pomocą gazów wzorcowych pomiędzy wymianami jest łatwa.

Cząstki stałe

- Spowodowane głównie niecałkowitym spalaniem paliwa w silnikach, ale również jest to pył starty z okładzin hamulcowych, opon oraz naniesiony z zewnątrz.
- Bardzo szkodliwe dla dróg oddechowych.
- Pogarszają przejrzystość powietrza.
- Cząstki zawieszone mogą długo pozostawać w atmosferze tunelu.
- Stężenie cząstek stałych określone jest przez pomiar widoczności (przejrzystości powietrza).

Pomiar widoczności – prześwietleniowy czy rozproszeniowy?

- Istotą pomiaru widoczności jest określenie ilości pyłu zawieszonego w powietrzu. Mgła, która może być obecna w skrajnych sektorach tunelu nie powinna wpływać na wskazania widoczności w systemie monitoringu atmosfery.
- Przez lata dominowały rozwiązania pomiar oparte na metodzie optyczne prześwietleniowej w świetle widzialnym (pomiar widoczności). Miernik TunnelTech serii 200 (ze zintegrowanym optycznym pomiarem CO i NO), a następnie model serii 700 (z gazowymi pomiarami elektrochemicznymi) były przykładami takiego rozwiązania.

Pomiar widoczności – prześwietleniowy czy rozproszeniowy?

- Ostatnie lata przyniosły zmianę preferencji. Dominującą metodę prześwietleniową zaczęła wypierać metoda rozproszeniowa (back scatter) dzięki swojej głównej zaletce funkcjonalnej: prostocie konstrukcji (konstrukcja jednobryłowa, a więc braku konieczności osiowania), a z kolei mimo mniejszej dokładności (w odróżnieniu od metody prześwietleniowej jest to pomiar pośredni). Ponadto w przypadku pomiaru rozproszeniowego łatwiej jest zabezpieczyć się przed wpływem mgły na pomiar widoczności (pomiar odbywa się w komorze, która może być grzana). W systemie Codela tę metodę pomiaru reprezentuje seria 900 ze zintegrowanymi elektrochemicznymi pomiarami gazowymi i grzaniem komory pomiarowej w standardzie.

Pomiar prędkości i kierunku przepływu powietrza

- Pomiar prędkości powietrza pozwala na optymalizację prędkości pracy wentylatorów (oszczędność energii)
- ... ale przede wszystkim zapewniają optymalny rozpływ powietrza w stanach awaryjnych (np. podczas pożaru).

Pomiar prędkości i kierunku przepływu powietrza – punktowy czy liniowy?

- Powszechnie stosowaną techniką pomiaru prędkości przepływu powietrza jest metoda ultradźwiękowa wykorzystująca zjawisko Dopplera.
- Najbardziej uniwersalnym rozwiązaniem jest pomiar liniowy na szerokości nawy tunelu. Czujniki po przeciwnych stronach nawy rozmieszczone są pod kątem zazwyczaj 45° do osi tunelu.
- Taki pomiar zapewnia rzeczywiste uśrednienie wartości mierzonej na całej szerokości tunelu.

Pomiar prędkości i kierunku przepływu powietrza – punktowy czy liniowy?

- Alternatywą jest pomiar punktowy. Jego zaletą jest jednoelementowa konstrukcja, a więc łatwość montażu i uruchomienia (nie są wymagane żadne czynności regulacyjne) oraz niska cena, natomiast wskazanie punktowe, zwłaszcza w tunelu o ruchu dwukierunkowym może nie być miarodajne dla całej szerokości tunelu
- Są jednak przypadki gdy takie rozwiązanie jest jedynym możliwym, np. w tunelach kolejowych, gdzie może brakować miejsca na zabudowę przyrządu z uwagi na małą różnicę między skrajnią budowli a skrajnią taboru.
- Drugim przykładem może brak możliwości zabudowy głowic na przeciwległych ścianach tunelu albo brak możliwości jednoczesnego dostępu serwisowego do obu ścian tunelu.

Na kolejnych slajdach przedstawimy przykłady rozwiązań z miernikami Codel International w polskich tunelach, pokazujących ewolucję rozwiązań technicznych w ostatniej dekadzie.

- Obecnie Codel International oferuje szeroką gamę mierników umożliwiających dobór rozwiązań w każdej technicznie możliwej opcji
- Dobór mierników może być dokonany zgodnie z obecnymi i przyszłymi wymaganiami legislacyjnymi (zarówno międzynarodowymi jak i lokalnymi) oraz preferencjami poszczególnych inwestorów.

