



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH**

DYSCYPLINA INŻYNIERIA ŚRODOWIKSA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

## **ROZPRAWA DOKTORSKA**

Analiza rozptyłu powietrza w sieci wentylacyjnej  
na podstawie badań symulacyjnych  
i eksperymentalnych z wykorzystaniem  
oprogramowania VentSim.

Autor: Andrzej Ryszard Szmuk

Promotor rozprawy: Prof. dr hab. inż. Marek Borowski  
Promotor pomocniczy: dr inż. Zbigniew Kuczera

Praca wykonana: AGH, WILiGZ

Kraków, 2025





AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**FIELD OF SCIENCE ENGINEERING AND TECHNOLOGY**

SCIENTIFIC DISCIPLINE ENVIRONMENTAL ENGINEERING,  
MINING AND ENERGY

## **DOCTORAL DISSERTATION**

Analysis of air distribution in the ventilation system  
based on experimental and simulation studies  
using software VentSim.

Author: Andrzej Ryszard Szmuk

First supervisor: Prof. DSc, Eng. Marek Borowski

Second supervisor or Auxiliary supervisor: PhD, Eng. Zbigniew Kuczera

Completed at: AGH, WILiGZ

Kraków, 2025





*Dziękuję Dyrekcji kopalni oraz kolegą i koleżanką z JSW S.A. za okazaną mi życzliwość,  
wsparcie oraz stworzenie warunków sprzyjających realizacji mojej pracy doktorskiej.*

*Możliwość prowadzenia badań w tak sprzyjającym środowisku  
była dla mnie niezwykle pomocna.*

*Pragnę wyrazić moją głęboką wdzięczność  
Panu Profesorowi dr hab. inż. Markowi Borowskiemu,*

*Panu dr inż. Zbigniewowi Kuczerze oraz*

*Pani dr inż. Aleksandrze Burczyk*

*za życzliwe wsparcie, cenne wskazówki oraz merytoryczne uwagi, które znacząco  
przyczyniły się do jakości i kształtu tej pracy.*

*Szczególnie pragnę podziękować mojej żonie za jej nieocenione wsparcie, cierpliwość  
i wiarę we mnie w trakcie całej drogi prowadzącej do ukończenia tej pracy.*

*Dziękuję również moim dzieciom za ich radość, uśmiech i miłość,  
które dodawały mi energii.*

Szmuk Andrzej



## Spis treści

|                                                                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Wprowadzenie .....                                                                                                                                             | 4  |
| 1.1. Uzasadnienie wyboru tematu.....                                                                                                                              | 4  |
| 1.2. Teza i cel pracy doktorskiej .....                                                                                                                           | 5  |
| 1.3. Metody badawcze .....                                                                                                                                        | 6  |
| 1.4. Zakres pracy.....                                                                                                                                            | 6  |
| 2. Przegląd literatury i stan wiedzy.....                                                                                                                         | 8  |
| 2.1. Przegląd literatury dotyczącej zagadnienia wentylacji kopalń .....                                                                                           | 8  |
| 2.2. Teoria rozprężu powietrza w sieciach wentylacyjnych .....                                                                                                    | 12 |
| 2.3. Oprogramowania badań wentylacyjnych .....                                                                                                                    | 9  |
| 2.4. Wykorzystanie oprogramowania VentSim w badaniach wentylacyjnych .....                                                                                        | 14 |
| 3. Wyznaczenie dynamiki zmian fizyki atmosfery w celu wyznaczenia wartości parametrów powietrza na wlocie do kopalni .....                                        | 22 |
| 3.1. Definicja problemu .....                                                                                                                                     | 22 |
| 3.2. Metodyka badań parametrów fizyki atmosfery .....                                                                                                             | 25 |
| 3.2.1. Badanie A – Metoda bezpośrednich pomiarów: ciśnienia barometrycznego, temperatury suchej, wilgotności względnej na wlocie do jednej z kopalń JSW S.A. .... | 26 |
| 3.2.2 Zestawienie otrzymanych wyników dla zmian ciśnienia atmosferycznego .....                                                                                   | 29 |
| 3.2.3 Zestawienie otrzymanych wyników zmian temperatury suchej .....                                                                                              | 37 |
| 3.2.4 Zestawienie otrzymanych wyników dla wilgotności względnej .....                                                                                             | 42 |
| 3.2.5 Podsumowania otrzymanych wyników w Badaniu A .....                                                                                                          | 48 |
| 3.2.6.Badanie B – Metoda analizy dynamiki zmian parametrów atmosferycznych na podstawie danych archiwalnych portalu meteoblue.com.....                            | 67 |
| 3.2.7 Analiza wyników - Badanie B .....                                                                                                                           | 51 |
| 3.3. Wnioski z porównania wyników badania A i B .....                                                                                                             | 64 |
| 4. Wyznaczenie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej kopalni .....                                                                                    | 66 |
| 4.1. Definicja problemu .....                                                                                                                                     | 66 |
| 4.2. Metodyka badawcza .....                                                                                                                                      | 67 |
| 4.2.1. Badanie C - Metoda wyznaczenia dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej w jednej z kopalń JSW S.A. ....                                           | 67 |
| 4.2.2. Analiza wyników - Badanie C .....                                                                                                                          | 71 |
| 4.2.3. Badanie D - Metoda badania stanu potencjałów sieci wentylacyjnej w czasie rzeczywistym .....                                                               | 79 |
| 4.2.3. Analiza wyników - Badanie D .....                                                                                                                          | 87 |
| 4.3. Wnioski z porównania wyników badania C i D .....                                                                                                             | 94 |
| 5. Wyznaczenie współczynników oporu aerodynamicznego w typowych wyrobiskach górniczych.....                                                                       | 95 |
| 5.1. Definicja problemu .....                                                                                                                                     | 95 |

|        |                                                                                                                                                                                    |     |
|--------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2.   | Metodyka badawcza .....                                                                                                                                                            | 98  |
| 5.2.1. | Badanie E – Metoda statystyczna wyznaczenia współczynników oporu dla typowych wyrobisk w JSW S.A. na podstawie badań sieci wentylacyjnych .....                                    | 98  |
| 5.2.2. | Analiza wyników - Badanie E .....                                                                                                                                                  | 102 |
| 5.2.3. | Badanie F - Metoda odwzorowania sieci wentylacyjnej kopalni w oprogramowaniu VentSim z wykorzystaniem wyznaczonych współczynników oporu w badaniu E .....                          | 128 |
| 5.2.4. | Analiza wyników - Badanie F .....                                                                                                                                                  | 135 |
| 5.3.   | Wnioski z porównania wyników badań E i F .....                                                                                                                                     | 143 |
| 6.     | Nowa metoda budowy modelu wentylacyjnego kopalni w oparciu o skanowanie laserowe .....                                                                                             | 146 |
| 6.1.   | Definicja problemu .....                                                                                                                                                           | 146 |
| 6.2.   | Opracowanie nowej metody budowy modelu sieci wentylacyjnej .....                                                                                                                   | 147 |
| 6.3.   | Matematyczny opis nowej metody .....                                                                                                                                               | 148 |
| 6.4.   | Opis nowej metody budowy modelu wentylacyjnego 3D w oparciu o skanowanie laserowe .....                                                                                            | 152 |
| 6.5.   | Sprawdzenie działania algorytmu budowy modelu wentylacyjnego w nowej metodzie .....                                                                                                | 161 |
| 6.6.   | Badanie G - Metoda budowy szczegółowego modelu wentylacyjnego fragmentu kopalni w oparciu o skanowanie laserowe bocznic wentylacyjnej i integracja z oprogramowaniem VentSim ..... | 167 |
| 6.7.   | Analiza wyników - Badanie G .....                                                                                                                                                  | 169 |
| 6.8.   | Wnioski z badania G .....                                                                                                                                                          | 173 |
| 7.     | Integracja modelu numerycznego z systemem gazometrycznym kopalni .....                                                                                                             | 176 |
| 7.1.   | Opracowanie sposobu łączenia modelu sieci wentylacyjnej w VentSim z czujnikami gazometrycznymi JSW S.A. ....                                                                       | 176 |
| 7.2.   | Zbieranie danych pomiarowych z czujników Zefir .....                                                                                                                               | 177 |
| 7.3.   | Łączenie danych .....                                                                                                                                                              | 180 |
| 7.4.   | Wnioski z współpracy danych z czujników z modelem numerycznym sieci. ....                                                                                                          | 181 |
| 8.     | Propozycja wytycznych do budowania i walidacji modeli wentylacyjnych w podziemnych zakładach górniczych .....                                                                      | 183 |
| 9.     | Analiza poziomu błędów w wyznaczaniu spadków naporów bocznic wentylacyjnych w kopalnianej sieci wentylacyjnej .....                                                                | 187 |
| 9.1.   | Błąd obliczenia prędkości powietrza w bocznic wentylacyjnej .....                                                                                                                  | 187 |
| 9.2.   | Błąd obliczenia pola przekroju poprzecznego wyrobiska .....                                                                                                                        | 189 |
| 9.2.1. | Tradycyjna metoda pomiaru w przekroju wyrobiska .....                                                                                                                              | 189 |
| 9.2.2. | Metoda skaningu laserowego .....                                                                                                                                                   | 190 |
| 9.3.   | Błąd obliczenia spadku naporu metodą barometryczną .....                                                                                                                           | 193 |
| 9.4.   | Porównanie dokładności wyznaczenia oporów bocznic metodą barometryczną i skaningu laserowego .....                                                                                 | 195 |

|                                                                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 9.4.1. Metoda barometryczna .....                                                                                                            | 196 |
| 9.4.2. Nowa metoda w oparciu o skaninig laserowy .....                                                                                       | 196 |
| 10. Zastosowanie modeli symulacyjnych w sytuacjach awaryjnych.....                                                                           | 197 |
| 10.1. Studium przypadku wykorzystania programu VentSim w trakcie pożaru endogenicznego w jednej z kopalń JSW S.A. ....                       | 197 |
| 10.2. Porównanie wyników symulacji ze stanem faktycznym .....                                                                                | 199 |
| 10.3. Wnioski z wykorzystania symulacji w modelu numerycznym .....                                                                           | 201 |
| 11. Wdrożenie programu VentSim w kopalniach JSW S.A. oraz w CSRG S.A. w Bytomiu.....                                                         | 202 |
| 11.1. Stan wdrożenia programu VentSim w kopalniach JSW S.A.....                                                                              | 202 |
| 11.2. Rekomendacje dotyczące implementacji w JSW S.A. ....                                                                                   | 203 |
| 11.3. CSRG S.A. w Bytomiu .....                                                                                                              | 204 |
| 11.4. Możliwości zastosowania VentSim w zarządzaniu bezpieczeństwem w akcjach ratowniczych. ....                                             | 204 |
| 12. Propozycja zmian legislacyjnych w zakresie wymagania posiadania cyfrowego modelu wentylacyjnego dla podziemnych zakładów górniczych..... | 206 |
| 13. Podsumowanie i wnioski. ....                                                                                                             | 211 |
| Spis rysunków.....                                                                                                                           | 218 |
| Spis tabel.....                                                                                                                              | 223 |
| Bibliografia .....                                                                                                                           | 225 |

# 1. Wprowadzenie

## 1.1. Uzasadnienie wyboru tematu

Dokładna znajomość aktualnego przepływu i parametrów fizykochemicznych powietrza w wyrobiskach jest fundamentalna dla bezpiecznego prowadzenia robót w podziemnych zakładach górniczych, szczególnie w warunkach występowania zagrożeń naturalnych i wentylacyjnych (pożarowego, metanowego, klimatycznego, tapaniami).

Podziemne sieci wentylacyjne kopalń głębokich, zazwyczaj posiadają skomplikowaną strukturę (kilkaset bocznic wentylacyjnych, sumaryczna długość wyrobisk ponad 100km, układ bocznic szeregowo-równoległych z wstępowaniem prądów przekątnych). Często zdarza się, że sieci wentylacyjne sąsiadujących zakładów górniczych oddziałują na siebie np. poprzez występowania połączenia w zrobach poeksploatacyjnych.

Niedokładna znajomość rozptyłu powietrza, wartość potencjałów aerodynamicznych, temperatury i wilgotności czy składu atmosfery kopalnianej wpływa na poziom bezpieczeństwa załóg górniczych oraz wydobywania.

Poziom skomplikowania zarządzania (regulacją) siecią wentylacyjną rośnie wykładniczo w przypadkach powstania zagrożeń, gdzie w sposób dynamiczny zmieniają się parametry sieci (np. w czasie pożaru występowanie dymów, zmiana gęstości i temperatury czy zmiany kierunków przepływającego powietrza itp.).

Podczas akcji ratowniczej w celu badania parametrów sieci wentylacyjnej i śledzenia aktualnego jej stanu w czasie rzeczywistym, wymagają wykonania dodatkowych pomiarów w strefach zagrożenia co wiąże się z ryzykiem utraty zdrowia lub życia przez ratowników lub jest po prostu niemożliwe.

Modele numeryczne sieci wentylacyjnych tworzy się w celu ułatwienia służbą wentylacyjnym kopalń, zarządzania stanem wentylacji w kopalni (regulacja). Wadliwy model numeryczny sieci wentylacyjnej może prowadzić do błędów w planowaniu robót górniczych, niedoszacowania wpływu zagrożeń na sieć wentylacyjną, nieprawidłowe wyznaczenie dróg ewakuacji załogi i innych. W konsekwencji wpływać to może do wzrostu kosztów jednostkowych wydobywania, ograniczenia zakresu robót, a nawet ich całkowitego wstrzymania.

## 1.2. Teza i cel pracy doktorskiej

Teza pracy doktorskiej:

1. Wyznaczenie oporów aerodynamicznych bocznic wentylacyjnych w kopalniach podziemnych z zastosowaniem nowej metody obliczania współczynnika oporu wyrobiska z wykorzystaniem technologii skaningu laserowego, pozwala na zwiększenie dokładności odwzorowania sieci wentylacyjnych w modelach numerycznych.
2. Precyzyjne odwzorowanie sieci wentylacyjnych kopalń w modelach numerycznych pozwala na znaczącą poprawę bezpieczeństwa pracy oraz optymalizację sposobu przewietrzania.

Celem pracy doktorskiej jest opracowanie i walidacja metody precyzyjnego modelowania rozptyłu powietrza w sieciach wentylacyjnych kopalń głębinowych poprzez integrację wyników badań eksperymentalnych, symulacyjnych i statystycznych.

Poprawa dokładności odwzorowania sieci wentylacyjnej w modelach numerycznych zwiększa dokładność przeprowadzanych symulacji wpływających na bezpieczeństwo pracy oraz optymalizację sposobu przewietrzania kopalni podziemnej.

W celu realizacji celu pracy, przeprowadzono prace badawcze obejmujące analizę następujących problemów:

- wyznaczenie dynamiki zmian fizyki atmosfery w celu określenia wartości parametrów powietrza na wlocie do kopalni;
- wyznaczenie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej kopalni wraz z opracowaniem badania stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym;
- wyznaczenie współczynników oporu w typowych wyrobiskach górniczych w celu predykcji oporów aerodynamicznych w sieci wentylacyjnej;
- stworzenie nowego sposobu budowy modeli cyfrowych sieci wentylacyjnych z wykorzystaniem skaningu laserowego;
- opracowanie procedur budowania i walidacji modeli sieci wentylacyjnych, tak aby można było zaufać generowanym obliczeniom przy planowaniu robót górniczych i sytuacjach awaryjnych w czasie prowadzenia działań ratowniczych;

### 1.3. Metody badawcze

Poruszana w pracy tematyka jest bardzo szeroka w związku z czym zastosowano metody statystyczne, obserwacje i pomiary eksperymentalne, modelowanie numeryczne i symulacyjne oraz wykonano analizę studium przypadku wykorzystania modelu wentylacyjnego w akcji ratowniczej.

W celu realizacji celów pracy wykorzystano następujące metody badawcze:

- **Badanie A** – Metoda bezpośrednich pomiarów: ciśnienia barometrycznego, temperatury suchej, wilgotności względnej na wlocie do jednej z kopalń JSW S.A.
- **Badanie B** – Metoda analizy dynamiki zmian parametrów atmosferycznych na podstawie danych archiwalnych portalu meteoblue.com.
- **Badanie C** – Metoda wyznaczenia dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej w jednej z kopalń JSW S.A.
- **Badanie D** – Metoda badania stanu potencjałów sieci wentylacyjnej w czasie rzeczywistym.
- **Badanie E** – Metoda statystyczna wyznaczenia współczynników oporu dla typowych wyrobisk w JSW S.A. na podstawie badań sieci wentylacyjnych.
- **Badanie F** – Metoda odwzorowania sieci wentylacyjnej kopalni w oprogramowaniu VentSim z wykorzystaniem wyznaczonych współczynników oporu w badaniu E.
- **Badanie G** – Metoda budowy szczegółowego modelu wentylacyjnego fragmentu kopalni w oparciu o skanowanie laserowe bocznic wentylacyjnej i integracja z oprogramowaniem VentSim.

Metody badawcze zostały szczegółowo opisane w dalszej części pracy.

### 1.4. Zakres pracy

Praca została podzielona na kilka głównych części, które odpowiadają kolejnym etapom analizy i badań.

Rozprawa została podzielona na kilka głównych części, które odpowiadają kolejnym etapom analizy i badań. została podzielona na kilkanaście rozdziałów, które odzwierciedlają kolejne etapy prowadzonych badań i analiz. Struktura pracy została tak zaprojektowana, aby możliwie przejrzysto przedstawić zarówno podstawy teoretyczne, jak i praktyczne aspekty związane z modelowaniem i analizą systemów wentylacyjnych w podziemnych zakładach górniczych.



Wprowadzenie do tematyki pracy w rozdziale 1 obejmuje uzasadnienie wyboru problematyki badawczej, określenie celu i zakresu pracy oraz zastosowanych metod badawczych, a także przedstawia ogólną strukturę rozprawy.

Rozdział 2 zawiera przegląd literatury oraz aktualny stan wiedzy dotyczący teorii rozplywu powietrza w sieciach wentylacyjnych, metod wyznaczania oporów aerodynamicznych, modelowania geometrycznego z wykorzystaniem skanowania laserowego 3D oraz integracji modeli cyfrowych z systemami pomiarowymi. Przedstawiono również możliwości i ograniczenia programu VentSim jako narzędzia do modelowania i symulacji sieci wentylacyjnych.

Z kolei rozdziały 3 i 4 koncentrują się na analizie dynamiki zmian parametrów powietrza na wlocie do kopalni oraz podciśnienia w sieci wentylacyjnej. Zaprezentowano wyniki badań terenowych i archiwalnych oraz opracowano metodę bieżącego monitorowania stanu potencjałów aerodynamicznych w czasie rzeczywistym.

Następny rozdział 5 zawiera szczegółowe badania współczynników oporu w typowych wyrobiskach górniczych. Przedstawiono tu analizę statystyczną danych pomiarowych z wielu kopalń oraz ocenę dokładności odwzorowania sieci w modelu VentSim.

Rozdział 6 opisuje nową metodę budowy modelu wentylacyjnego w oparciu o skanowanie laserowe. W części tej przedstawiono zarówno podejście matematyczne, jak i praktyczne aspekty implementacji algorytmów, umożliwiających przetwarzanie danych przestrzennych i generowanie modeli 3D wyrobisk.

Rozdział 7 dotyczy integracji modeli numerycznych z czujnikami gazometrycznymi funkcjonującymi w kopalniach JSW S.A. Opisano sposób połączenia danych z systemów pomiarowych z symulacjami wentylacyjnymi, co pozwala na dynamiczne dostosowywanie modelu do aktualnych warunków.

Rozdział 8 zawiera propozycję procedury budowy i walidacji modeli sieci wentylacyjnych w kopalniach. Zaprezentowano tu sześciopiętowy schemat działań od budowy przestrzennego modelu, przez przypisanie oporów i wprowadzenie urządzeń, aż po aktualizację danych i integrację z systemami pomiarowymi.

Rozdział 9 stanowi studium przypadku dotyczące analizy błędów w wyznaczaniu spadków naporu w bocznicach wentylacyjnych. Porównano dokładność klasycznej metody barometrycznej z wynikami uzyskanymi na podstawie skaningu laserowego.

Rozdział 10 prezentuje zastosowanie modeli numerycznych w sytuacjach awaryjnych, na przykładzie rzeczywistego pożaru endogenicznego. Przedstawiono przebieg akcji

ratowniczej oraz oceniono przydatność modeli VentSim do wspomagania decyzji w warunkach kryzysowych.

Rozdział 11 opisuje aktualny stan wdrożenia oprogramowania VentSim w kopalniach JSW S.A. oraz w Centralnej Stacji Ratownictwa Górniczego w Bytomiu. Przedstawiono tu także rekomendacje dotyczące dalszego rozwoju i wykorzystania modeli w zarządzaniu wentylacją oraz bezpieczeństwem pracy.

Rozdział 12 zawiera propozycję zmian w przepisach prawa górniczego, zmierzających do wprowadzenia obowiązku utrzymywania aktualnych cyfrowych modeli wentylacyjnych w kopalniach, w których występują zagrożenia naturalne.

Rozdział 13 stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań i zawiera wnioski końcowe.

Wskazano na praktyczne zastosowanie wyników pracy oraz na możliwe kierunki dalszego rozwoju technologii w zakresie modelowania sieci wentylacyjnych.

Całość pracy uzupełniona została o bibliografię, a także spis rysunków i tabel, które wyjaśniają i pozwalają na zrozumienie prezentowanych zagadnień.

## **2. Przegląd literatury i stan wiedzy**

### **2.1. Przegląd literatury dotyczącej zagadnienia wentylacji kopalń**

Pierwsze wzmianki o sposobach wentylacji kopalń pojawiły się w klasycznym dziele Georgiusa Agricoli z 1556 r. [1]. Naukowe podstawy aerologii górniczej ugruntowały m.in. prace [4, 13, 14, 40, 46, 66, 81, 116, 118]. Teorię sieci wentylacyjnych, regulację i optymalizację rozpływu powietrza oraz oprogramowanie do wizualizacji sieci opisują liczne pozycje, w tym [7, 24, 29, 30, 33, 34, 35, 36, 37, 54, 90, 91, 92, 114, 134, 135, 136]. Zagadnienia symulacji CFD i modelowania przepływu przedstawiono m.in. w [8, 10, 26, 27, 50, 62, 65, 78, 99, 100, 123]. Analizę oporów przepływu wynikających z tarcia i strat miejscowych przeprowadzono w [4, 12, 25, 43, 44, 47, 64, 79, 80, 82, 83, 84, 127]. Prognozy klimatyczne, mikroklimat, wymianę ciepła oraz chłodnictwo omawiają prace [28, 67, 69, 77, 88, 101, 102, 105, 107, 110, 115, 114, 118]. Wreszcie, zastosowania sztucznej inteligencji, cyfrowych bliźniaków, grafów i „ventilation-on-demand” analizują autorzy [23, 42, 48, 59, 89, 95, 96, 119, 121, 126].

Najnowsze kierunki badań w dziedzinie wentylacji kopalń koncentrują się na integracji metod sztucznej inteligencji, nowoczesnych technik pomiarowych oraz wieloaspektowej analizy danych w celu zwiększenia dokładności modelowania i sterowania przepływem

powietrza. Coraz większe znaczenie zyskuje modelowanie oporu wentylacyjnego z wykorzystaniem algorytmów AI, w tym metod głębokiego uczenia i sztucznej inteligencji (XAI), pozwalających na lepszą interpretowalność wyników i ich adaptację do różnych warunków eksploatacyjnych [42, 48, 95, 96, 119, 126]. W obszarze zarządzania powietrzem w kopalni rozwijane są systemy ventilation-on-demand (VoD) oparte na układach neuro-fuzzy, które umożliwiają dynamiczne dopasowanie rozprywu powietrza do aktualnych potrzeb produkcyjnych i poziomu zagrożeń. [89, 95, 96, 121]. Równolegle prowadzone są prace nad wykorzystaniem ensemble learning w prognozowaniu współczynnika tarcia, co pozwala na poprawę dokładności modeli poprzez łączenie wyników wielu algorytmów predykcyjnych [119, 126].

Postęp widoczny jest także w diagnostyce sieci wentylacyjnych, gdzie stosuje się hybrydowe modele, takie jak DBN-ELM (Deep Belief Network – Extreme Learning Machine), do wczesnego wykrywania anomalii pracy układu [124, 125]. Dodatkowo opracowywane są metody redukcji szumów w danych różnicowo-ciśnieniowych, m.in. z użyciem filtrów Savitzky–Golay czy dekompozycji EEMD (Ensemble Empirical Mode Decomposition), co pozwala na zwiększenie wiarygodności pomiarów [122]. W zakresie bezpieczeństwa w sytuacjach kryzysowych prowadzone są badania nad rewersyjnym przewietrzaniem wyrobisk w warunkach awaryjnych, które (w kopalniach bez zagrożenia metanowego), mogłyby poprawić skuteczność ewakuacji lub izolacji zagrożonych rejonów [125].

Znaczącą rolę w nowoczesnych systemach zarządzania wentylacją odgrywają zintegrowane systemy wspomagania decyzji oparte na grafach wiedzy, umożliwiające kompleksową analizę zależności pomiędzy elementami sieci i dynamiczne planowaniem działań [126]. Równocześnie rozwija się metodologia analizy niepewności w cyfrowych bliźniakach, pozwalająca na probabilistyczną ocenę dokładności prognoz i uwzględnienie błędów pomiarowych w modelach [22,58].

W obszarze pozyskiwania danych geometrycznych coraz większe znaczenie ma skanowanie laserowe 3D oraz techniki SLAM (Simultaneous Localization and Mapping), które umożliwiają szybkie, bezkontaktowe i precyzyjne odwzorowanie geometrii wyrobisk górniczych [89, 97, 114]. Połączenie tych danych z symulacjami CFD oraz modelami numerycznymi pozwala na uzyskanie spójnego obrazu sieci wentylacyjnej, zwiększając efektywność przewietrzania i poprawiając bezpieczeństwo pracy.

Integracja powyższych kierunków badań wskazuje, że przyszłość wentylacji kopalń opierać się będzie na synergii technologii pomiarowych, modelowania numerycznego

i algorytmów AI, wspieranych przez cyfrowe bliźniaki zdolne do pracy w czasie rzeczywistym i adaptacji do zmiennych warunków eksploatacyjnych.

W polskim górnictwie wymagania w zakresie wentylacji kopalń regulują akty prawne, ustawa Prawo geologiczne i górnicze oraz trzy rozporządzenia dotyczące zagrożeń naturalnych, prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych i ratownictwa górniczego [128-131].

Po analizie przeprowadzonej literatury i stanu wiedzy wyznaczono kilka kluczowych problemów badawczych, które wciąż pozostają aktualne i wymagają rozwiązania, a dotyczą przede wszystkim: niedokładności odwzorowania oporów bocznic wentylacyjnych w modelach numerycznych w porównaniu do wartości rzeczywistych; ograniczeń stosowanej obecnie metody barometrycznej i jej dużej niepewności pomiarowej; braku długoczasowych danych kalibracyjnych dla modeli turbulentnych (LES/DES); niskiej precyzji pomiarów anemometrycznych przy małych prędkościach przepływu; braku skalowalnych rozwiązań umożliwiających pełne odwzorowanie geometrii wyrobisk na podstawie skaningu 3D; niepełnego uwzględnienia w modelach rzeczywistych warunków transportu ciepła, masy i wilgoci; trudności z wdrażaniem symulacji w czasie rzeczywistym z uwagi na ograniczenia obliczeniowe oraz niedostatecznego poziomu integracji modeli ML i AI z wiedzą inżynierską; a także potrzeby rozwinięcia funkcjonalnych i adaptacyjnych cyfrowych bliźniaków kopalni wspomagających zarządzanie siecią wentylacyjną w warunkach awaryjnych.

W praktyce utrzymuje się znaczna rozbieżność pomiędzy oporami bocznic obliczanymi w modelach, a wartościami rzeczywistymi. Dodatkowo poziom wyznaczanych współczynników oporu wykazuje się dużą zmiennością co może powodować znaczne błędy. Nie zidentyfikowano dotąd w publikacjach ujednoliconych wartości typowych współczynników chropowatości dla charakterystycznych wyrobisk eksploatowanych w kopalniach JSW S.A. [40, 66, 81, 90, 93, 113].

Barometryczna metoda badania sieci wentylacyjnej może być obciążona bardzo dużą niepewnością, ponieważ na jej dokładność wpływają m.in. fluktuacje ciśnienia atmosferycznego, ruch maszyn i urządzeń pod ziemią, pulsacje sieci i inne. [15, 55, 56, 83, 115].

Obecnie stosowane symulacje nie w pełni odwzorowują rzeczywistą strukturę turbulentnego przepływu (lokalne symulacje), zwłaszcza w strefach przyociosowych, ponieważ zazwyczaj wykonywane są na modelach bez faktycznego wyposażenia wyrobiska (nie na podstawie pełnego skanu) oraz brakuje długookresowych pomiarów referencyjnych niezbędnych do kalibracji modeli LES/DES [9, 10, 99, 127].

Działanie termoanemometrów staje się niewystarczająco dokładne przy prędkościach niższych niż 0,5 m/s. Aby możliwe było dokładne odwzorowanie rzeczywistego pola prędkości w wyrobiskach górniczych, szczególnie w strefach o silnej turbulentności przepływu. Takie układy powinny umożliwiać rejestrację zmian chwilowych w wielu punktach jednocześnie, co pozwoliłoby na analizę dynamicznych zjawisk przepływowych i poprawę jakości danych wykorzystywanych do kalibracji modeli numerycznych. Jednak te rozwiązanie stosowane jest tylko dla szczegółowych analiz wycinka sieci.

Nowe procedury kalibracyjne powinny uwzględniać zarówno zmienność czasową, jak i przestrzenną parametrów przepływu, z uwzględnieniem wpływu warunków brzegowych oraz zakłóceń wynikających z obecności maszyn, obudowy i innych elementów infrastruktury kopalnianej. [86, 99, 100].

Zastosowania skanowania 3D ograniczają się do krótkich odcinków wyrobisk, gdyż brakuje skalowalnych testów in-situ, automatycznej filtracji chmur punktów, niezawodnej nawigacji UAV bez GPS i intuicyjnych interfejsów do analizy wyników CFD. Ponadto zastosowanie w chwili obecnej metody CFD w skali całej kopalni wydaje się być poza zasięgiem możliwości obliczeniowych komputerów klasy PC [9, 26, 97, 99, 114].

Modele uczenia maszynowego (machine learning, ML) stale się rozwijają, jednak bez odpowiednich danych wejściowych (w tym o wykonane skanowaniem laserowym) trudno o praktyczną aplikację, stąd niezbędne jest integrowanie rzeczywistej informacji z dołu kopalni z technikami wyjaśnionej sztucznej inteligencji (explainable AI, XAI) [22].

Prototypy digital-twinów nie analizują pełnego łańcucha błędów pomiarowych ani nie wspierają samoczynnej detekcji usterek, dlatego konieczne jest opracowanie formalizmów probabilistycznych i implementacja algorytmów głębokiego uczenia do diagnostyki online [23].

Zidentyfikowane problemy wskazują, że pomimo upływu około 150 lat od czasu badań nad sieciami kopalń J.J. Atkinson'a, zagadnienie dokładności wyznaczenia oporów bocznic wentylacyjnych jest ciągle bardzo istotny.

Wraz z rozwojem technologii AI, skaningu laserowego i wielowariantowej analizy danych zachodzi konieczność dalszych badań zmierzających do opracowania szybkich, automatycznych metod badania i wizualizacji wyników pomiarów integrując modele numerycznych z czujnikami gazometrii automatycznej kopalń.

Proponowane aktualnie metody CFD są jak na dzisiejsze moce obliczeniowe komputerów zbyt wolne. Dlatego należy opracować nową metodę skaningu laserowego,

która będzie generować dokładne współczynniki oporu i geometrię wyrobiska, wykorzystywane w aktualnych modelach obliczeniowych sieci (np. VentSim).

Wraz z rozwojem techniki skaningu i metod obliczeniowych, wydaje się konieczne zweryfikować podejście do wyznaczenia oporów sieci metoda barometryczną, tak aby wykorzystać jej największe zalety (np. szyby, wyrobiska z dużymi spadkami naporu) przez wydłużenie czasu badania (zwiększenie dokładności). A w pozostałych częściach kopalni wykorzystać nowe technologie skaningu laserowego lub ciągły monitoring czujnikami.

Takie podejście umożliwi przejście od statycznych analiz do cyfrowych bliźniaków kopalni wspierających decyzje w czasie akcji ratowniczych czy planowania robót.

Przegląd obowiązujących aktów prawnych ujawnił także ich częściową nieadekwatność względem analizowanego zagadnienia i aktualnego stanu wiedzy i techniki.

Z uwagi na wysokie natężenie zagrożeń naturalnych, takich jak metanowe, pożarowe i klimatyczne, w zakładach górniczych należących do JSW S.A., prowadzenie badań w tym zakresie jest nie tylko zasadne, lecz wręcz konieczne z punktu widzenia bezpieczeństwa pracy, efektywności eksploatacji oraz przyszłego rozwoju regulacji techniczno-prawnych w górnictwie podziemnym.

## **2.2. Teoria rozplywu powietrza w sieciach wentylacyjnych**

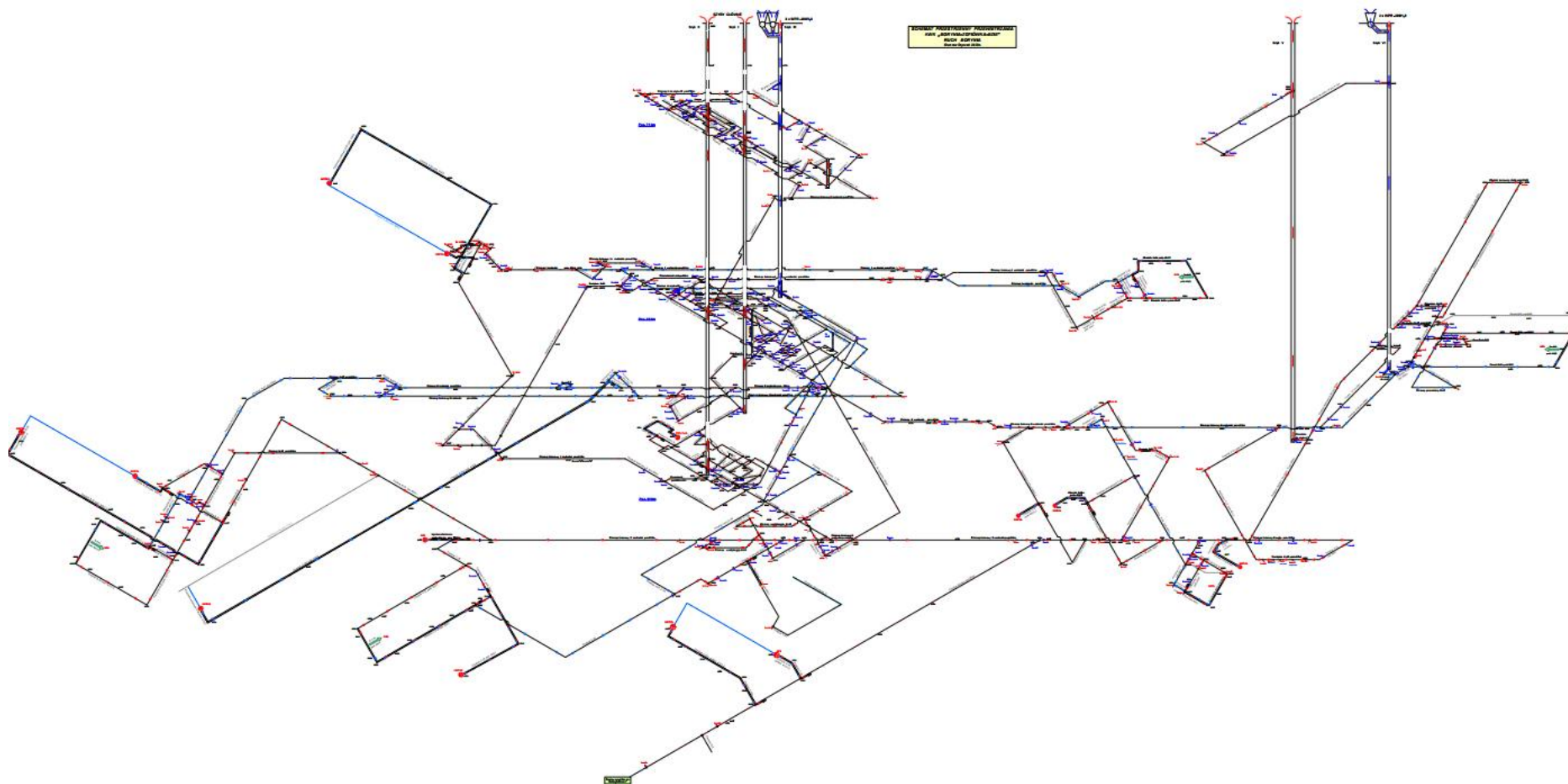
Podstawowe równania mechaniki płynów opisujące typowe zagadnienia związane z przepływem powietrza to:

- równanie ciągłości;
- równanie ruchu;
- równanie energii;
- równanie stanu gazu.

Najczęściej, w wentylacji kopalń, przyjmuje się przy tym założenia upraszczające, że przepływ jest jednowymiarowy. Posługujemy się przy tym pojęciem prędkości średniej. Prawie zawsze jednak uwzględnia się, że powietrze jest płynem rzeczywistym, a więc uwzględnia się opory ruchu.

Podział systemów wentylacyjnych: nierozgałęzione - składają się z elementów wentylacyjnych połączonych szeregowo; rozgałęzione - dzielimy na normalne i przekątne. Najczęściej spotykany system normalny złożony składa się z elementów połączonych szeregowo-równoległe (mieszany).

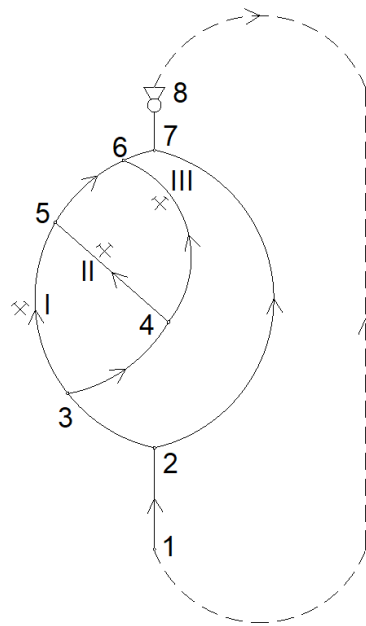
W celu zobrazowania złożonej sieci wentylacyjnej oraz w celu ułatwienia obliczeń, kopalniane sieci wentylacyjne przedstawia się na: mapach pokładowych, poziomowych (część systemu wentylacyjnego); schematach przestrzennych (Rys. 1);



**Rys. 1** Schemat przestrzenny w rzucie izometrycznym kopalni

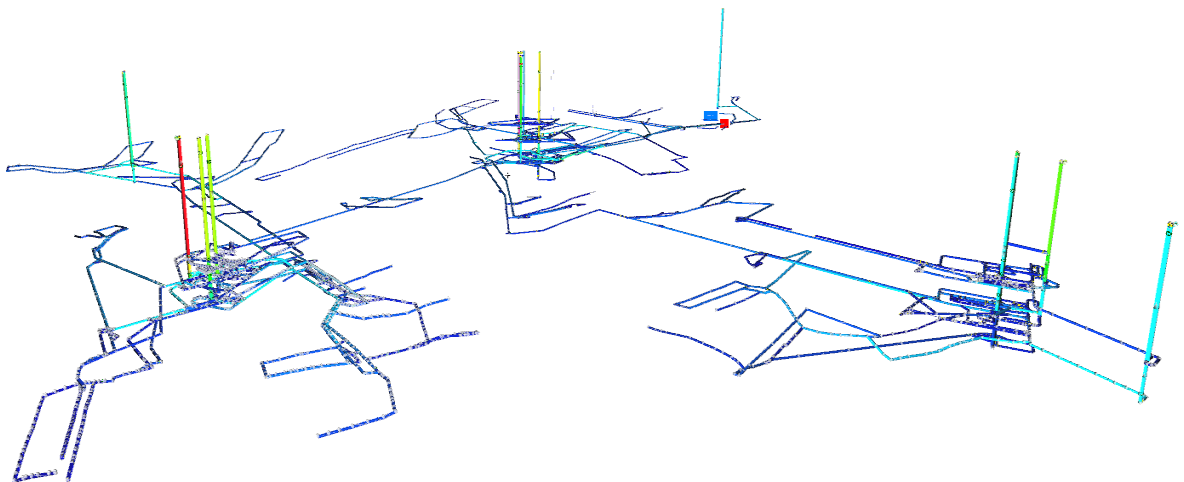


schematach kanonicznych (Rys.2);



**Rys. 2** Schemat kanoniczny kopalni

modelach 3D w skali 1:1. (Rys.3);



**Rys. 3** Model 3D kopalni w oprogramowaniu VentSim.

Podstawowym zadaniem w analizie systemu wentylacyjnego jest wyznaczenie kierunku i ilości przepływającego powietrza we wszystkich bocznicach oraz określenie oporu wypadkowego sieci wentylacyjnej.

W przypadku systemów przekątnych jedynym sposobem obliczenia sieci jest zastosowanie metod przybliżonych, takich jak:

- Metoda Newtona, która polega na rozwiązywaniu układów równań algebraicznych wyższych stopni za pomocą przybliżeń. [81]
- Metoda H. Crossa, powszechnie stosowana metoda wykorzystywana przez F. Hinsley'a i D. Scotta do obliczeń sieci wentylacyjnych. [81]

Analiza sieci wentylacyjnej obejmuje:

- wyznaczenie oporów aerodynamicznych wyrobisk;
- określenie charakterystyki źródeł energii;
- wyznaczenie oporów lokalnych (np. tamy wentylacyjne);
- określenie ilości przepływającego powietrza;
- identyfikację rodzaju i parametrów charakteryzujących zaburzenia w sieci wentylacyjnej.

W celu wyznaczenia oporów aerodynamicznych wyrobisk górniczych, służby wentylacyjne wykonują badania sieci. Głównymi metodami wyznaczenia oporów aerodynamicznych oraz spadków naporu są pomiary: bezpośrednie (na podstawie różnicy ciśnień wskazań np. mikrobarometrów) oraz pośrednie (np. w wyniku wykonania zdjęcia potencjalnego kopalni w węzłach za pomocą barometrów).

### **Wyznaczenie straty naporu na podstawie różnicy potencjałów izentropowych**

W zapisie sieci wentylacyjnej zachowane są incydencje pomiędzy poszczególnymi węzłami sieci (połączenia te stanowią bocznicę sieci), a każdemu punktowi przyporządkowany jest odpowiedni potencjał aerodynamiczny. Potencjał izentropowy powietrza ( $h$ ) w węźle sieci o wysokości niwelacyjnej ( $z$ ) określa się w stosunku do potencjału zerowego występującego na zrębie szybu wdechowego o wysokości  $z_0$ . Potencjał ten definiuje równanie: [104]

$$h = p - p_s \quad (1)$$

gdzie:

$p$  - ciśnienie powietrza kopalnianego pod wpływem depresji wentylatora głównego i depresji naturalnej [ $N/m^2$ ],

$p_s$  - ciśnienie powietrza suchego tworzącego atmosferę uwarstwioną izentropowo w sieci, które występowałoby w danym węźle bez działania wentylatora głównego i depresji naturalnej [ $N/m^2$ ].

Ciśnienie powietrza suchego oblicza się ze wzoru:

$$p_s = p_0 \cdot \left( 1 + \frac{g \cdot (z_0 - z)}{c_p \cdot T_v} \right)^{\frac{H}{H-1}} \quad (2)$$

lub po wprowadzeniu oznaczeń:

$$z = \frac{g \cdot (z_0 - z)}{c_p \cdot T_v} \quad (2)$$

$$H = 1,4 \quad (3)$$

$$\frac{H}{H-1} = 3,5 \quad (4)$$

$$y = (1 + z)^{3,5} \quad (5)$$

$$p_s = p_o \cdot y \quad (6)$$

gdzie:

$p_o$  – ciśnienie powietrza atmosferycznego w przekroju zrębu szybu wdechowego, Pa

$z_o$  – wysokość niwelacyjna przekroju zrębu szybu wdechowego, m

$z$  – wysokość niwelacyjna środka przekroju bocznego, dla której wyznacza się potencjał, m

$g$  – przyspieszenie ziemskie,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

$C_p$  – ciepło właściwe powietrza suchego przy stałym ciśnieniu,  $C_p = 1005 \text{ J/kg deg}$ ;

$H$  - wykładnik przemiany politropowej powietrza suchego,  $H = 1,4$ ;

$T_v$  – temperatura wirtualna powietrza atmosferycznego w przekroju zrębu szybu wdechowego, K.