Wybrane przykłady projektów tunelowych w Polsce z miernikami systemu TunnelTech Codela

- Tunel w ciągu Drogowej Trasy Średnicowej w Katowicach (pod rondem Gen. Jerzego Ziętka)
- Tunel w ciągu Drogowej Trasy Średnicowej w Gliwicach
- Tunel w ciągu Drogi S2 pod Ursynowem (Południowa Obwodnica Warszawy)
- Tunele Łagiewnickie w Krakowie
- Tunel pod Świną w ciągu Drogi S3 w Świnoujściu

Tunel DTS pod Rondem Gen. Ziętka

- Zlokalizowany pod rondem Generała Ziętka w Katowicach w ciągu Drogowej Trasy Średnicowej(DTS)
- Dwunawowy, długość 650m (każda z naw)
- Tunel oddany w 2006r.
- TunnelTech 201 (CO/NO/przejrzystość) – 6 kpl.
- Aparatura Codel International uruchomiona w latach 2011 – 2013 (zastąpiła aparaturę innego producenta)

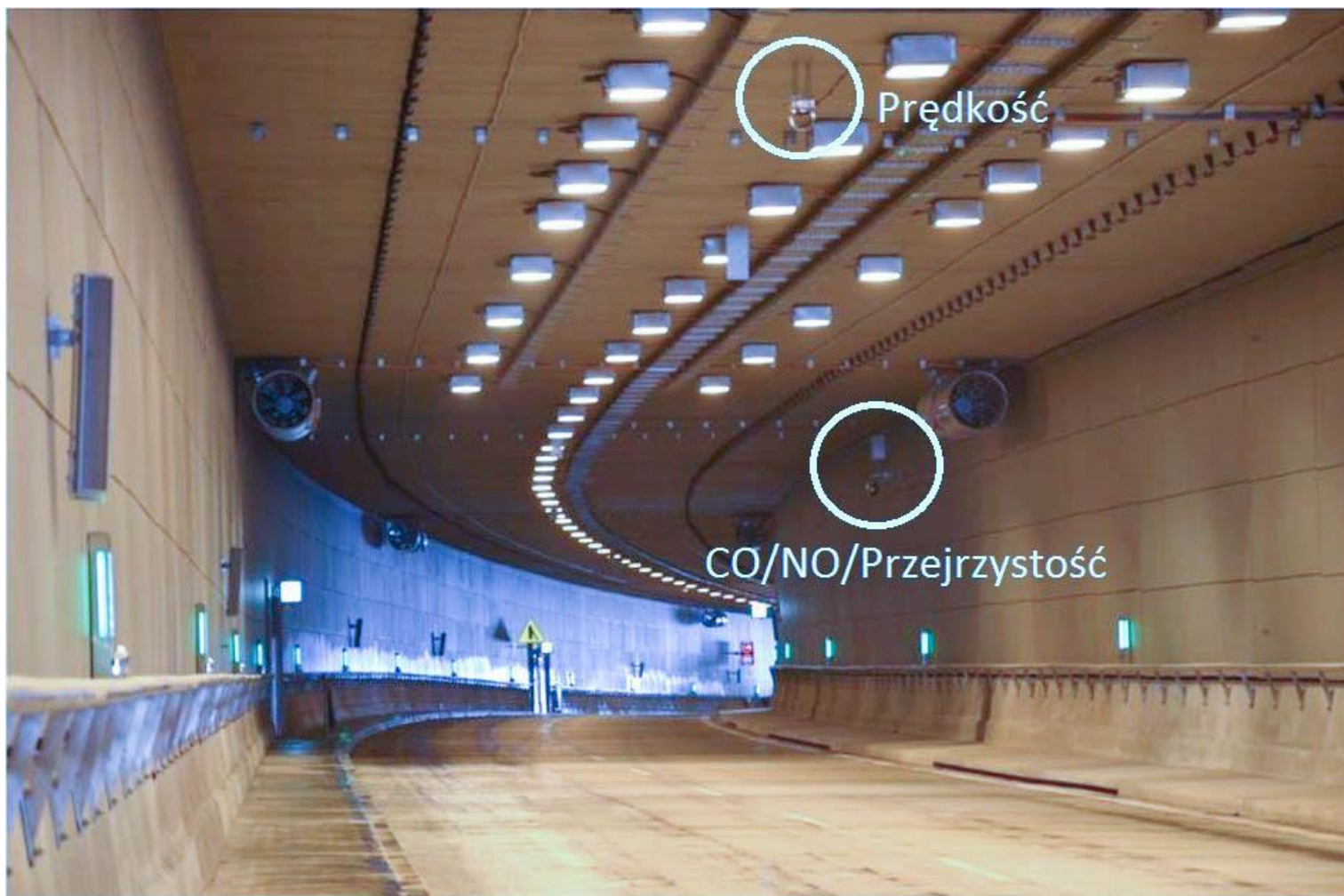
Tunel DTS pod Rondem Gen. Ziętka



Tunel w ciągu Drogowej Trasy Średnicowej w Gliwicach

- Zlokalizowany pod centrum Gliwic
- Dwunawowy, długość ok. 500m (każda z naw)
- TunnelTech 201 (CO/NO/przejrzystość) – 6 kpl.
- TunnelTech 302 (prędkość i kierunek powietrza) 10 kpl.
- Obudowy ze stali tytanowej (316Ti/1.4571) – wymóg inwestora
- Uruchomienie nastąpiło w 2016 roku