Temperaturę wirtualną określa zależność:

$$T_v = (1 + 0,6 \cdot X) \cdot T \quad (7)$$

gdzie:

$T$  – temperatura bezwzględna powietrza atmosferycznego w przekroju zrębu szybu wdechowego,  $T = t_s + 273$ , K

$t_s$  – temperatura termometru suchego na zrębie szybu wdechowego, °C;

$X$  - wilgotność właściwa powietrza atmosferycznego, [kg/kg p.s]:

$$X = 0,622 \cdot \frac{e}{p - e} \quad (8)$$

$e$  - ciśnienie parcjale pary wodnej zawartej w powietrzu, Pa.

Dodatkowo dla obliczeń depresji cieplnej konieczne jest obliczenie gęstości powietrza wilgotnego wg zależności:

$$\rho = \frac{0,00348}{T} \cdot (p - 0,378 \cdot e) \quad (9)$$

gdzie:

$\rho$  – gęstość powietrza,  $\text{kg/m}^3$

Znając różnicę potencjałów  $h$  oraz ilość powietrza, korzystając z tzw. kwadratowego prawa zależności oporów:

$$R = \frac{\Delta p}{\dot{V}^2} \quad (10)$$

gdzie:

$\Delta p = h_i - h_{i+1}$  – różnica potencjałów między węzłami sieci, Pa

$R$  – opór właściwy (zastępczy),  $\text{N} \cdot \frac{\text{s}^2}{\text{m}^8}$

$\dot{V}$  – wydatek powietrza,  $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

### **Równanie Darcy-Weisbacha określające stratę naporu**

Równanie Darcy-Weisbacha określające stratę naporu służy do obliczania liniowych strat ciśnienia w przewodach prostoliniowym na skutek tarcia. [104]

$$\Delta p = \lambda \frac{L \rho \bar{v}^2}{2D} \quad (11)$$

Gdzie:

$\Delta p$  – strata naporu, Pa

$\lambda$  – współczynnik oporu, –

$L$  – długość kanału (bocznic), m

$D$  – średnica hydrauliczna kanału (bocznic), m

$\rho$  – gęstość płynu,  $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

$\bar{v}^2$  – prędkość średnia powietrza,  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$

Współczynnik oporu Darcy-Weisbacha  $\lambda$ , zależy od liczby Reynoldsa oraz względnej chropowatości.

Liczba Reynoldsa to bezwymiarowa liczba opisująca charakter przepływu:

$$Re = \frac{\bar{v}D}{\nu} \quad (12)$$

Gdzie:

$\bar{v}$  – średnia prędkość przepływu,  $\frac{m}{s}$

$D$  – średnica hydrauliczna przewodu, m

$\nu$  – lepkość kinematyczna płynu,  $\frac{m^2}{s}$

$$D = \frac{4A}{Oz} \quad (13)$$

$A$  – powierzchnia przekroju,  $m^2$

$Oz$  – obwód, m

### **Zakresy liczby Reynoldsa i obliczanie współczynnika tarcia $\lambda$**

$Re < 2300$  przewód o dowolnej chropowatości zachowuje się jako hydraulicznie gładki,

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (14)$$

$2300 < Re < 4000$  zakres przejściowy – obserwuje się nieciągłości eksperymentalnych krzywych

$$\lambda = f(Re) \quad (15)$$

$Re > 4000$  przepływ turbulentny w którym wyodrębniamy kolejne trzy zakresy:

$\varepsilon < \delta_{lam}$  - brak wpływu chropowatości na współczynnik tarcia

$$\lambda = f(Re) \quad (16)$$

$\varepsilon > \delta_{lam}$  -wpływ chropowatości zmienia się wraz ze zmianą liczby Reynoldsa,

$$\lambda = f\left(Re, \frac{\varepsilon}{D}\right) \quad (17)$$

$\varepsilon \gg \delta_{lam}$  – w pełni rozwinięty wpływ chropowatości (brak wpływu liczby Reynoldsa),

$$\lambda = f\left(\frac{\varepsilon}{D}\right) \quad (18)$$

Dla przepływów turbulentnego stosujemy równanie, stosujemy równanie Colebrooka-White'a, które ma postać:[12]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2.0 \log_{10} \left( \frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{\lambda}} \right) \quad (19)$$

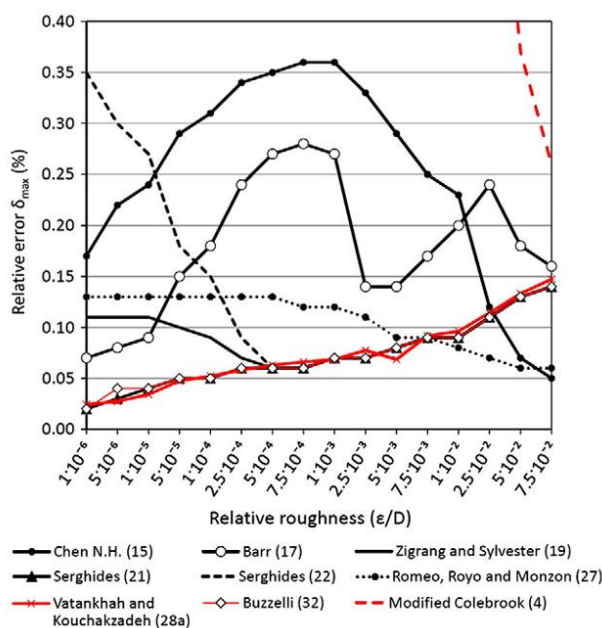
gdzie:

$\varepsilon$  – chropowatość bezwzględna, m

$\delta_{\text{lam}}$  – grubość warstwy laminarnej, m

Równanie Colebrooka-White'a jest nieliniowym względem  $\lambda$ , więc nie można go rozwiązać analitycznie. Rozwiązanie można uzyskać poprzez metody iteracyjne (w wyniku kolejnych przybliżeń), lub w celu uniknięcia iteracji jedną z wielu aproksymacji (np. Hallanda).

Na podstawie [12] do obliczenia chropowatości wybrano przybliżenie autorstwa: Romeo, Roy, Monzón (2002). Aproksymacja ta, ma najmniejszy błąd maksymalny oraz największą dokładność zakresie wysokich chropowatości, spośród 26 analizowanych metod. Szacowany błąd przybliżenia wynosi do 0,13% w porównaniu do równania Colebrookoka. Na rysunku 4 a rysunku 4 przedstawiono porównanie względnego błędu maksymalnego  $\delta_{\text{max}}$  w zależności od względnej chropowatości  $\varepsilon/D$  dla wybranych metod aproksymacyjnych równania Colebrookoka. Z wykresu jednoznacznie wynika, że przybliżenie Romeo, Roy i Monzón (oznaczone jako 27) charakteryzuje się jednym z najniższych błędów w całym analizowanym zakresie chropowatości, szczególnie dla wartości wysokich, co potwierdza jego przydatność w inżynierskich zastosowaniach wentylacyjnych.



**Rys. 4** Przybliżenia równania Colebrook'a z szacowanym błędem do 0,4%

Źródło: opracowano na podstawie [12]

Przybliżenie (Romeo i inni) równania Colebrooka-White'a, ma następującą postać

[12]:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \approx -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.7065 \cdot D} - \frac{5.0272}{\text{Re}} \cdot \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.827 \cdot D} - \frac{4.567}{\text{Re}} \right) \cdot \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{7.7918 \cdot D} \right)^{0.9924} \cdot \left( \frac{5.3326}{208.815 + \text{Re}} \right)^{0.9345} \right) \quad (20)$$

Szczególnym przypadkiem, jest  $\varepsilon \gg \delta_{\text{lam}}$  (w pełni rozwinięty wpływ chropowatości), dla tego zakresu można korzystać ze wzoru Nikuradsego:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \approx 2 \log \frac{D}{\varepsilon} + 1.14 \quad (21)$$

Dla tego zakresu obowiązuje tzw. kwadratowe prawo zależności oporów [81].

$$R = \frac{\Delta p}{\dot{V}^2} \quad (22)$$

gdzie:

$\Delta p = h_i - h_{i+1}$  – różnica potencjałów między węzłami sieci, Pa

$R$  – opór właściwy (zastępczy),  $N \cdot \frac{s^2}{m^8}$

$\dot{V}$  – wydatek powietrza,  $\frac{m^3}{s}$

W tym przypadku stratę naporu możemy wyznaczyć z równania (Atkinsona) [66]:

$$\Delta p = k_{1.2} \frac{LO_z \dot{V}^2 \rho}{A^3 \cdot 1.2} \quad (23)$$

$$k_{1.2}(\text{FF}) = \frac{\Delta p A^3 \cdot 1.2}{LO_z \dot{V}^2 \rho} \quad (24)$$

gdzie:

$$k_{1.2} = \text{Friction Factor (FF)} = \alpha = \text{współczynnik oporu}, \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = \frac{\text{N} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4} = \frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s}^2}{\text{m}^4}$$

A – powierzchnia przekroju, m<sup>2</sup>

O<sub>z</sub> – obwód, m

Pomiędzy współczynnikiem oporu (Atkinsonn'a), a bezwymiarowym współczynnikiem oporu (Darcy'ego) pod warunkiem występowania przepływu burzliwego, zachodzi zależność: [66, 81]

$$k_{1.2}(\text{FF}) = \alpha = \frac{f\rho}{2} \quad (25)$$

$$f = 0,6k_{1.2} \quad (26)$$

$$\lambda = 4 \cdot f \quad (27)$$

Omówione powyżej zależności stanowią podstawę obliczeń w prezentowanych badaniach, przy założeniu przepływu burzliwego (wartości liczby Reynoldsa dla wszystkich bocznic potwierdzały w pełni turbulentny charakter przepływu).

W niniejszej pracy współczynnik oporu aerodynamicznego wyrobisk oznaczono jako FF (Friction Factor), zgodnie z notacją stosowaną w oprogramowaniu VentSim. Program ten wykorzystuje uproszczony zapis wynikający z prawa J.J. Atkinsona, w którym FF odpowiada współczynnikowi oporu (k<sub>1.2</sub>) wyrażonemu w [kg/m<sup>3</sup>]. Zastosowanie tej notacji umożliwia bezpośrednią integrację wyników pomiarów i analiz z modelem numerycznym w VentSim, bez konieczności dodatkowych przeliczeń.

W pracy przyjęto także upraszczające założenie polegające na pominięciu wpływu oddziaływań cieplnych i wentylacji naturalnej na opory aerodynamiczne sieci wentylacyjnej. Wynika to z faktu, że oprogramowanie VentSim automatycznie uwzględnia efekty cieplne w modelu – na podstawie obliczanych temperatur pierwotnych górotworu, czasu przewietrzania, zidentyfikowanych źródeł ciepła czy składu atmosfery kopalnianej. Dzięki temu wpływ procesów termicznych i składu atmosfery jest już bezpośrednio integrowany w symulacjach docelowych.



Należy jednak podkreślić, że w przypadku kopalń głębokich szczególnie istotne staje się uwzględnienie depresji cieplnej oraz składu powietrza. Wysoka temperatura górotworu, długi czas przewietrzania oraz obecność gazów kopalnianych mogą znacząco wpływać na parametry przepływu, gęstość powietrza i w konsekwencji na rzeczywiste wartości oporów aerodynamicznych. Z tego względu należy w oprogramowaniu VentSim (ale również w każdym innym przypadku) uwzględniać przy projektowaniu i walidacji numerycznych modeli sieci wentylacyjnych o odpowiedniej konfiguracji oprogramowania i uwzględnianiu źródeł ciepła i składu atmosfery kopalnianej w kopalniach eksploatowanych na dużych głębokościach.

### **2.3. Oprogramowania badaniach wentylacyjnych**

Powszechnie obliczenia sieci wentylacyjnych wykorzystuje się w przemyśle światowym następujące programy komputerowe:

- VentGraph;
- AERO2014D;
- Vuma 3D;
- VentSim;
- i inne.

W Polsce trwają próby wykorzystania na skalę przemysłową skaningu w projekcie VOK3D, projekt ten do symulacji wykorzystuje metodę elementów skończonych (CFD).[114] Na świecie trwają intensywne wdrożenia i badania w celu wykorzystania tej technologii w symulowaniu wentylacji kopalń czy robotyce [97, 123].

Poniżej przedstawiono krótką charakterystykę deklarowanych funkcjonalności programów.

#### **VentGraph**

„System VentGraph jest zintegrowanym pakietem programów komputerowych dostarczającym ekspertom i inżynierom wentylacji kopalń skutecznych narzędzi do rozwiązywania złożonych problemów wentylacyjnych. Oprogramowanie umożliwia cyfrowe odwzorowanie wszystkich wyrobisk kopalni, dzięki czemu powstaje jej wirtualny model, na którym można analizować proces przewietrzania zarówno w warunkach normalnych, jak i w stanie awaryjnym. System VentGraph dysponuje znacznymi możliwościami obliczeniowymi, a przy jego opracowaniu duży nacisk położono na łatwość obsługi i interpretacji wyników. Oprogramowanie buduje bazę danych dotyczącą struktury

przestrzennej sieci wentylacyjnej kopalni i parametrów charakteryzujących przepływ mieszaniny gazów. Baza jest podstawą do obliczenia rozptyłu powietrza i gazów zarówno w stanie normalnym, jak i awaryjnym. Tym samym wirtualna kopalnia jest gotowa do reagowania na wszelkie sytuacje. System VentGraph wdrożono w latach 1991-2014 w 48 polskich kopalniach (również w zlikwidowanych). Ponadto dzięki współpracy z partnerami zagranicznymi w latach 2003-2014 wdrożono je w: Australii – 12 wdrożeń (partner Gillies Wu Mining Technology Pty Ltd), USA – 6 wdrożeń (2 kopalnie, National Institute for Occupational Safety and Health, University of Kentucky, University of Missouri), Republice Czeskiej (VŠB-Technická Universita Ostrava), Wietnamie (Hanoi Institute of Mining Science and Technology).

Symulacja numeryczna groźnych zjawisk tj. pożar podziemny lub dopływ tysięcy metrów sześciennych metanu, a następnie jego migracja wzdłuż dróg wentylacyjnych kopalni pozwalają skontrolować jakość przewietrzania oraz co istotniejsze podjąć środki w celu minimalizacji zagrożenia, zanim zdarzy się wypadek. Przewidzenie zmian stężeń gazów w warunkach awarii lub katastrofy w kopalni stanowi poważny problem ze względu na dynamizm zachodzących zjawisk. Zagadnienie to można jednak rozwiązać przez zastosowanie symulacji numerycznej, opisującej funkcjonowanie całego systemu wentylacji kopalni składającego się z wyrobisk, węzłów i urządzeń wentylacyjnych. Taka symulacja wymaga stworzenia modelu matematycznego, który uwzględnia zjawiska fizyczne związane z przepływem powietrza i gazów rzeczywistej kopalni. Warunki początkowe określają stan, w jakim znajduje się przepływ powietrza i gazów w sieci wentylacyjnej tuż przed zaistnieniem zdarzenia, zaś warunki brzegowe określają wpływ określonych czynników przemieszczeń górotworu, wybuchu pożaru, dopływu metanu, akcji gaśniczych na funkcjonowanie systemu wentylacyjnego. Konkretnie przypadki wykazały, że oprogramowanie oparte na naukowych podstawach stanowi skuteczne narzędzie do zwalczania zagrożeń istniejących w kopalniach węgla na całym świecie.

System programów VentGraph jest narzędziem wspomagającym pracę inżynierów i ekspertów wentylacji kopalń. Wyróżnia go animowana grafika do obrazowania zmiennych w czasie procesów pożarów podziemnych i propagacji niebezpiecznych gazów. Podstawą dla modelowania są moduły do tworzenia baz danych systemów wentylacyjnych oraz rysowania schematu przestrzennego sieci, będącego podstawą dla graficznej prezentacji wyników. Jakość modelu jest weryfikowana poprzez porównanie obliczeń z danymi z pomiarów na rzeczywistych obiektach. Podstawowym zastosowaniem VentGraph są wielowariantowe analizy stanu przewietrzania istniejących i projektowanych systemów.

VentGraph zawiera unikalny moduł do symulacji scenariuszy rozwoju i zwalczania zagrożeń wywołanych przez pożary i emisję wybuchowych i toksycznych gazów. Oparto go na optymalnie dobranym zestawie modeli matematycznych i numerycznych, uwzględniających zjawiska przepływu gazów, wymiany ciepła z otaczającym górotworem, naturalnej wentylacji, dynamiki ogniska pożaru i działania urządzeń do podawania gazów inertnych. Opcjonalnie VentGraph może współpracować w czasie rzeczywistym z systemami monitoringu atmosfery kopalnianej i wspomagać planowanie ewakuacji załogi. Specjalne wersje programu służą do analizy interakcji między przepływami w wyrobiskach chodnikowych i migracją gazów w zrobach – podziemnych zwałowiskach pozostałych po wydobytych kopalinach.

Kolejne zastosowania to modelowanie sieci odmetanowania kopalń, a także analiza systemów wentylacji tuneli oraz wentylacji grawitacyjnej w budynkach. Jest stosowany również w dydaktyce i szkoleniu służb ratowniczych.

Schemat przestrzenny kopalni można odwzorować w postaci cyfrowej, z bezpośrednim powiązaniem „systemu bocznicy” i parametrów charakteryzujących przepływ w tej bocznicy. Równocześnie można umieścić na nim wyniki obliczeń. Pozwala to na dokonywanie w trakcie obliczeń dowolnych animacji na monitorze komputera. Przyjęty w systemie VentGraph sposób prezentacji informacji o systemie sieci wentylacyjnej wymaga przygotowania dwojakiego rodzaju danych. Dotyczą one struktury sieci, jak i graficznego schematu przestrzennego sieci wentylacyjnej prezentowanej na ekranie komputera.” [134]

### **AERO2014**

„Jego najnowsza wersja – AERO2014 jest programem nie tylko do obliczeń bilansowania rozpliwów powietrza w kopalniach głębinowych, lecz także do współpracy z systemami dyspozytorskimi. System AERO2014 składa się z dwóch modułów: Programu Standardowego Wprowadzania danych (PSWD) oraz z Modułu Monitoringu Graficznego (MMG).

Moduł obliczeniowy został opracowany na podstawie algorytmów Hardy Crossa, natomiast moduł graficzny działa na podstawie pakietu graficznego Auto-CAD. Ze względu na możliwość pracy w technologii klient-serwer i wielostanowiskowe wykorzystanie systemu może być użytkowany równolegle w wielu miejscach. Dla służb wentylacyjnych wygodniejszą formą jest praca na schematach przestrzennych, natomiast dla służb zewnętrznych w sztabie akcji (WUG, OUG, służby techniczno-naukowe), obsługa schematu kanonicznego sieci wentylacyjnej kopalni.

Niezależnie od własnego interfejsu graficznego system jest w stanie przekazywać na bieżąco wszystkie informacje do systemu bezpieczeństwa opartego na systemie SMP-NT/x, umożliwiając ich prezentację na stanowiskach dyspozytorskich.

Moduł obliczeniowy umożliwia:

- edycję danych wejściowych: zmiany oporów aerodynamicznych, potencjałów
- aerodynamicznych, wydatków powietrza, dyssypacji energii, depresji naturalnej,
- charakterystyk wentylatorów głównych, wprowadzenia charakterystyk wentylatorów pomocniczych,
- aproksymację charakterystyk wentylatorów głównych i pomocniczych, ich wykreślenie wraz z charakterystyką kopalni i otworem równoznacznym,
- przeprowadzenie obliczeń bilansujących rozpływy i dokumentowanie danych dla wielu wariantów pracy sieci, dla zadanych wydatków powietrza – wprowadzenie odpowiednich regulatorów zmian – ciśnienia lub oporu,
- wprowadzenie depresji cieplnej (naturalnej, pożarowej) do dowolnej bocznic i przeprowadzenie obliczeń symulacyjnych dla sieci z uwzględnieniem ich wartości,
- generowanie stref zagrożenia pożarowego lub metanowego,
- tworzenie zestawień danych i wyników obliczeń wg potrzeb i wymagań użytkownika,
- tworzenie algorytmów kontrolnych w celu sprawdzenia poprawności wprowadzanych danych.

Moduł graficzny zapewnia:

- wielowariantową edycję schematu przestrzennego kopalni wraz z naniesionymi atrybutami parametrów wentylacyjnych,
- modyfikację atrybutów dowolnego elementu lub fragmentu sieci,
- modyfikacje struktury sieci (usunięcie zbędnych bocznic i węzłów, wprowadzenie nowych tam wentylacyjnych, zabudowanie wentylatora itp.),
- przeprowadzenie w krótkim czasie symulacji rozptywu dymów pożarowych, tlenu węgla i metanu, awarii wentylatorów głównych, zawału wyrobisk z graficzną prezentacją strefy zagrożenia,
- wyznaczanie stref zagrożenia pożarowego ze wskazaniem zadymionych bocznic oraz posterunków obserwacyjnych.” [29]

### **VUMA3D**

(Tłumaczenie automatyczne ze strony internetowej VUMA Software ADCO (Pty) Ltd.)

„Oprogramowanie VUMA wykorzystuje kombinację termodynamicznych i aerodynamicznych algorytmów modelowania interaktywnej sieci kopalnianej, które zespół VUMA może dostosować do dowolnego systemu wydobywczego lub złoża rudy.

Oprogramowanie VUMA jest wykorzystywane do planowania, projektowania, optymalizacji zużycia energii, zarządzania i monitorowania w czasie rzeczywistym sieci wentylacji kopalni na całym świecie. To najnowocześniejsze oprogramowanie daje użytkownikom możliwość pełnej kontroli nad kluczowymi aspektami wentylacji i chłodzenia w procesie wydobywczym.”

VUMA-network 5.0 to interaktywny program do symulacji sieci opracowany, aby pomóc inżynierom i praktykom zajmującym się wentylacją kopalń w planowaniu, projektowaniu, obsłudze i kontrolowaniu systemów wentylacji i chłodzenia w kopalniach podziemnych. Umożliwia jednoczesną symulację:

- Przepływ powietrza
- Zachowanie termodynamiczne powietrza
- Ogrzewanie, chłodzenie i chłodnictwo
- Gazy (w tym radon i DPM)
- Emisja pyłu

#### **Główne cechy**

- Obciążenia cieplne, chłodzenie i mrożenie
- Analiza „co by było, gdyby”. Porównanie różnych symulacji w celu zaobserwowania efektu domina obserwowanego przy zmianie parametrów wejściowych.
- Moduł wybuchowy. Oczyszczanie i śledzenie zanieczyszczeń. Określ czas usunięcia skutków wybuchu
- Moduł przeciwpożarowy. Brane są pod uwagę skutki spalania wywołane przez ogień w sieci, np. zmiana przepływu wentylacji. Symuluje skuteczność możliwych scenariuszy gaszenia pożaru. Symuluje, czy istniejące środki kontroli pożaru są odpowiednie, np. drzwi zainstalowane w celu kontroli pożaru przenośnika taśmowego.
- Planowanie drogi ewakuacyjnej. Umożliwia planowanie bezpiecznej odległości podróży z obszarów roboczych do komór schronienia.

#### **Moduł węglowy zintegrowany z siecią VUMA 5.0**

- Działa podobnie do sieci VUMA, ale została opracowana w celu zaspokojenia specyficznych potrzeb kopalni węgla.

- Stosowany do symulacji ustalonych warunków środowiskowych występujących w podziemnych kopalniach węgla.
- Interaktywnie steruje przepływem powietrza i dystrybucją zanieczyszczeń (pyłu, gazu, dymu itp.) w całym obwodzie wentylacji kopalni węgla.
- Dokładnie przedstawia układ kopalni węgla i metody eksploatacji.” [135]

### **VentSim DESIGN**

„Ventsim DESIGN to kompletny, zintegrowany pakiet oprogramowania do wentylacji kopalni i tuneli, służący do projektowania i testowania obwodów wentylacyjnych, w tym przepływu powietrza, ciśnienia, ciepła, gazów, mocy, radonu, ognia i wielu innych rodzajów informacji o wentylacji.

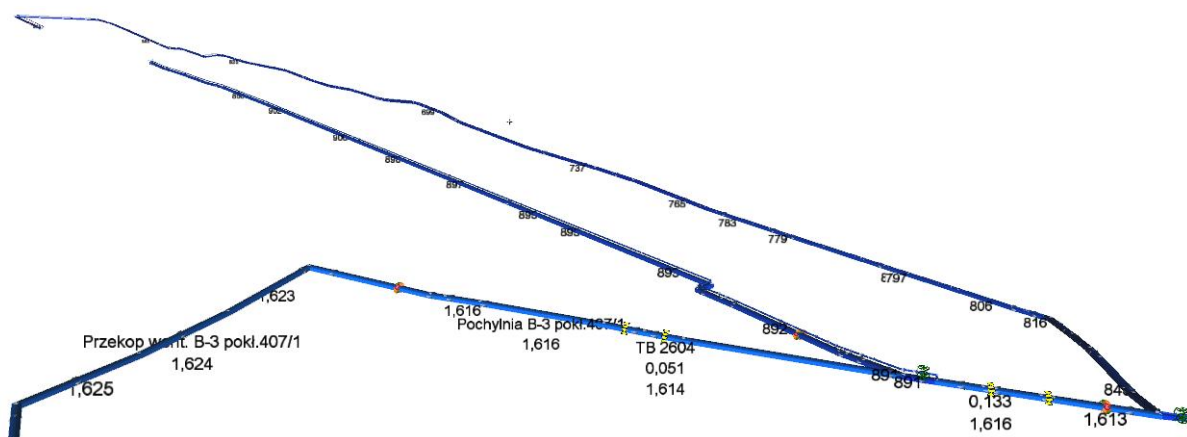
Ventsim CONTROL to inteligentne, konfigurowalne oprogramowanie do podziemnej wentylacji na żądanie (VOD), które komunikuje się z urządzeniami sprzętowymi, umożliwiając zdalne monitorowanie, sterowanie, automatyzację i optymalizację przepływu powietrza, ogrzewania i chłodzenia. Ten najnowocześniejszy system VOD zwiększa bezpieczeństwo, zrównoważony rozwój, wydajność, produkcję i oszczędności kosztów związane z wentylacją kopalni. Ventsim System wentylacji na żądanie sprawdził się skutecznie w kopalniach i tunelach na całym świecie, w tym w Australii, Kanadzie, Chinach, Meksyku, Peru, Polsce, Republice Południowej Afryki i USA (...).” [136]

## **2.4. Wykorzystanie oprogramowania VentSim w badaniach wentylacyjnych**

W pracy wykorzystano oprogramowanie VentSim DESIGN™ w wersji Premium.

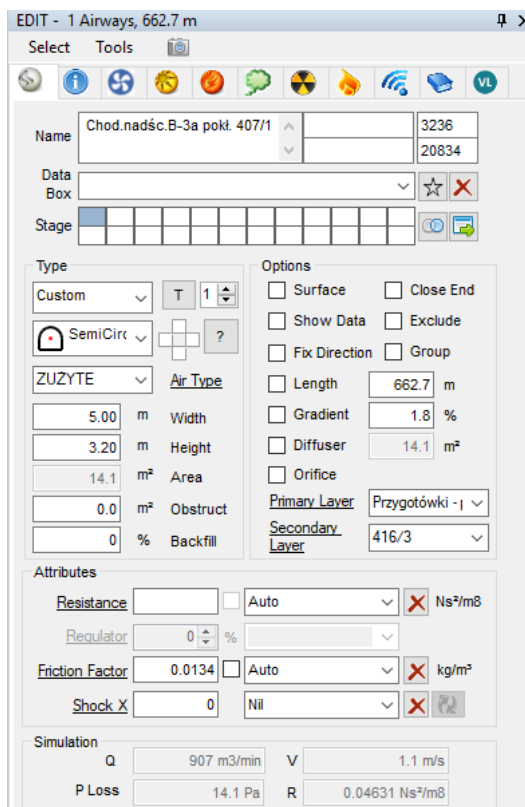
VentSim DESIGN™ jest następcą programu VentSim Classic, który od 1993 r. wprowadził możliwość obliczeń sieci wentylacyjnych w oparciu o model trójwymiarowy. Stosunkowo niedawno, wskutek rozwoju komputerów osobistych PC, program VentSim DESIGN™ wprowadził swobodną możliwość przeglądania modelu i analizy danych w 3D wraz z wsparciem sprzętowym. Program systematycznie jest rozwijany i aktualizowany do wymagań stawianych przez przemysł. W chwili obecnej program pozwala między innymi na: [137]

- odwzorowania układu wyrobisk z map górniczych lub programu Deswik w skali 1:1 (Rys.5);



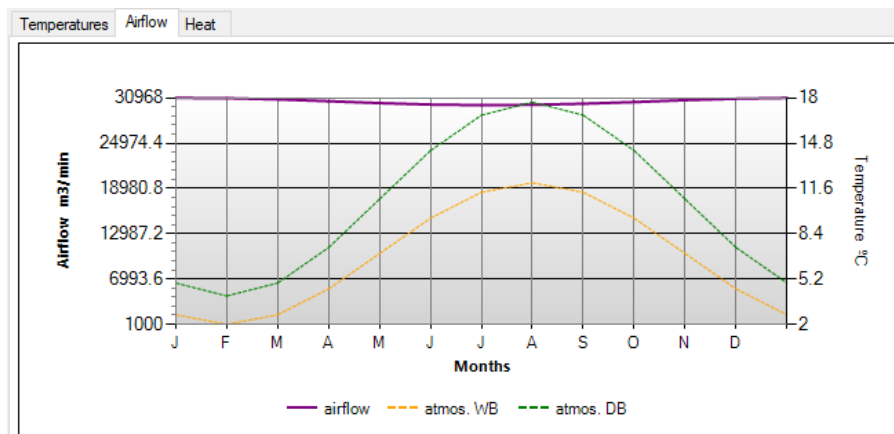
**Rys. 5** Model 3D kopalni KWK „Borynia-Zofiówka-Bzie” Ruch „Zofiówka” w programie VentSim – odwzorowanie regionu B w pokł. 407/1 na etapie rozcinki.

- wprowadzenie do opisu wyrobisk atrybutów fizycznych wyrobisk np. szerokość, wysokość długość, typ przekroju, typ obudowy (współczynnik oporu wyrobiska) na podstawie których wstępnie wyznaczony jest opór aerodynamiczny bocznicy;



**Rys. 6** Menu EDIT w oprogramowaniu VentSim.

- obliczenie depresji naturalnej kopalni i jej zmianą w skali roku;



Rys. 7 Zmiana ilości powietrza w szybie w oprogramowaniu VentSim w zależności od miesiąca.

- wprowadzenie wyników pomiarów zdjęcia potencjalnego kopalni;

The dialog box is titled "Barometric Survey" and contains the following sections:

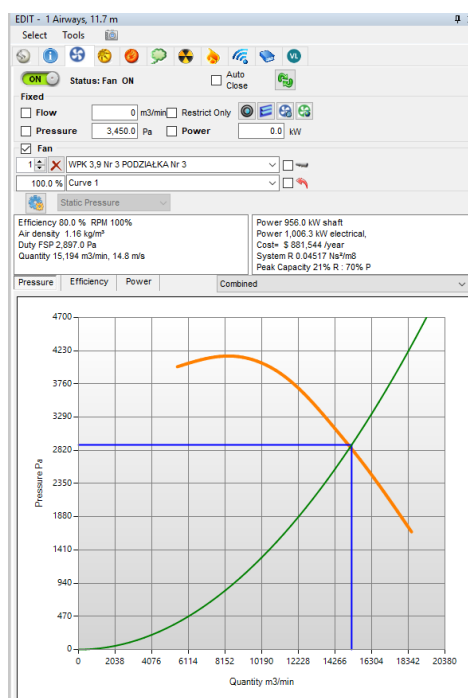
- Upper Station:**
  - Elevation: -549.0 m
  - Barometric Pressure: 108.2973 kPa
  - Temperature: 26.3 °C
  - RH %: 51.5 %
- Lower Station:**
  - Elevation: -549.0 m
  - Barometric Pressure: 108.4061 kPa
  - Temperature: 26.9 °C
  - RH %: 50.0 %
- Measurements:**
  - Airflow: 2,232 m³/min
  - Length: 639.2 m
  - Area: 14.1 m²
  - Perimeter: 15.0 m
- Calculated:**
  - Linear Resistance: 0.01230 R/100m
  - Fixed Resistance: 0.07861 Ns²/m⁸
  - Friction Factor: 0.0228 kg/m³
  - Pressure Change: 108.8 Pa
- Apply As:**
  - Linear Resistance: ☒
  - Fixed Resistance: ☐
  - Friction Factor: ☐
  - PQ Survey: ☐

Buttons: OK, Cancel

Rys. 8 Wprowadzenie pomiarów zdjęcia potencjalnego kopalni w oprogramowaniu VentSim

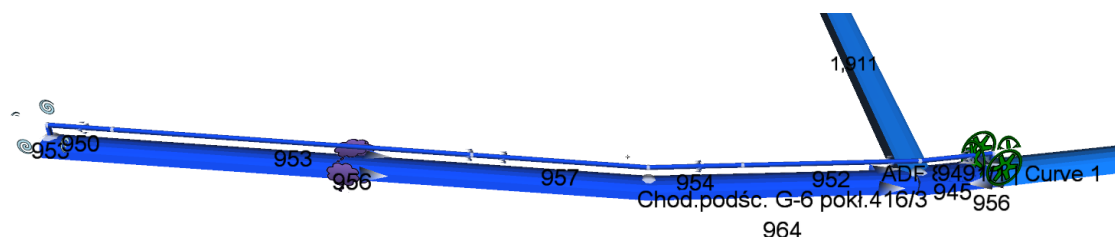
- wprowadzanie charakterystyki wentylatorów głównego przewietrzania, wentylacji odrębnej, pomocniczych (tzw. JetFun) wraz z pełną analizą punktu pracy w układzie pojedynczym, szeregowym, równoległym lub szeregowo-równoległym;





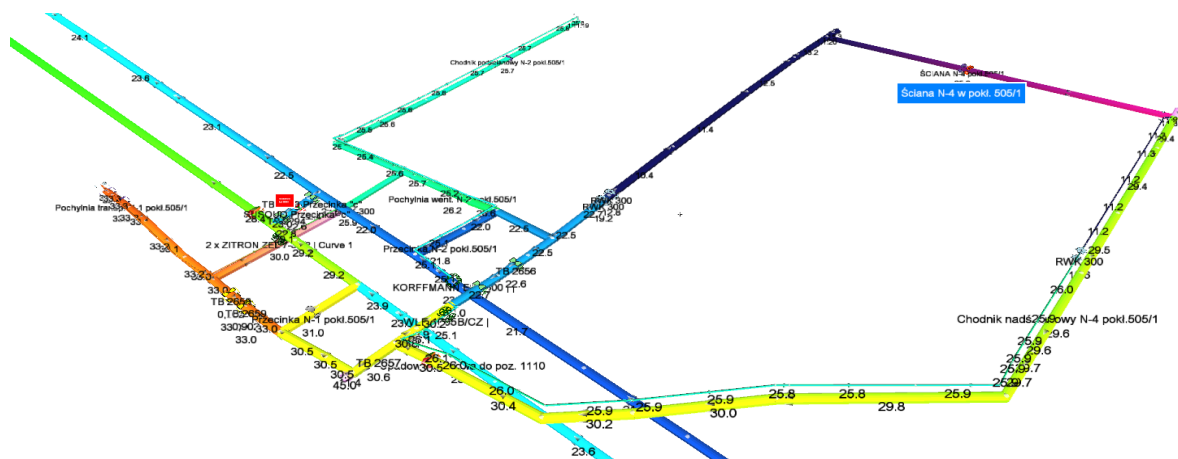
**Rys. 9** Wyniki obliczeń punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania w oprogramowaniu VentSim.

- wykonywanie obliczeń przewietrzania wentylacją odrębną z wyznaczeniem strat powietrza na długości lutniociągu;



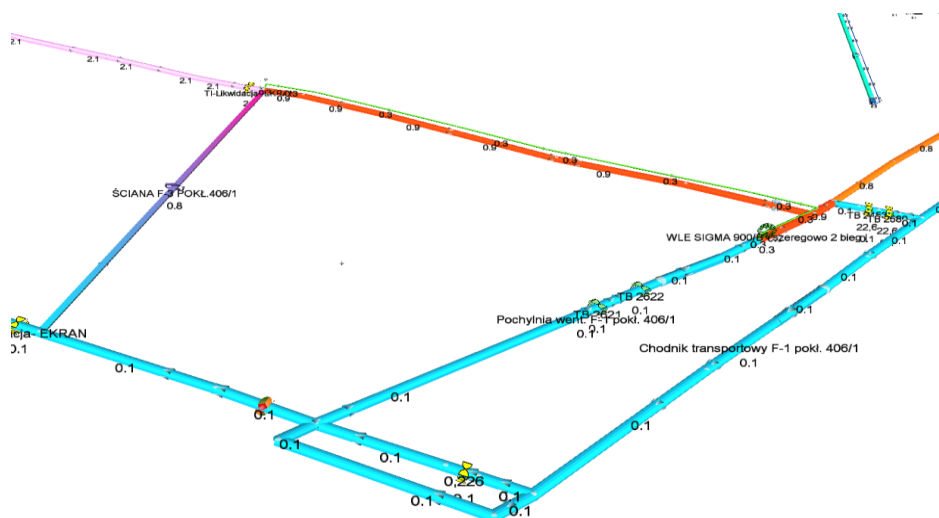
**Rys. 10** Wyniki symulacji ilości powietrza w chodniku z wentylacją odrębną w oprogramowaniu VentSim

- prognozą warunków klimatycznych z automatycznym wyznaczaniem temperatury pierwotnej górotworu, określaniem średniej temperatury rocznej ( $T_{os}$ ), amplitudy sezonowych zmian temperatur ( $A_{os}$ ) czy przesunięciem fazowym amplitudy, wpływ lokalnych źródeł ciepła w tym od przenośników taśmowych, kolejek spalinowych itp.;



Rys. 11 Wyniki symulacji klimatycznej w rejonie ściany w oprogramowaniu VentSim

- emisji gazów i pyłów do powietrza kopalnianego;



Rys. 12 Wyniki symulacji emisji metanu w rejonie ściany w oprogramowaniu VentSim

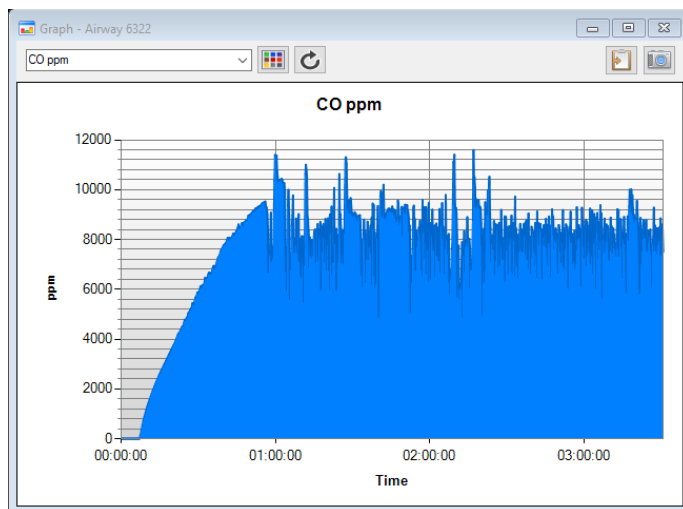
- współpraca z czujnikami gazometrii automatycznej i umożliwienie w oparciu o wyniki z nich przeprowadzać dynamiczną symulację rozptyłu powietrza, emisji gazów lub zmian temperatury i wilgotności powietrza;

| Data Grid |                    |        |             |     |                                    |   | Text Data Source       |                                                  |
|-----------|--------------------|--------|-------------|-----|------------------------------------|---|------------------------|--------------------------------------------------|
| File      | Edit               |        |             |     |                                    |   | Status                 | First Row Contains Column Headers                |
| IDENT#    | CZAS               | POMIAR | TypCzujnika | JED | LOKALIZACJA                        | X | ON                     |                                                  |
| ZX.001    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | Komora olejowa poz.705             |   | Name                   | Pomiar                                           |
| ZX.002    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | Ch. podśc. B-3a p. 407/1, przy ... |   | Text File              | \\fs1zo.jaw.pl\hemes_szo\WIDENET\GNIAZDA\ZOFIOWI |
| ZX.003    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | Wyłyczna główna poz. 1110          |   | Date Format (Optional) |                                                  |
| ZX.004    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | Przekop taśmowy DF poz 1080        |   | Encoding               | Unicode                                          |
| ZX.005    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | Upadkowa taśmowa do poz.1110       |   |                        |                                                  |
| ZX.006    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | Ch. podścianowy G-4 p.416/3...     |   |                        |                                                  |
| ZX.007    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | Przecinka transportowa G-2 poz...  |   |                        |                                                  |
| ZX.008    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | Przekop badawczy wentylacyjn...    |   |                        |                                                  |
| ZX.009    | 2020-09-13 17:4... | 1      | Centrałka   |     | pochłwina C-1 o.505/2 łama T...    |   |                        |                                                  |

Rys. 13 Podgląd wczytanych czujników z gazometrii automatycznej w oprogramowaniu VentSim

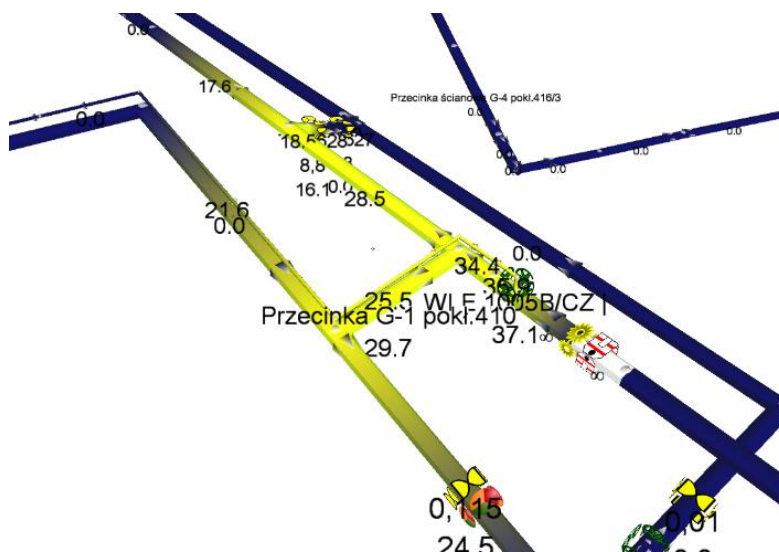
- moduł VentFire umożliwia wykonywanie symulacji dynamicznej pożarów z wyznaczeniem zadymienia, wpływu zadymienia (zmiany gęstości) na potencjały

aerodynamiczne, dyfuzyjny rozptył dymów, zmiany temperatury powietrza i górotworu w obrębie pożaru, wyznaczeniem dróg ucieczkowych z podaniem czasów przejść i określeniem ilości tlenu węgla jaką pracownik „wchłonie” jeżeli nie użyłby aparatu ucieczkowego;



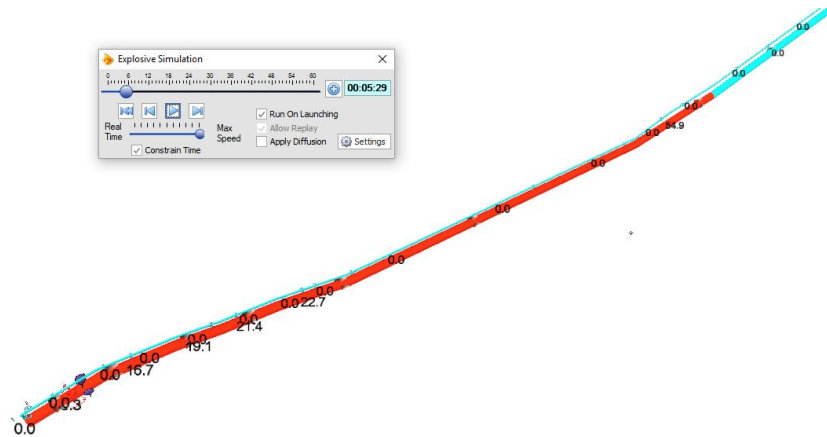
**Rys. 14** Wyniki symulacji dynamicznej przyrostu tlenu węgla w czasie pożaru w oprogramowaniu VentSim

- symulacja zasięgu fali uderzeniowej w przypadku wybuchu;



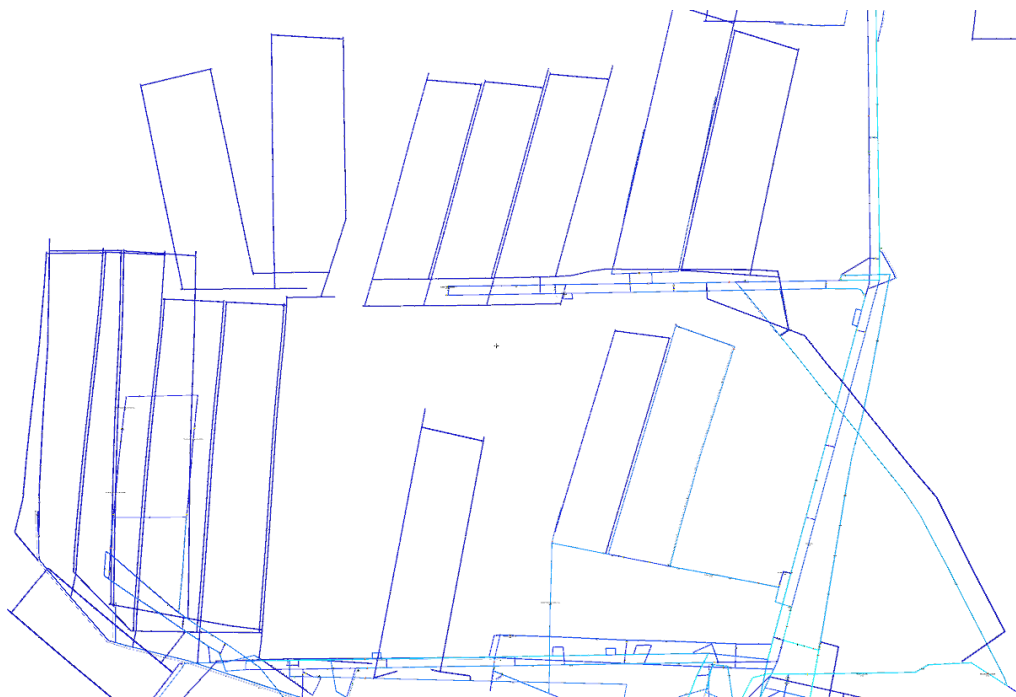
**Rys. 15** Wyniki symulacji rozprzestrzeniania się ciśnienia wybuchu gazu w rejonie w oprogramowaniu VentSim

- określa czas przewietrzania wyrobisk po wykonaniu robót strzałowych;



- umożliwia prowadzenia archiwizacji dokumentacji pomiarów wentylacyjnych (VentLog);
- swobodny przegląd struktury kopalni poprzez zmianę widoku na poziomy, pokłady, itp.;

- oprogramowanie pozwala również na projektowanie i analizy sieci wentylacyjnej w poszczególnych etapach (latach);



**Rys. 18** Widok projektowanych ścian w rejonie kopalni w oprogramowaniu VentSim

- wpływ pracujących silników spalinowych na skład i temperaturę powietrza wraz z analizą ruchu i wpływu na prędkość powietrza w wyrobisku (tzw. „efekt tłoka”);
- analizę ekonomiczną kopalni poprzez przypisanie kosztów stałych związanych wydrążeniem wyrobiska czy pracujących maszyn i urządzeń;
- automatyczny, racjonalny dobór przekroju wyrobiska jako zależność pomiędzy kosztem wentylacji, a kosztem wydrążenia;
- oraz wiele innych.