Tunel w ciągu Drogowej Trasy Średnicowej w Gliwicach



Tunel S2 pod Ursynowem

- Zlokalizowany pod Ursynowem w ciągu Południowej Obwodnicy Warszawy (Trasa S2)
- Dwunawowy, długość 2365m (każda z naw)
- TunnelTech 201 (CO/NO/przejrzystość) – 10 kpl.
- TunnelTech 505 (NO₂) – 10 kpl.
- TunnelTech 801 (prędkość i kierunek powietrza) 10 kpl.
- Uruchomiony w 2021 roku

Tunel S2 pod Ursynowem



Tunel S2 pod Ursynowem



Tunel S2 pod Ursynowem



Tunele na Trasie Łagiewnickiej

- Aparatura Codel International zainstalowana w trzech dwunawowych tunelach drogowych o długości każdej nawy ok. 520m, ok. 620m i ok. 200m
- TunnelTech 201 (CO/NO/przejrzystość) – 14 kpl.
- Uruchomiony w 2022 roku

Tunele na Trasie Łagiewnickiej



Tunel pod Świną w ciągu Drogi S3 w Świnoujściu

- Jednonawowy tunel długości 1440m
- Najgłębszy punkt 38m pod poziomem Świny
- TunnelTech 9xx (CO/NO/NO2/przejrzystość) – 2 kpl.
- TunnelTech 9xx (przejrzystość) 3 kpl.
- TunnelTech 801 (prędkość i kierunek powietrza) – 3 kpl.
- Projekt w realizacji, dostawa zrealizowana w 2022 roku, uruchomienie planowane na przełomie I i II kwartału 2023 roku.

Przykład konfiguracji z aparaturą najnowszej generacji

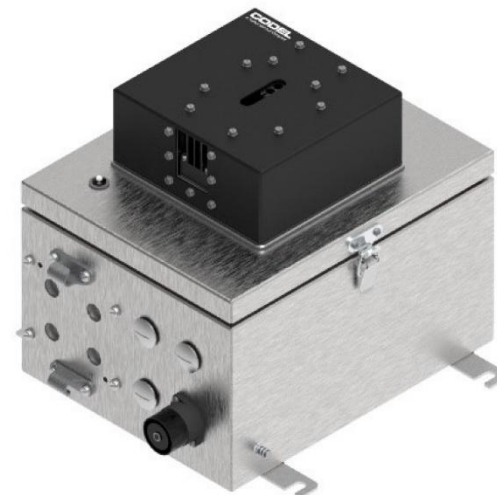


Tunel pod Świną w ciągu Drogi S3 w Świnoujściu



Rozwiązanie na dziś i najbliższe lata (na przykładzie Codela)

- Pomiar CO/NO₂
(elektrochemiczny),
widoczności(rozproszeniowy)
TunnelTech serii 900
- **Alternatywa:** Pomiar CO/NO₂
(elektrochemiczny),
widoczności(prześwietleniowy)
TunnelTech serii 700



Rozwiązanie na dziś i najbliższe lata (na przykładzie Codela)

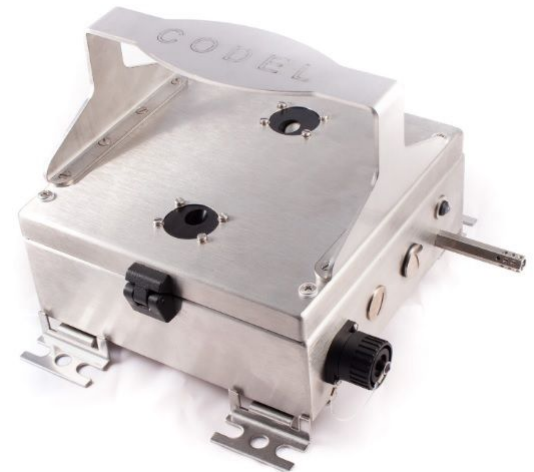
- Pomiar prędkości i kierunku
(ultradźwiękowy liniowy)

TunnelTech 801



- Alternatywa:
Pomiar prędkości i kierunku
(ultradźwiękowy punktowy)