Dużym atutem programu jest graficzna prezentacji wyników pomiarów w modelu 3D (kolor poszczególnego odcinka wyrobiska przedstawia dane wyniku obliczeń). Przy złożonych modelach wentylacyjnych interpretacja danych jest szybka i intuicyjna.

Podsumowując w rozdziale przedstawiono funkcjonalności oraz możliwości zastosowania oprogramowania VentSim DESIGN™ w analizie i modelowaniu sieci wentylacyjnych kopalń. VentSim wspiera procesy decyzyjne dzięki integracji z rzeczywistymi danymi pomiarowymi i zaawansowanej wizualizacji wyników. Przedstawione funkcjonalności stanowią podstawę do dalszej części pracy, w której zaprezentowano problemy badawcze związane z dokładnością odwzorowania sieci wentylacyjnych, identyfikacją parametrów przepływu oraz walidacją modeli na podstawie danych rzeczywistych.

### **3. Wyznaczenie dynamiki zmian fizyki atmosfery w celu wyznaczenia wartości parametrów powietrza na wlocie do kopalni**

#### **3.1. Definicja problemu**

Określenie warunków początkowych (brzegowych) dla każdej symulacji jest kluczowe dla poprawnego budowania modeli sieci wentylacyjnej.[30] Warunki te są determinowane przez położenie geograficzne kopalni oraz panujące w jej obszarze warunki klimatyczne. Mają one wpływ między innymi na ciśnienie barometryczne na wlocie do kopalni (zależne od wysokości względem poziomu morza) oraz średnioroczną temperaturę górotworu na wlocie do szybu (związaną ze średnią temperaturą powietrza atmosferycznego).

Znajomość dynamiki zmian fizyki atmosfery jest szczególnie istotna w kopalniach głębinowych węgla kamiennego o wysokim zagrożeniu metanowym. W tego typu kopalniach, gwałtowny spadek ciśnienia barometrycznego może prowadzić do wzrostu zagrożenia metanowego lub ryzyka powstania atmosfery beztlenowej w rejonach ścian wydobywczych i tam izolacyjnych.

Ponadto, wraz ze zmianami klimatycznymi, część zjawisk atmosferycznych ulega nasileniu. Zmianie podlegają wartości średniej rocznej temperatury powietrza, minimalne i maksymalne temperatury dobowe, a także amplituda tych zmian. Modyfikacji ulega również dynamika oraz częstotliwość występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych.

W polskiej literaturze górniczej zagadnienie zmian ciśnienia atmosferycznego oraz ich wpływu na zagrożenie metanowe, a także zestawienia średnich wartości temperatury i sezonowych wahań temperatury powietrza, są dobrze opisane i zbadane.[14, 40, 81, 111, 118] Jednakże nie zaleziono opisu dynamiki zmian ciśnienia atmosferycznego, temperatury suchej oraz wilgotności właściwej dla przedziałów czasowych: 1 godzina, 12 godzin, 24 godzin, 3 dni, 7 dni i miesiąca (z uwzględnieniem wartości średnich, maksymalnych i minimalnych w długoterminowej perspektywie).

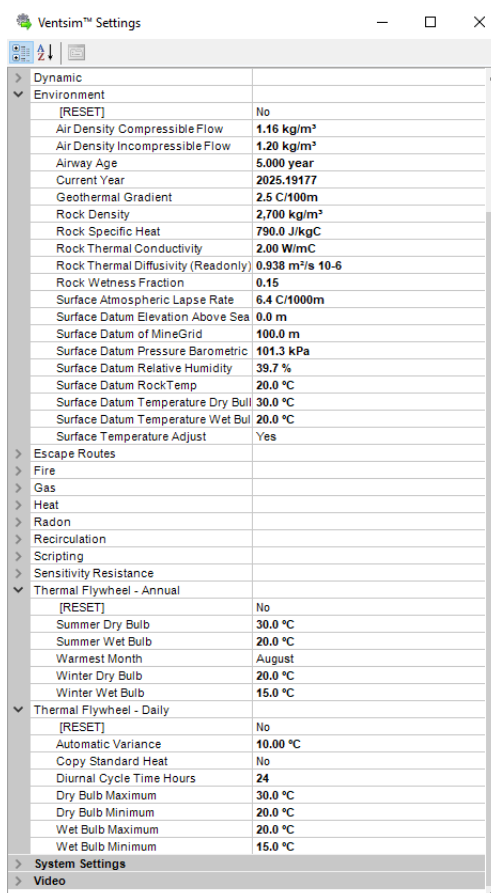
Ze względu na techniczne możliwości integracji oprogramowania VentSim z czujnikami gazometrii automatycznej kopalń, należało również sprawdzić, czy taka integracja jest możliwa w realnych warunkach polskich kopalń. W tym zakresie również nie znalazłem opisów dotyczących takiej integracji.

Aby właściwie skonfigurować oprogramowanie VentSim, należy przypisać odpowiednio uśrednione wartości fizyki atmosfery oraz wartości geotermodynamiczne górotworu, dostosowane do warunków danej kopalni.

Ustawienia te można podzielić na trzy główne obszary [137]:

- Environment (środowiskowe w ujęciu globalnym dla kopalni) – warunki atmosferyczne, geotermiczne itp.
- Thermal Flywheel – Annual (sezonowe zmiany temperatury powietrza).
- Thermal Flywheel – Daily (dobowe zmiany temperatury powietrza).

Szczegółowe wymagania określają poniższe tabele.



Rys. 19 Okno ustawień w oprogramowaniu VentSim

**Tabela 1** Okno ustawień (environment) w oprogramowaniu VentSim [137]

| Parametr                                           | Wartość                                     | Opis (Tłumaczenie)                                               |
|----------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Air Density Compressible Flow                      | 1.16 kg/m <sup>3</sup>                      | Gęstość powietrza przy przepływie ściśliwym                      |
| Air Density Incompressible Flow                    | 1.20 kg/m <sup>3</sup>                      | Gęstość powietrza przy przepływie nieściśliwym                   |
| Airway Age                                         | 5.000 year                                  | Wiek wyrobiska (lata)                                            |
| Current Year                                       | 2025.1977                                   | Aktualny rok                                                     |
| Geothermal Gradient                                | 2.5<br>°C/100m                              | Gradient geotermalny (wzrost temperatury na 100 m głębokości)    |
| Rock Density                                       | 2700 kg/m <sup>3</sup>                      | Gęstość skały                                                    |
| Rock Specific Heat                                 | 790.0<br>J/kgK                              | Ciepło właściwe skały                                            |
| Rock Thermal Conductivity                          | 2.00<br>W/m°C                               | Przewodność cieplna skały                                        |
| Rock Thermal Diffusivity<br>(Readonly)             | 0.938 m <sup>2</sup> /s<br>10 <sup>-6</sup> | Dyfuzyjność cieplna skały (tylko do odczytu)                     |
| Rock Wetness Fraction                              | 0.15                                        | Udział wilgotności dla skały                                     |
| Surface Atmospheric Lapse Rate                     | 6.4<br>°C/1000m                             | Średnia zmiana temperatury z wysokością (gradient atmosferyczny) |
| <b>Surface Datum Elevation Above<br/>Sea Level</b> | 0.0 m                                       | Wysokość odniesienia nad poziomem morza                          |
| Surface Datum of MineGrid                          | 100.0 m                                     | Wysokość odniesienia dla siatki kopalni                          |
| Surface Datum Pressure<br>Barometric               | 101.3 kPa                                   | Ciśnienie atmosferyczne na poziomie odniesienia                  |
| Surface Datum Relative Humidity                    | 39.7 %                                      | Wilgotność względna powietrza na powierzchni                     |
| Surface Datum RockTemp                             | 20.0 °C                                     | Temperatura skały na powierzchni                                 |
| <b>Surface Datum Temperature Dry<br/>Bulb</b>      | 30.0 °C                                     | Temperatura sucha powietrza na powierzchni                       |
| <b>Surface Datum Temperature<br/>Wet Bulb</b>      | 20.0 °C                                     | Temperatura mokra powietrza na powierzchni                       |
| Surface Temperature Adjust                         | Yes                                         | Korekta temperatury powierzchni (Tak)                            |

**Tabela 2** Okno ustawień (thermal flywheel – annual) w oprogramowaniu VentSim [137]

| Parametr               | Wartość | Opis (Tłumaczenie)      |
|------------------------|---------|-------------------------|
| <b>Summer Dry Bulb</b> | 30.0 °C | Temperatura sucha latem |
| <b>Summer Wet Bulb</b> | 20.0 °C | Temperatura mokra latem |
| <b>Warmest Month</b>   | August  | Najcieplejszy miesiąc   |
| <b>Winter Dry Bulb</b> | 20.0 °C | Temperatura sucha zimą  |
| <b>Winter Wet Bulb</b> | 15.0 °C | Temperatura mokra zimą  |



**Tabela 3** Okno ustawień thermal flywheel – daily) w oprogramowaniu VentSim [137]

| Parametr                        | Wartość  | Opis (Tłumaczenie)                            |
|---------------------------------|----------|-----------------------------------------------|
| <b>Automatic Variance</b>       | 10.00 °C | Automatyczna zmienność temperatury            |
| <b>Copy Standard Heat</b>       | No       | Kopiowanie standardowej wartości ciepła (Nie) |
| <b>Diurnal Cycle Time Hours</b> | 24       | Czas trwania cyklu dobowego (w godzinach)     |
| <b>Dry Bulb Maximum</b>         | 30.0 °C  | Maksymalna temperatura sucha                  |
| <b>Dry Bulb Minimum</b>         | 20.0 °C  | Minimalna temperatura sucha                   |
| <b>Wet Bulb Maximum</b>         | 20.0 °C  | Maksymalna temperatura mokra                  |
| <b>Wet Bulb Minimum</b>         | 15.0 °C  | Minimalna temperatura mokra                   |

Część powyższych wartości można uzyskać z dostępnych danych stacji meteorologicznych. Wymaga to jednak czasochłonnych analiz oraz poniesienia kosztów dostępu do danych archiwalnych.

W związku z przedstawioną problematyką zaplanowano i przeprowadzono badania dynamiki fizyki atmosfery, których celem było opracowanie tabel umożliwiających poprawną konfigurację oprogramowania VentSim dla kopalń JSW S.A. Tabele te pozwolą również na właściwy dobór wartości zmian parametrów atmosferycznych (ciśnienia barometrycznego, temperatury, wilgotności właściwej) przy opracowywaniu scenariuszy symulacji dynamicznych, a także stanowić punkt odniesienia w ocenie zaistniałych zdarzeń w kopalni.

### **3.2. Metodyka badań parametrów fizyki atmosfery**

W celu zbadania dynamiki zmian fizyki atmosfery na wlocie do kopalni zaplanowano wykonanie dwóch badań:

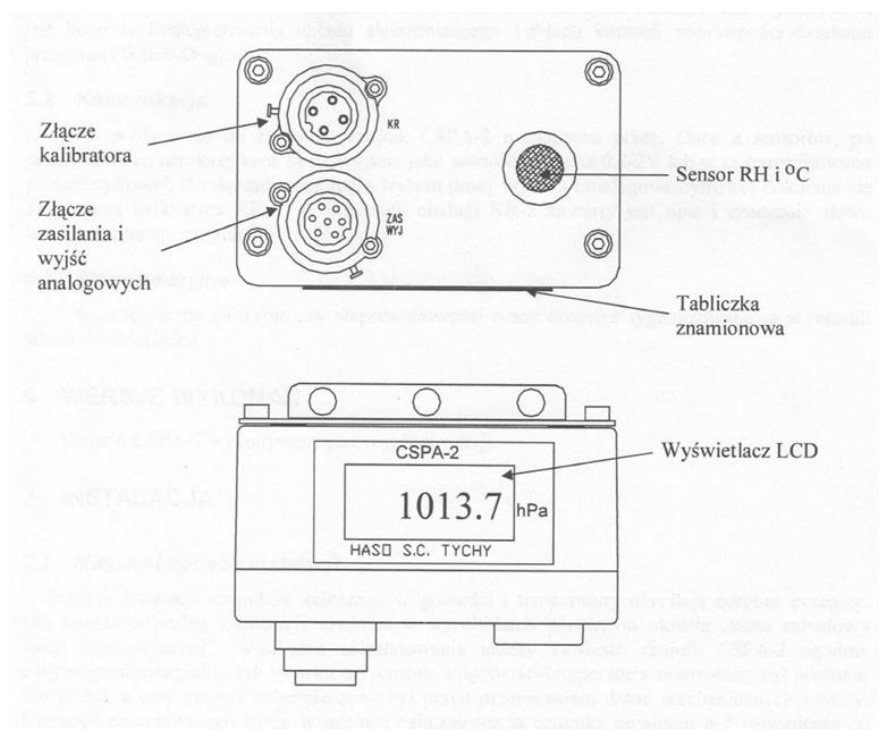
- Badanie A – Metoda bezpośrednich pomiarów: ciśnienia barometrycznego, temperatury suchej, wilgotności względnej na wlocie do jednej z kopalń JSW S.A.
- Badanie B – Metoda analizy dynamiki zmian parametrów atmosferycznych na podstawie danych archiwalnych portalu meteoblue.com.

### 3.2.1. Badanie A – Metoda bezpośrednich pomiarów: ciśnienia barometrycznego, temperatury suchej, wilgotności względnej na wlocie do jednej z kopalń JSW S.A.

Pomiar wykonywany był poprzez czujnik ciśnienia atmosferycznego, wilgotności i temperatury typu CSPA-2 firmy HASSO S.C. Zabudowa czujnika zlokalizowana była w jednej z kopalń JSW S.A. na wysokości 2 m od poziomu gruntu w miejscu zacienionym (kota niwelacyjna 280,15 m n.p.m.). Współrzędne lokalizacji stanowiska 49°58'02"N 18°37'41"E. W tabeli 4 zestawiono szczegółowe dane techniczne czujnika, obejmujące m.in. zakresy pomiarowe, dokładność wskazań, czasy odpowiedzi oraz parametry zasilania i warunki pracy. Na rysunku 20 przedstawiono widok zewnętrzny czujnika CSPA-2 wraz z rozmieszczeniem kluczowych elementów pomiarowych i przyłączy.

**Tabela 4** Dane techniczne czujnika typu CSPA-2 firmy HASO S.C [138]

| Parametr                          | Wartość                                                                  |
|-----------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Napięcie zasilania                | 8-14,5 VDC (nominalnie 12 VDC)                                           |
| Pobór prądu                       | max 4 mA                                                                 |
| Wyjście 1                         | analogowe 0.4-2V (ciśnienie) / cyfrowe transmisja szeregową              |
| Wyjście 2                         | analogowe 0.4-2V (wilgotność)                                            |
| Wyjście 3                         | analogowe 0.4-2V (temperatura)                                           |
| Zakres pomiarowy (ciśnienie)      | 800 ÷ 1300 hPa (wersja podstawowa) / 800 ÷ 1600 hPa (wersja rozszerzona) |
| Zakres pomiarowy (wilgotność)     | 0 ÷ 100 % RH                                                             |
| Zakres pomiarowy (temperatura)    | -20 ÷ 50 °C                                                              |
| Błąd pomiaru ciśnienia            | ±2 hPa (pełny zakres temperatur) / ±0,5 hPa (+5°C ÷ 40°C)                |
| Błąd pomiaru temperatury          | ±1°C                                                                     |
| Błąd pomiaru wilgotności          | ±3 % RH                                                                  |
| Rozdzielczość                     | 0,1 hPa, 0,1 % RH, 0,1 °C                                                |
| Sposób pomiaru                    | ciągły                                                                   |
| Parametr                          | Wartość                                                                  |
| Czas odpowiedzi t90 (ciśnienie)   | ≤2 s                                                                     |
| Czas odpowiedzi t90 (wilgotność)  | ≤4 s                                                                     |
| Czas odpowiedzi t90 (temperatura) | ≤30 s                                                                    |
| Pozycja pracy                     | wlot do sensora wilgotności i temp. z boku lub z dołu (zalecany)         |
| Sposób skalowania                 | za pomocą kalibratora KR-2                                               |
| Zakres temperatury pracy          | -10 ÷ +40 °C                                                             |
| Wilgotność względna               | 15% ÷ 95% RH (bez kondensacji)                                           |
| Wymiary zewnętrzne                | 110 x 75 x 80 mm                                                         |
| Masa                              | 0,65 kg                                                                  |
| Stopień ochrony obudowy           | IP-54                                                                    |
| Zasilanie (Ui)                    | 16 V                                                                     |
| Prąd zasilania (Ii)               | 150 mA                                                                   |
| Moc (Pi)                          | 2,4 W                                                                    |



**Rys. 20** Widok czujnika CSPA-2 z rozmieszczeniem elementów na obudowie

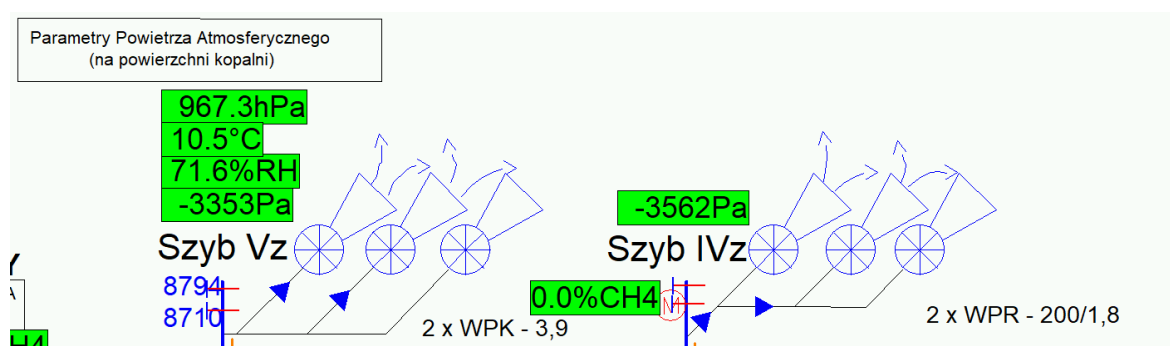
Pomiary realizowano w okresie od 01.02.2021 do 01.05.2023, z częstotliwością próbkowania co 1 minutę. W tabeli 5 przedstawiono zagregowane statystyki opisowe zarejestrowanych danych pomiarowych obejmujących ciśnienie atmosferyczne, temperaturę powietrza oraz wilgotność względną. Dla każdego z parametrów określono wartości minimalne, maksymalne, średnie oraz odchylenie standardowe, co umożliwia wstępną ocenę zmienności warunków atmosferycznych w analizowanym okresie. Dane te stanowiły podstawę do dalszych analiz kalibracyjnych i modelowych opisujących wpływ czynników atmosferycznych na rozptył powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej.

**Tabela 5** Wycinek danych z rejestracji ciśnienia atmosferycznego

| Data     | Czas       | Barometr |
|----------|------------|----------|
| 2/1/2021 | 6:00:00 AM | 970.2    |
| 2/1/2021 | 6:01:00 AM | 970.2    |
| 2/1/2021 | 6:02:00 AM | 970.2    |
| 2/1/2021 | 6:03:00 AM | 970.2    |
| 2/1/2021 | 6:04:00 AM | 970.2    |
| 2/1/2021 | 6:05:00 AM | 970.2    |
| (...)    | (...)      | (...)    |
| 5/1/2023 | 5:57:00 AM | 986.4    |

Czujnik był zintegrowany z systemem telemetrycznym kopalni, a dane były gromadzone i wyświetlane w systemie Zefir w czasie rzeczywistym. W analizowanym okresie zebrano 1 095 196 rekordów danych.

Na rysunku 21 pokazano wycinek z wizualizacji systemu ZEFIR, w którym przedstawiono przykładowe parametry powietrza atmosferycznego mierzone na powierzchni kopalni: ciśnienie atmosferyczne (967,3 hPa), temperaturę powietrza (10,5 °C), wilgotność względną (71,6 %) oraz wartość depresji (−3353 Pa). Wskazania te były na bieżąco aktualizowane i wykorzystywane przez służby wentylacyjne do oceny bieżących warunków przewietrzania szybowego.



Rys. 21 Wycinek z wizualizacji pomiarów z czujnika CSPA-2 w systemie ZEFIR

### Proces przetwarzania danych:

Do realizacji badania wykorzystano język Python wraz z następującymi bibliotekami:

- pandas – do przetwarzania i analizy danych tabelarycznych, w tym importu danych z plików Excel i CSV,
- numpy – do operacji numerycznych, w tym usuwania braków danych i obliczania statystyk,
- matplotlib – do tworzenia wykresów przebiegu zmian ciśnienia,
- seaborn – do wizualizacji danych i histogramów,
- scipy.optimize – do analizy statystycznej (dopasowanie rozkładów danych),
- datetime – do operacji na datach i czasie,
- os – do obsługi plików,
- time – do pomiaru czasu działania skryptu

Dla każdej mierzonej wartości osobno (ciśnienie barometryczne, temperatura sucha, wilgotność względna) dane zostały importowane do pliku CSV. Z bazy pomiarowej następnie usunięto brakujące dane ('???' – zapis w systemie Zefir związany z brakiem

komunikacji. Przypadki każdej operacji uśnięcia rekordów danych został zapisany do pliku raport.txt).

Następnie, algorytm wykonywał iteracyjne obliczanie różnicy wartości (ciśnienia barometrycznego, temperatury lub wilgotności względnej) dla okresów poszczególnych okresów (z uwzględnieniem wartości średnich, maksymalnych i minimalnych w długoterminowej perspektywie) dla każdego przedziału osobno z przesunięciem co 1 minutę pod warunkiem, że zachowana była ciągłość danych w tym okresie.

Badanie dynamiki zmian fizyki atmosfery zostało wykonane dla przedziałów czasowych:

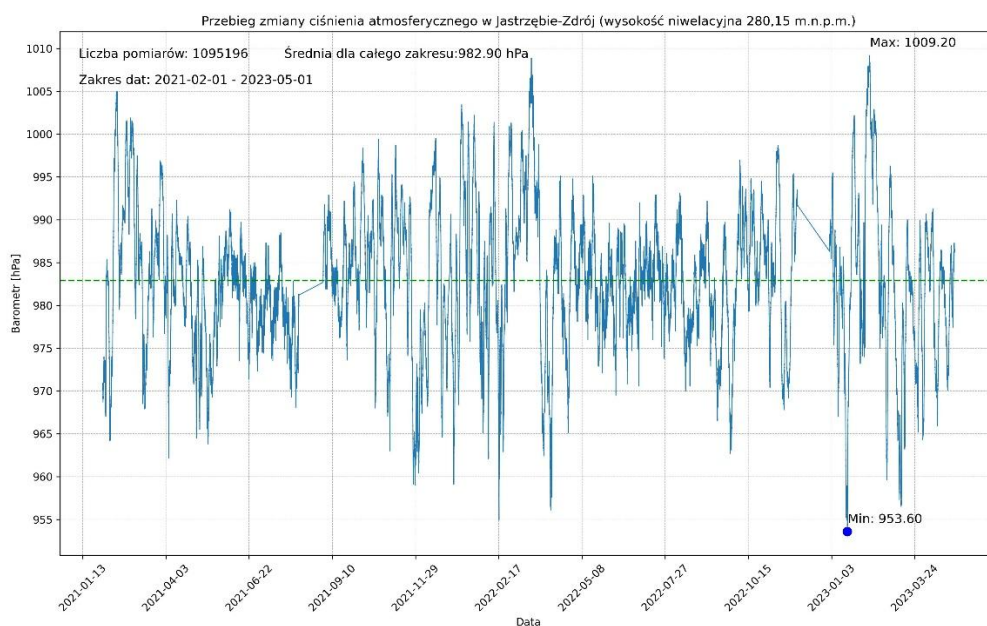
- ciśnienia barometrycznego: 1 godzina, 12 godzin, 24 godzin, 3 dni, 7 dni i miesiąca;
- temperatury suchej oraz wilgotności względnej: 1 godzina, 24 godzin, 7 dni i miesiąca.

Dla każdej mierzonej wartości opracowano wykresy:

- przebiegu zmiany mierzonej wartości;
- analiza statystyczna rozkładu wartości (histogram);
- zmiana różnicy wartości w czasie;

### **3.2.2 Zestawienie otrzymanych wyników dla zmian ciśnienia atmosferycznego**

Zestawienie wyników badania A (Rys. 22–34, Tab. 6) wskazuje na dużą dynamikę zmian ciśnienia barometrycznego w skali od godzinowej po miesięczną. Średnia wartość ciśnienia w całym okresie pomiarowym wyniosła 982,9 hPa, przy czym zanotowano minimum 953,6 hPa oraz maksimum 1009,2 hPa (Rys. 22). Analiza różnic w poszczególnych przedziałach czasowych pokazała, że największe zmiany pojawiały się w okresach kilkudniowych i tygodniowych – np. w interwale miesięcznym maksymalna różnica osiągnęła 51,3 hPa (Rys. 23–24), natomiast w skali tygodniowej 46,7 hPa (Rys. 25–26). W krótszych przedziałach czasowych wartości były mniejsze, ale nadal istotne – do 35 hPa w skali 3 dni (Rys. 27–28), do 24,8 hPa w skali doby (Rys. 29–30) oraz do 20,5 hPa w skali 12 godzin (Rys. 31–32). Histogramy rozkładów (Rys. 24, 26, 28, 30, 32, 34) pokazują wyraźną asymetrię z dominującymi wartościami niskich różnic ciśnienia.

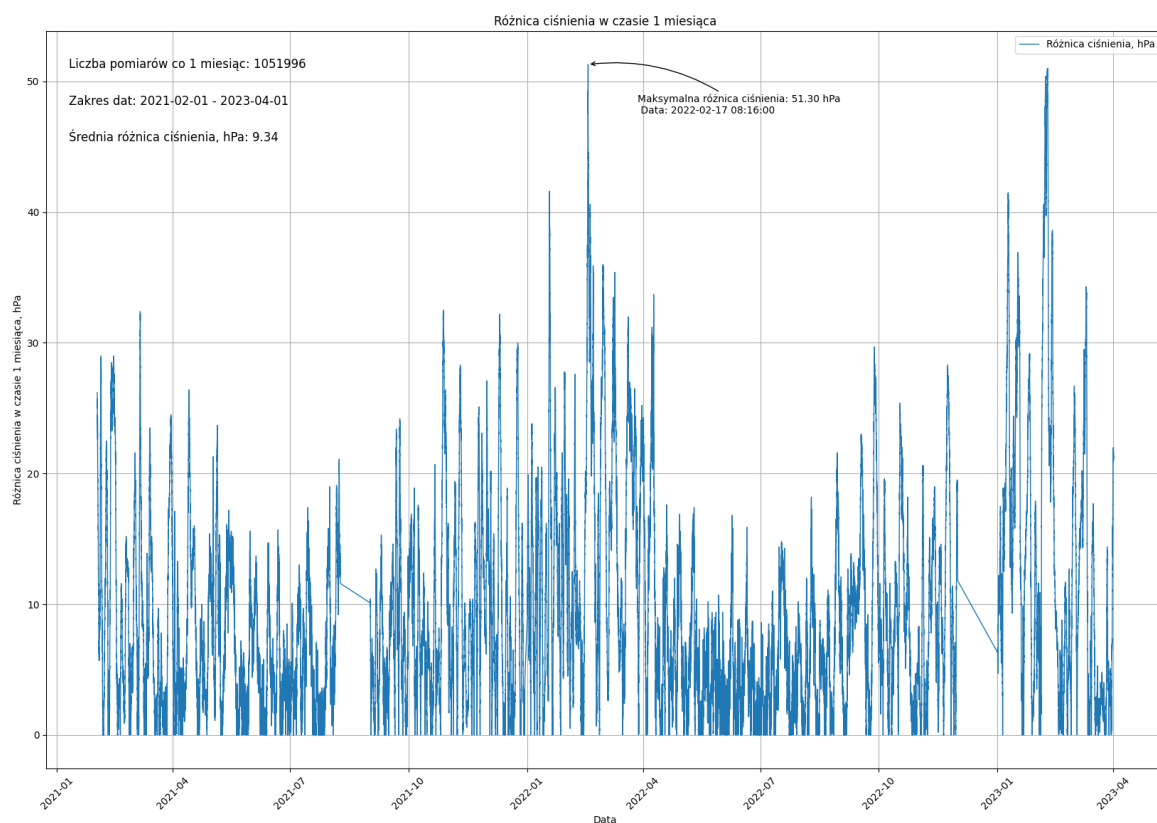


**Rys. 22** Przebieg zmian ciśnienia barometrycznego w badaniu A

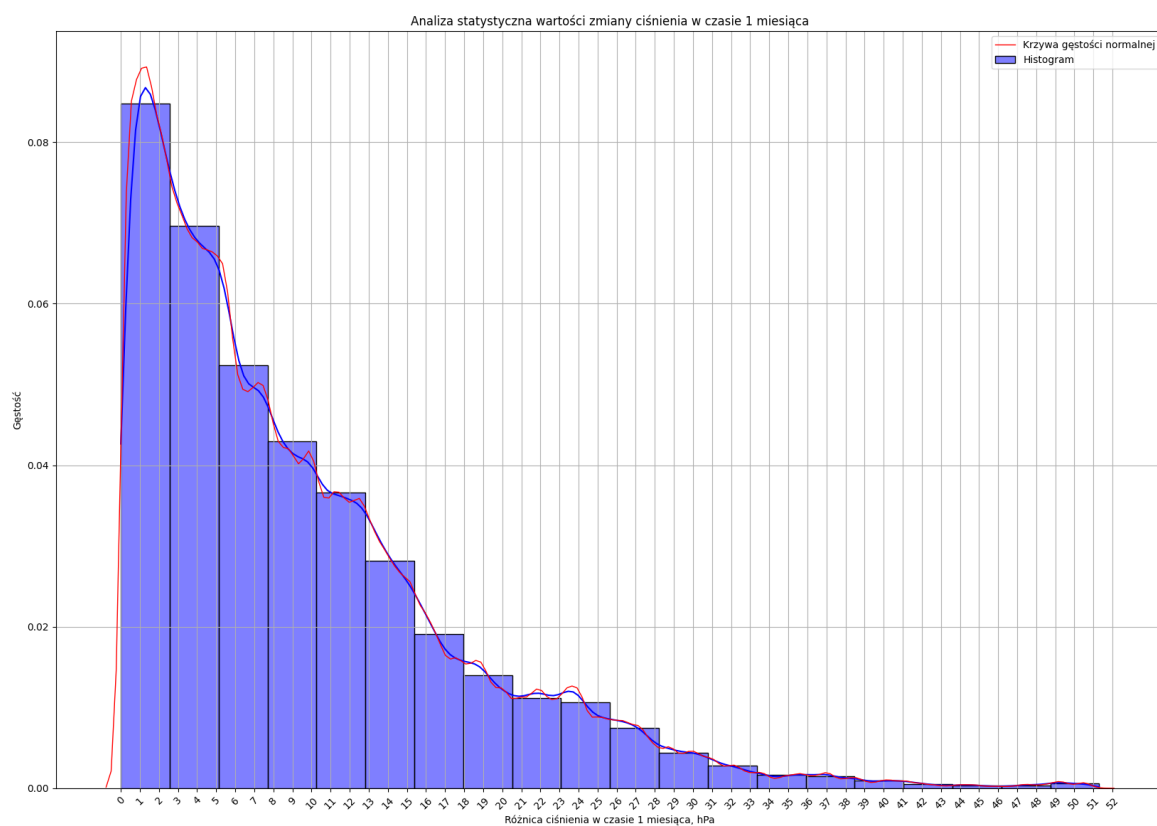
**Tabela 6** Zestawienie otrzymanych wyników dla ciśnienia barometrycznego w badaniu A

|                                                             | Minimalne | Średnie | Maksymalne |
|-------------------------------------------------------------|-----------|---------|------------|
|                                                             | hPa       | hPa     | hPa        |
| Wartość ciśnienia barometrycznego                           | 953.6     | 982.9   | 1009.2     |
| Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie<br>co 1 miesiąc  | 0         | 9.34    | 51.30      |
| Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie<br>co 7 dni      | 0         | 8.96    | 46.70      |
| Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie<br>co 3 dni      | 0         | 7.46    | 35,00      |
| Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie<br>co 24 godziny | 0         | 4.29    | 24.80      |
| Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie<br>co 12 godziny | 0         | 2.80    | 20.50      |
| Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie<br>co 1 godzinę  | 0         | 0.42    | 8.300      |

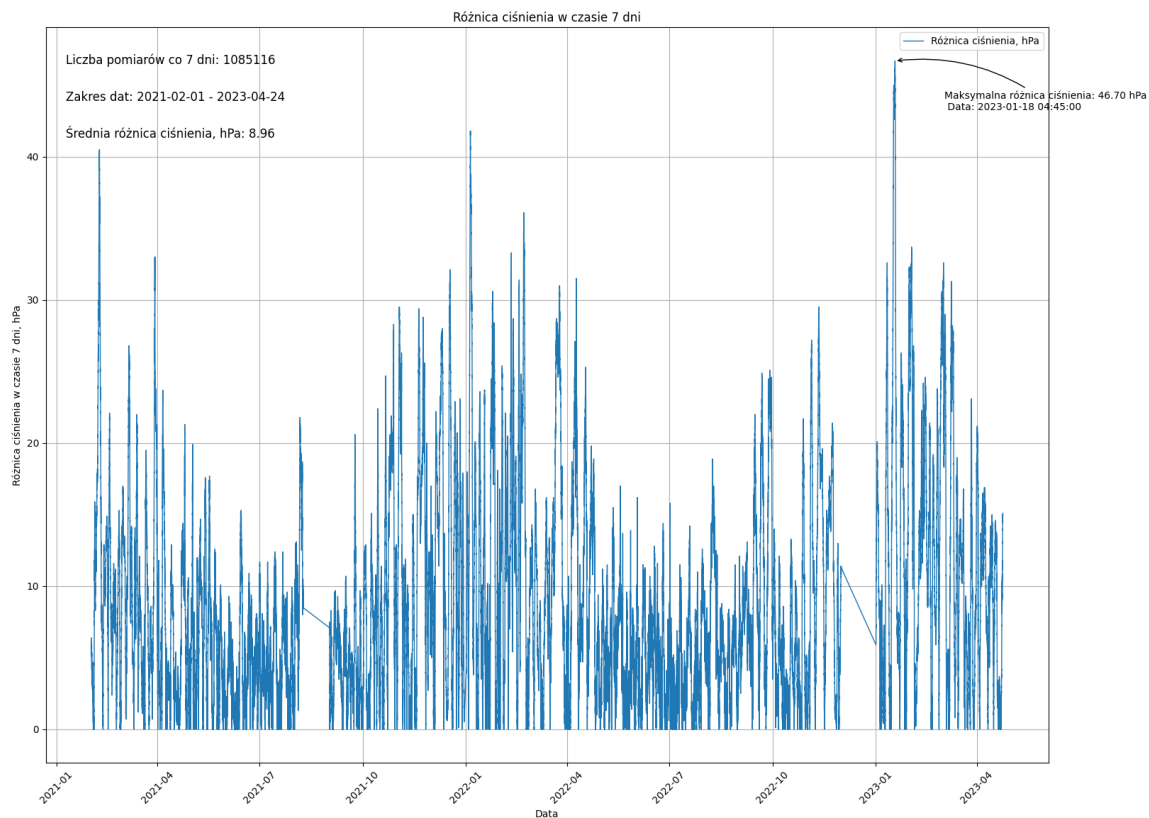
Szczegółowy przebieg pomiarów obrazują poniższe wykresy.



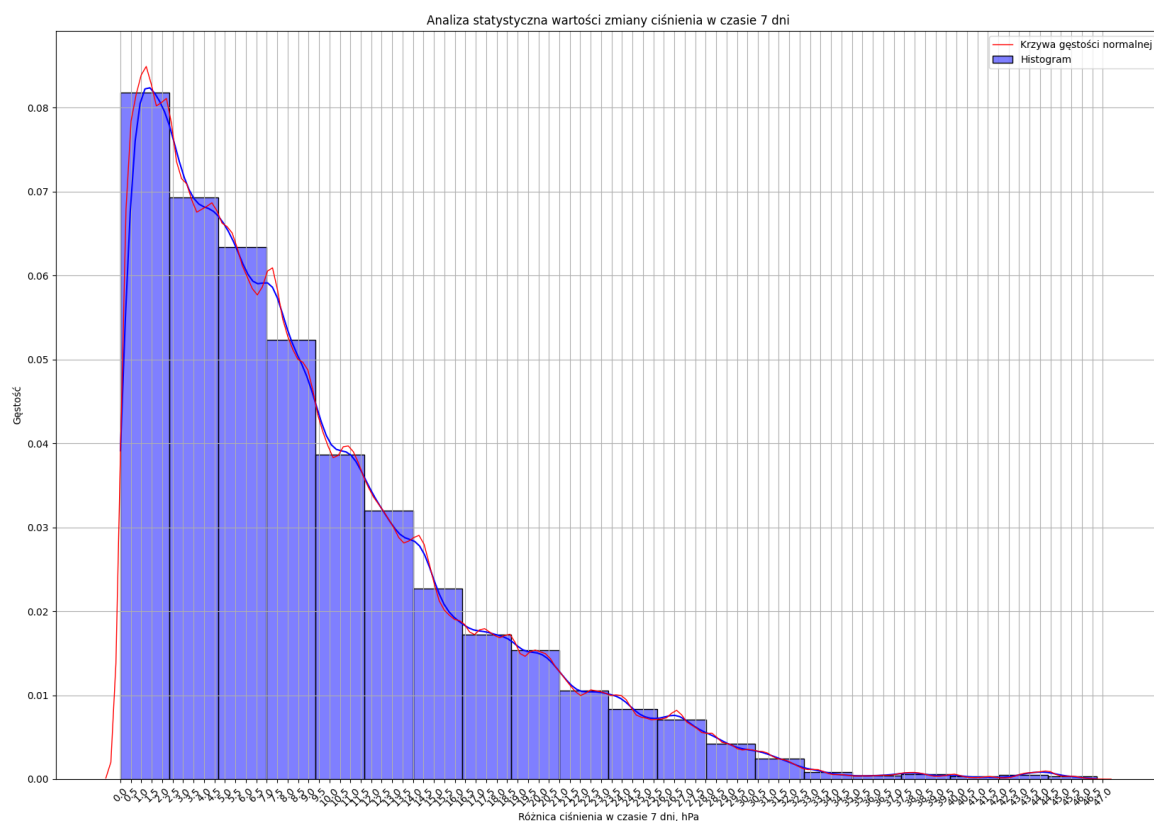
**Rys. 23** Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 1 miesiąc dla badania A



**Rys. 24** Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 1 miesiąca dla badania A

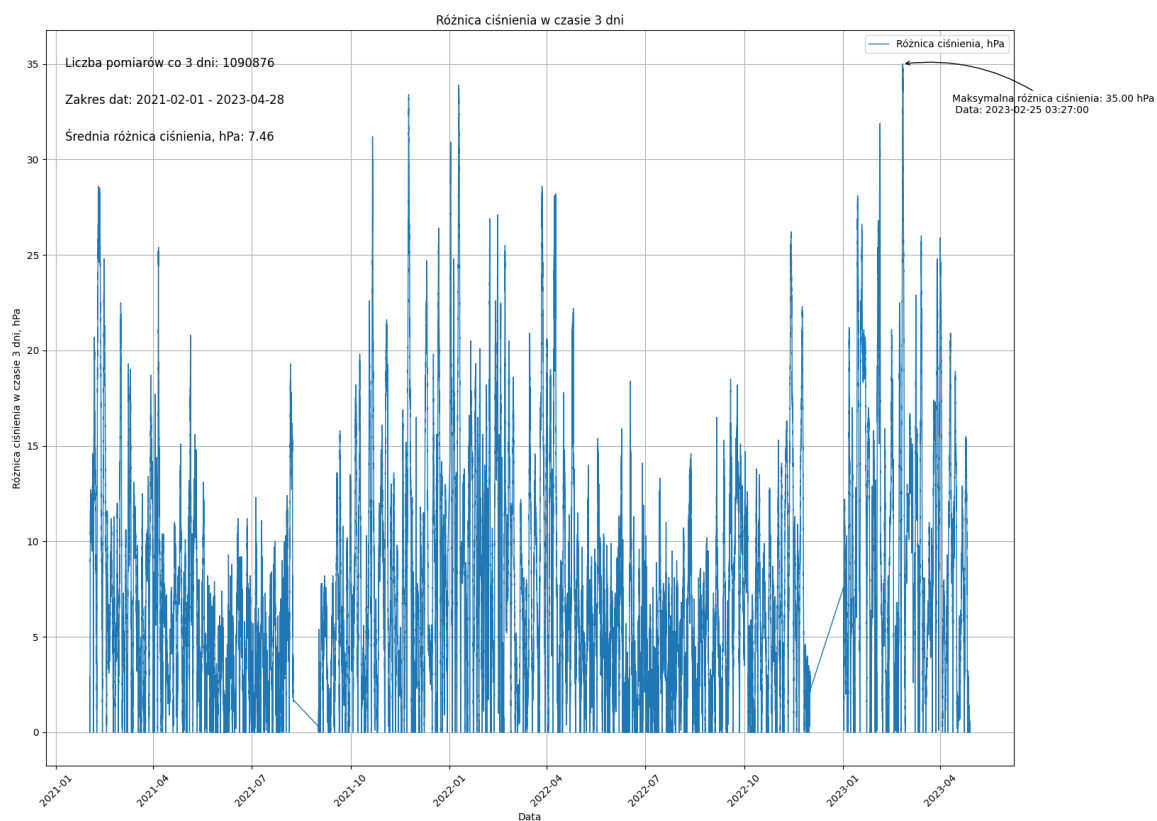


**Rys. 25** Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 7 dni dla badania A

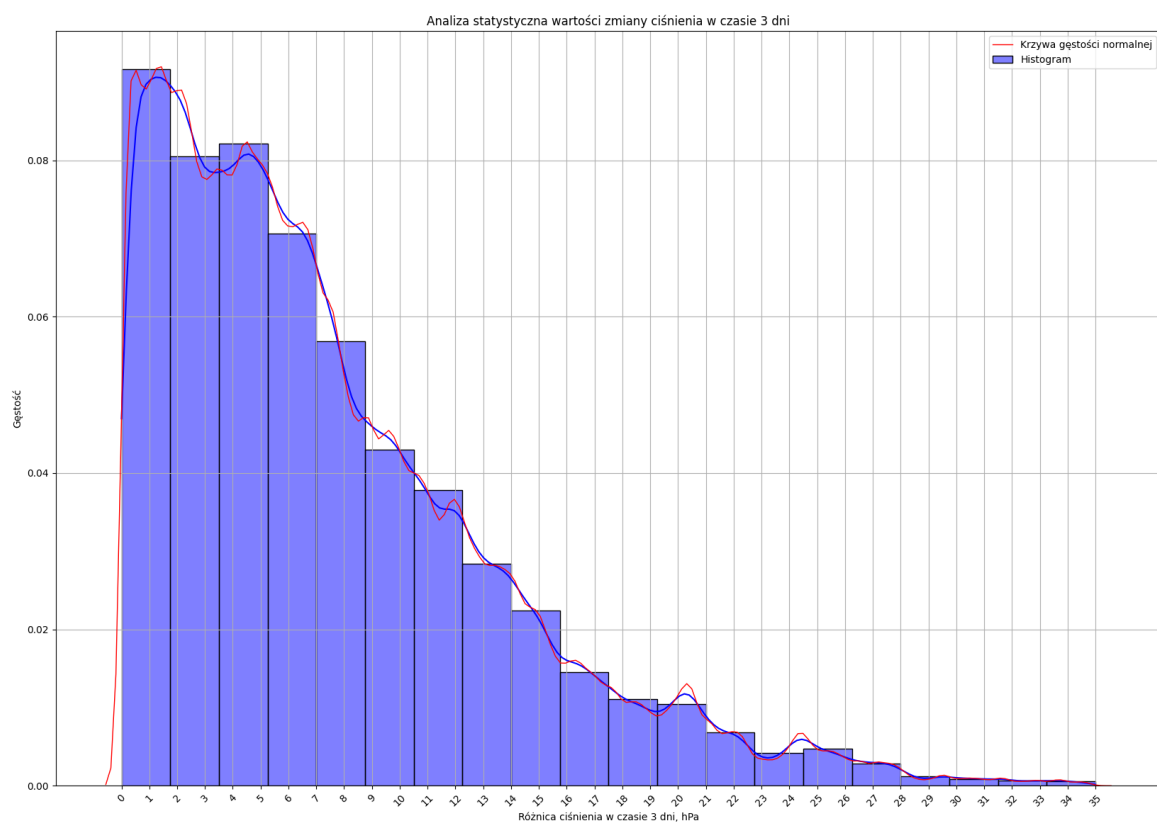


**Rys. 26** Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 7 dni dla badania A

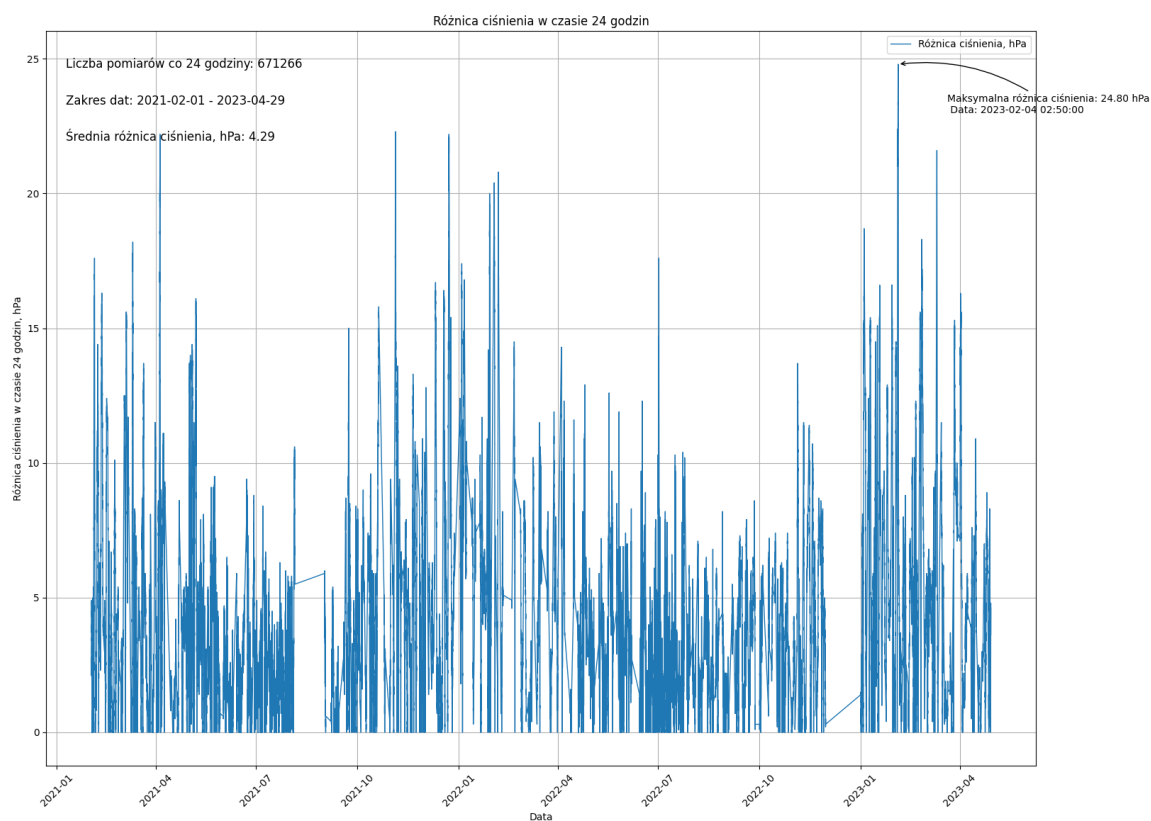




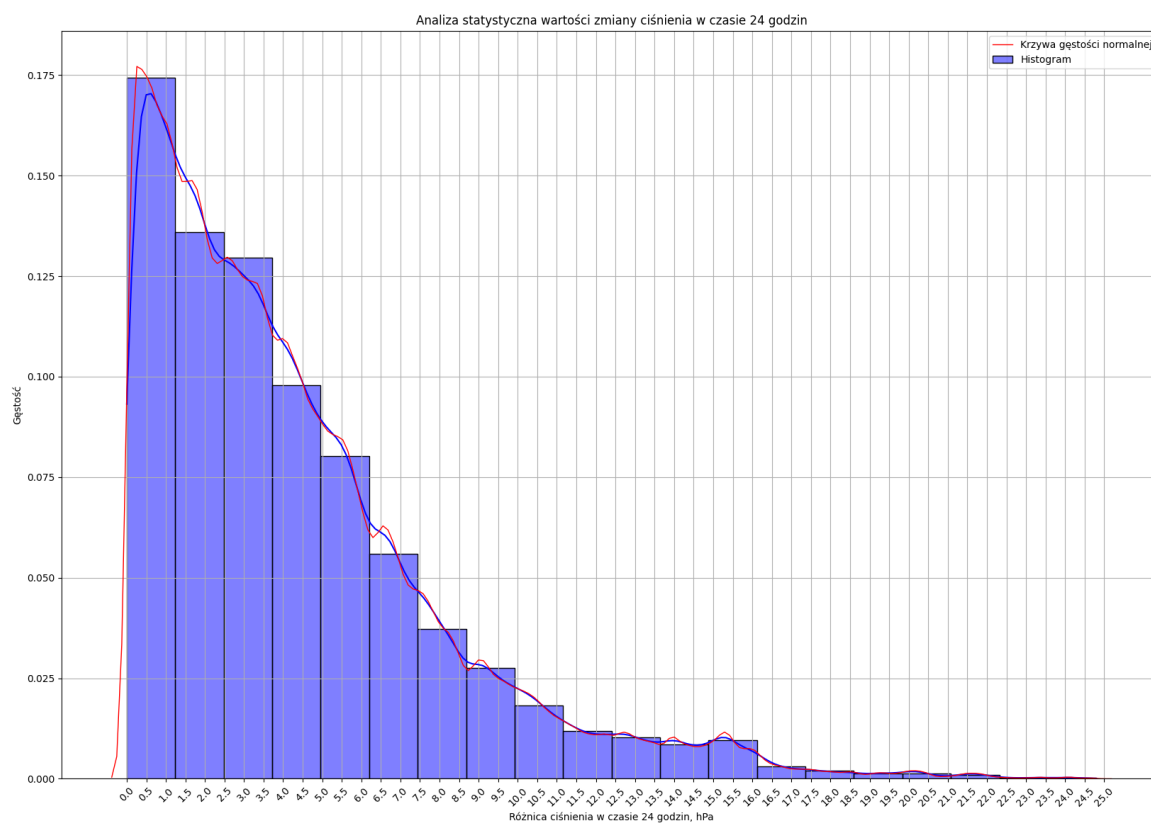
**Rys. 27** Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 3 dni dla badania A



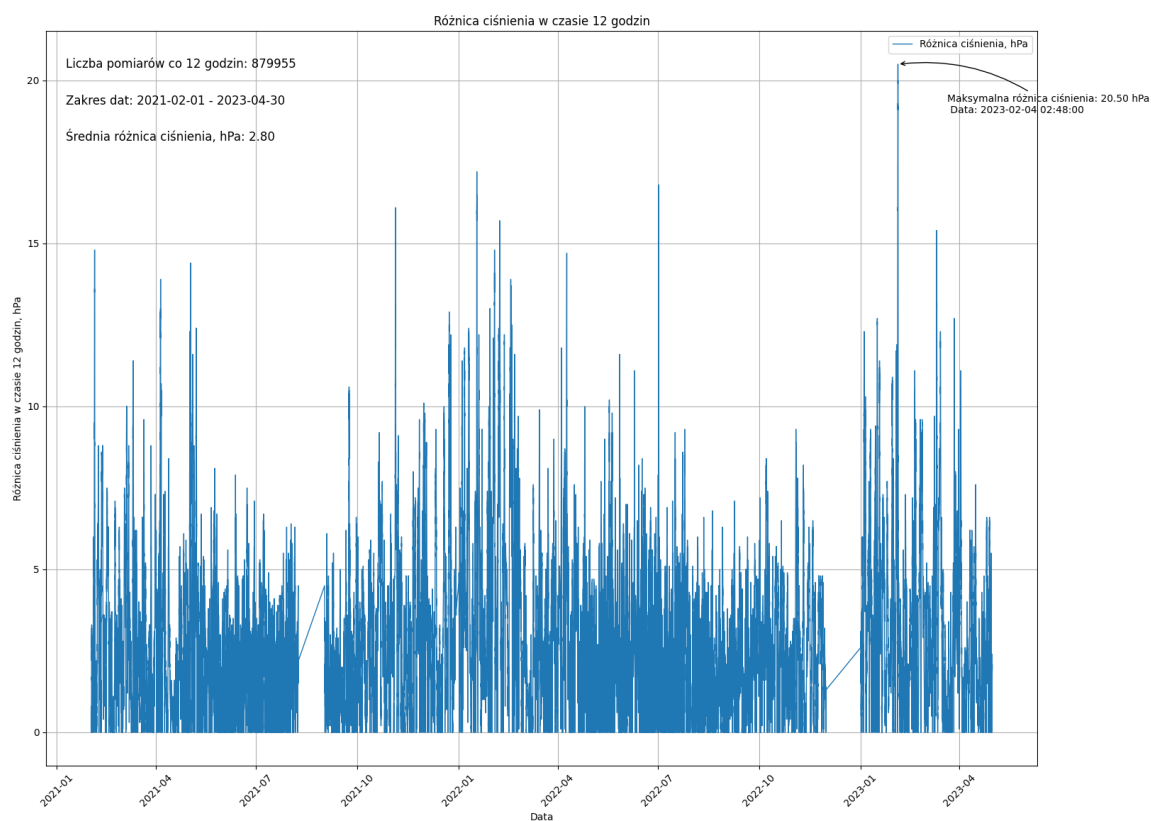
**Rys. 28** Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 3 dni dla badania A



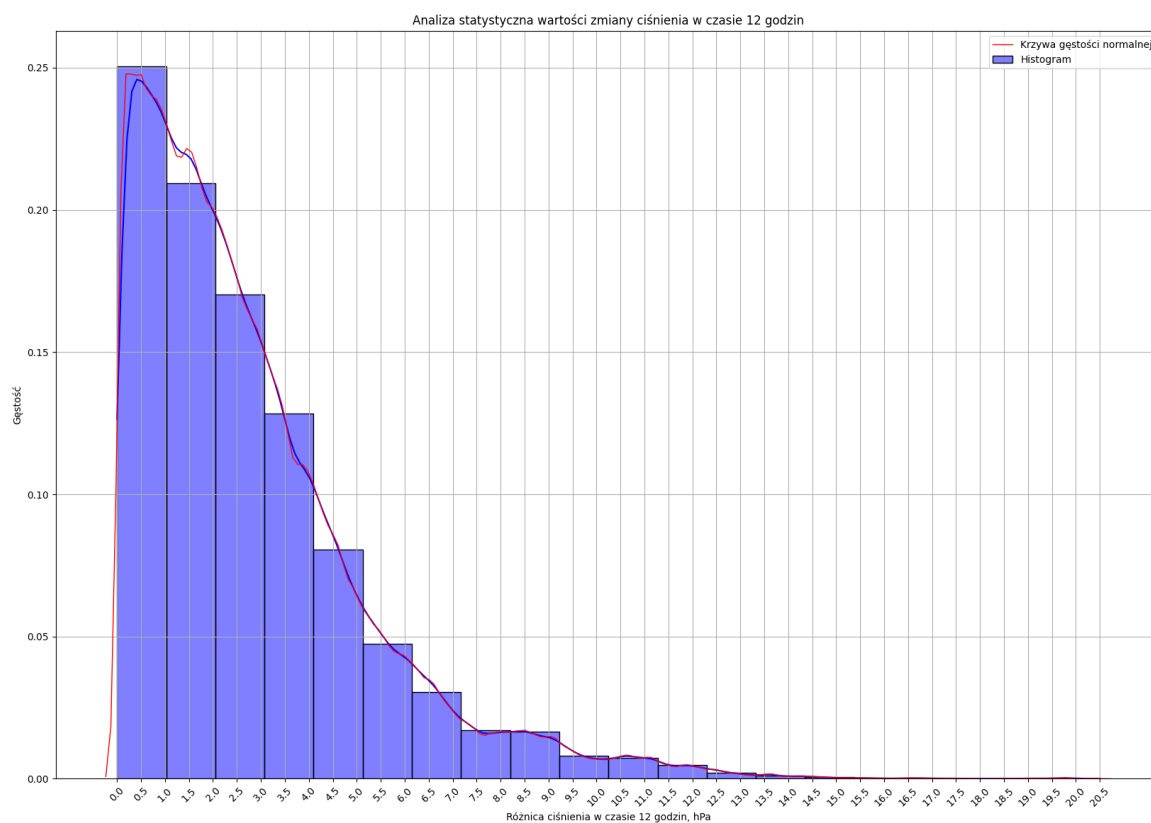
**Rys. 29** Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 24 godziny dla badania A



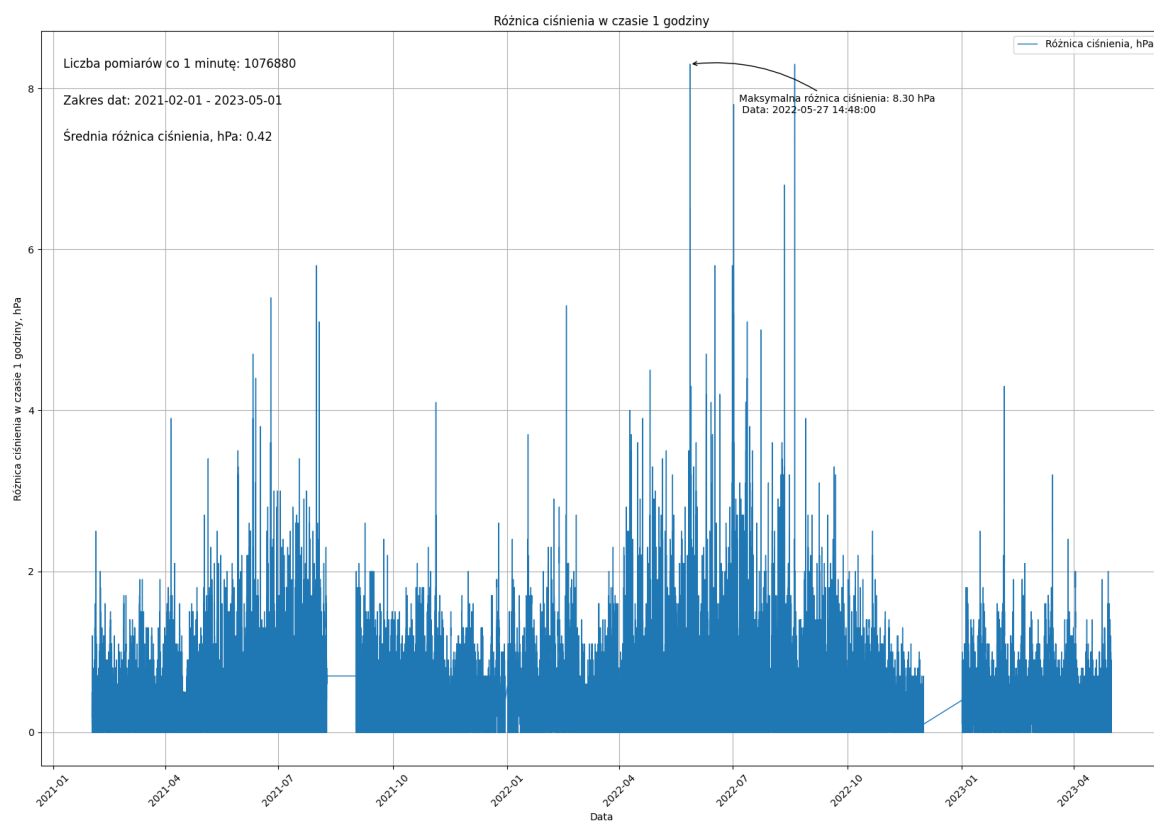
**Rys. 30** Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 3 dni dla badania A



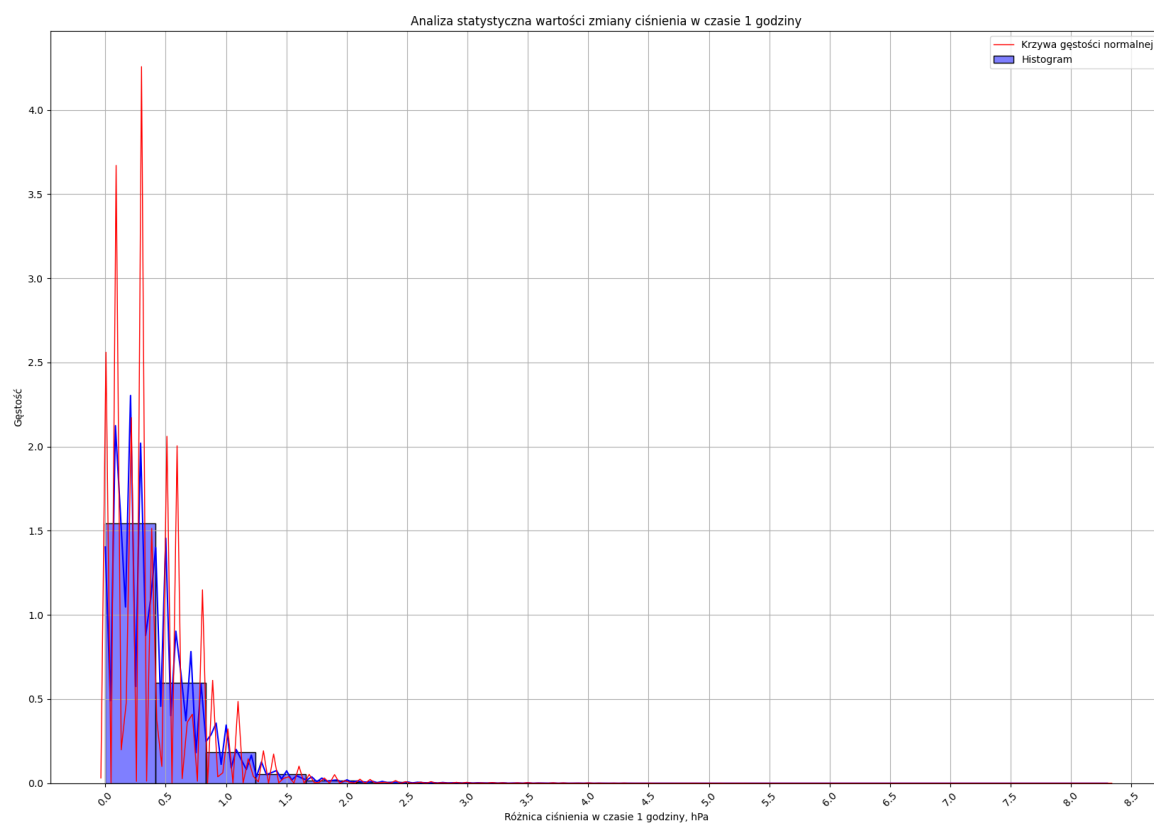
**Rys. 31** Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 12 godzin dla badania A



**Rys. 32** Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 12 godzin dla badania A

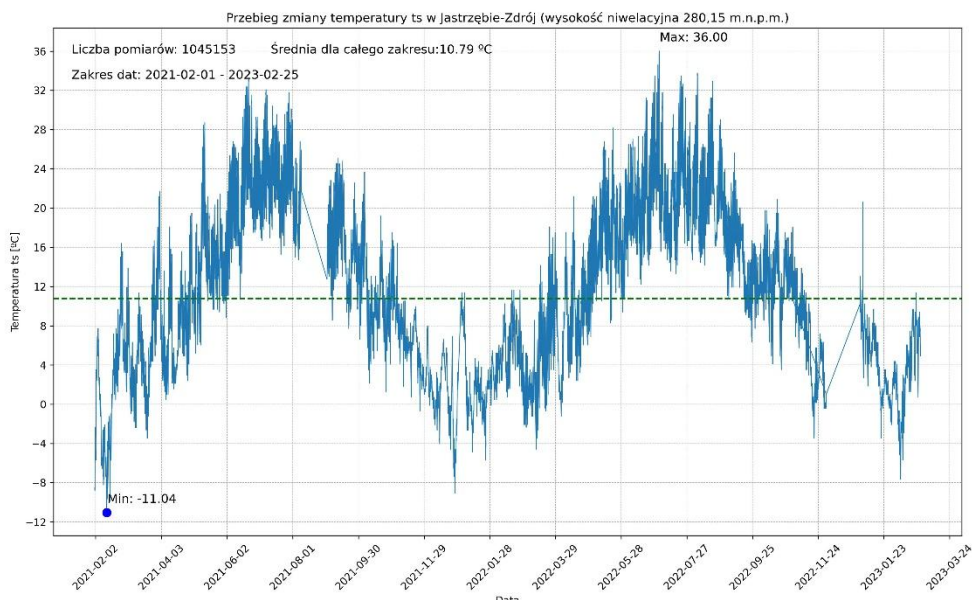


**Rys. 33** Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 1 godzinę dla badania A



**Rys. 34** Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 12 godzin dla badania A

### 3.2.3 Zestawienie otrzymanych wyników zmian temperatury suchej



**Rys. 35** Przebieg zmian temperatury powietrza w badaniu A

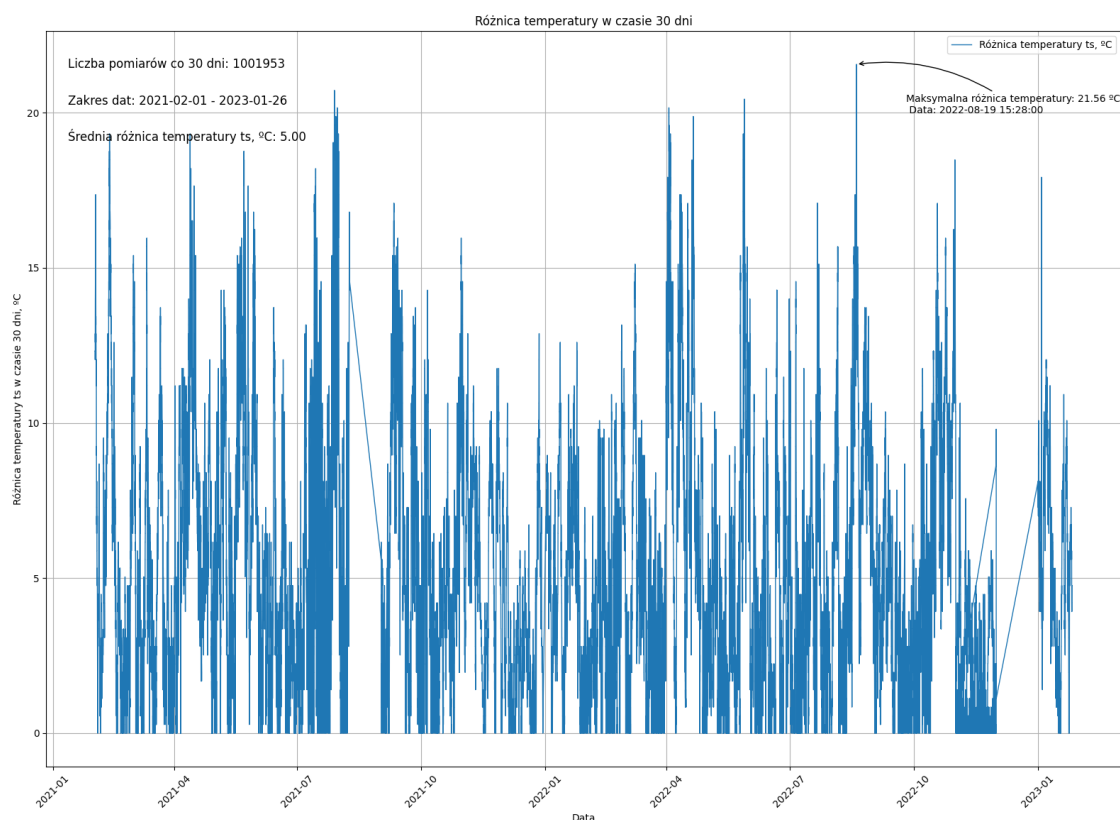
**Tabela 7** Zestawienie otrzymanych wyników dla temperatury powietrza w badaniu A

|                                                         | Minimalne | Średnie | Maksymalne |
|---------------------------------------------------------|-----------|---------|------------|
|                                                         | °C        | °C      | °C         |
| Wartość temperatury powietrza                           | -11.04    | 10.79   | 36,00      |
| Zmiana temperatury powietrza w okresie co jeden miesiąc | 0         | 5,00    | 21.56      |
| Zmiana temperatury powietrza w okresie co 7 dni         | 0         | 3.96    | 19.04      |
| Zmiana temperatury powietrza w okresie co 24 godziny    | 0         | 2.05    | 15.96      |
| Zmiana temperatury powietrza w okresie co 1 godzinę     | 0         | 0.56    | 12.88      |

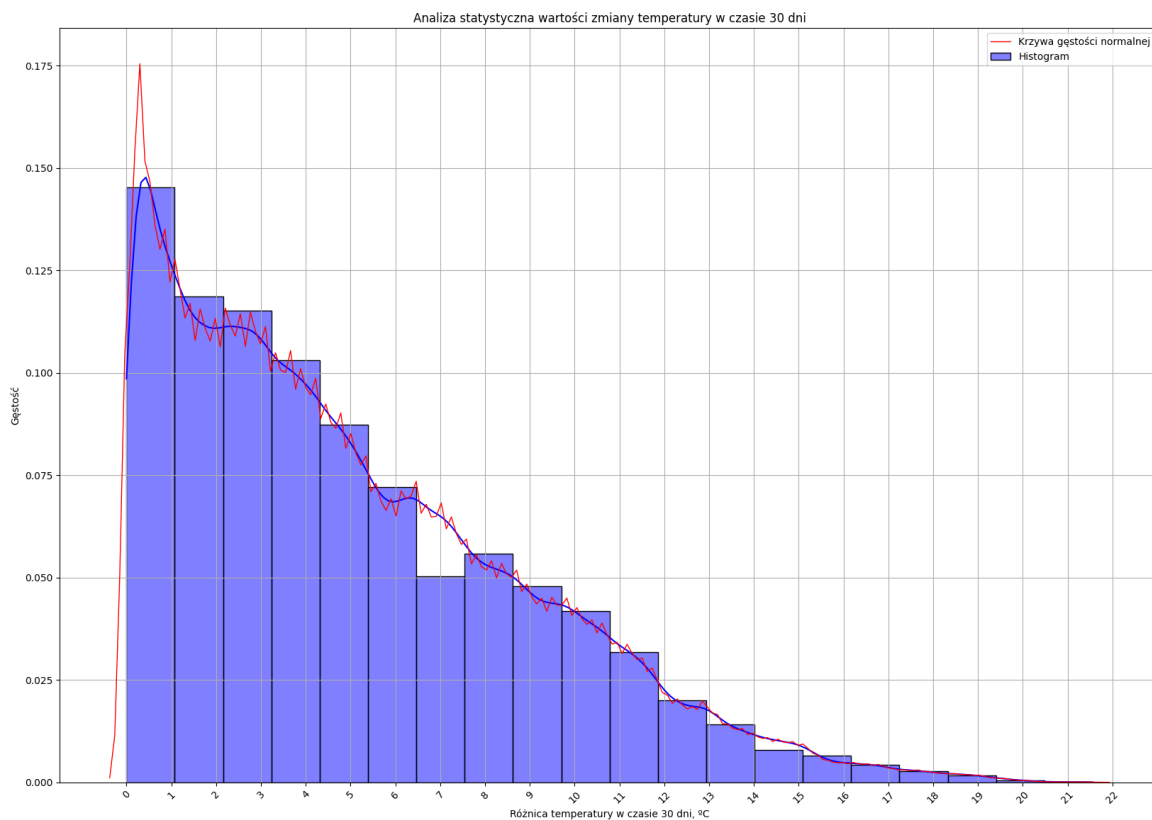
W przypadku temperatury suchej (Rys. 35, Tab. 7) obserwuje się bardzo wyraźną sezonowość związaną z cyklem rocznym. Średnia wartość temperatury powietrza w badanym okresie wyniosła 10,79°C, natomiast wartości ekstremalne mieściły się w przedziale od –11,04°C do 36,0°C. Wahania temperatury w krótkich przedziałach czasowych są istotne – w skali dobowej różnice osiągały do 15,96°C, a w skali godzinowej nawet 12,88°C, co pokazuje wysoki stopień zmienności (Rys. 35). Największe zmiany obserwowane były w okresach przejściowych (wiosna i jesień), gdy amplitudy międzydniowe dochodziły do kilkunastu stopni. W interwałach dłuższych (tygodniowych

i miesięcznych) maksymalne zmiany temperatury wynosiły odpowiednio 19,04°C i 21,56°C, co świadczy o dużej dynamice procesów atmosferycznych w regionie.

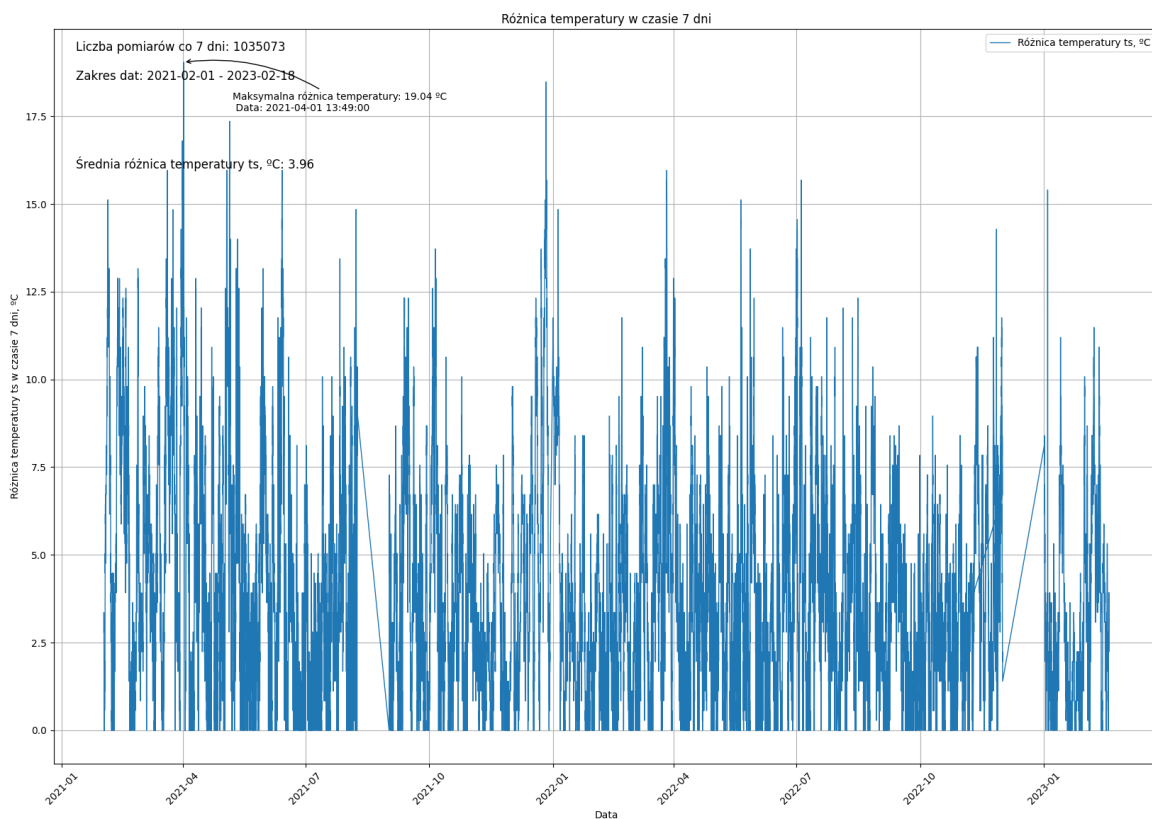
Histogramy zmian (Rys. 36–39) wskazują, że dominują niewielkie różnice (do kilku stopni), jednak obecność długiego ogona rozkładu potwierdza istnienie epizodów ekstremalnych. Tego typu gwałtowne wahania są istotne z punktu widzenia wentylacji kopalń, gdyż mają bezpośredni wpływ na warunki mikroklimatyczne w wyrobiskach. Wyniki potwierdzają, że modelowanie temperatury powinno uwzględniać zarówno cykliczność sezonową, jak i dobowe zmiany temperatury, aby lepiej odzwierciedlać warunki rzeczywiste w symulacjach numerycznych.



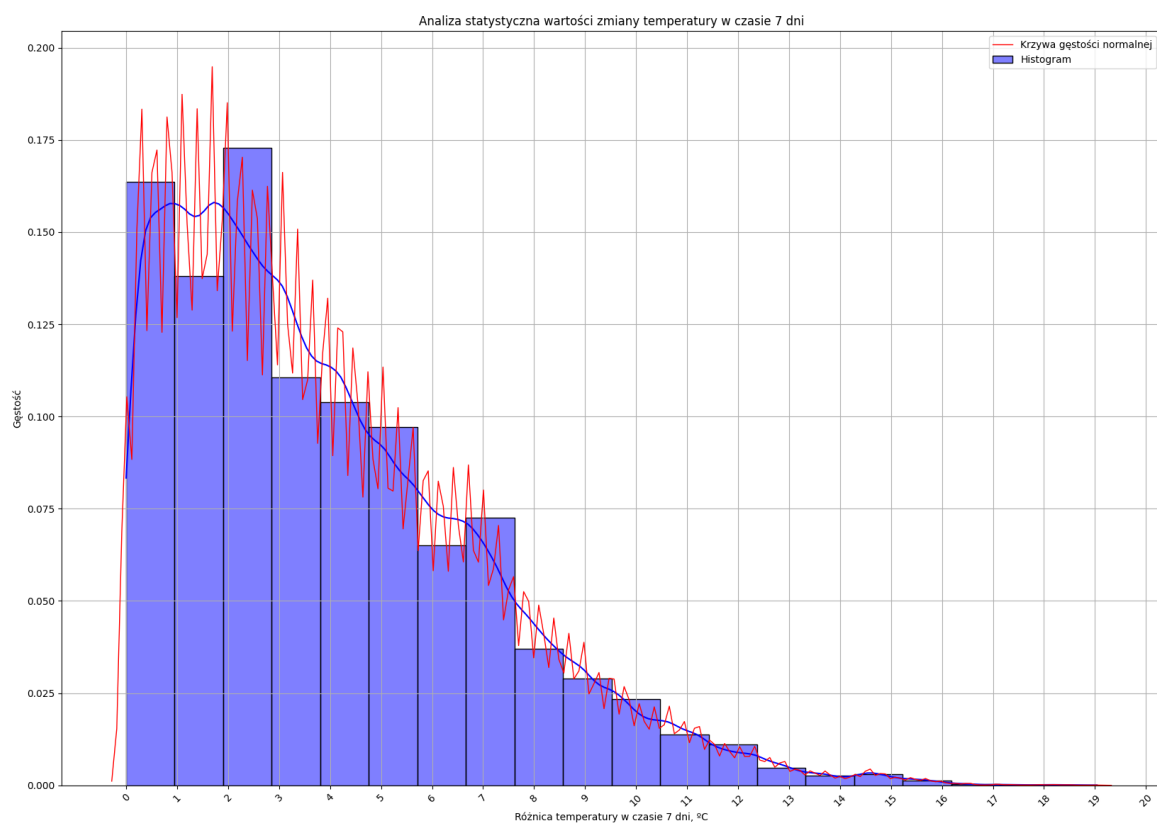
**Rys. 36** Zmiana temperatury powietrza w okresie co jeden miesiąc dla badania A



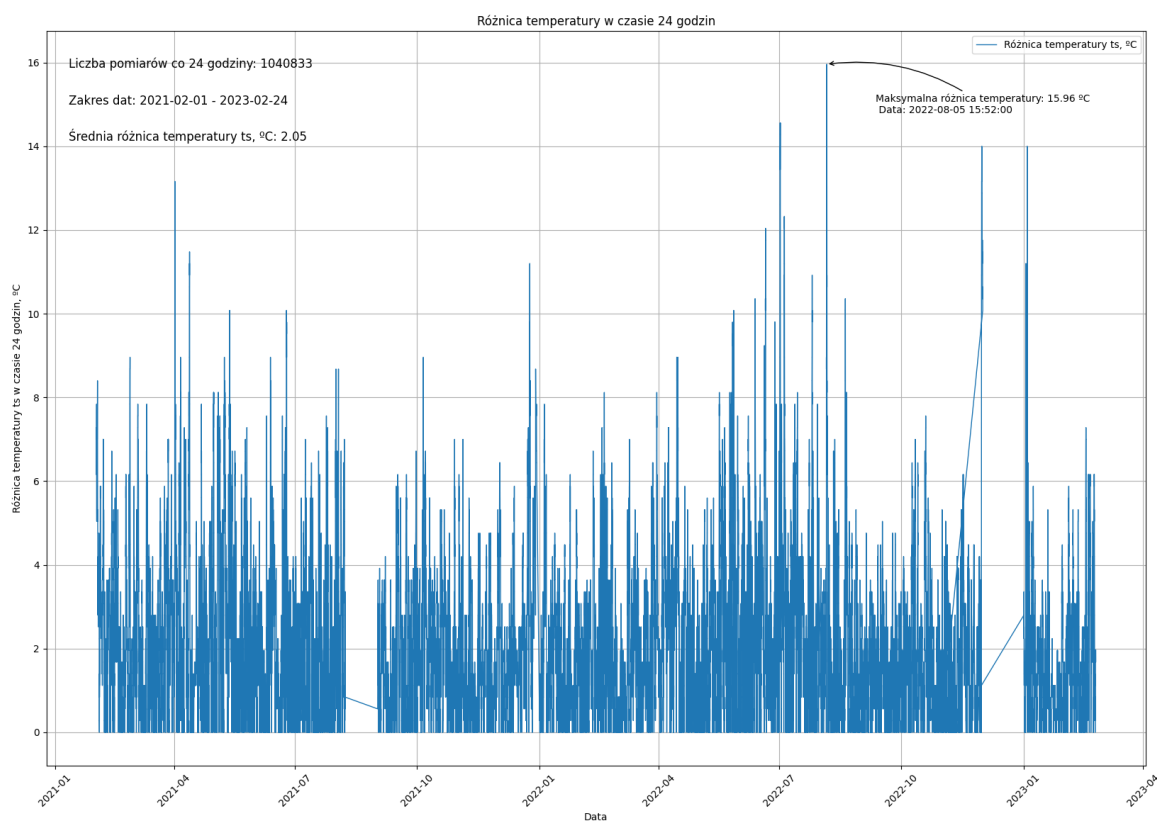
**Rys. 37** Histogram dla zmiany temperatury powietrza co jeden miesiąc dla badania A