TunnelTech 305



Kierunki dalszej ewolucji systemów monitoringu atmosfery w tunelach

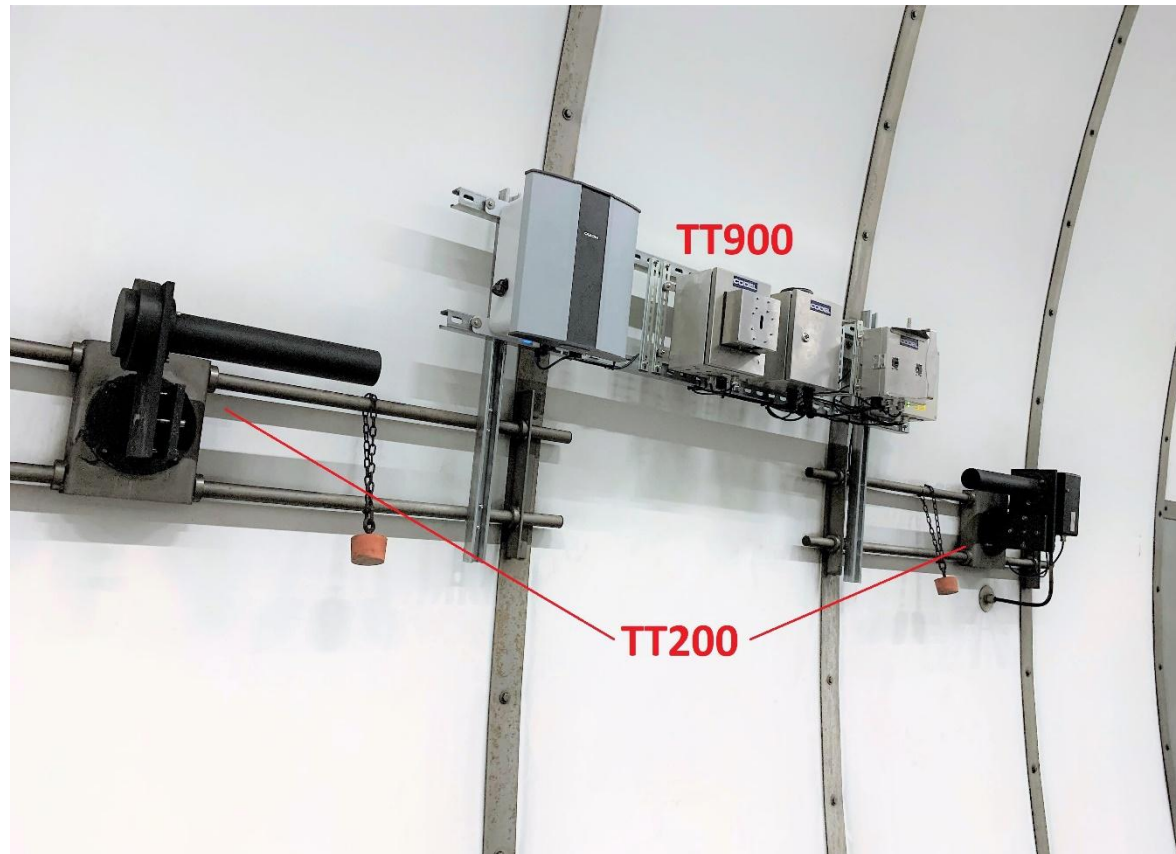
Należy oczekiwać zmiany w filozofii pomiarów atmosfery w tunelach, manifestującej się w zmniejszeniu znaczenia CO i widoczności jako najbardziej uciążliwych kryteriów zanieczyszczenia oraz w jednoczesnym podkreśleniu znaczenia NO₂ i cząstek stałych (PM) jako kluczowych zmiennych określających jakość powietrza w tunelach.

Kierunki dalszej ewolucji systemów monitoringu atmosfery w tunelach

Codel jest świadomy tego trendu i pracuje nad koncepcją przyrządu który będzie w stanie mierzyć poszczególne frakcje pyłu zawieszonego (PM10 i PM2,5 – ale i przyszłościowy wskaźnik PM1). Przyrząd powinien nie tylko mierzyć poszczególne frakcje, ale i dawać możliwość weryfikacji wskazań, co jest dodatkowym wyzwaniem dla laboratoriów, które w przyszłości będą się tym zajmować zgodnie z wymaganiami przyszłej normy EN 50545-2. Stanowisko testowe Codela w jednym z tuneli brytyjskich pokazuje rysunek 15 na następnej stronie. Na tym stanowisku testowany był m.in. miernik serii TT900, a do porównania służył znany z kilku tuneli w Polsce przyrząd TT201 mierzący CO, NO i przejrzystość:



Kierunki dalszej ewolucji systemów monitoringu atmosfery w tunelach



Dziękujemy za uwagę

**Zapraszamy na rozmowę podczas Forum
i do odwiedzenia naszej strony internetowej**

www.pentol.pl

lub do kontaktu z naszym biurem w Krakowie

Tel. 12 686 36 86, E-mail pentol@pentol.pl