**Rys. 38** Zmiana temperatury powietrza w okresie co 7 dni dla badania A

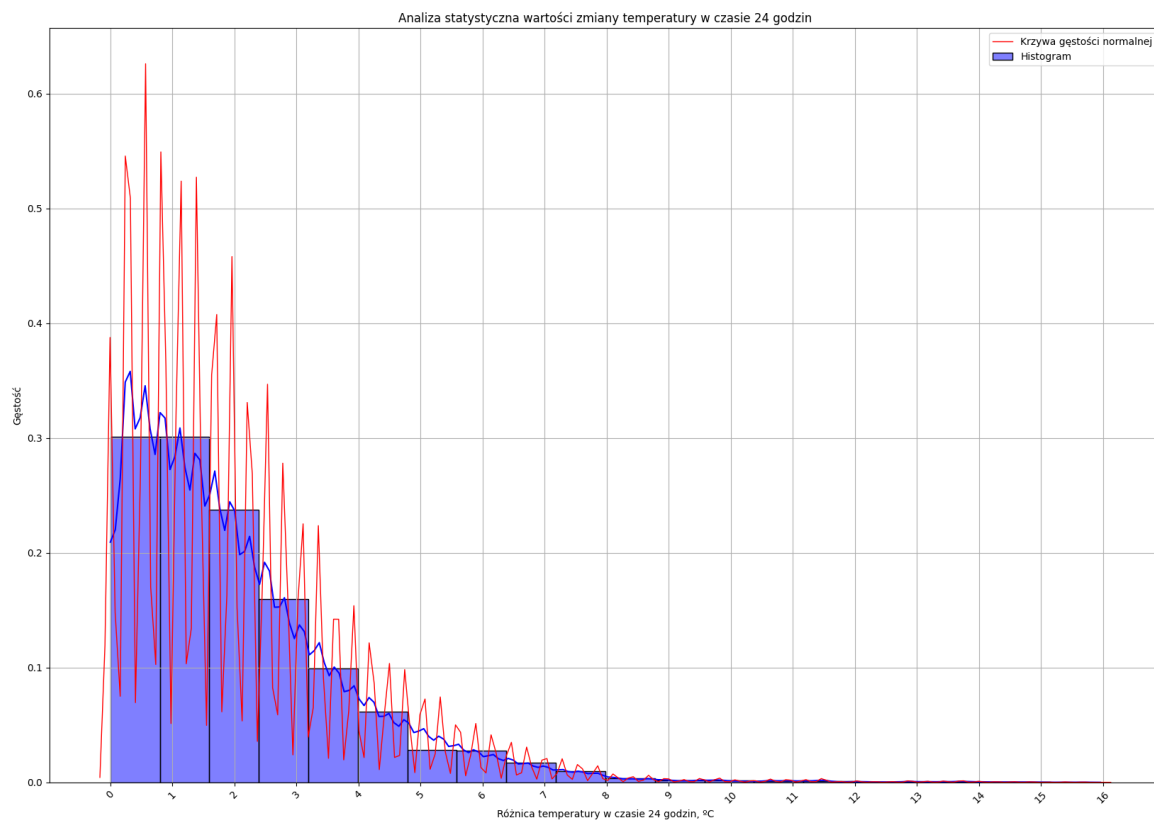


**Rys. 39** Histogram dla zmiany temperatury powietrza co 7 dni dla badania A

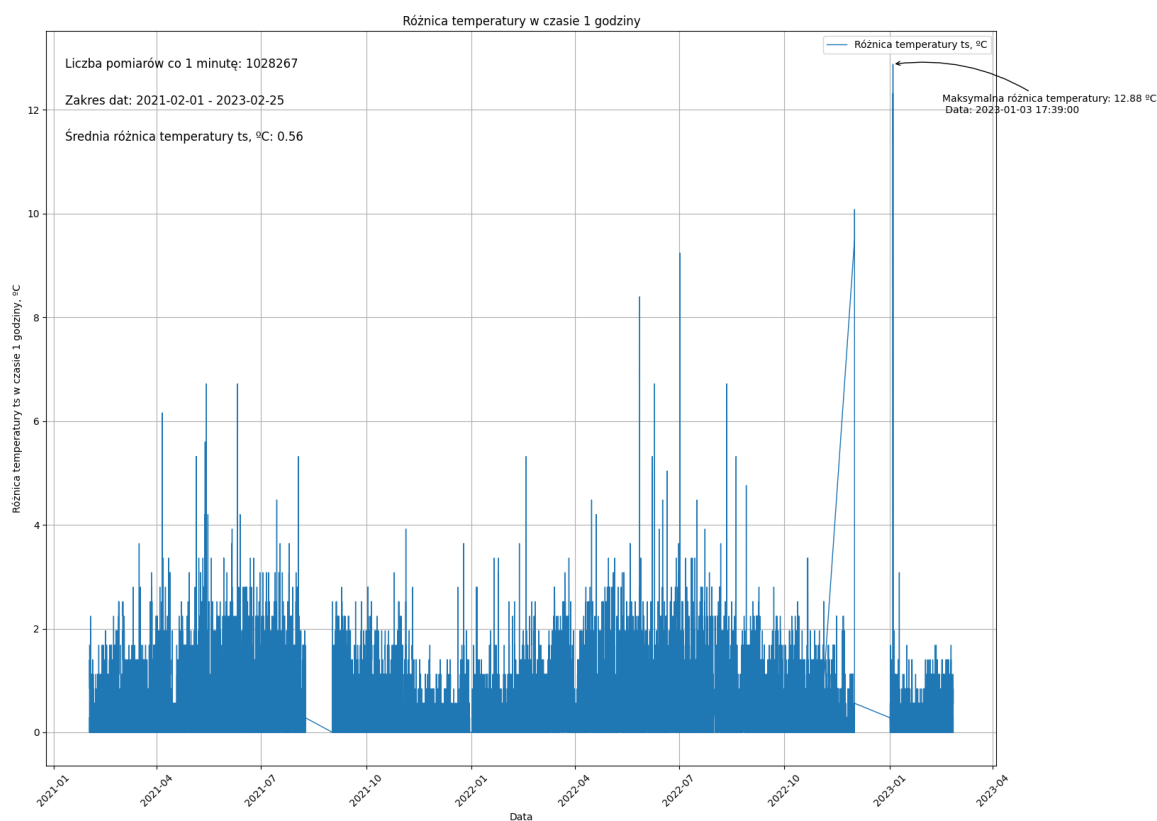


**Rys. 40** Zmiana temperatury powietrza w okresie co 24 godziny dla badania A

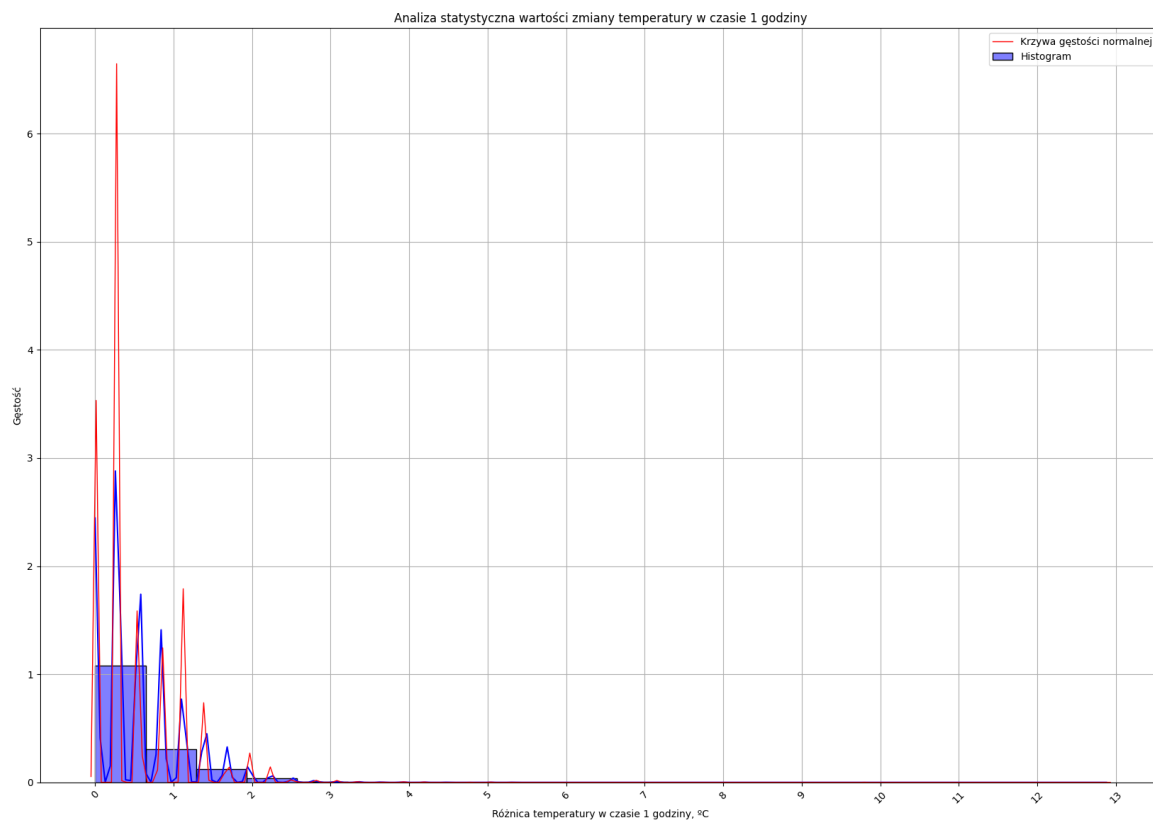




**Rys. 41** Histogram dla zmiany temperatury powietrza co 24 godziny dla badania A

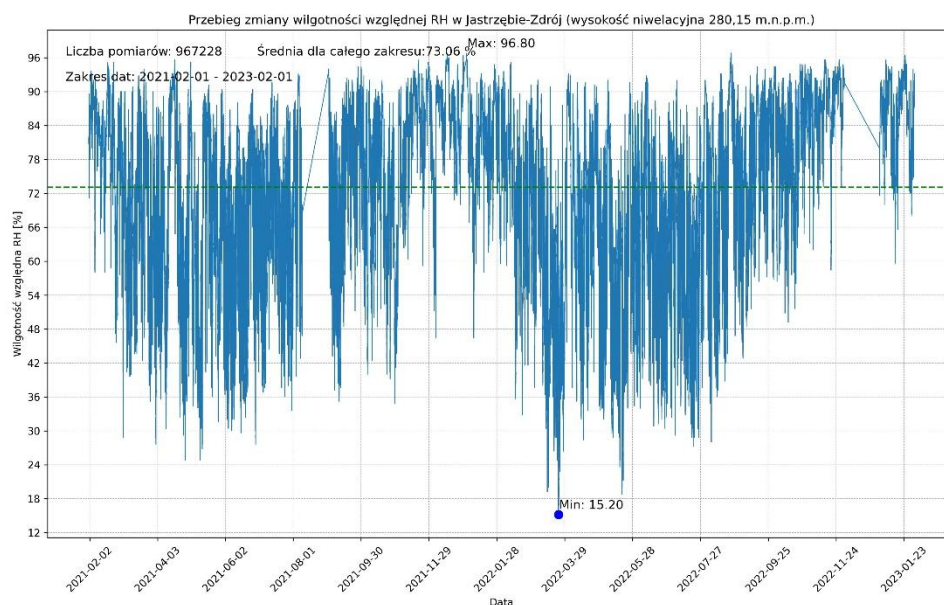


**Rys. 42** Zmiana temperatury powietrza w okresie co 1 godzinę dla badania A



Rys. 43 Histogram dla zmiany temperatury powietrza co 1 godzinę dla badania A

### 3.2.4 Zestawienie otrzymanych wyników dla wilgotności względnej

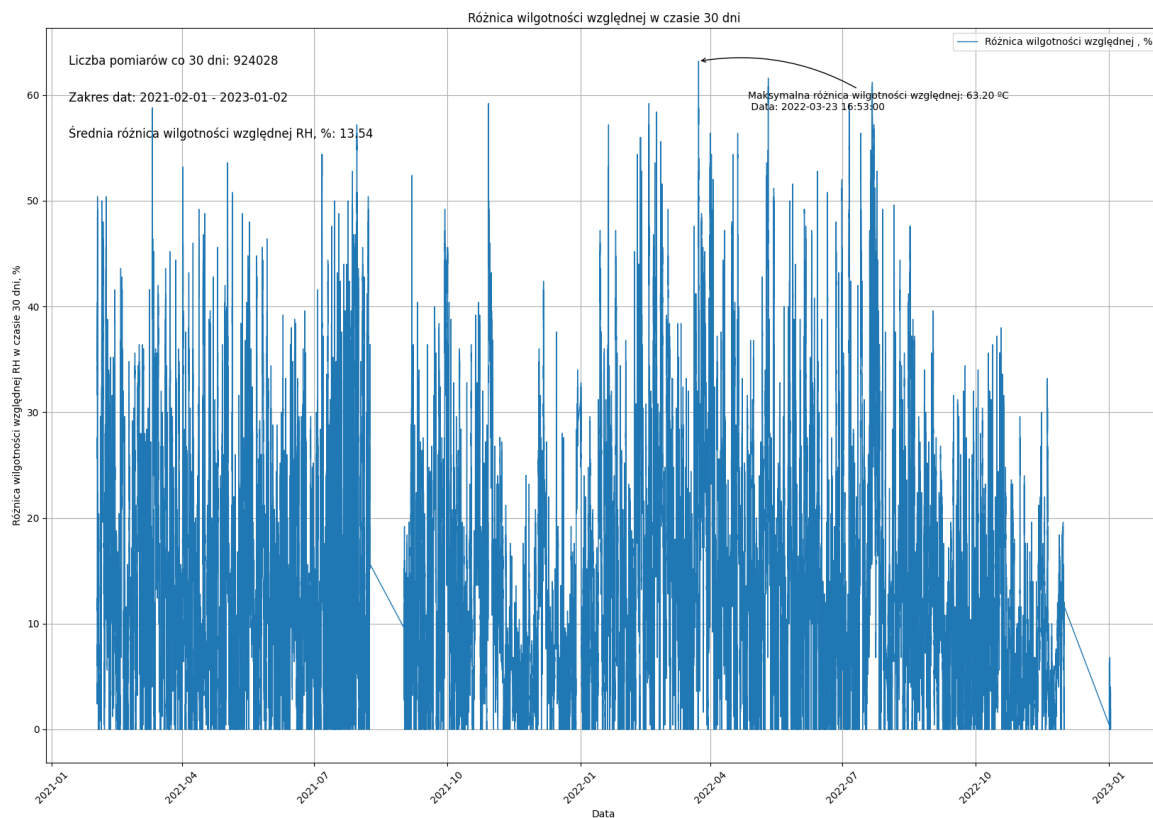


Rys. 44 Przebieg zmian wilgotności względnej powietrza w badaniu A

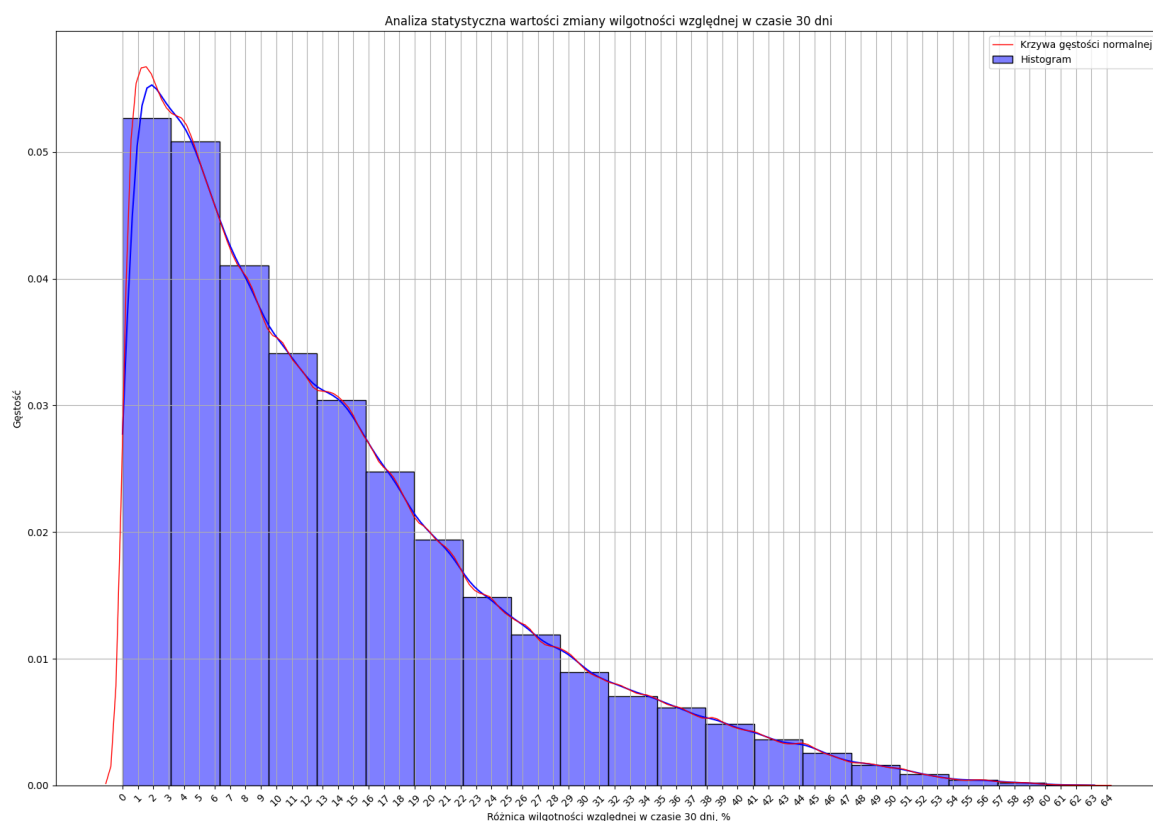
**Tabela 8** Zestawienie otrzymanych wyników wilgotności względnej powietrza w badaniu A

|                                                                   | Minimalne | Średnie | Maksymalne |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|---------|------------|
|                                                                   | %         | %       | %          |
| Wartość wilgotności względnej powietrza                           | 15.20     | 73.06   | 96.80      |
| Zmiana wilgotności względnej powietrza<br>w okresie co 1 miesiąc  | 0         | 13.54   | 65.20      |
| Zmiana wilgotności względnej powietrza<br>w okresie co 7 dni      | 0         | 12.44   | 67.60      |
| Zmiana wilgotności względnej powietrza<br>w okresie co 24 godziny | 0         | 8.89    | 59.60      |
| Zmiana wilgotności względnej powietrza<br>w okresie co 1 godzinę  | 0         | 2.54    | 40,00      |

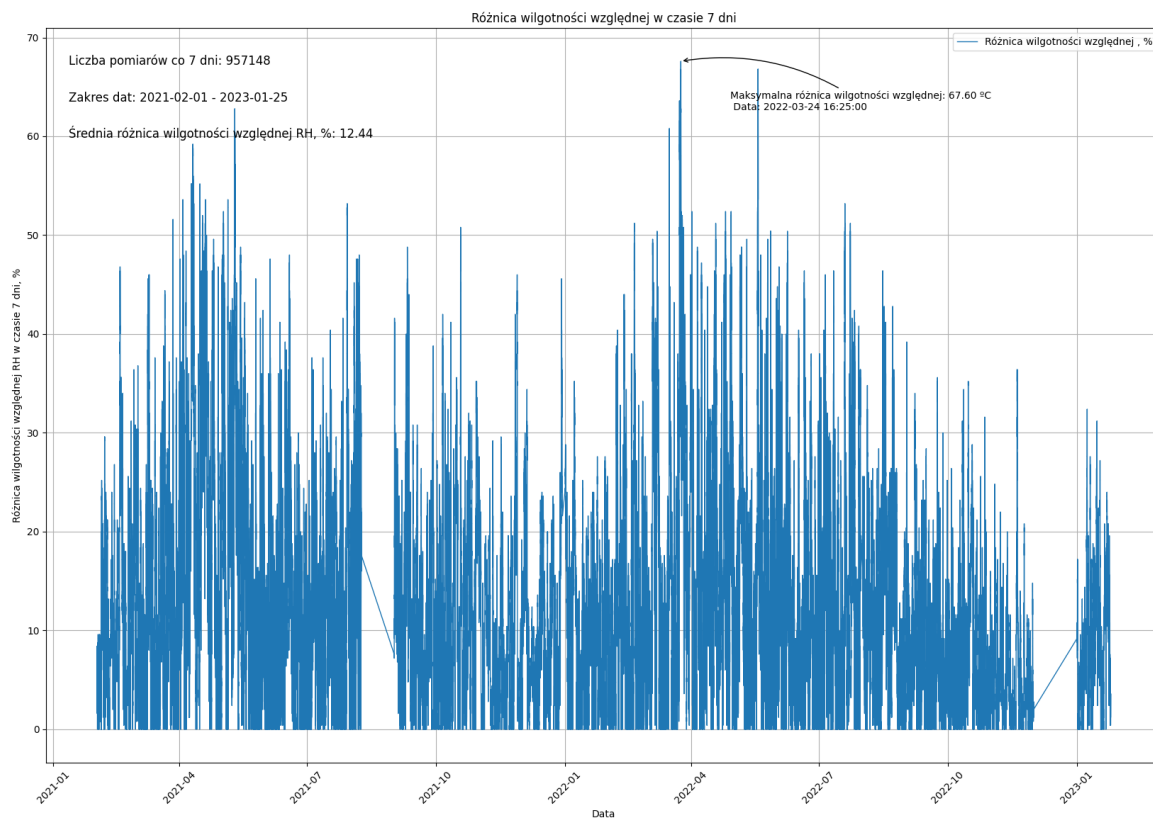
W przypadku wilgotności względnej powietrza (Rys. 44, Tab. 8) również zaobserwowano szeroki zakres wahań – od minimum 15,2% do maksimum 96,8%, przy średniej wartości 73,06%. Dynamika zmian wilgotności była wyraźna we wszystkich interwałach czasowych: w skali miesięcznej różnice sięgały 65,2%, tygodniowej 67,6%, a dobowej 59,6%. Nawet w skali godzinnej wartości maksymalne wynosiły 40% (Rys. 45–49). Rozkłady statystyczne potwierdzają, że choć dominują niewielkie zmiany (rzędu kilku procent), występują także liczne epizody nagłych spadków lub wzrostów wilgotności. Naturalnie wraz ze spadkiem temperatury wzrasta wilgotność względna. Wahania te, w powiązaniu z wahaniami temperatury, mogą istotnie wpływać na bilans ciepło-wilgotnościowy w wyrobiskach górniczych, a tym samym na procesy transportu masy i energii. Wyniki jednoznacznie wskazują na potrzebę uwzględnienia parametrów wilgotnościowych w modelach wentylacyjnych, zwłaszcza w kontekście oceny zagrożenia klimatycznego oraz są podstawą do opracowania dynamiki zmian wilgotności właściwej.



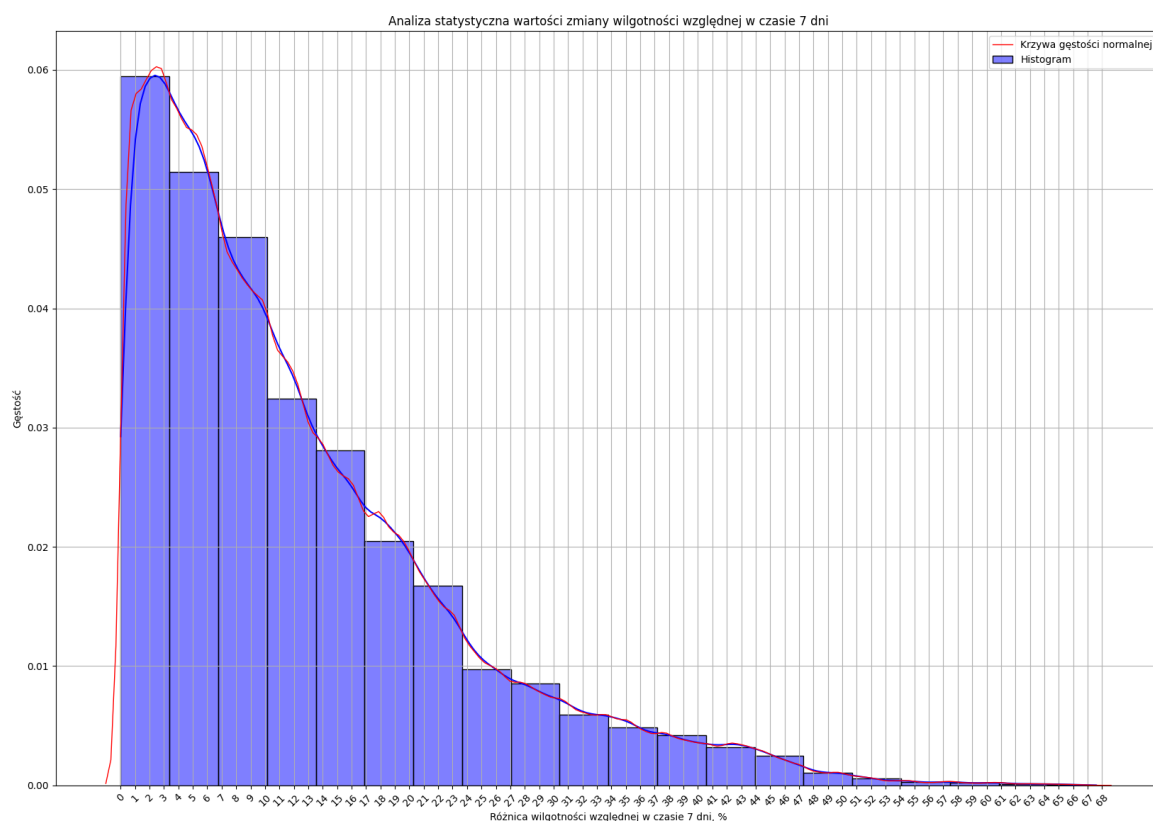
**Rys. 45** Zmiana wilgotności względnej powietrza w okresie co 1 miesiąc dla badania A



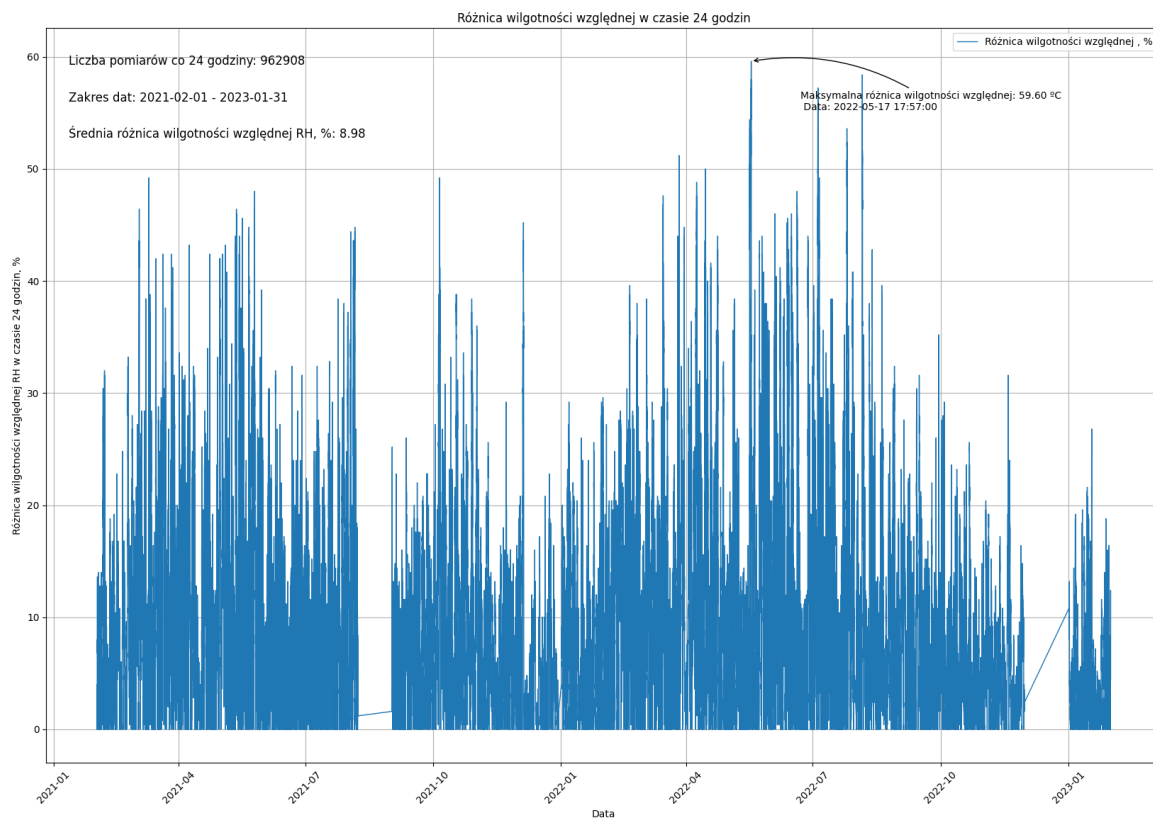
**Rys. 46** Histogram dla zmiany wilgotności względnej powietrza w okresie co 1 miesiąc dla badania A



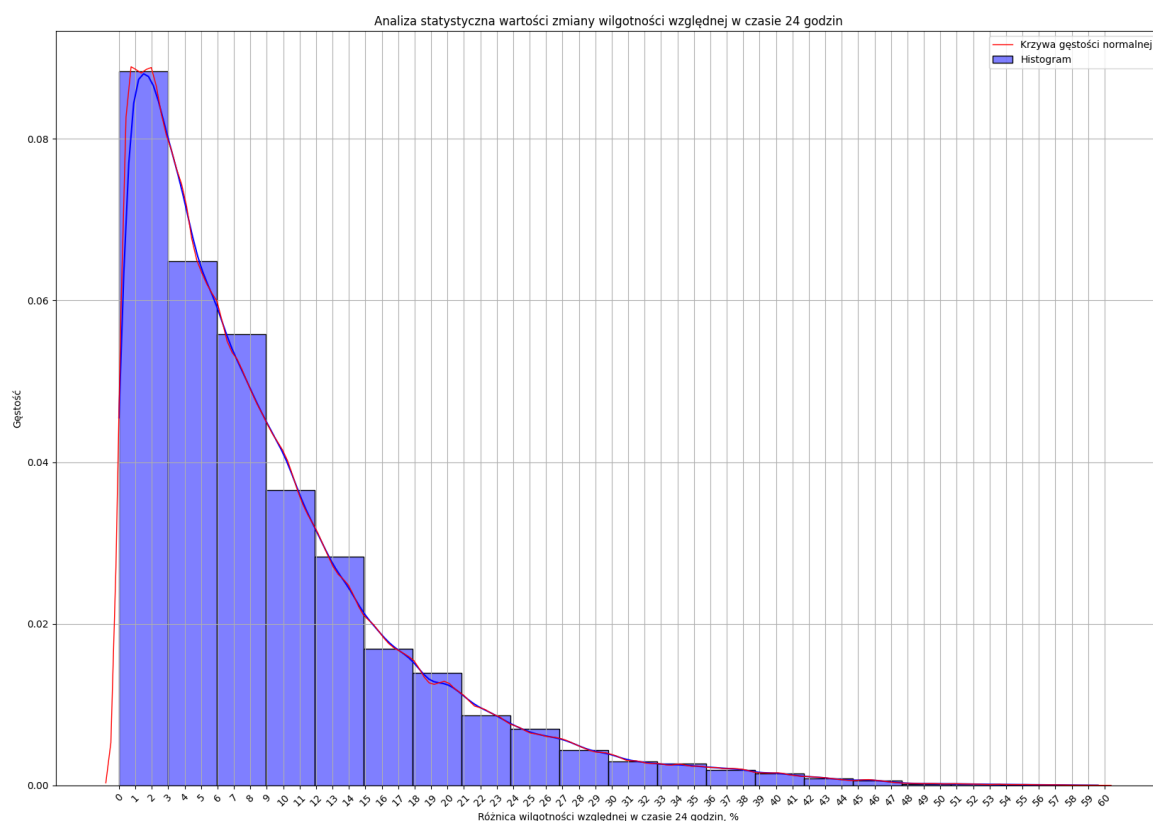
**Rys. 47** Zmiana wilgotności względnej powietrza w okresie co 7 dni dla badania A



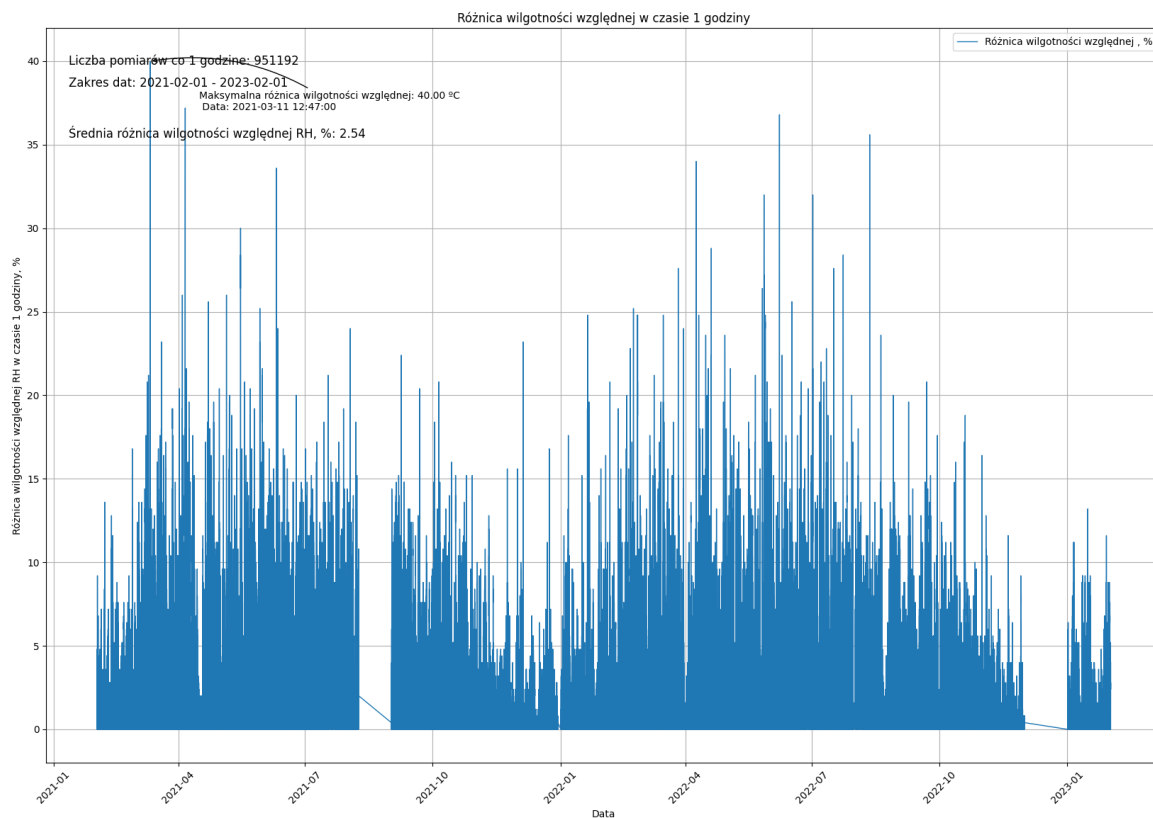
**Rys. 48** Histogram dla zmiany wilgotności względnej powietrza w okresie co 7 dni dla badania A



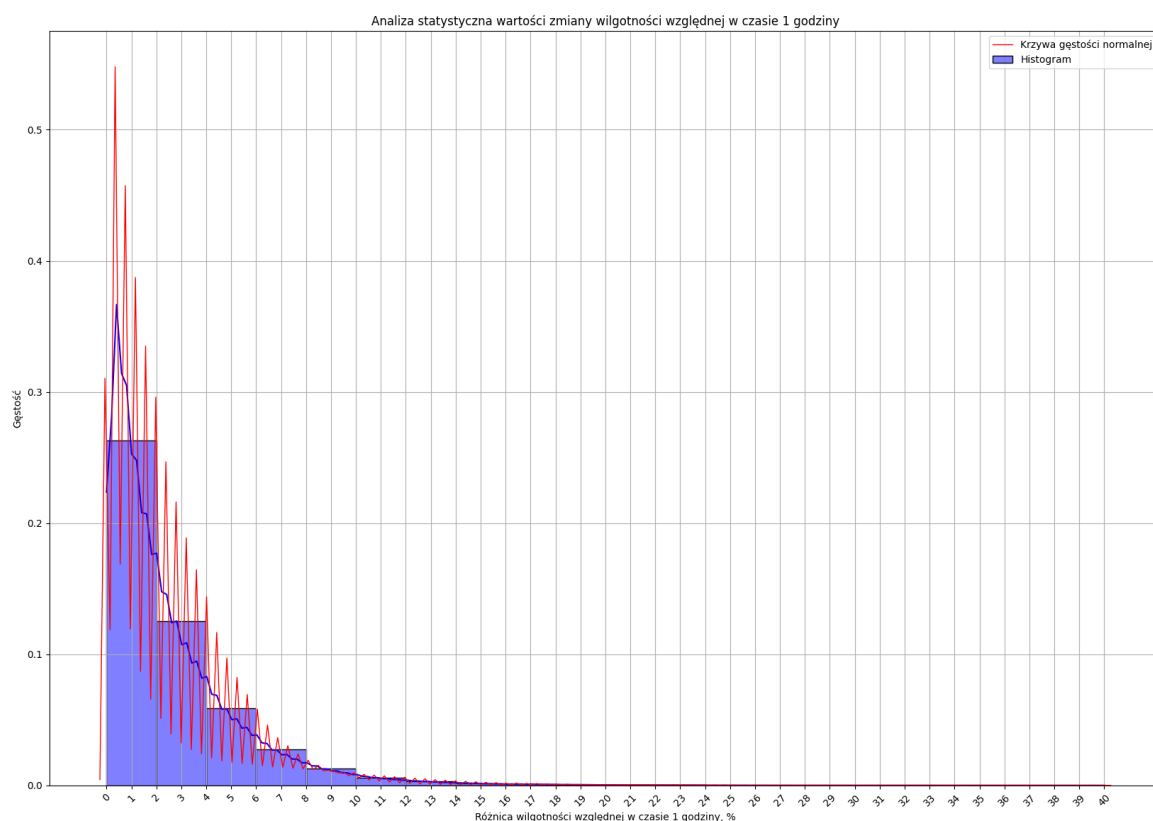
**Rys. 49** Zmiana wilgotności względnej powietrza w okresie co 24 godziny dla badania A



**Rys. 50** Histogram dla zmiany wilgotności względnej powietrza w okresie co 24 godziny dla badania A



**Rys. 51** Zmiana wilgotności względnej powietrza w okresie co 1 godzinę dla badania A



**Rys. 52** Histogram dla zmiany wilgotności względnej powietrza w okresie co 1 godzinę dla badania A

Analiza zmian wilgotności względnej powietrza w badaniu A (Rys. 45–52) wskazuje na istotną dynamikę tego parametru w różnych przedziałach czasowych. W okresach miesięcznych średnia różnica wilgotności wynosiła 13,54%, a wartości maksymalne sięgały 63,2% (Rys. 45–46). W interwałach tygodniowych średnia różnica wynosiła 12,44%, przy czym notowano skoki nawet do 67,6% (Rys. 47–48). W skali dobowej wartości były nieco niższe, średnio 8,98%, z maksymalnym wzrostem do 59,6% (Rys. 49–50). Nawet w interwale godzinnym obserwowano średnią różnicę 2,54%, a ekstremalne zdarzenia dochodziły do 40% (Rys. 51–52). Histogramy rozkładów potwierdzają, że w większości przypadków zmiany wilgotności są umiarkowane, ale pojawiają się także rzadkie, gwałtowne fluktuacje o dużej skali, widoczne w „ogonie” rozkładu. Wyniki te są istotne z punktu widzenia warunków klimatycznych w wyrobiskach górniczych.

### **3.2.5 Podsumowania otrzymanych wyników w Badaniu A**

Podsumowując wyniki Badania A, obejmującego analizę ciśnienia barometrycznego, temperatury powietrza oraz wilgotności względnej, można wskazać kilka kluczowych wniosków (Rys. 22–52, Tab. 6–8):

1. Ciśnienie barometryczne – średnia wartość wyniosła 982,9 hPa, przy ekstremach od 953,6 hPa do 1009,2 hPa. Dynamika zmian ciśnienia w różnych interwałach czasowych wskazuje na dużą zmienność: w skali miesięcznej do 51,3 hPa, tygodniowej do 46,7 hPa, dobowej do 24,8 hPa, a nawet godzinowej do 8,3 hPa. Histogramy rozkładów pokazują przewagę niewielkich zmian, jednak pojawiają się także istotne epizody gwałtownych spadków i wzrostów, które mają bezpośrednie znaczenie dla procesów wydzielania metanu ze zrobów i zagrożenia metanowego.
2. Temperatura powietrza – średnia w okresie pomiarowym wyniosła 10,79°C, przy wartościach od -11,04°C do 36°C. Zmiany w krótkich interwałach mogą być bardzo duże, w ciągu jednej doby nawet 15,96°C, a w skali godzinowej aż 12,88°C. W interwałach tygodniowych i miesięcznych różnice wynosiły odpowiednio 19,04°C i 21,56°C. Analiza rozkładów potwierdza dominację niewielkich zmian, lecz obecność długiego ogona wskazuje na występowanie epizodów ekstremalnych, co ma znaczenie praktyczne w kontekście bilansu cieplnego i mikroklimatu w wyrobiskach.
3. Wilgotność względna powietrza – średnia wartość wyniosła 73,06%, przy zakresie od 15,2% do 96,8%. Zmienność tego parametru była wyraźna w różnych skalach czasowych: w skali miesięcznej maksymalne różnice osiągały 63,2%, tygodniowej



67,6%, dobowej 59,6%, a godzinowej aż 40%. Histogramy ukazują przewagę niewielkich zmian, jednak podobnie jak w przypadku temperatury, obserwuje się epizody gwałtownych wahań. Z punktu widzenia praktyki górniczej ma to istotne znaczenie dla komfortu pracy, procesów kondensacyjnych, osadzania pyłów oraz korozji elementów metalowych w kopalni.

### **3.2.6. Badanie B – Metoda analizy dynamiki zmian parametrów atmosferycznych na podstawie danych archiwalnych portalu meteoblue.com**

#### **Cel badania:**

Określenie dynamiki zmian ciśnienia barometrycznego w rejonie kopalni na podstawie udostępnionych danych portalu meteoblue.com dla miasta Jastrzębie-Zdrój dla okresu 10 lat od 2013-2022 r.

Dodatkowym celem jest sprawdzenie poprawności wykonanej analizy w badaniu A (bezpośredni pomiar ciśnienia barometrycznego, temperatury suchej, wilgotności względnej w jednej z kopalń JSW S.A.).

#### **Źródło pomiarów archiwalnych:**

Dane historyczne pobrano za pośrednictwem strony <https://www.meteoblue.com/>. Meteoblue to szwajcarska usługa meteorologiczna, która dostarcza prognozy pogody dla dowolnego miejsca na Ziemi, niezależnie od obecności lokalnych stacji meteorologicznych. Meteoblue integruje dane z różnych źródeł (stacje meteorologiczne, satelity).

Pobierając dane, skorzystano z usługi history+, która oferuje dostęp do globalnych symulacji pogodowych od 1940 roku w rozdzielczości godzinowej. Użytkownicy mogą pobierać dane dotyczące takich parametrów jak temperatura, wiatr, zachmurzenie czy opady w formacie CSV dla dowolnego miejsca na świecie.

Ważną cechą Meteoblue jest możliwość uzyskania danych nie tylko ze stacji meteorologicznych, ale również dla miejsc, gdzie ich nie ma – dane są generowane przez interpolację danych stacji sąsiednich.

Dane zostały pobrane dla lokalizacji miasta Jastrzębie-Zdrój (szerokość geograficzna: 49°57'9.66"N oraz długość geograficzna: 18°32'54.68"E) dla koty niwelacyjnej 256 m.n.p.m.

Punkt ten znajduje się w odległości około 1,32 km i różnicy wysokości ok. 24m od miejsca wykonywania badania A na terenie kopalni.

**Tabela 9** Wycinek danych źródłowych z portalu meteoblue.com

| location            | Jastrzębie-Zdrój                                             | Jastrzębie-Zdrój                                     | Jastrzębie-Zdrój                               |
|---------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|------------------------------------------------|
| lat                 | 49.9527                                                      | 49.9527                                              | 49.9527                                        |
| lon                 | 18.5485                                                      | 18.5485                                              | 18.5485                                        |
| asl                 | 256.02                                                       | 256.02                                               | 256.02                                         |
| variable            | Temperature                                                  | Mean Sea Level Pressure                              | Relative Humidity                              |
| unit                | °C                                                           | hPa                                                  | %                                              |
| level               | 2 m elevation corrected                                      | MSL                                                  | 2 m                                            |
| resolution          | hourly                                                       | hourly                                               | hourly                                         |
| aggregation         | None                                                         | None                                                 | None                                           |
| timestamp           | Jastrzębie-Zdrój<br>Temperature<br>[2 m elevation corrected] | Jastrzębie-Zdrój<br>Mean Sea Level Pressure<br>[MSL] | Jastrzębie-Zdrój<br>Relative Humidity<br>[2 m] |
| 2013-01-01T00:00:00 | 2.25413                                                      | 1015.7                                               | 77                                             |
| 2013-01-01T01:00:00 | 2.22413                                                      | 1015.6                                               | 77                                             |
| 2013-01-01T02:00:00 | 2.14413                                                      | 1015                                                 | 77                                             |

Dane zostały pobrane w 10 plikach CSV (dla każdego roku osobno) za okres od 2013-2022 z rozdzielczością co 1 godzinę.

Uzyskano następujące dane:

- ciśnienie barometryczne w hPa – ciśnienie zredukowane do poziomu morza;
- temperatura powietrza w °C – na poziomie 2 m nad poziomem gruntu;
- wilgotność względna w % - na poziomie 2 m nad poziomem gruntu;

Dane poddano analizie statystycznej w celu wyznaczenia następujących parametrów ciśnienia barometrycznego, temperatury suchej oraz wilgotności właściwej (wykonując obliczeń z uwzględnieniem wilgotności względnej).

Analiza pozwoliła na wyznaczenie wartości: średnich, minimalnych, maksymalnych dla okresów czasowych:

- 1 godziny;
- 24 godzin;
- miesiąca;
- roku
- oraz 10 lat.

Dla ciśnienia barometrycznego wyznaczono wartości zredukowane dla poziomu morza oraz dla 280,15 m.n.p.m. (jak w badaniu A). W tym celu korzystano z równania: [81]

$$\Delta P = -\rho g \Delta h \quad (28)$$

Gdzie:

$\Delta P$  – ciśnienie atmosferyczne, hPa

$\rho$  – gęstość powietrza,  $\text{kg/m}^3$

$g$  – przyspieszenie ziemskie,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$

$\Delta h$  - różnica wysokości, m

Dla wyznaczenia wartości wilgotności właściwej  $x$ , korzystano z zależności:

$$X = \frac{0,622 \cdot p_v}{p - p_v} \quad (29)$$

Gdzie:

$x$  – wilgotność właściwa,  $\text{kg}_{\text{H}_2\text{O}} \frac{\text{kg}}{\text{kg}_{\text{powietrza}}}$

$p_v$  – ciśnienie parcjale pary wodnej, Pa

$p$  – ciśnienie całkowite, Pa

0.622 – stosunek mas molowych pary wodnej i suchego powietrza

Dane zostały przetworzone przy użyciu metod statystycznych, umożliwiających ocenę dynamiki zmian ciśnienia i ich wpływu na wentylację kopalni.

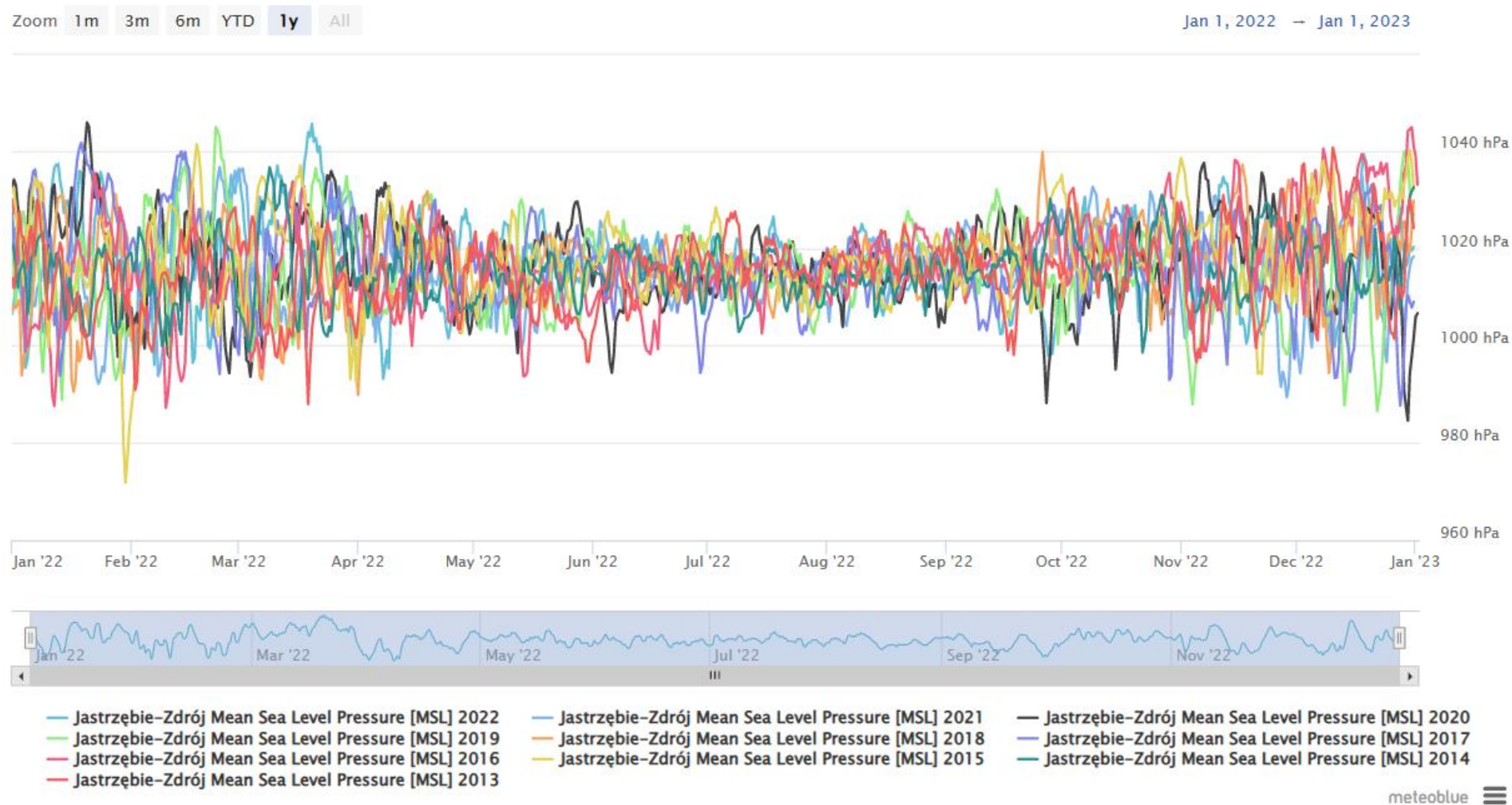
Uzyskane wyniki pozwoliły na porównanie rzeczywistych pomiarów z interpolowanymi danymi, co umożliwiło określenie przydatności modelu numerycznego dla odwzorowania rzeczywistych zmian atmosferycznych w rejonie kopalni.

### 3.2.7 Analiza wyników - Badanie B

W Badaniu B, na podstawie wieloletnich wykresów z meteoblue (Rys. 53–55) oraz własnych zestawień miesięcznych (Rys. 56–59; Tab. 10–13), uzyskano spójny obraz klimatu Jastrzębia-Zdroju w latach 2013–2022. Ciśnienie barometryczne wykazuje niewielką sezonowość i brak wyraźnego trendu dekadowego: średnia z 10-lecia dla poziomu stacji (280,15 m n.p.m.) wynosi 982,33 hPa, a po redukcji do poziomu morza 1016,37 hPa (Tab. 10–11; Rys. 56–57). Wahania dobowo-godzinowe są istotne synoptycznie, lecz stabilne statystycznie: średnio 0,45 hPa/h (maks. 5,82 hPa/h) oraz 5,78 hPa/24h (maks. 26,86 hPa/24 h), co dobrze koresponduje z gęstym, „rozmytym” przebiegiem słupków ciśnienia na wykresie wieloletnim (Rys. 53). Temperatura powietrza ma wyraźny cykl roczny (Rys. 54, 58) ze średnią roczną 10,74°C; maksimum miesięczne przypada na lipiec–sierpień ( $\approx 20$ – $21^\circ\text{C}$ ), a minimum na styczeń ( $\approx 0,4^\circ\text{C}$ ). Dynamika krótkookresowa

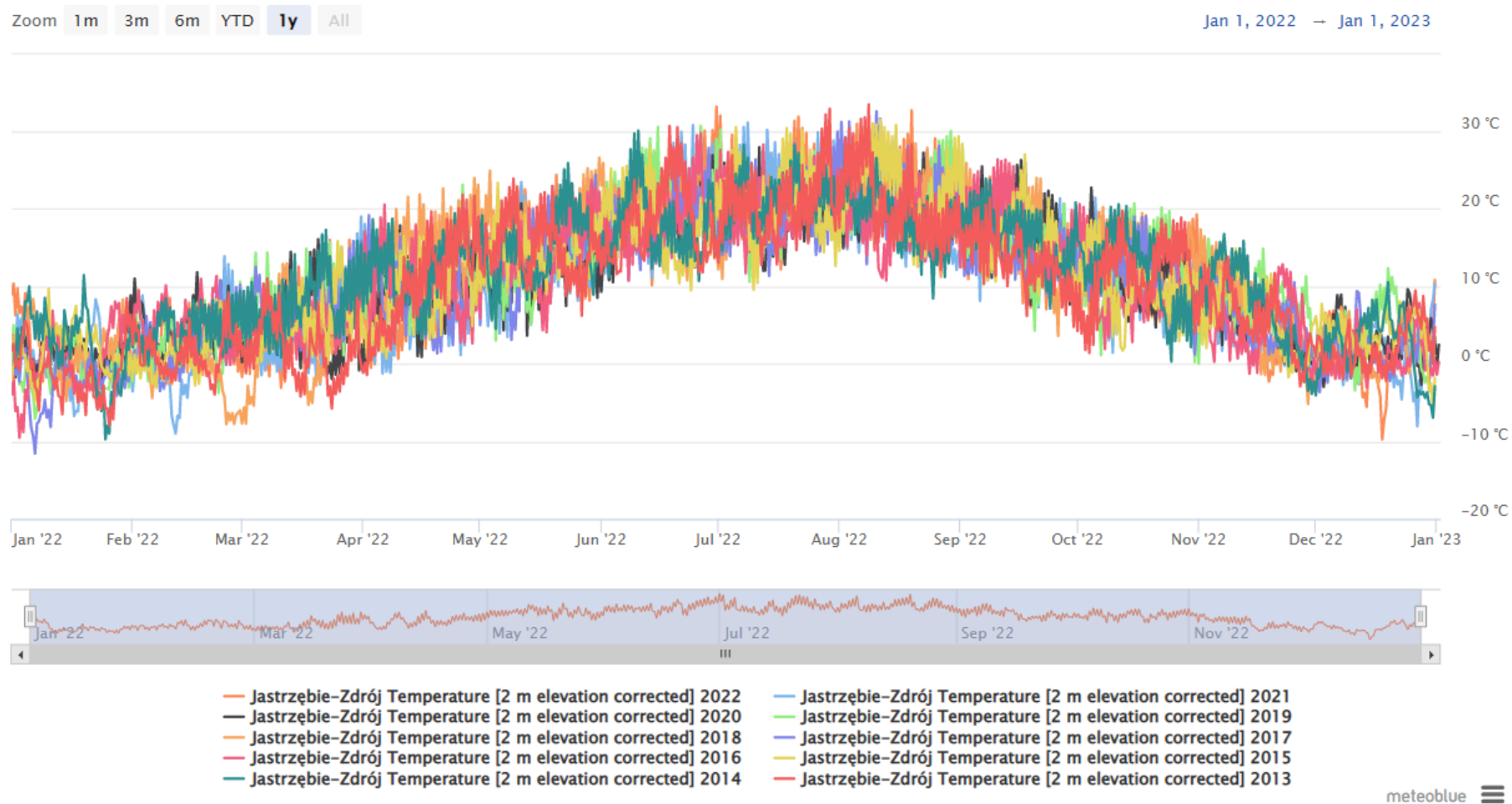
temperatury jest wyso-ka (średnio  $0,82^{\circ}\text{C/h}$ ;  $9,54^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$ ; maks. do  $24,56^{\circ}\text{C}/24\text{ h}$ ), co tłumaczy duże rozproszenie krzywych sezonowych w Rys. 54. Wilgotność właściwa (Rys. 55, 59) średnio wynosi  $0,00612\text{ kg/kg}$  i zgodnie z termodynamiczną zależnością od temperatury, rośnie latem (szczyt  $\sim 0,009\text{--}0,0095\text{ kg/kg}$  w czerwcu–sierpniu) i maleje zimą ( $\sim 0,0033\text{--}0,0038\text{ kg/kg}$  w styczniu–lutym; Tab. 13). Krótkookresowe zmiany pary wodnej pozostają umiarkowane (średnio  $0,00019\text{ kg/kg/h}$ ;  $0,00191\text{ kg/kg}/24\text{ h}$ ), ale maksima dobowych skoków (do  $0,00761\text{ kg/kg}$ ) wskazują na incydentalne, gwałtowne adwekcje wilgotnego powietrza. Zestawiając te wyniki, widać typową dla regionu środkowoeuropejskiego sezonowość: latem nieco niższe ciśnienie i wyższa temperatura współwystępują z podwyższoną wilgotnością właściwą, a zimą odwrotnie; przy tym brak jest jednoznacznego kierunku długookresowej zmiany ciśnienia, natomiast temperatury i wilgotności wykazują raczej stabilny poziom rocznych średnich z istotną zmiennością między miesięcznymi ekstremami (Rys. 53–59; Tab. 10–13).

Podsumowując, należy podkreślić, że wyniki Badania B dostarczają podstaw do wprowadzenia do modeli wentylacyjnych realistycznych warunków brzegowych opartych na długookresowych analizach klimatycznych.



Rys. 53 Wspólny wykres przebiegu zmian ciśnienia barometrycznego w latach 2013-2022 dla miasta Jastrzębie-Zdrój

Źródło: [www.meteoblue.com](http://www.meteoblue.com):

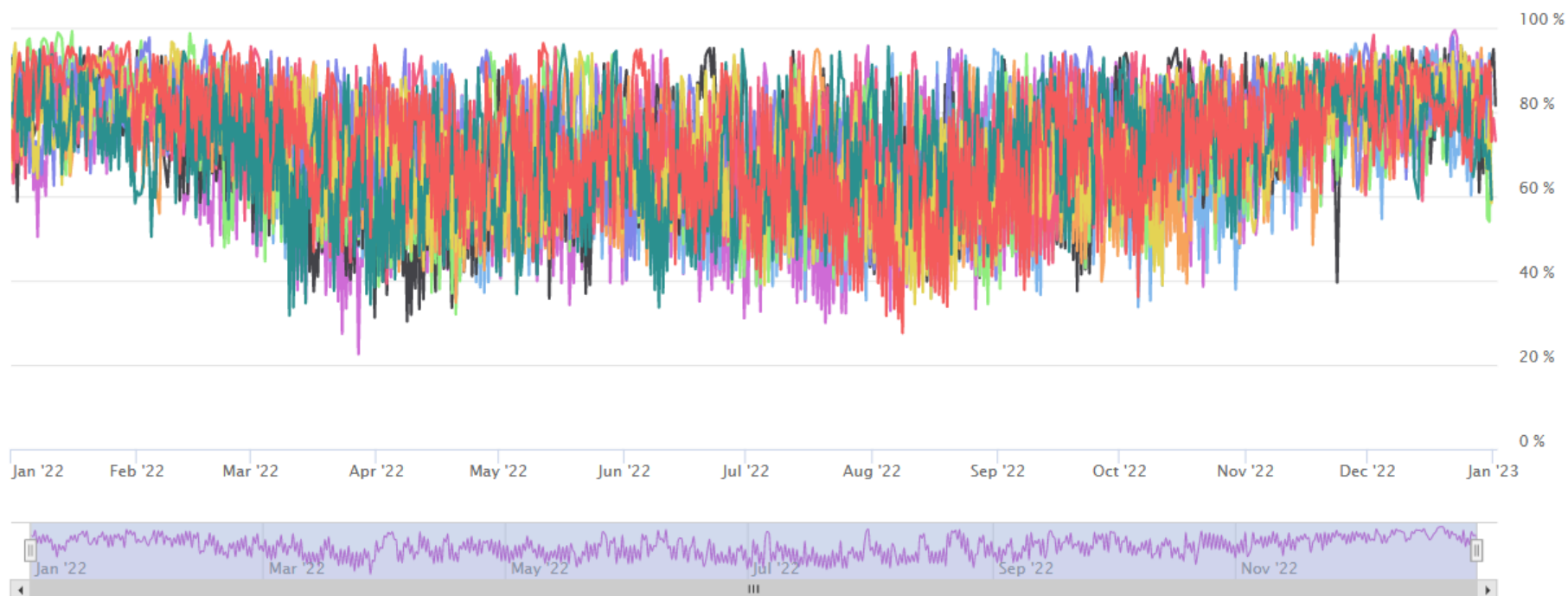


Rys. 54 Wspólny wykres przebiegu zmian temperatury powietrza w latach 2013-2022 dla miasta Jastrzębie-Zdrój

Źródło: [www.meteoblue.com](http://www.meteoblue.com)

Zoom 1m 3m 6m YTD 1y All

Jan 1, 2022 — Jan 1, 2023



— Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2022  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2019  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2016  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2013  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2021  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2018  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2015  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2020  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2017  
 — Jastrzębie-Zdrój Relative Humidity [2 m] 2014

meteoblue

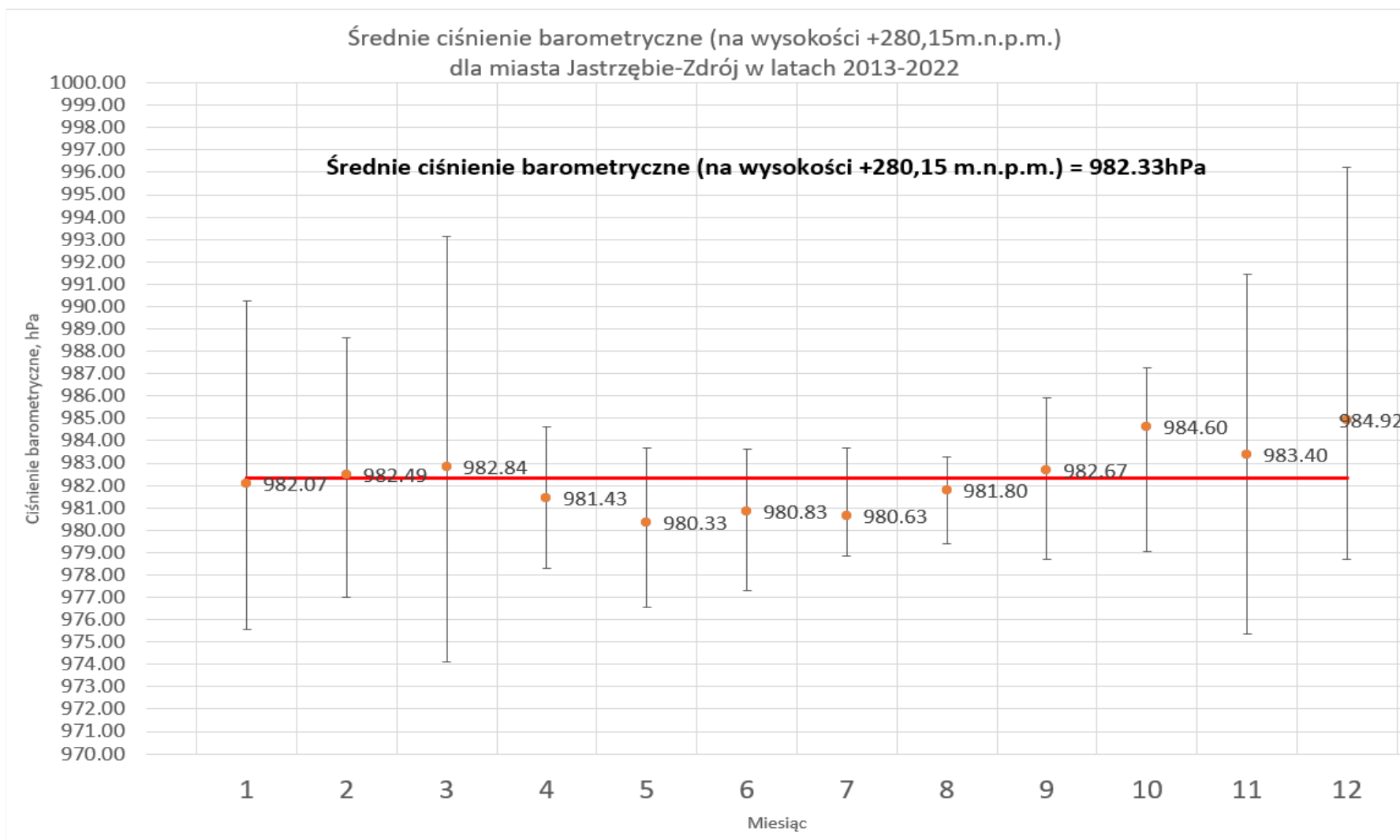
**Rys. 55** Wspólny wykres przebiegu zmian wilgotności względnej powietrza w latach 2013-2022 dla miasta Jastrzębie-Zdrój

Źródło: [www.meteoblue.com](http://www.meteoblue.com)

**Tabela 10** Zestawienie wyników obliczeń dynamiki zmiany ciśnienia barometrycznego dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 dla wysokości 280,15 m.n.p.m.

| Zmiana ciśnienia barometrycznego w skali 10 lat, hPa  |             | Rok     |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Średnia dla 10 lat |        |         |
|-------------------------------------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|--------|---------|
|                                                       |             | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | 2020    | 2021    | 2022    | Min                | Max    |         |
| Miesiąc                                               | Styczeń     | 979.38  | 979.25  | 980.73  | 981.04  | 989.93  | 981.48  | 976.82  | 990.26  | 975.56  | 986.22  | 6.509              | 8.198  | 982.07  |
|                                                       | Luty        | 979.62  | 979.87  | 983.08  | 976.98  | 985.67  | 983.72  | 988.58  | 979.94  | 985.96  | 981.42  | 5.507              | 6.095  | 982.49  |
|                                                       | Marzec      | 976.81  | 982.34  | 985.92  | 979.57  | 984.20  | 974.11  | 982.28  | 984.04  | 985.94  | 993.13  | 8.729              | 10.299 | 982.84  |
|                                                       | Kwiecień    | 981.63  | 979.09  | 983.40  | 978.28  | 982.72  | 981.12  | 982.10  | 984.60  | 982.13  | 979.22  | 3.149              | 3.172  | 981.43  |
|                                                       | Maj         | 976.57  | 979.81  | 981.00  | 978.84  | 981.80  | 982.21  | 977.97  | 983.16  | 978.32  | 983.66  | 3.766              | 3.329  | 980.33  |
|                                                       | Czerwiec    | 980.58  | 981.33  | 983.63  | 978.15  | 978.59  | 980.75  | 983.34  | 977.30  | 982.80  | 981.84  | 3.531              | 2.802  | 980.83  |
|                                                       | Lipiec      | 983.67  | 978.82  | 981.16  | 979.75  | 979.45  | 979.72  | 979.22  | 981.75  | 979.58  | 983.17  | 1.805              | 3.038  | 980.63  |
|                                                       | Sierpień    | 983.13  | 979.40  | 982.44  | 983.28  | 983.19  | 982.82  | 982.51  | 979.63  | 979.91  | 981.63  | 2.392              | 1.482  | 981.80  |
|                                                       | Wrzesień    | 980.88  | 982.86  | 983.03  | 983.79  | 981.07  | 985.91  | 983.63  | 982.52  | 984.35  | 978.68  | 3.987              | 3.235  | 982.67  |
|                                                       | Październik | 985.08  | 984.24  | 986.10  | 987.28  | 983.22  | 984.77  | 982.33  | 979.07  | 986.85  | 987.08  | 5.535              | 2.679  | 984.60  |
|                                                       | Listopad    | 981.28  | 983.38  | 983.58  | 985.18  | 981.26  | 988.03  | 975.37  | 991.46  | 981.36  | 983.06  | 8.021              | 8.060  | 983.40  |
|                                                       | Grudzień    | 988.92  | 983.46  | 994.70  | 996.23  | 979.87  | 983.87  | 980.89  | 978.71  | 980.42  | 982.15  | 6.208              | 11.311 | 984.92  |
| Średnie ciśnienie barometryczne roczne                |             | 981.48  | 981.16  | 984.08  | 982.40  | 982.57  | 982.35  | 981.20  | 982.70  | 981.89  | 983.49  | 1.172              | 1.748  | 982.33  |
| Minimalne ciśnienie barometryczne roku                |             | 951.53  | 962.84  | 937.52  | 950.28  | 952.11  | 955.11  | 952.31  | 947.09  | 953.95  | 957.81  | -14.536            | 10.786 | 952.05  |
| Maksymalna ciśnienie barometryczne w roku             |             | 1006.43 | 1002.66 | 1007.40 | 1012.13 | 1007.40 | 1005.56 | 1011.94 | 1011.75 | 1005.85 | 1011.26 | -5.577             | 3.895  | 1008.24 |
| Średnia zmiana ciśnienia barometrycznego w czasie 1h  |             | 0.44    | 0.42    | 0.43    | 0.46    | 0.46    | 0.41    | 0.45    | 0.48    | 0.48    | 0.49    | -0.040             | 0.034  | 0.45    |
| Maks. zmiana ciśnienia barometrycznego w czasie 1h    |             | 4.80    | 5.50    | 7.40    | 6.20    | 5.00    | 4.70    | 5.40    | 5.80    | 6.80    | 6.60    | -1.120             | 1.580  | 5.82    |
| Średnia zmiana ciśnienia barometrycznego w czasie 24h |             | 5.82    | 4.92    | 5.63    | 5.70    | 6.12    | 5.56    | 6.10    | 5.96    | 5.87    | 6.07    | -0.858             | 0.349  | 5.78    |
| Maks. zmiana ciśnienia barometrycznego w czasie 24h   |             | 28.00   | 20.70   | 24.00   | 26.80   | 28.40   | 29.20   | 29.80   | 29.00   | 25.60   | 27.10   | -6.160             | 2.940  | 26.86   |

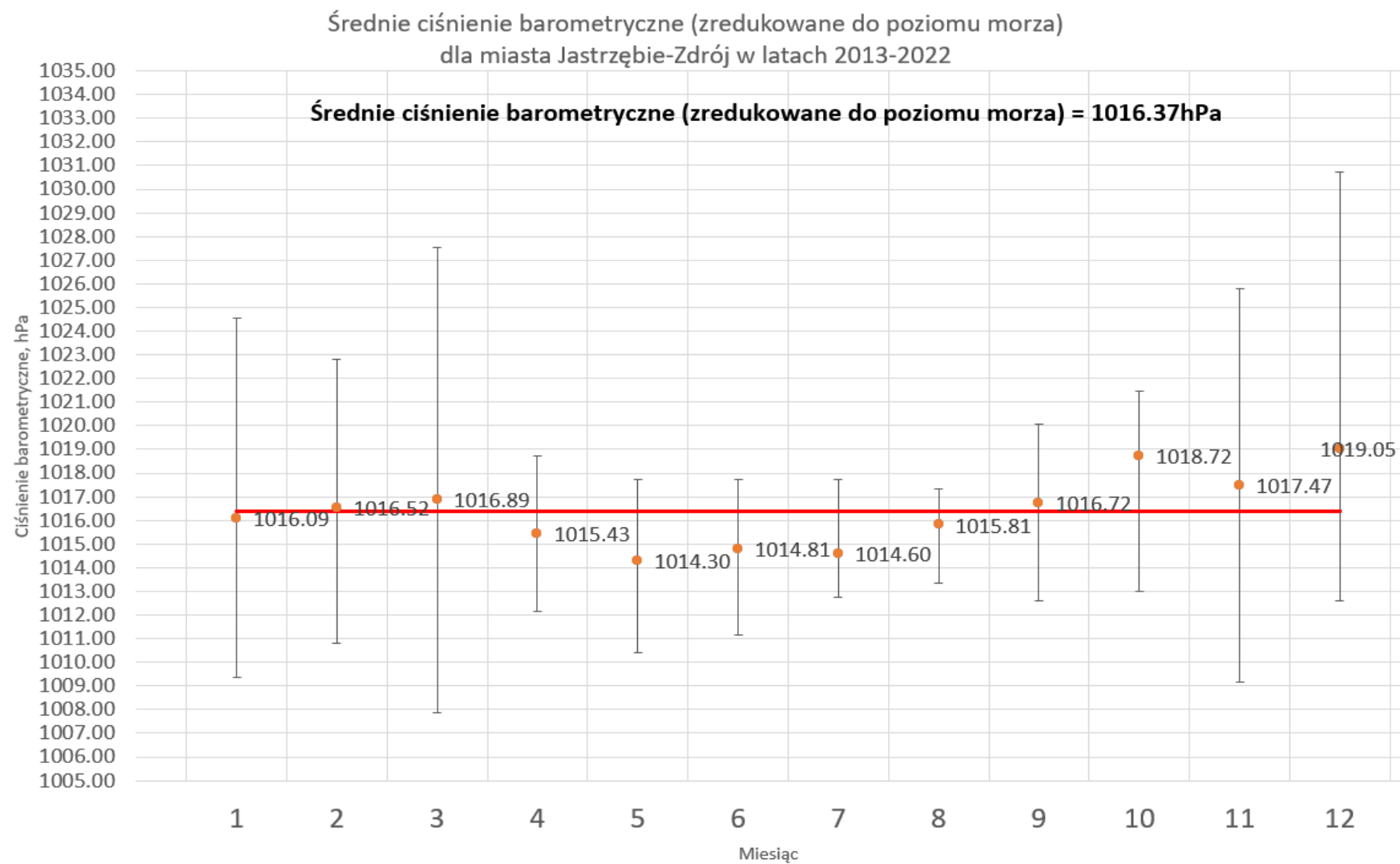




**Rys. 56** Wykres zmiany ciśnienia barometrycznego dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 dla wysokości 280,15 m.n.p.m.

**Tabela 11** Zestawienie wyników obliczeń dynamiki zmiany ciśnienia barometrycznego dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 wartości zredukowane do poz. morza

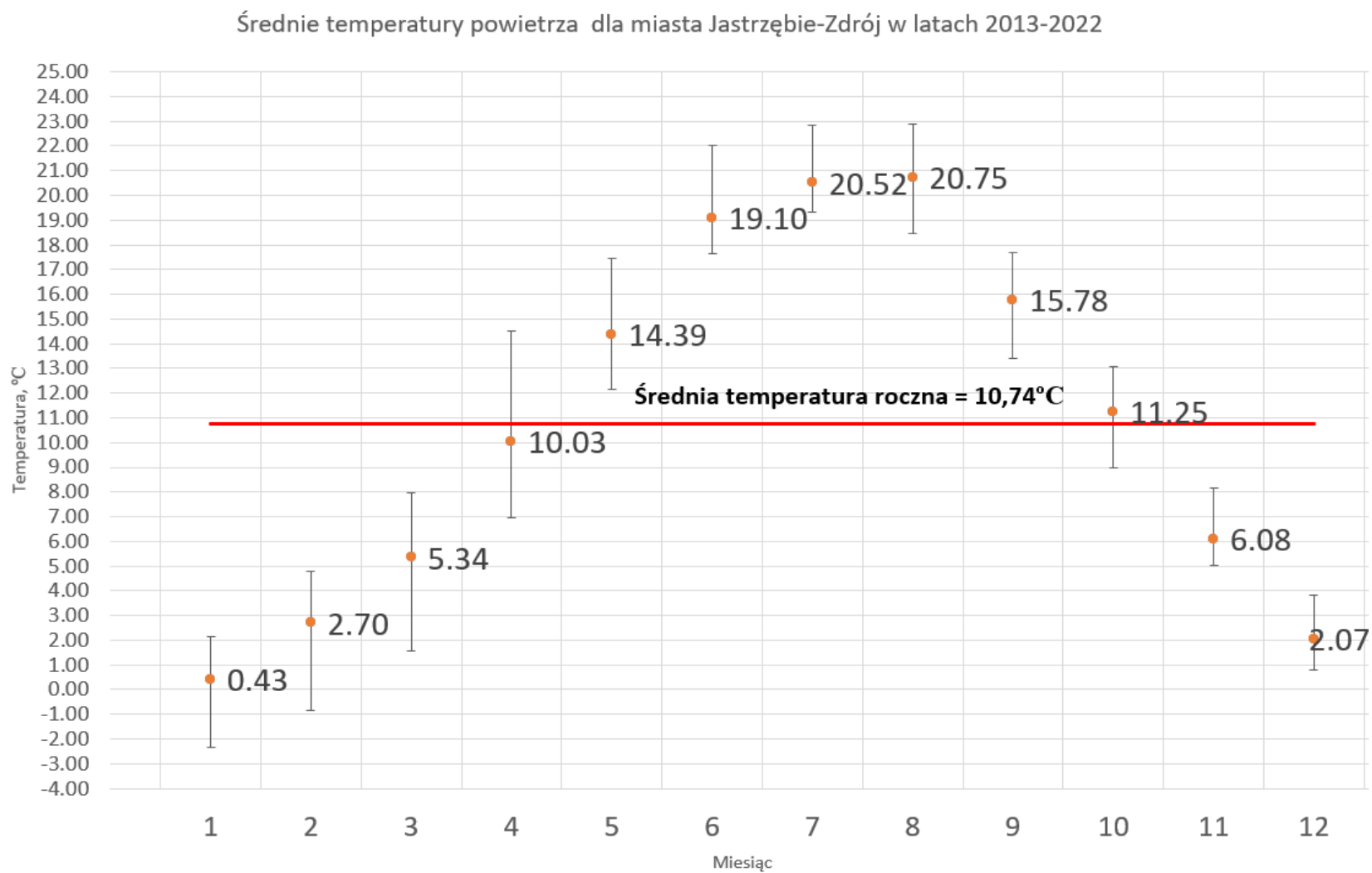
| Zmiana ciśnienia barometrycznego w skali 10 lat, hPa |             | Rok     |         |         |         |         |         |         |         |         |         | Średnia dla 10 lat |        |         |
|------------------------------------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------|--------|---------|
|                                                      |             | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | 2020    | 2021    | 2022    |                    |        | Min     |
| Miesiąc                                              | Styczeń     | 1013.31 | 1013.18 | 1014.71 | 1015.03 | 1024.22 | 1015.48 | 1010.66 | 1024.57 | 1009.36 | 1020.39 | 6.735              | 8.482  | 1016.09 |
|                                                      | Luty        | 1013.56 | 1013.82 | 1017.14 | 1010.83 | 1019.82 | 1017.81 | 1022.83 | 1013.89 | 1020.12 | 1015.42 | 5.698              | 6.306  | 1016.52 |
|                                                      | Marzec      | 1010.65 | 1016.38 | 1020.08 | 1013.51 | 1018.30 | 1007.86 | 1016.32 | 1018.14 | 1020.10 | 1027.54 | 9.031              | 10.656 | 1016.89 |
|                                                      | Kwiecień    | 1015.64 | 1013.01 | 1017.47 | 1012.17 | 1016.76 | 1015.11 | 1016.13 | 1018.71 | 1016.15 | 1013.15 | 3.258              | 3.282  | 1015.43 |
|                                                      | Maj         | 1010.40 | 1013.76 | 1014.99 | 1012.75 | 1015.81 | 1016.24 | 1011.86 | 1017.22 | 1012.22 | 1017.74 | 3.897              | 3.444  | 1014.30 |
|                                                      | Czerwiec    | 1014.56 | 1015.32 | 1017.71 | 1012.04 | 1012.50 | 1014.73 | 1017.40 | 1011.16 | 1016.85 | 1015.86 | 3.654              | 2.899  | 1014.81 |
|                                                      | Lipiec      | 1017.75 | 1012.74 | 1015.15 | 1013.70 | 1013.38 | 1013.66 | 1013.15 | 1015.76 | 1013.51 | 1017.23 | 1.868              | 3.143  | 1014.60 |
|                                                      | Sierpień    | 1017.19 | 1013.34 | 1016.48 | 1017.34 | 1017.25 | 1016.87 | 1016.55 | 1013.57 | 1013.86 | 1015.64 | 2.475              | 1.533  | 1015.81 |
|                                                      | Wrzesień    | 1014.86 | 1016.91 | 1017.09 | 1017.87 | 1015.06 | 1020.07 | 1017.71 | 1016.57 | 1018.46 | 1012.59 | 4.126              | 3.347  | 1016.72 |
|                                                      | Październik | 1019.21 | 1018.34 | 1020.27 | 1021.49 | 1017.28 | 1018.89 | 1016.37 | 1012.99 | 1021.04 | 1021.28 | 5.727              | 2.772  | 1018.72 |
|                                                      | Listopad    | 1015.27 | 1017.45 | 1017.66 | 1019.31 | 1015.26 | 1022.27 | 1009.17 | 1025.81 | 1015.36 | 1017.12 | 8.299              | 8.340  | 1017.47 |
|                                                      | Grudzień    | 1023.18 | 1017.53 | 1029.16 | 1030.75 | 1013.82 | 1017.96 | 1014.87 | 1012.62 | 1014.38 | 1016.18 | 6.423              | 11.703 | 1019.05 |
| Średnie ciśnienie barom. roczne                      |             | 1015.49 | 1015.15 | 1018.17 | 1016.44 | 1016.62 | 1016.38 | 1015.19 | 1016.75 | 1015.91 | 1017.56 | 1.213              | 1.808  | 1016.37 |
| Minimalne ciśnienie barom. w roku                    |             | 984.50  | 996.20  | 970.00  | 983.20  | 985.10  | 988.20  | 985.30  | 979.90  | 987.00  | 991.00  | -15.040            | 11.160 | 985.04  |
| Maksymalna ciśnienie barom. w roku                   |             | 1041.30 | 1037.40 | 1042.30 | 1047.20 | 1042.30 | 1040.40 | 1047.00 | 1046.80 | 1040.70 | 1046.30 | -5.770             | 4.030  | 1043.17 |
| Średnia zmiana ciśnienia barom. w czasie 1h          |             | 0.44    | 0.42    | 0.43    | 0.46    | 0.46    | 0.41    | 0.45    | 0.48    | 0.48    | 0.49    | -0.040             | 0.034  | 0.45    |
| Maks. zmiana ciśnienia barom. w czasie 1h            |             | 4.80    | 5.50    | 7.40    | 6.20    | 5.00    | 4.70    | 5.40    | 5.80    | 6.80    | 6.60    | -1.120             | 1.580  | 5.82    |
| Średnia zmiana ciśnienia barom. w czasie 24h         |             | 5.82    | 4.92    | 5.63    | 5.70    | 6.12    | 5.56    | 6.10    | 5.96    | 5.87    | 6.07    | -0.858             | 0.349  | 5.78    |
| Maks. zmiana ciśnienia barom. w czasie 24h           |             | 28.00   | 20.70   | 24.00   | 26.80   | 28.40   | 29.20   | 29.80   | 29.00   | 25.60   | 27.10   | -6.160             | 2.940  | 26.86   |



Rys. 57 Wykres zmiany ciśnienia barometrycznego dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 wartości zredukowane do poz. morza.

**Tabela 12** Zestawienie wyników obliczeń dynamiki zmiany temperatury powietrza dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022

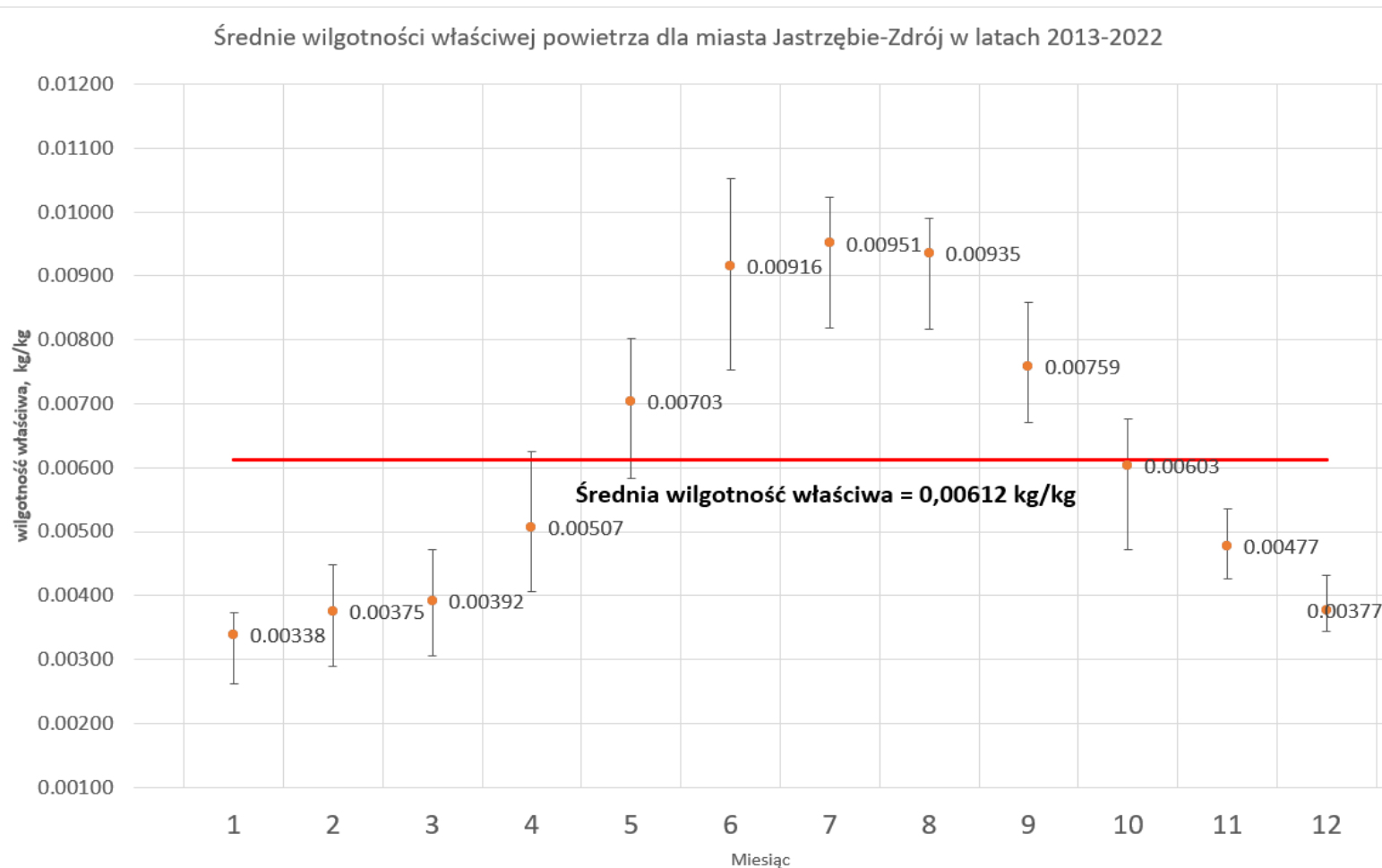
| Zmiana temperatury suchej w skali 10 lat, °C |             | Rok   |        |       |        |        |       |       |       |        |        |        |       | Średnia dla 10 lat |
|----------------------------------------------|-------------|-------|--------|-------|--------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|--------------------|
|                                              |             | 2013  | 2014   | 2015  | 2016   | 2017   | 2018  | 2019  | 2020  | 2021   | 2022   | Min    | Max   |                    |
| Miesiąc                                      | Styczeń     | -1.43 | 2.00   | 1.70  | 0.10   | -2.33  | 2.16  | -0.89 | 1.48  | 0.43   | 1.06   | 2.753  | 1.728 | 0.43               |
|                                              | Luty        | 1.20  | 4.55   | 1.89  | 4.79   | 2.64   | -0.82 | 3.17  | 4.45  | 1.65   | 3.42   | 3.516  | 2.098 | 2.70               |
|                                              | Marzec      | 1.58  | 7.96   | 5.65  | 5.74   | 7.06   | 3.15  | 7.21  | 5.83  | 4.52   | 4.74   | 3.765  | 2.616 | 5.34               |
|                                              | Kwiecień    | 10.07 | 12.28  | 9.08  | 10.14  | 8.28   | 14.51 | 11.40 | 9.82  | 6.94   | 7.81   | 3.094  | 4.473 | 10.03              |
|                                              | Maj         | 14.97 | 14.82  | 13.98 | 15.00  | 14.73  | 17.46 | 12.87 | 12.15 | 12.27  | 15.67  | 2.242  | 3.072 | 14.39              |
|                                              | Czerwiec    | 18.26 | 17.69  | 17.65 | 18.94  | 18.69  | 18.98 | 22.02 | 18.02 | 20.24  | 20.51  | 1.453  | 2.919 | 19.10              |
|                                              | Lipiec      | 20.70 | 21.00  | 20.96 | 19.72  | 19.56  | 20.00 | 19.92 | 19.34 | 22.82  | 21.15  | 1.174  | 2.307 | 20.52              |
|                                              | Sierpień    | 20.68 | 18.57  | 22.91 | 18.46  | 21.40  | 21.79 | 21.89 | 21.27 | 18.70  | 21.78  | 2.286  | 2.161 | 20.75              |
|                                              | Wrzesień    | 13.42 | 16.49  | 16.15 | 17.68  | 14.50  | 16.93 | 15.77 | 16.68 | 16.04  | 14.16  | 2.360  | 1.901 | 15.78              |
|                                              | Październik | 11.66 | 11.88  | 9.79  | 8.96   | 10.93  | 12.56 | 12.19 | 11.33 | 10.09  | 13.08  | 2.283  | 1.829 | 11.25              |
|                                              | Listopad    | 5.87  | 7.36   | 6.41  | 5.01   | 5.36   | 6.34  | 8.15  | 5.34  | 5.06   | 5.94   | 1.073  | 2.067 | 6.08               |
|                                              | Grudzień    | 2.03  | 2.31   | 3.83  | 0.92   | 1.62   | 1.92  | 3.37  | 2.53  | 0.79   | 1.34   | 1.275  | 1.764 | 2.07               |
| Średnia temperatura roczna                   |             | 9.97  | 11.44  | 10.89 | 10.46  | 10.25  | 11.31 | 11.46 | 10.70 | 10.01  | 10.94  | 0.775  | 0.714 | 10.74              |
| Minimalna temperatura w roku                 |             | -8.82 | -11.55 | -7.16 | -10.39 | -12.11 | -8.85 | -8.53 | -4.32 | -10.52 | -11.21 | -2.764 | 5.026 | -9.34              |
| Maksymalna temperatura w roku                |             | 37.21 | 32.44  | 33.54 | 32.43  | 36.57  | 32.71 | 34.96 | 32.22 | 34.61  | 36.13  | -2.062 | 2.928 | 34.29              |
| Średnia zmiana temperatury w czasie 1h       |             | 0.79  | 0.82   | 0.81  | 0.75   | 0.77   | 0.82  | 0.85  | 0.83  | 0.85   | 0.89   | -0.071 | 0.072 | 0.82               |
| Maks. zmiana temperatury w czasie 1h         |             | 5.58  | 8.03   | 7.35  | 7.05   | 6.47   | 7.97  | 7.34  | 8.83  | 7.52   | 8.51   | -1.885 | 1.365 | 7.46               |
| Średnia zmiana temperatury w czasie 24h      |             | 9.28  | 9.60   | 9.44  | 8.80   | 9.03   | 9.51  | 9.87  | 9.69  | 9.89   | 10.31  | -0.744 | 0.764 | 9.54               |
| Maks. zmiana temperatury w czasie 24h        |             | 19.34 | 18.54  | 19.75 | 17.46  | 19.59  | 20.29 | 18.85 | 24.56 | 19.12  | 22.44  | -2.534 | 4.566 | 19.99              |



Rys. 58 Wykres zmiany temperatury powietrza dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022

**Tabela 13** Zestawienie wyników obliczeń dynamiki zmiany wilgotności właściwej powietrza dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022

| Zmiana wilgotności właściwej powietrza w skali 10 |             | Rok     |         |         |         |         |         |         |         |         |         |          |         | Średnia dla 10 |
|---------------------------------------------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|---------|----------------|
| lat, kg/kg                                        |             | 2013    | 2014    | 2015    | 2016    | 2017    | 2018    | 2019    | 2020    | 2021    | 2022    | Min      | Max     | lat            |
| Miesiąc                                           | Styczeń     | 0.00319 | 0.00369 | 0.00366 | 0.00339 | 0.00262 | 0.00374 | 0.00320 | 0.00350 | 0.00340 | 0.00337 | 0.00076  | 0.00036 | 0.00338        |
|                                                   | Luty        | 0.00359 | 0.00394 | 0.00367 | 0.00447 | 0.00386 | 0.00289 | 0.00387 | 0.00392 | 0.00367 | 0.00357 | 0.00086  | 0.00073 | 0.00375        |
|                                                   | Marzec      | 0.00335 | 0.00420 | 0.00416 | 0.00436 | 0.00471 | 0.00370 | 0.00428 | 0.00371 | 0.00367 | 0.00306 | 0.00086  | 0.00079 | 0.00392        |
|                                                   | Kwiecień    | 0.00571 | 0.00569 | 0.00486 | 0.00543 | 0.00508 | 0.00626 | 0.00513 | 0.00406 | 0.00417 | 0.00433 | 0.00101  | 0.00118 | 0.00507        |
|                                                   | Maj         | 0.00757 | 0.00712 | 0.00710 | 0.00749 | 0.00773 | 0.00803 | 0.00670 | 0.00583 | 0.00614 | 0.00659 | 0.00120  | 0.00100 | 0.00703        |
|                                                   | Czerwiec    | 0.00950 | 0.00753 | 0.00852 | 0.00932 | 0.00899 | 0.00962 | 0.01052 | 0.00978 | 0.00897 | 0.00885 | 0.00163  | 0.00136 | 0.00916        |
|                                                   | Lipiec      | 0.00902 | 0.01023 | 0.00987 | 0.01014 | 0.00957 | 0.00991 | 0.00901 | 0.00927 | 0.00990 | 0.00818 | 0.00133  | 0.00072 | 0.00951        |
|                                                   | Sierpień    | 0.00817 | 0.00911 | 0.00981 | 0.00901 | 0.00944 | 0.00991 | 0.00975 | 0.00991 | 0.00877 | 0.00964 | 0.00119  | 0.00056 | 0.00935        |
|                                                   | Wrzesień    | 0.00670 | 0.00860 | 0.00759 | 0.00844 | 0.00764 | 0.00768 | 0.00723 | 0.00778 | 0.00728 | 0.00696 | 0.00089  | 0.00101 | 0.00759        |
|                                                   | Październik | 0.00623 | 0.00677 | 0.00548 | 0.00577 | 0.00629 | 0.00601 | 0.00623 | 0.00655 | 0.00472 | 0.00627 | 0.00131  | 0.00073 | 0.00603        |
|                                                   | Listopad    | 0.00482 | 0.00535 | 0.00493 | 0.00457 | 0.00454 | 0.00475 | 0.00533 | 0.00463 | 0.00427 | 0.00453 | 0.00051  | 0.00058 | 0.00477        |
|                                                   | Grudzień    | 0.00364 | 0.00374 | 0.00432 | 0.00343 | 0.00369 | 0.00378 | 0.00400 | 0.00385 | 0.00350 | 0.00375 | 0.00034  | 0.00055 | 0.00377        |
| Średnia roczna wilgotność właściwa                |             | 0.00597 | 0.00635 | 0.00618 | 0.00632 | 0.00620 | 0.00638 | 0.00628 | 0.00607 | 0.00572 | 0.00577 | 0.00040  | 0.00025 | 0.00612        |
| Minimalna wilgotność właściwa w roku              |             | 0.00138 | 0.00123 | 0.00172 | 0.00142 | 0.00108 | 0.00132 | 0.00145 | 0.00117 | 0.00132 | 0.00136 | -0.00027 | 0.00038 | 0.00135        |
| Maksymalna wilgotność właściwa w roku             |             | 0.01557 | 0.01436 | 0.01702 | 0.01540 | 0.01571 | 0.01433 | 0.01529 | 0.01541 | 0.01628 | 0.01458 | -0.00106 | 0.00162 | 0.01539        |
| Średnia zmiana wilgotności właściwej w czasie 1h  |             | 0.00018 | 0.00018 | 0.00021 | 0.00019 | 0.00020 | 0.00020 | 0.00019 | 0.00018 | 0.00018 | 0.00019 | -0.00001 | 0.00002 | 0.00019        |
| Maksymalna zmiana temperatury w czasie 1h         |             | 0.00429 | 0.00333 | 0.00281 | 0.00289 | 0.00330 | 0.00356 | 0.00479 | 0.00376 | 0.00421 | 0.00325 | -0.00081 | 0.00117 | 0.00362        |
| Średnia zmiana wilgotności właściwej w czasie 24h |             | 0.00180 | 0.00182 | 0.00207 | 0.00190 | 0.00199 | 0.00192 | 0.00192 | 0.00186 | 0.00185 | 0.00195 | -0.00011 | 0.00016 | 0.00191        |
| Maks. zmiana wilgotności właściwej w czasie 24h   |             | 0.00648 | 0.00673 | 0.00956 | 0.00726 | 0.00738 | 0.00740 | 0.00801 | 0.00714 | 0.00819 | 0.00795 | -0.00113 | 0.00195 | 0.00761        |



**Rys. 59** Wykres zmiany wilgotności właściwej powietrza dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022

### 3.3. Wnioski z porównania wyników badania A i B

Po przeprowadzeniu badań dynamiki zmian fizyki atmosfery:

- **Badanie A** – Metoda bezpośrednich pomiarów: ciśnienia barometrycznego, temperatury suchej, wilgotności względnej na wlocie do jednej z kopalń JSW S.A.
- **Badanie B** – Metoda analizy dynamiki zmian parametrów atmosferycznych na podstawie danych archiwalnych portalu meteoblue.com.

badania można sformułować następujące wnioski:

Czujniki typu CSPA-2 firmy HASO S.C. posiadają wystarczającą dokładność, aby pełnić rolę "stacji pogodowej" dla kopalni, pod warunkiem zachowania odpowiednich zasad lokalizacji ich zabudowy. Czujniki powinny znajdować się na wysokości ok. 2 m nad poziomem gruntu, z dala od lokalnych źródeł ciepła oraz bezpośredniego nasłonecznienia.

Aby wskazania czujników mogły być wykorzystywane do automatycznego wyznaczania potencjałów aerodynamicznych sieci, należy określić dokładną wysokość ich zabudowy w stosunku do poziomu morza (kota niwelacyjna).

Wartość wilgotności względnej powietrza jest wystarczająca do zasymulowania wilgotności właściwej w oprogramowaniu VentSim, pod warunkiem jednoczesnej znajomości wartości temperatury suchej oraz ciśnienia barometrycznego. Warto jednak, aby w trakcie integracji z tablicą synoptyczną wartość wilgotności właściwej była automatycznie obliczana.

Wykorzystanie czujników gazometrii automatycznej kopalni jako "stacji pogodowej" ułatwia integrację z innymi czujnikami kopalni, ponieważ dane z nich są zapisywane w tym samym formacie oraz regularnie kontrolowane.

Średnia wartość ciśnienia barometrycznego na kopalni w badaniu A (na podstawie dwuletnich obserwacji) wyniosła 982,9 hPa, natomiast w badaniu B (dla tego samego okresu) wyniosła 982,69 hPa, czyli była niższa o 0,21 hPa. Różnica ta nie jest duża i może wynikać z różnej częstotliwości pomiarów, czujniki CSPA-2 rejestrowały dane co 1 minutę, natomiast dane z meteoblue.com były rejestrowane co 1 godzinę. Ponadto czujnik CSPA-2 w zakresie pomiaru ciśnienia posiada błąd pomiarowy  $\pm 0,5$  hPa ( $+5^{\circ}\text{C}$  –  $40^{\circ}\text{C}$ ), a zatem uzyskana różnica mieści się w tej granicy.

Zaobserwowano coroczną wysoką amplitudę zmian ciśnienia barometrycznego w miesiącach styczeń-luty oraz listopad-grudzień, natomiast w miesiącach letnich wartości ciśnienia stabilizują się.



Średnioroczna temperatura powietrza w badaniu A na kopalni wyniosła 10,79°C, natomiast w badaniu B (dla tego samego okresu) 10,475°C, czyli była niższa o 0,315°C. Czujnik CSPA-2 posiada błąd pomiarowy  $\pm 1^\circ\text{C}$ , co mogło wpłynąć na różnicę. Dodatkowo wpływ mogło mieć położenie czujnika w terenie przemysłowym, gdzie występuje wiele źródeł ciepła oraz betonowa zabudowa.

Średnioroczna temperatura powietrza dla Jastrzębia-Zdroju (na podstawie danych z lat 2013-2022) wynosi 10,79°C, co jest o około 2°C więcej niż wartości podawane w literaturze górniczej (np. "Wentylacja kopalń" Tom II, 2010, J. Waclawik, str. 68) [118] dla Katowic i Gliwic. Możliwe przyczyny to:

- bliskość Bramy Morawskiej (napływ ciepłych mas powietrza z południa),
- zmiany klimatyczne.

Wzrostu średniorocznej temperatury powietrza jest istotny, dlatego należy uwzględnić ten wzrost w obliczeniach symulacyjnych.

Przy wyznaczaniu temperatury nie uwzględniono wpływu ogrzewania powietrza w szybach wlotowych w okresie zimowym.

Opracowane tabele pozwalają odpowiednio skonfigurować wartości początkowe w ustawieniach VentSim.

Poznanie dynamiki zmian fizyki atmosfery dla kopalń JSW S.A. pozwala na dokładniejszą analizę w symulacjach dynamicznych: wpływu zmian ciśnienia atmosferycznego na zagrożenie metanowe oraz wpływu temperatury i wilgotności powietrza na zagrożenie klimatyczne.

Właściwa konfiguracja oprogramowania VentSim umożliwi zwiększenie dokładności symulacji depresji naturalnej kopalni.

Tabele umożliwiają także weryfikację ostrzeżeń dla załóg górniczych na szybach zjazdowych dotyczących "niskiego" lub "wysokiego" ciśnienia barometrycznego oraz wprowadzenie dodatkowej klasyfikacji, np. silny lub umiarkowany spadek ciśnienia.

## **4. Wyznaczenie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej kopalni**

### **4.1. Definicja problemu**

Obserwacje wskazań barometru na dole kopalni podczas wykonywania pomiarów ciśnienia wykazują częste wahania wskazań przyrządów. Istnieje kilka głównych przyczyn tego zjawiska.

#### **Przepływ turbulentny**

Przepływ powietrza w głębokich kopalniach, ze względu na konieczność dostarczenia odpowiednio dużej ilości powietrza, jest z natury turbulentny (burzliwy). Charakteryzuje się on pulsacyjnym, nieliniowym przepływem, przy czym pulsacja ta ma charakter makroskopowy.

#### **Ruch naczyń wyciągowych i środków transportu**

Przemieszczające się maszyny o dużym stosunku przekroju czołowego do całkowitego przekroju wyrobiska (szybu) powodują powstawanie tzw. „efektu tłoka”. Mechaniczne przemieszczenie mas powietrza objawia się jako ich "tłoczenie" przed poruszającą się maszyną oraz "zasysanie" (powstawanie podciśnienia) bezpośrednio za nią. Wartość tego efektu wzrasta wraz ze wzrostem prędkości przemieszczania się maszyny.

#### **Otwieranie i zamykanie tam wentylacyjnych**

Aby odpowiednio ukierunkować przepływ powietrza na dole kopalni, stosuje się tamy wentylacyjne (śluzы wentylacyjne). Przejście lub przejazd środków transportu przez tamy powoduje chwilowe zmniejszenie oporu bocznic wentylacyjnej, co skutkuje wzrostem przepływu powietrza i zmianą układu ciśnień w sieci wentylacyjnej. Im większa różnica potencjałów między oddzielanymi prądami powietrza, tym większa wartość tych zmian.

#### **Pompaż wentylatora głównego przewietrzania**

Jeśli opór wypadkowy sieci wentylacyjnej jest zbyt duży (np. zbyt mały przekrój otworu równoważnego), a wentylator pracuje poza stabilnym zakresem charakterystyki, dochodzi do cyklicznych zmian przepływu i ciśnienia.

Wszystkie powyższe czynniki wpływają na dokładność wyznaczania oporów aerodynamicznych bocznic wentylacyjnych oraz potencjałów w węzłach sieci. Podczas badania sieci wentylacyjnej (zdjęcia potencjalnego) dąży się do eliminacji lub ograniczenia części tych zakłóceń, jednak całkowite ich wyeliminowanie nie jest możliwe.

Wyznaczenie dynamiki tych zmian w czasie jest kluczowe dla określenia poziomu błędów pomiarowych podczas badania sieci wentylacyjnej (co zostanie szczegółowo omówione w dalszej części pracy).

Dodatkowo, aby kontrolować stopień dokładności odwzorowania modelu sieci wentylacyjnej w oprogramowaniu VentSim, opracowano metodę badania potencjałów sieci w czasie rzeczywistym.

## **4.2. Metodyka badawcza**

W celu wyznaczenia dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej kopalni oraz opracowania metody badania stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym zaplanowano przeprowadzenie dwóch badań:

- **Badanie C** – Metoda wyznaczenia dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej w jednej z kopalń JSW S.A.,
- **Badanie D** – Metoda badania stanu potencjałów sieci wentylacyjnej w czasie rzeczywistym.

### **4.2.1. Badanie C - Metoda wyznaczenia dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej w jednej z kopalń JSW S.A.**

Lokalizacja i sposób pomiaru.

Badanie przeprowadzono w jednej z kopalń JSW S.A.

Zakłada się, że największy poziom pulsacji sieci wentylacyjnej występuje bezpośrednio przy wentylatorach głównego przewietrzania. Dlatego stanowiska badawcze zlokalizowano w pobliżu szybów wentylacyjnych.

Wyznaczono dwa stanowiska badawcze:

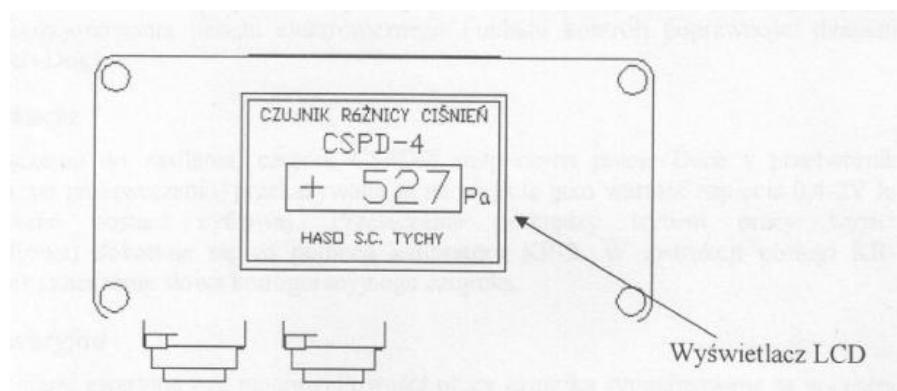
- Szyb IV – szyb wentylacyjno-zjazdowo-materiałowy, połączony ze stacją wentylatorów głównego przewietrzania wyposażoną w trzy wentylatory typu WPR-200/1,8 (1 lub 2 wentylatory pracują, 1 stanowi rezerwę). Kota niwelacyjna szybu: 280,15 m n.p.m.
- Szyb V – szyb wentylacyjny (bosy – bez zbrojenia), połączony ze stacją wentylatorów głównego przewietrzania wyposażoną w trzy wentylatory typu WPK-3,9 (1 lub 2 wentylatory pracują, 1 stanowi rezerwę). Kota niwelacyjna szybu: 280,82 m n.p.m.

Stanowiska pomiarowe nie ingerowały w układ AKPiA stacji wentylatorów przy szybach. Zabudowa stanowisk polegała na zamontowaniu dwóch czujników różnicy ciśnień CSPD-4 firmy HASO S.C. (zakres pomiarowy  $\pm 5000$  Pa), po jednym na każdy szyb. Każdy czujnik został połączony za pomocą złącza pneumatycznego z linią pomiarową  $\varnothing 8$  mm o długości ok. 10 m. Linie pomiarowe wprowadzono bezpośrednio do szybów, na głębokość ok. 5 m poniżej zrębu, natomiast czujniki umieszczono na powierzchni kopalni.

Taka konfiguracja umożliwia ciągły pomiar różnicy ciśnień pomiędzy ciśnieniem barometrycznym na powierzchni kopalni a podciśnieniem w szybach wentylacyjnych, powyżej kanałów stacji wentylatorów głównego przewietrzania.

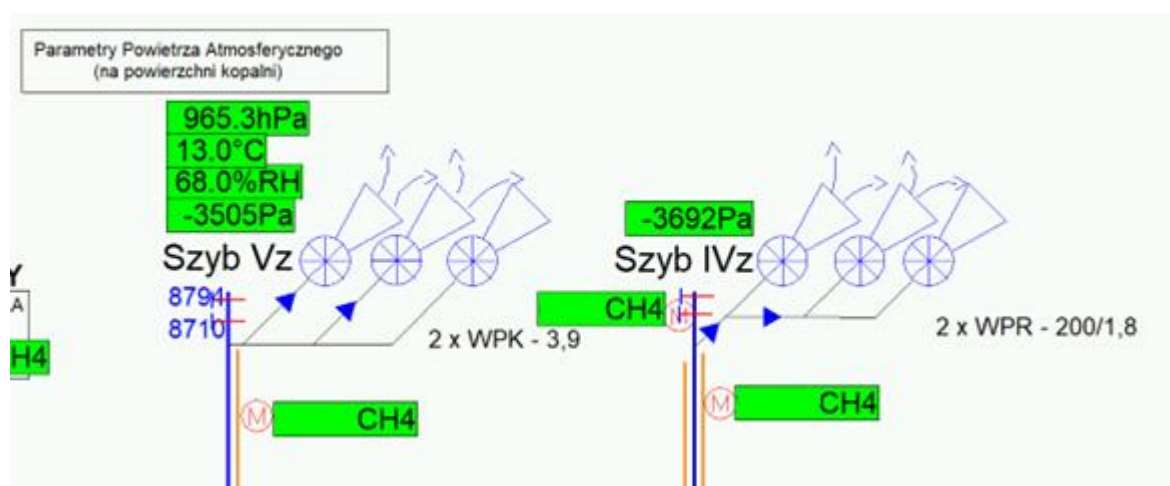
**Tabela 14** Dane techniczne czujnika typu CSPD-4 firmy HASO S.C. [138]

| Parametr                 | Wartość                                                                                      |
|--------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
| Napięcie zasilania       | od 8 do 14,5 VDC (nominalnie 12 VDC)                                                         |
| Pobór prądu              | max 5mA                                                                                      |
| Wyjście                  | analogowe 0,4-2 V lub cyfrowe, jednokierunkowa transmisja szeregową                          |
| Zakresy pomiarowe        | $\pm 250$ Pa, $\pm 1250$ Pa, $\pm 2500$ Pa, $\pm 5000$ Pa, $\pm 7500$ Pa                     |
| Błąd pomiarowy           | < 2%                                                                                         |
| Rozdzielczość            | 1 Pa                                                                                         |
| Sposób pomiaru           | ciągły                                                                                       |
| Czas odpowiedzi          | $\leq 2$ s                                                                                   |
| Pozycja pracy            | dowolna, zakończenia przewodów pneumatycznych w miejscach nie narażonych na zmiany ciśnienia |
| Zakres temperatury pracy | od -10°C do +40°C                                                                            |
| Zakres wilgotności pracy | od 15% do 99% bez kondensacji                                                                |
| Wymiary zewnętrzne       | 160 x 75 x 55 mm (bez złącz i osłony)                                                        |
| Masa (bez osłony)        | 0,7 kg                                                                                       |
| Stopień ochrony obudowy  | IP-54                                                                                        |



**Rys. 60** Widok czujnika typu CSPD-4 firmy HASO S.C. [138]

Pomiary realizowano w okresie od 01.02.2021 do 27.03.2023, z częstotliwością próbkowania co 1 minutę. Czujniki były zintegrowane z systemem telemetrycznym kopalni, a dane były gromadzone i wyświetlane w systemie Zefir w czasie rzeczywistym. W analizowanym okresie zebrano 1 048 574 rekordów danych, które następnie poddano analizie statystycznej.



**Rys. 61** Widok zabudowy czujników różnicy ciśnień w systemie ZEFIR

Proces przetwarzania danych:

Do realizacji badania wykorzystano język Python wraz z następującymi bibliotekami:

- pandas – do przetwarzania i analizy danych tabelarycznych, w tym importu danych z plików Excel i CSV,
- numpy – do operacji numerycznych, w tym usuwania braków danych i obliczania statystyk,
- matplotlib – do tworzenia wykresów przebiegu zmian ciśnienia,
- seaborn – do wizualizacji danych i histogramów,
- scipy.optimize – do analizy statystycznej (dopasowanie rozkładów danych),
- datetime – do operacji na datach i czasie,

- os – do obsługi plików,
- time – do pomiaru czasu działania skryptu

Dla każdej mierzonej wartości osobno (różnica ciśnień dla szybu IV oraz szybu V) dane zostały importowane do pliku CSV. Z bazy pomiarowej następnie usunięto brakujące dane ('???' – zapis w systemie Zefir związany z brakiem komunikacji. Przypadki każdej operacji usunięcia rekordów danych został zapisany do pliku raport.txt).

W tabeli 15 przedstawiono fragment danych pochodzących z czujnika różnicy ciśnień typu CSPD-4, zainstalowanego przy szybie IV kopalni. Dane obejmują wartości różnicy ciśnień zarejestrowane w czasie rzeczywistym, z częstotliwością co 1 minutę.

**Tabela 15** Wycinek danych czujnika różnicy ciśnień CSPD-4 przy Szybie IV

| Data     | Czas       | Ciśnienie |
|----------|------------|-----------|
| 2/1/2021 | 6:00:00 AM | -2851     |
| 2/1/2021 | 6:01:00 AM | -2869     |
| 2/1/2021 | 6:02:00 AM | -2837     |
| 2/1/2021 | 6:03:00 AM | -2854     |
| 2/1/2021 | 6:04:00 AM | -2859     |
| 2/1/2021 | 6:05:00 AM | -2859     |
| 2/1/2021 | 6:06:00 AM | -2852     |

Następnie, algorytm wykonywał iteracyjne obliczanie różnicy wartości ciśnienia dla poszczególnych okresów (z uwzględnieniem wartości średnich i maksymalnych) dla każdego przedziału osobno z przesunięciem co 1 minutę pod warunkiem, że zachowana była ciągłość danych w tym okresie.

Badanie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej kopalni zostało wykonane dla przedziałów czasowych: 15 minut, 1 godzina, 24 godzin, 7 dni i miesiąca;

Dla każdej lokalizacji opracowano wykresy:

- rejestracja różnicy ciśnień w całym okresie pomiarowym;
- zmiana różnicy ciśnień w czasie.

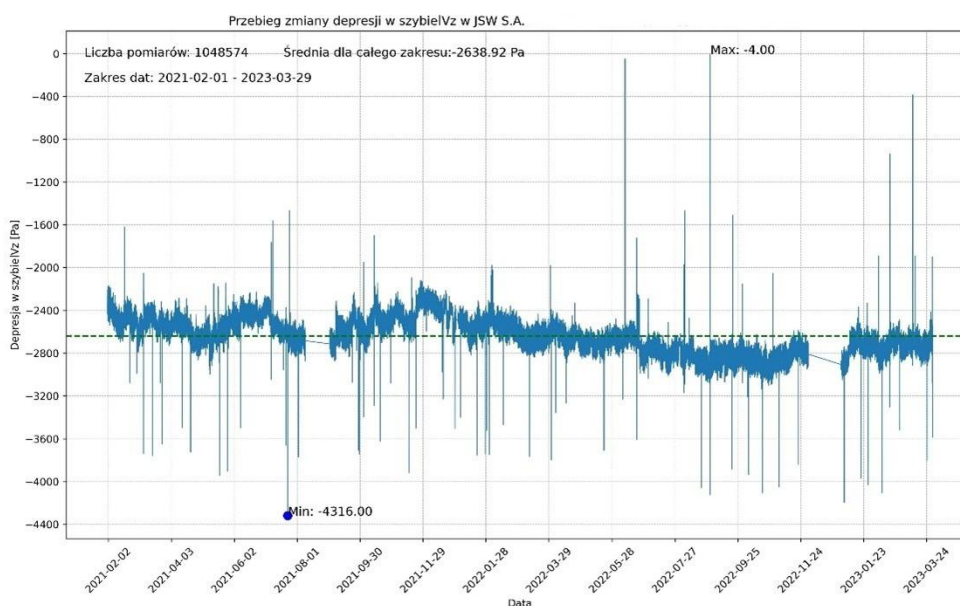
Uwaga: Z powodu dużej wilgotności powietrza, pomiary wykonane w rejonie szybu V w okresie od 01.02.2021 r. do 29.03.2023 r. wykazywały znaczną liczbę błędów pomiarowych, spowodowanych kondensacją pary wodnej w linii pomiarowej.

W związku z powyższym, wyznaczenie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej kopalni dla szybu V przeprowadzono w różnych, krótszych okresach.

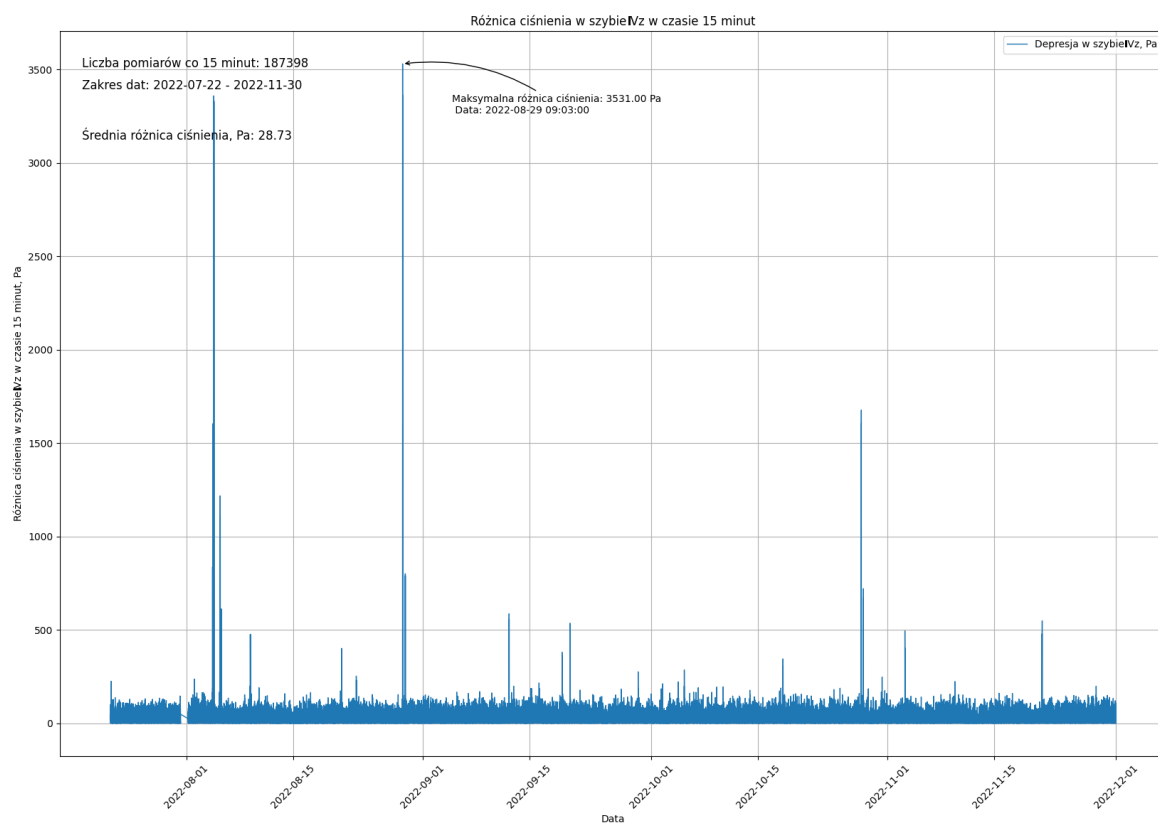
Przypadek ten został omówiony we wnioskach, a wykresy przedstawiające cały zakres danych zamieszczono w wynikach.

#### 4.2.2. Analiza wyników - Badanie C

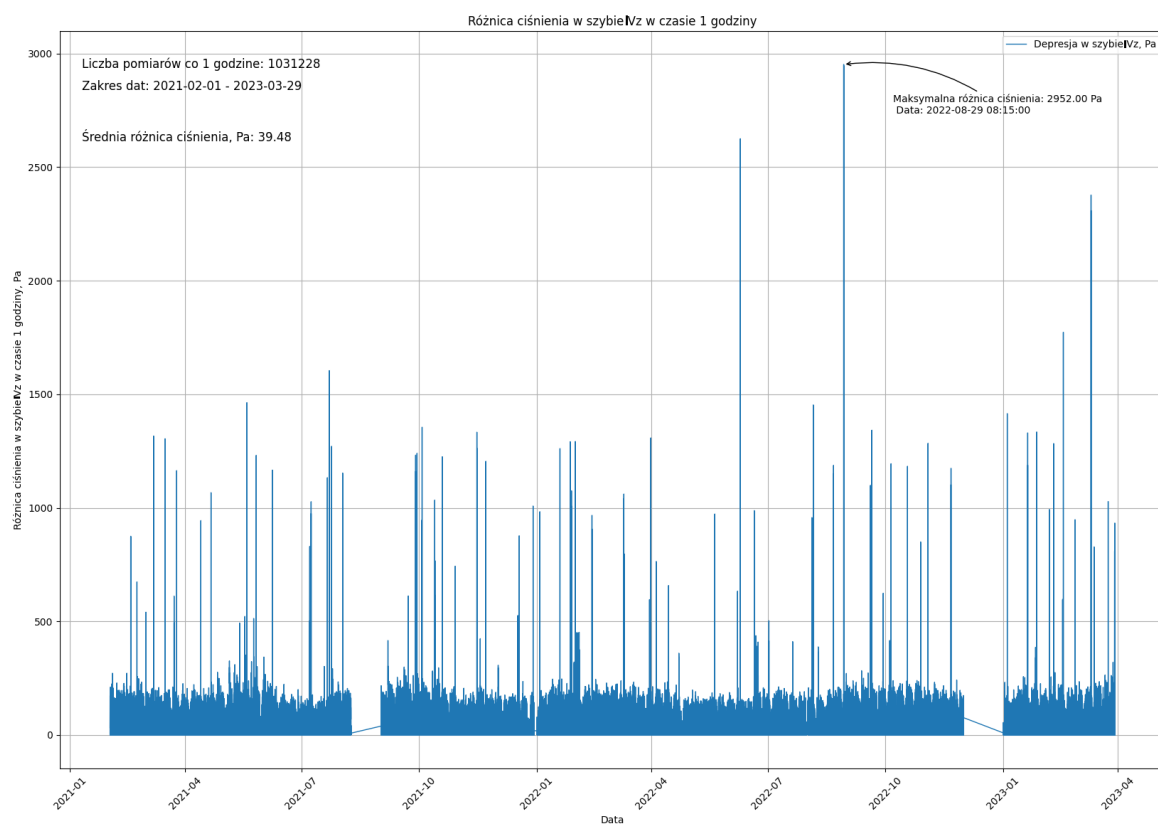
W ramach Badania C przeprowadzonego dla szybu IV uzyskano bardzo obszerny zestaw danych, które ilustrować zarówno poziom średni depresji, jak i dynamikę jej zmian w różnych przedziałach czasowych. Jak przedstawiono na rys. 62, wartości depresji w szybie IV kształtowały się średnio na poziomie  $-2638,92$  Pa, przy czym odnotowano skrajne wartości od  $-4316$  Pa do  $-4$  Pa. Wyniki te jednoznacznie wskazują na występowanie istotnych pulsacji, które w krótkich interwałach czasowych mogą generować zakłócenia w pomiarach i analizach sieci wentylacyjnej. Analiza dynamiki zmian ciśnienia (rys. 63–67) pozwala stwierdzić, że średnia amplituda fluktuacji wynosiła:  $28,73$  Pa w interwale 15-minutowym (rys. 63),  $39,48$  Pa w interwale godzinny (rys. 64),  $54,50$  Pa w skali dobowej (rys. 65),  $80,24$  Pa w skali tygodniowej (rys. 66) oraz  $111,77$  Pa w skali miesięcznej (rys. 67). Wyraźnie widoczny jest więc wzrost rozpiętości wahań w miarę wydłużania okresu analizy, co związane jest zarówno z naturalnymi zmianami w warunkach atmosferycznych, jak i czynnikami eksploatacyjnymi (m.in. praca wentylatorów, otwieranie tam czy efekt tłoka od naczyń wyciągowych).



Rys. 62 Przebieg zmian depresji w szybie IVz dla Badania C

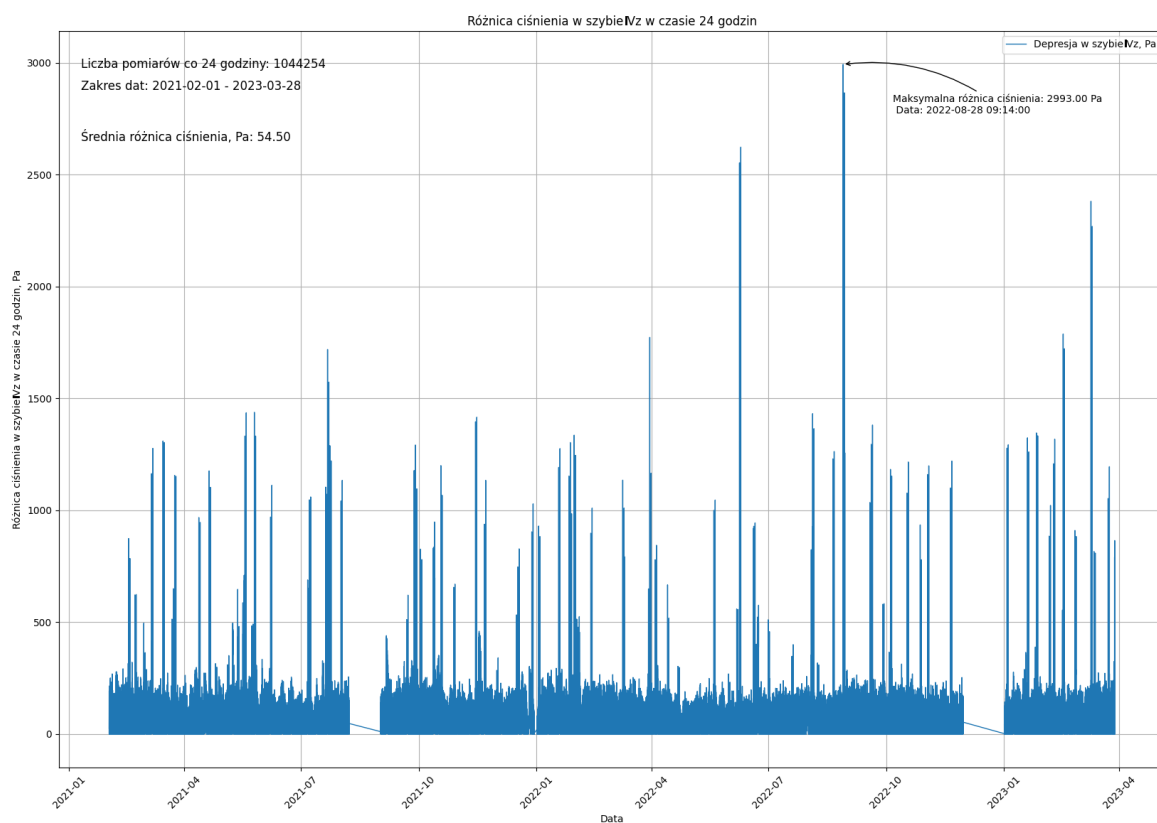


**Rys. 63** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie 15 min

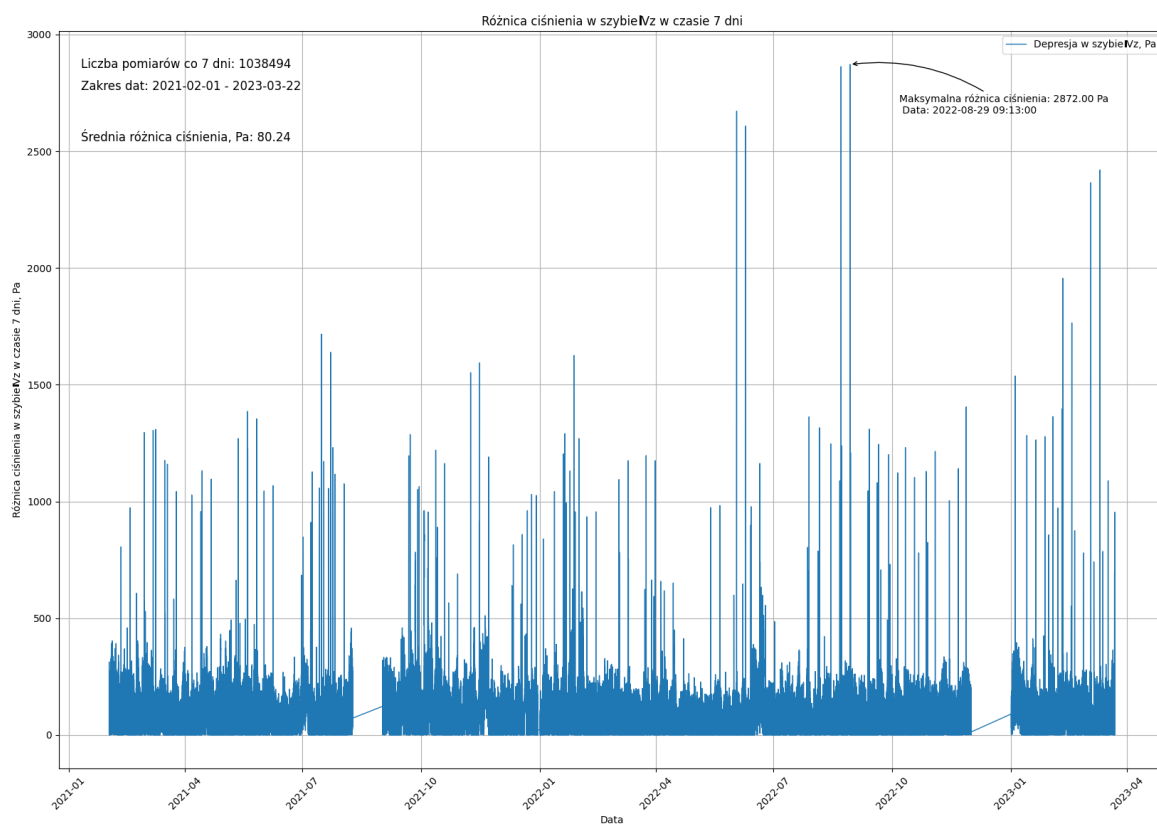


**Rys. 64** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie 1 godziny

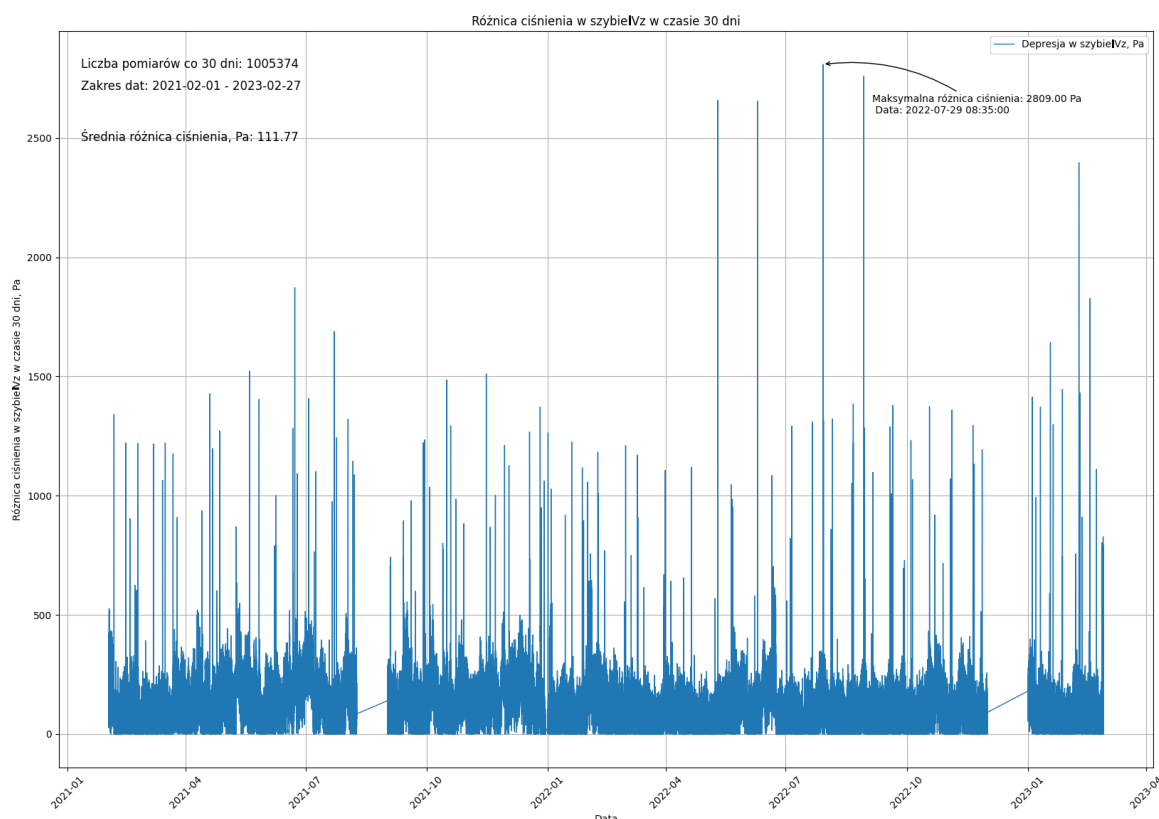




**Rys. 65** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie 24 godzin

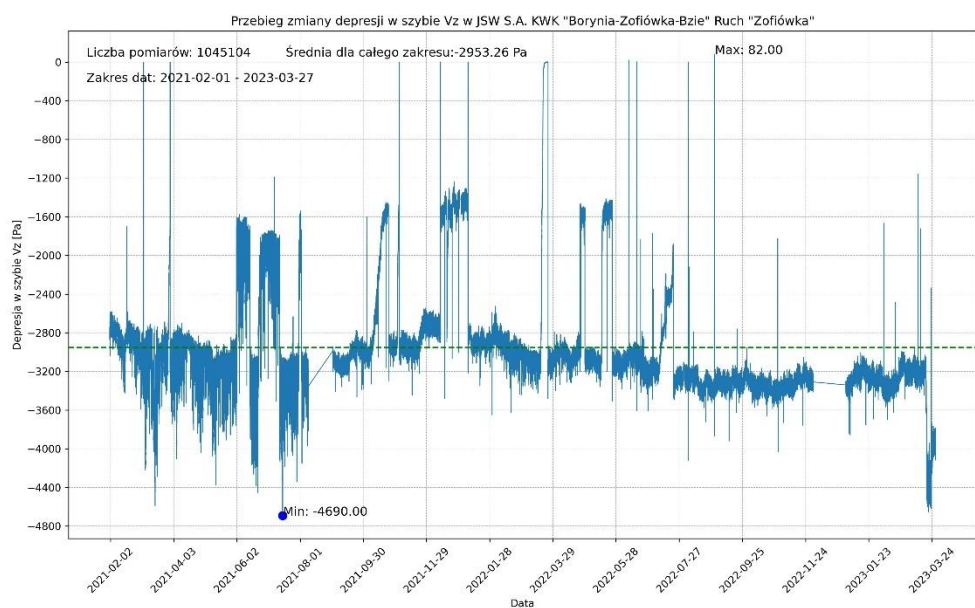


**Rys. 66** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie 7 dni

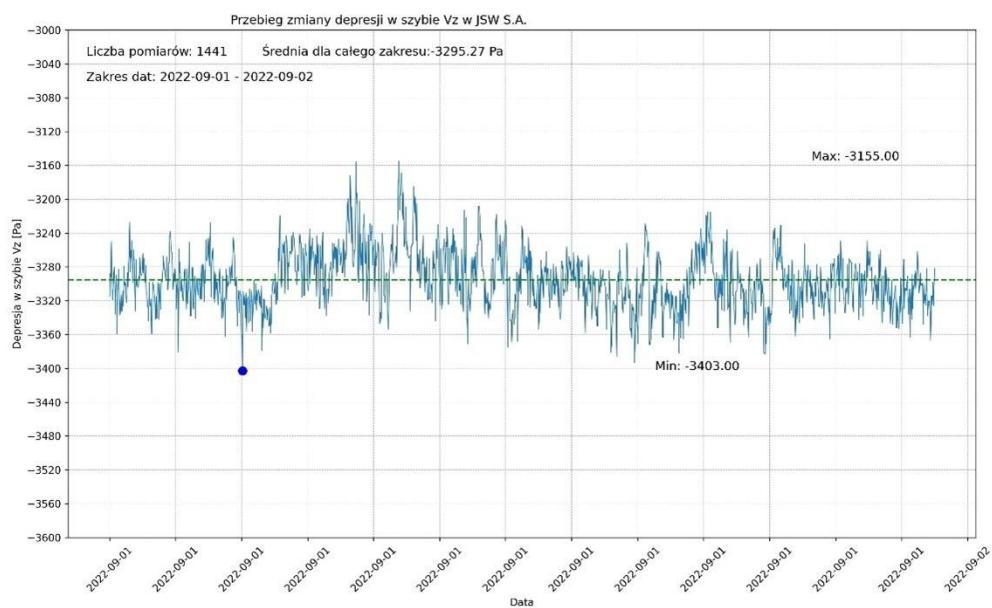


**Rys. 67** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie miesiąca

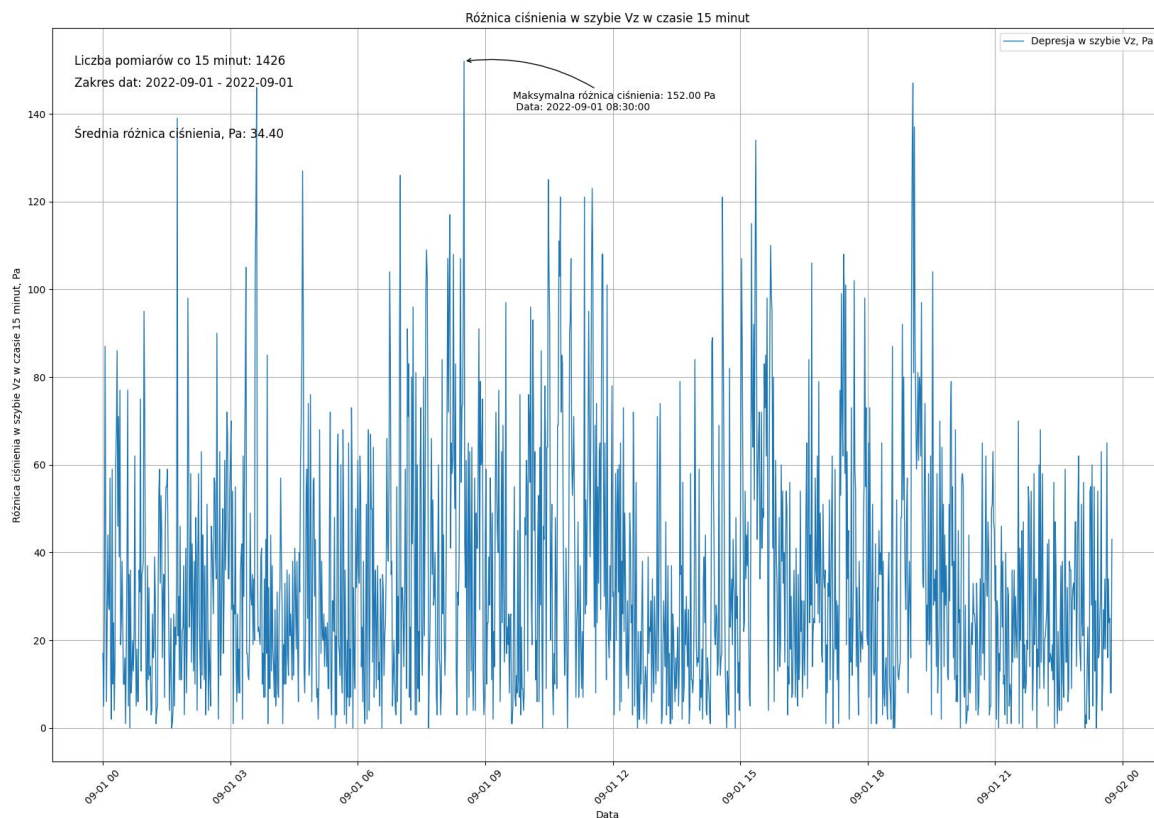
Wyniki uzyskane dla stanowiska badawczego przy szybie V potwierdzają większą zmienność i liczbę zakłóceń pomiarowych niż w przypadku szybu IV, co wynika m.in. z większej podatności linii pomiarowej na zawilgocenie. Na rys. 68 przedstawiono pełny przebieg zmian depresji w szybie V w całym okresie badawczym – średnia wartość wyniosła  $-3295,27$  Pa, a odnotowane ekstremalne wartości mieściły się w zakresie od  $-4690$  Pa do  $+82$  Pa, co wskazuje na znacznie większą amplitudę wahań niż w szybie IV. W krótkim przedziale dobowym (rys. 69) depresja utrzymywała się w granicach od  $-3403$  Pa do  $-3155$  Pa, ze średnią  $-3295,27$  Pa, co pokazuje stosunkowo stabilny charakter w tym zakresie czasowym, jednak z wyraźnymi lokalnymi pulsacjami. Analiza dynamiki zmian różnicy ciśnień w poszczególnych interwałach czasowych (rys. 70–74) wskazuje na zróżnicowany poziom zmian: w okresie 15 minut średnia różnica wynosiła  $34,40$  Pa, w interwale godzinnym  $33,04$  Pa, w dobowym  $46,04$  Pa, tygodniowym  $66,50$  Pa, a w miesięcznym już  $85,30$  Pa.



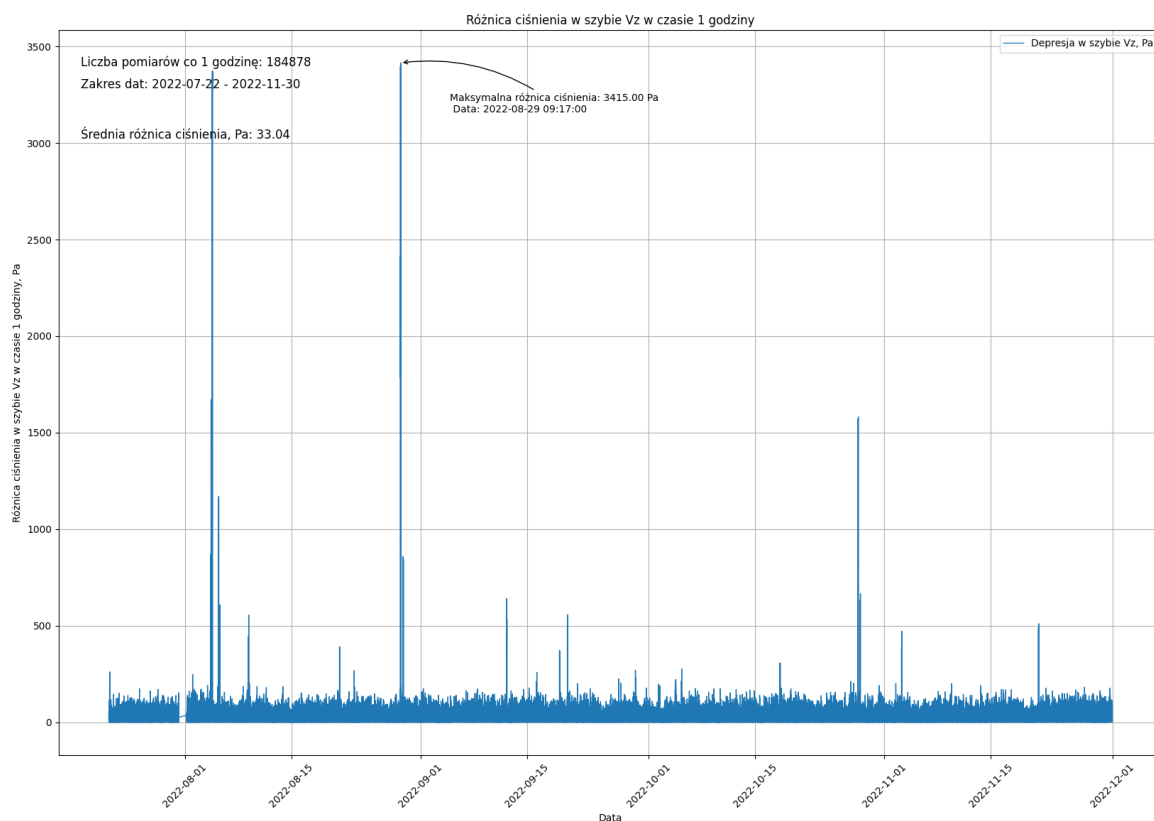
**Rys. 68** Przebieg zmian depresji w szybie V dla Badania C – wraz z błędami pomiarowymi



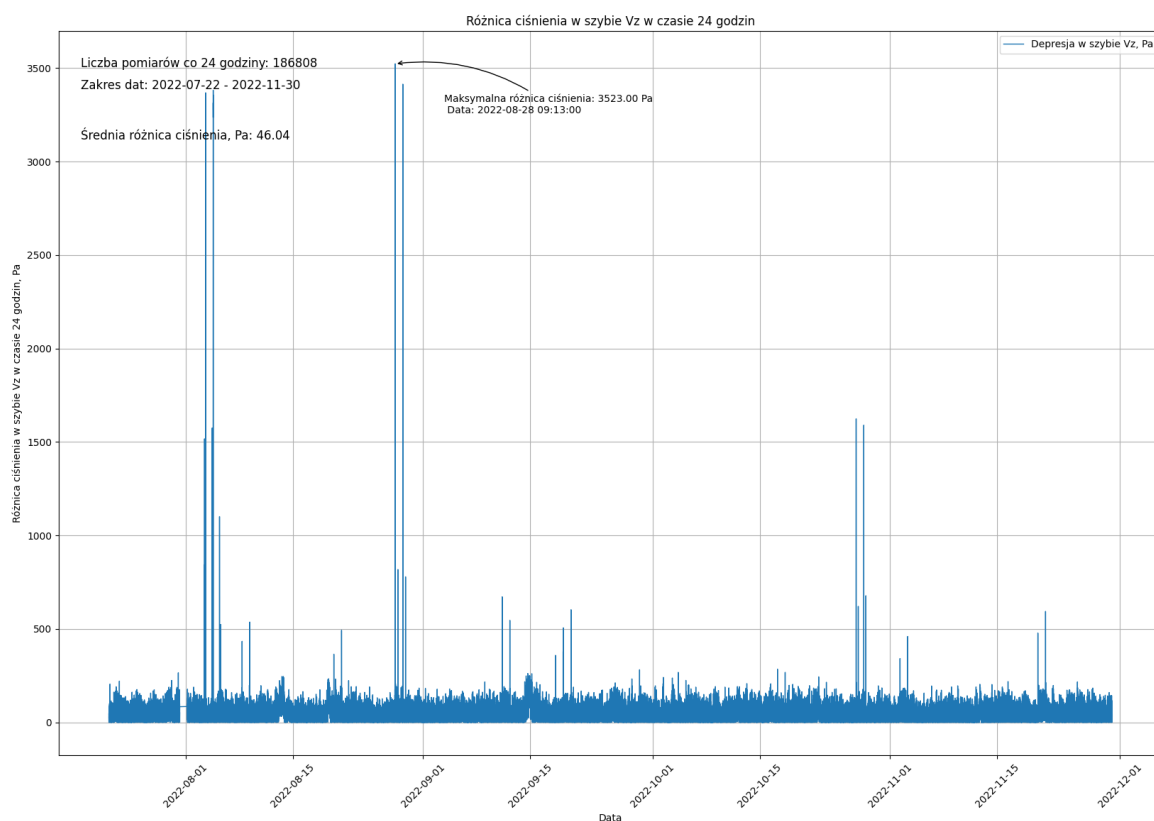
**Rys. 69** Przebieg zmian depresji w szybie V dla Badania C – okres 24 godzin



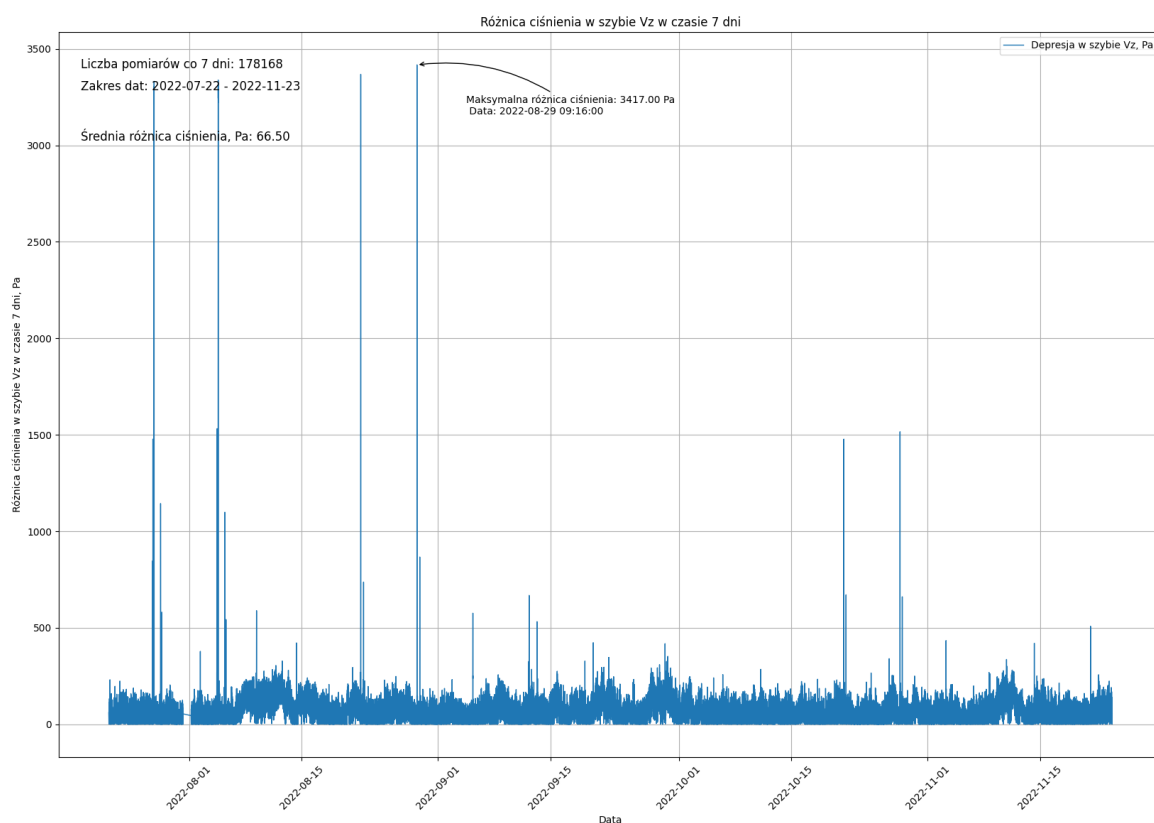
**Rys. 70** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie 15 minut



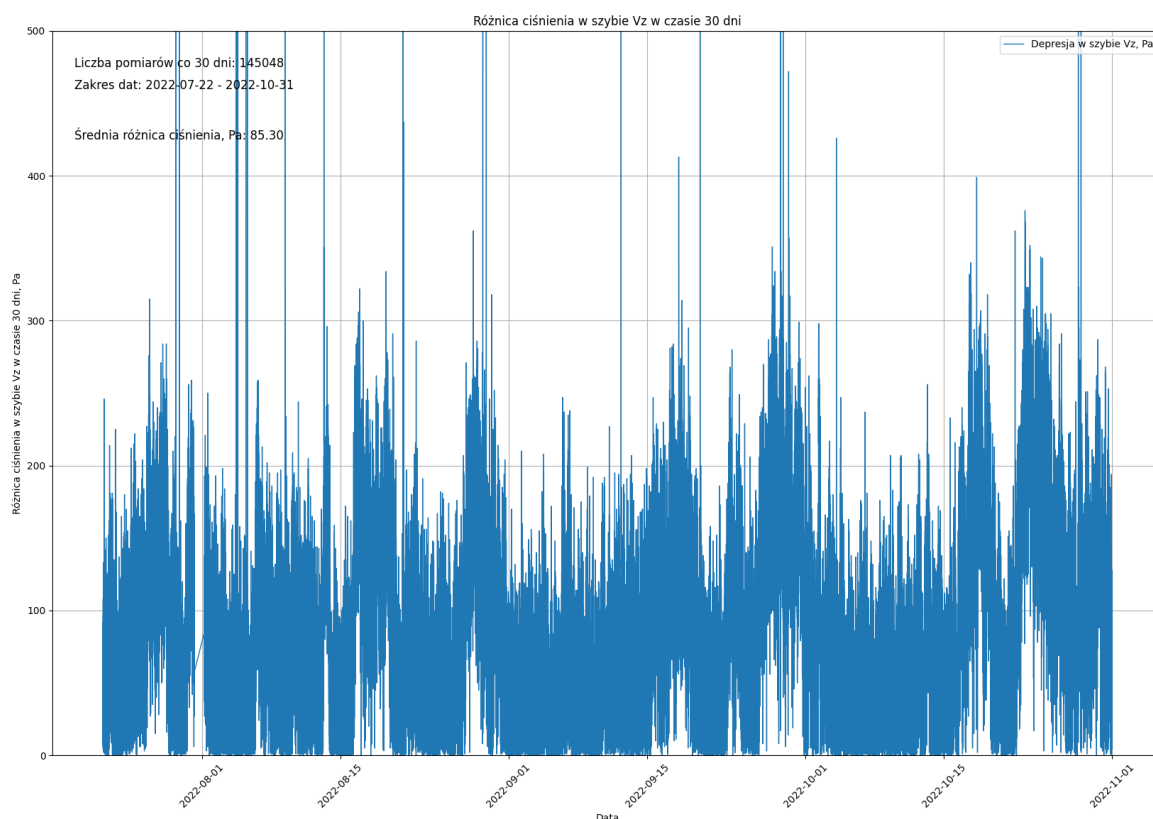
**Rys. 71** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie 1 godziny



**Rys. 72** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie 24 godzin



**Rys. 73** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie 7 dni



**Rys. 74** Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie miesiąca

Porównanie wyników zestawionych w tabeli 16 pokazuje, że szyb V charakteryzuje się ogólnie wyższą depresją średnią niż szyb IV ( $-3295,27$  Pa wobec  $-2638,92$  Pa), co wynika bezpośrednio z pracy mocniejszych wentylatorów głównego przewietrzania.

Jednocześnie amplitudy wahań w krótszych przedziałach czasowych (15 min, 1 godzina, 24 godziny) są podobne lub nieznacznie wyższe niż w szybie IV, natomiast w dłuższych interwałach (7 i 30 dni) wartości dla szybu IV są wyższe, co sugeruje większy wpływ czynników długookresowych (np. sezonowych zmian atmosferycznych) na ten szyb. Wyniki uzyskane w szybie V potwierdzają również, że chwilowe zakłócenia (zmiany w stanie otwarcie/zamknięcie tam wentylacyjnych) mają silny wpływ na przebieg rejestrowanych wartości, co widoczne jest w nagłych „pikach”.

Niższe wartości w szynie V, spowodowane są z pewnością przez, długie okresy nieprawidłowych wskazań czujnika różnicy ciśnień (kondensacja par wodnej w linii pomiarowej w szybie).

**Tabela 16** Wyznaczenie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej dla Badania C

| Wyznaczenie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej kopalni |           |          |          |         |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|----------|----------|---------|
|                                                                       |           | Szyb IV  | Szyb V*  |         |
|                                                                       |           | Średnia  | Średnia  | Średnia |
| Depresja w szybie, Pa                                                 |           | -2638.92 | -3295.27 | -2967.1 |
| Dynamika zmiany ciśnienia, Pa                                         | 15 minut  | 28.73    | 34.4     | 31.565  |
|                                                                       | 1 godzina | 39.48    | 33.04    | 36.26   |
|                                                                       | 24 godzin | 54.5     | 46.04    | 50.27   |
|                                                                       | 7 dni     | 80.24    | 66.5     | 73.37   |
|                                                                       | 30 dni    | 111.77   | 85.3     | 98.535  |

\* wartości dla szybu V na podstawie krótkich przedziałów czasowych

#### 4.2.3. Badanie D - Metoda badania stanu potencjałów sieci wentylacyjnej w czasie rzeczywistym

Powszechnie w polskich kopalniach, wykonuje się badanie sieci wentylacyjnej przez wykonanie zdjęcia potencjalnego kopalni. Pomiary te wykonuje się zazwyczaj w dniu wolnym od wydobywania, przy możliwie małym ruchu załogi w podziemnych wyrobiskach kopalni. Zdjęcie potencjalne wykonuje się z wykorzystaniem przenośnych barometrów w węzłach sieci wentylacyjnej. Opracowanie wyników wykonanych pomiarów jest czasochłonne, a otrzymane wyniki nie zawsze są miarodajne (pulsacje ciśnienia sieci, błędy ludzkie i inne). Pomiary obejmują jednak zasięgiem całą sieć wentylacyjną.

Pomiar ciągły potencjałów w każdym węźle sieci wentylacyjnej kopalni jest skrajnie niepraktyczny oraz byłby bardzo drogi.

Po przeanalizowaniu, możliwości przeprowadzenia takich badań, zwrócono uwagę na fakt możliwości wykorzystania już istniejących czujników gazometrii automatycznej lub AKPiA przy wentylatorach głównego przewietrzania kopalni. W kopalniach JSW S.A. korzysta się między innymi z następujących typów czujników ciśnienia w centralach gazometrycznych:

**Czujnik barometryczny** - (np. CSPA-2 firmy HASO S.C.): czujniki tego typu buduje się zazwyczaj na wylocie z rejonu ścian wydobywczych. Wskazują aktualną wartość ciśnienia barometrycznego w sieci wentylacyjnej kopalni. Jednakże bez wykonania dodatkowych obliczeń, służbą wentylacyjną może pokazywać tylko trend (wzrost lub spadek ciśnienia barometrycznego).

Kolejnym miejscem instalowania czujników barometrycznych jest powierzchnia kopalni. Czujnik ten jest zintegrowany z systemem wizualnego informowania załogi

o zmianie ciśnienia barometrycznego (ostrzeżenie na nadszybiu, szybów zjazdowych). Czujnik ten zazwyczaj nie jest zintegrowany z systemem gazometrycznym kopalni.

**Czujnik różnicy ciśnień** – (np. CSPD-4 firmy HASO S.C.) -powszechnie budowany jest przy tamach wentylacyjnych (śluzach) na dole kopalni. Czujniki różnicy ciśnień budowane są również często w AKPiA stacji wentylatorów głównego przewietrzania (w niezmodernizowanych instalacjach wykorzystuje się do dziś cieczowy manometr różnicowy typu U-rurka).

W oparciu o te dwa typy czujników gazometrii automatycznej opracowano metodę badania stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym.

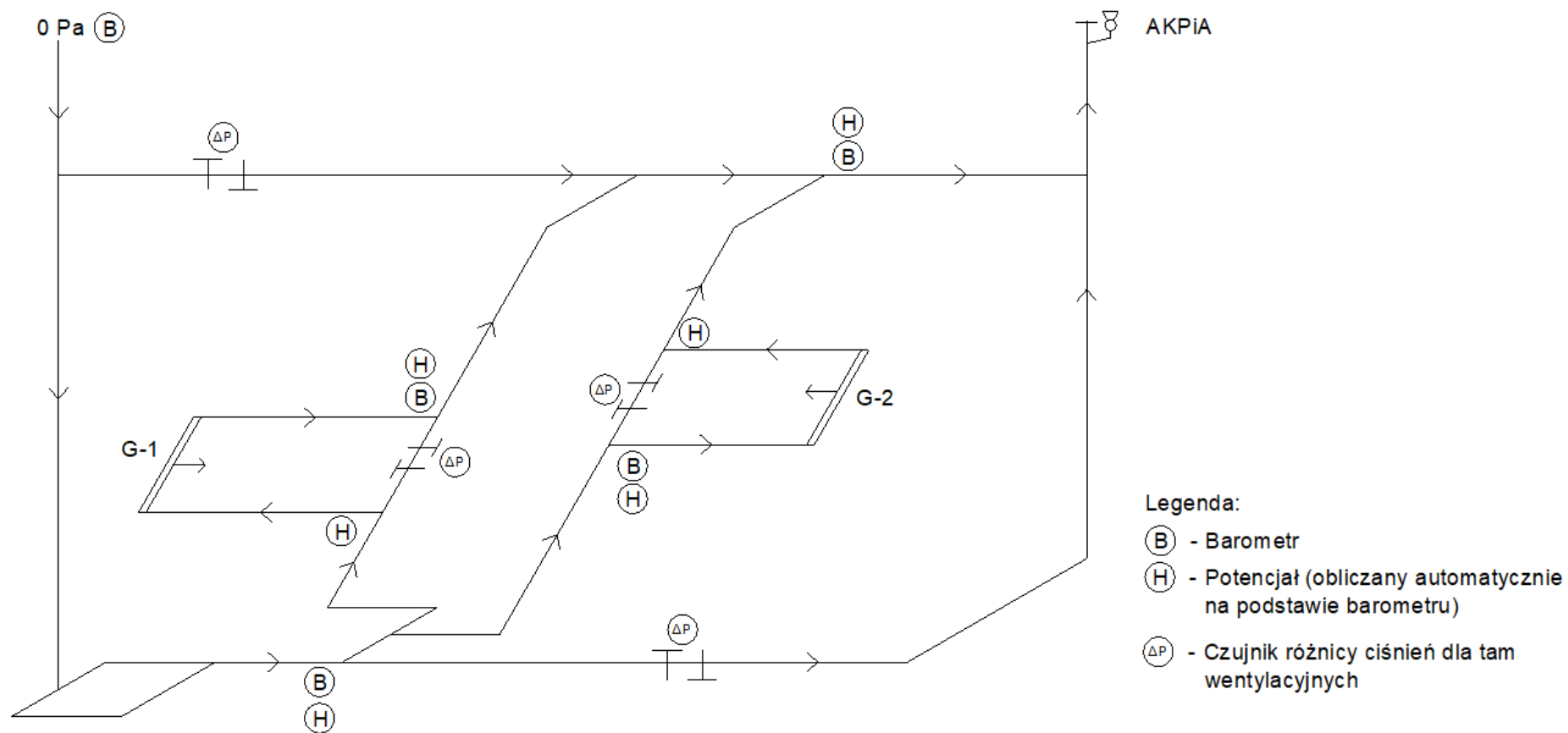
### **Lokalizacja i sposób pomiaru**

Metodę zastosowano w jednej z kopalń JSW S.A. wykorzystując już istniejące czujniki gazometrii automatycznej oraz uzupełniono o dodatkowe lokalizacje według następujących zasad:

- czujnik barometryczny typu CSPA-2 firmy HASO S.C. zabudowany powierzchni kopalni do 2 m od gruntu względem poziomu zrębu szybu wdechowego (kota niwelacyjna 280,15 m.p.p.m.) – czujnik ten pełni rolę „stacji pogodowej” – opisany w czasie Badania A. Czujnik ten połączony jest z systemem gazometrycznym kopalni i wizualizowany w systemie Zefir (częstotliwość zapisu co 1 minuta).
- czujnik barometryczny typu CSPA-2 firmy HASO S.C. zabudowany na wylocie powietrza z rejonu wentylacyjnego (kota niwelacyjna: dla każdego czujnika jest inna – odczytana z mapy górniczej) – czujnik ten rejestruje wartość ciśnienia barometrycznego na wylocie lub wlocie do/z rejonu ściany (pozwala na automatyczne obliczenie potencjału). Czujnik ten również jest połączony z systemem gazometrycznym kopalni i wizualizowany w systemie Zefir (częstotliwość zapisu co 1 minuta).
- Czujnik różnicy ciśnień typu CSPD-4 firmy HASO S.C. zabudowany jest pomiędzy tamami wentylacyjnymi (śluzach) dla ściany w boczniczy wentylacyjnej łączący chodnik wentylacyjny (z zabudowanym czujnikiem barometrycznym na wylocie z rejonu wentylacyjnego). Czujnik ten będzie pozwalał na określenie przybliżonej wartości potencjału wlotowego do rejonu wentylacyjnego ściany.

Idę rozmieszczenia czujników obrazuje rysunek 75.





**Rys. 75** Schemat ideowy rozmieszczenia czujników dla automatycznego wyznaczania potencjałów

Takie rozmieszczenie czujników w sieci pozwala już na obliczenie czterech głównych w kopalni wartości potencjałów w sposób ciągły (na podstawie aktualnych wskazań czujników):

- potencjał wlotowy do kopali na zrębie szybu równy 0 Pa;
- potencjał wlotowy do rejonu ściany (szacowany na podstawie aktualnych pomiarów różnicy ciśnień i wskazań czujnika barometrycznego na wylocie z rejonu);
- potencjał wylotowy z rejonu wentylacyjnego ściany, został obliczany na podstawie wskazań czujnika barometrycznego;
- potencjał wylotowy na podstawie czujnika różnicy ciśnień AKPiA zabudowanego w stacji wentylatorów głównego przewietrzania (pomiar podciśnienia w szybie wentylacyjnego poniżej kanału wentylacyjnego).

Na tym etapie nie zachodziła konieczność zabudowy żadnych dodatkowych czujników w systemie gazometrycznym kopalni, aby móc obliczać wartość potencjałów w sposób automatyczny, wymagane było napisanie skryptu w VBA (Visual Basic for Applications), który wprowadzi „wirtualny” czujnik pomiaru potencjału aerodynamicznego do bazy danych serwera lustrzanego w systemie ZEFIR.

W celu zwiększenia dokładności badania sieci wentylacyjnej, zdecydowano o zabudowie dwóch kolejnych czujników barometrycznych w grupowych prądach powietrza („świeżego” i „zużytego”):

- czujnik barometryczny typu CSPA-2 firmy HASO S.C. zabudowany w grupowym prądzie powietrza „świeżego” w połowie odległości pomiędzy podszybem szybu wdechowego na poziomie wydobywczym i węzłem łączącym grupowy prąd powietrza, a prądem rejonowym ściany – czujnik ten rejestruje wartość ciśnienia barometrycznego (średnia wartość grupowego prądu powietrza „świeżego”). Czujnik ten również jest połączony z systemem gazometrycznym kopalni i wizualizowany w systemie Zefir (częstotliwość zapisu co 1 minuta).
- czujnik barometryczny typu CSPA-2 firmy HASO S.C. zabudowany w grupowym prądzie powietrza „zużytego” w połowie odległości pomiędzy podszybem szybu wentylacyjnego na poziomie wentylacyjnym i węzłem łączącym grupowy prąd powietrza, a prądem rejonowym wylotowym (wentylacyjnym) ściany – czujnik ten rejestruje wartość ciśnienia

barometrycznego (grupowy prąd powietrza „zużytego”). Czujnik ten również jest połączony z systemem gazometrycznym kopalni i wizualizowany w systemie Zefir (częstotliwość zapisu co 1 minuta).

W takim rozmieszczeniu czujników możliwe było przypisanie dla każdej ściany pięciu stref potencjałów, które wyznaczane są w sposób ciągły i automatyczny w czasie rzeczywistym.

UWAGA: używana jest nazwa „potencjału”, ponieważ przedstawia szacowaną wartość potencjału izochorycznego według Bystronia. Uproszczenie te jest spowodowane ograniczonymi możliwościami obliczeniowymi systemu ZEFIR stosowanego powszechnie w kopalniach. Program pozwala tylko na proste działania arytmetyczne. Założono, że wartością nadrzędną jest znajomość szacowanej wartości potencjału izochorycznego w czasie rzeczywistym, aniżeli żadnej. Ponadto, badana jest dynamika zmian, a więc wartości względne tego samego czujnika (mniejsze błędy, aniżeli względem innego czujnika).

Jednakże w związku z równocześnie wykonywanymi pomiarami temperatury i wilgotności, przy odpowiednim oprogramowaniu możliwe byłoby obliczanie potencjałów izochorycznych jak również izentropowych, w miejscu zabudowy czujników z odpowiednią dokładnością.

W związku z powyższym przyjęto wartość średnią gęstości powietrza dla wyrobisk na dole kopalni na poziomie - 1,25 kg/m<sup>3</sup>.

W takim rozmieszczeniu czujników możliwe było przypisanie dla każdej ściany pięciu stref potencjałów aerodynamicznych, które wyznaczane są w sposób ciągły i automatyczny w czasie rzeczywistym. Obliczenia realizowane są zgodnie z równaniem (30), w którym potencjał czujnika pod ziemią określany jest na podstawie różnicy między lokalnym ciśnieniem barometrycznym a ciśnieniem atmosferycznym na powierzchni, skorygowanym o wysokość zabudowy czujnika. W przypadku wykorzystania czujników różnicy ciśnień dodatkowo obliczany jest potencjał przybliżony według równania (31), co pozwala na precyzyjniejsze odwzorowanie spadków ciśnienia w bocznicach wentylacyjnych. Zasada działania systemu została zobrazowana na wizualizacjach z systemu Zefir: rozmieszczenie czujników pokazano na rys. 76, zbiorcze zestawienie wyników obliczeń przedstawiono na rys. 77, natomiast przykłady automatycznie wyznaczonych potencjałów dla rejonów ścianowych i grupowych prądów powietrza zaprezentowano odpowiednio na rys. 78 i 79. Szczegółowy przebieg zmian potencjału w czasie dobowym, rejestrowany w odstępach minutowych, ukazano na rys.80,

co potwierdza możliwość ciągłego monitorowania dynamiki sieci wentylacyjnej w warunkach rzeczywistych.

Obliczanie wartości potencjałów na podstawie zabudowanych czujników realizowane automatycznie zgodnie z równaniem (30):

$$h_{cz} = 100 \cdot p_{cz} - 100 \cdot p_{atm} + 1.25 \cdot z_{cz} \cdot g \quad (30)$$

Gdzie:

$h_{cz}$  – potencjał obliczony dla lokalizacji czujnika pod ziemią, Pa

$p_{cz}$  – ciśnienie barometryczne z czujnika pod ziemią, hPa

$p_{atm}$  – ciśnienie barometryczne (atmosferyczne) na powierzchni z czujnika, Pa

$z_{cz}$  – kota niw. zabudowy czujnika barometrycznego pod ziemią ( $p_{cz}$ ), m. p. p. m.

$g$  – przyspieszenie ziemskie,  $g=9,81 \text{ m/s}^2$

W przypadku obliczenia przybliżonej (szacowanej) wartości potencjału wlotowego korzystając z wskazań czujnika różnicy ciśnień, na podstawie równania:

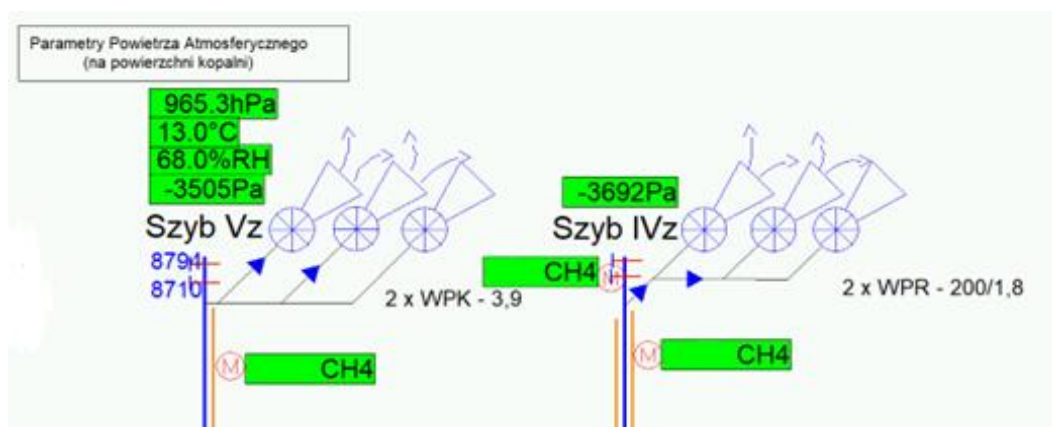
$$h_{scz} = h_{cz} - \Delta p \quad (31)$$

gdzie:

$h_{scz}$  – potencjał szacowany (przybliżony), Pa

$h_{cz}$  – potencjał obliczony, Pa

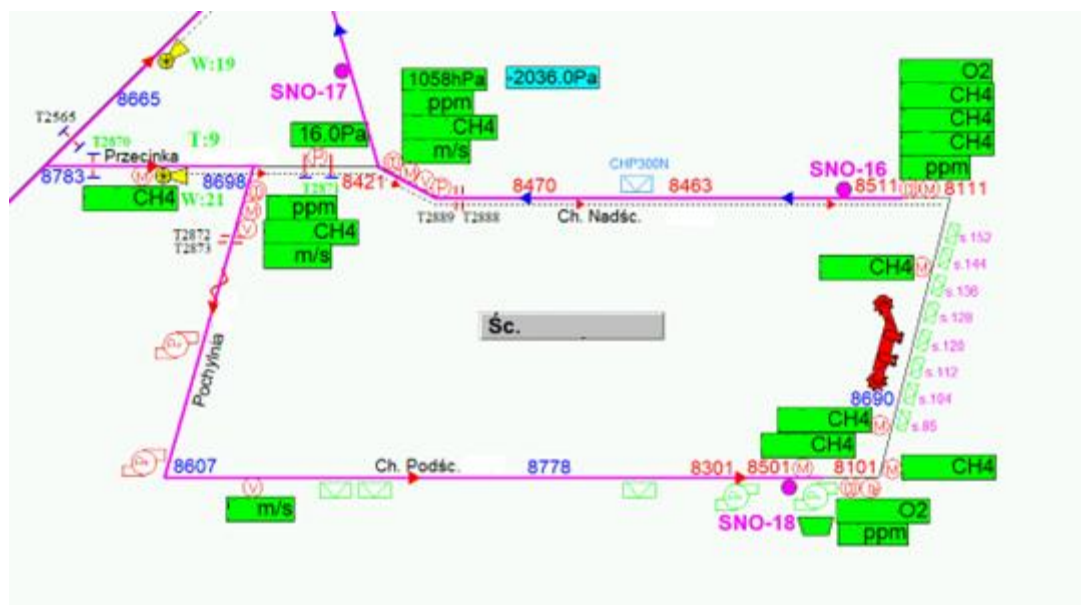
$\Delta p$  – wartość czujnika różnicy ciśnień na tamach wentylacyjnych (śluzach), Pa



**Rys. 76** Wizualizacja w Zefirze czujników barometrycznych wykorzystywanych do automatycznego obliczania potencjałów w Badaniu D

| Automatyczne potencjały kopalni                          |                          |                           |                              |
|----------------------------------------------------------|--------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Stacja pogodowa na powierzchni kopalni (281,15 m.n.p.m.) |                          |                           |                              |
| 965hPa 13°C 68.0%RH                                      |                          |                           |                              |
| Rejon                                                    | Potencjał wlot do rejonu | Różnica ciśnień na tamach | Potencjał wylot z rejonu     |
| C                                                        |                          |                           | -2329Pa<br>(-553,0 m.p.p.m.) |
| B                                                        | -2137Pa                  | 340Pa                     | -2477Pa<br>(-695 m.p.p.m.)   |

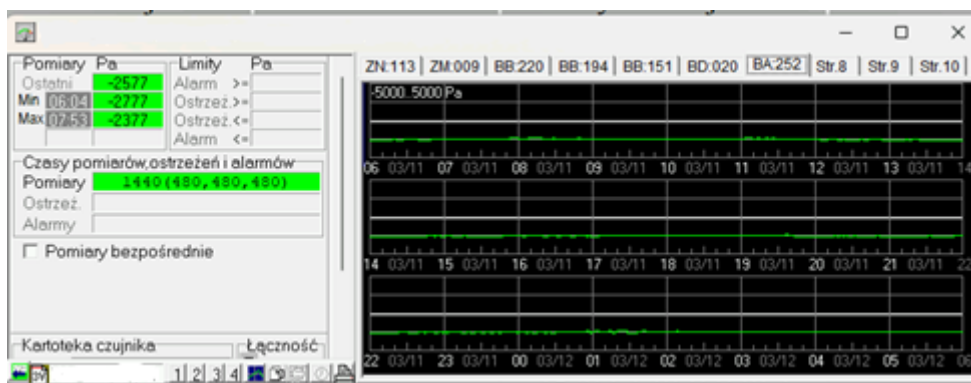
Rys. 77 Wizualizacja zbiorczego zestawienia wyników automatycznych obliczeń potencjałów w Zefirze w Badaniu D



Rys. 78 Wycinek schematu w systemie Zefir z obliczonym automatycznym potencjałem na wylocie z rejonu ściany (kolor niebieski) w Badaniu D



Rys. 79 Wycinek schematu w systemie Zefir z obliczonym automatycznym potencjałem – grupowy prąd powietrza „świeżego” (kolor niebieski) w Badaniu D



**Rys. 80** Wycinek wskazań obliczonego potencjału w systemie Zefir dla okresu 24 godzin co 1 minuta w Badaniu D

Na podstawie powyżej opracowanej metody badania stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym, wyznaczono stanowiska badawcze w kopalni w następujących miejscach:

- powierzchnia - czujnik barometryczny typu CSPA-2 firmy HASO S.C.;
- szyb wentylacyjny - czujnik różnicy ciśnień typu CSPD-4 firmy HASO S.C.;
- przekop z grupowym prądem powietrza „świeżego” czujnik barometryczny typu CSPA-2 firmy HASO S.C.;
- trzy czujniki barometryczne typu CSPA-2 firmy HASO S.C. na wylotach z rejonowych prądów powietrza ściany A, B, C (trzy rejonu ścian);
- trzy czujniki różnicy ciśnień typu CSPD-4 firmy HASO S. pomiędzy tamami wentylacyjnymi (śluzach) dla ścian w bocznicach wentylacyjnych łączących chodnik wentylacyjne (z zabudowanymi czujnikami barometrycznymi na wylocie z rejonów wentylacyjnych);
- potencjały wlotowe do rejonów ścian (szacowane na podstawie aktualnych pomiarów różnic ciśnień i wskazań czujników barometrycznych na wylotach z rejonów).

Wyznaczając, dla każdego z tych miejsc potencjałów w czasookresach co 1 minutę w okresie od 1.01. – 31.01.2025r.

W podanym okresie wyznaczono 3 przedziały czasowe:

- styczeń (cały zakres pomiarów);
- 24 godziny za dzień 1.01.2025 r.
- 1 godzina za dzień 1.01.2025 r. (6:00-7:00) – Sylwester 2025 - bardzo mały ruch załogi w kopalni (bardzo stabilne pomiary ciśnienia).

Dla każdego z przedziałów czasowych wyznaczono następujące wartości ciśnień:

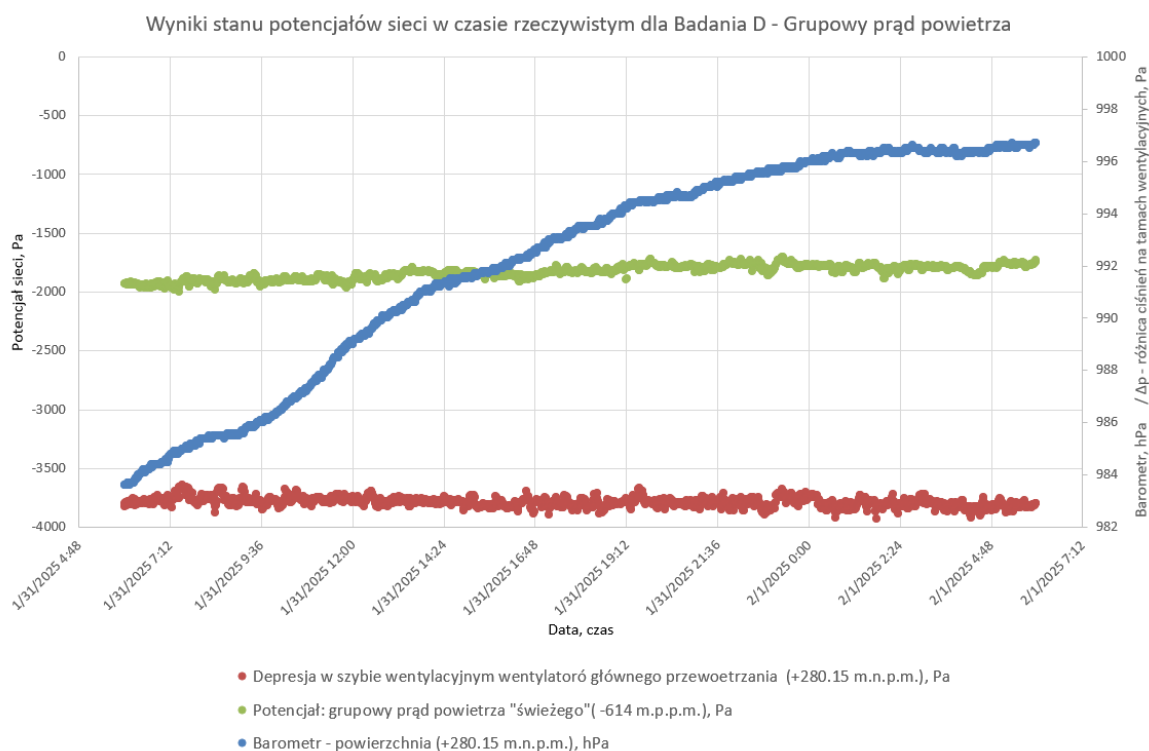
- średnia;
- mediana;
- minimum;
- maksimum.

#### **4.2.4. Analiza wyników - Badanie D**

Analiza wyników uzyskanych w ramach Badania D pozwala stwierdzić, że opracowana metoda automatycznego wyznaczania potencjałów aerodynamicznych w czasie rzeczywistym umożliwia bieżące śledzenie dynamiki sieci wentylacyjnej z dostateczną dokładnością. Na rys. 81 zaprezentowano wyniki dla grupowego prądu powietrza „świeżego”, gdzie obserwuje się wyraźną stabilność wartości potencjału w okresie dobowym, przy jednoczesnej wrażliwości na zmiany depresji w szybie wentylacyjnym. Dla poszczególnych ścian eksploatacyjnych (rys. 82–84) odnotowano różnice wartości potencjałów między wlotem a wylotem rejonu, które odpowiadają spadkom ciśnienia na tamach wentylacyjnych ( $\Delta p$ ). Rys. 84 zestawia wyniki dla wylotów z rejonów ścian A, B i C, potwierdzając zróżnicowaną wartość potencjałów poszczególnych prądów powietrznych, co wynika zarówno z lokalnych oporów aerodynamicznych, jak i umiejscowieniem w sieci wentylacyjnej kopalni. Szczegółowe przebiegi dla ściany A (rys. 85), a także w warunkach ograniczonej eksploatacji (Sylwester 2025 – rys. 87–89) wskazują, że przy niewielkim obciążeniu ruchem górniczym pulsacje potencjałów maleją i przyjmują wartości rzędu kilkudziesięciu Pa.

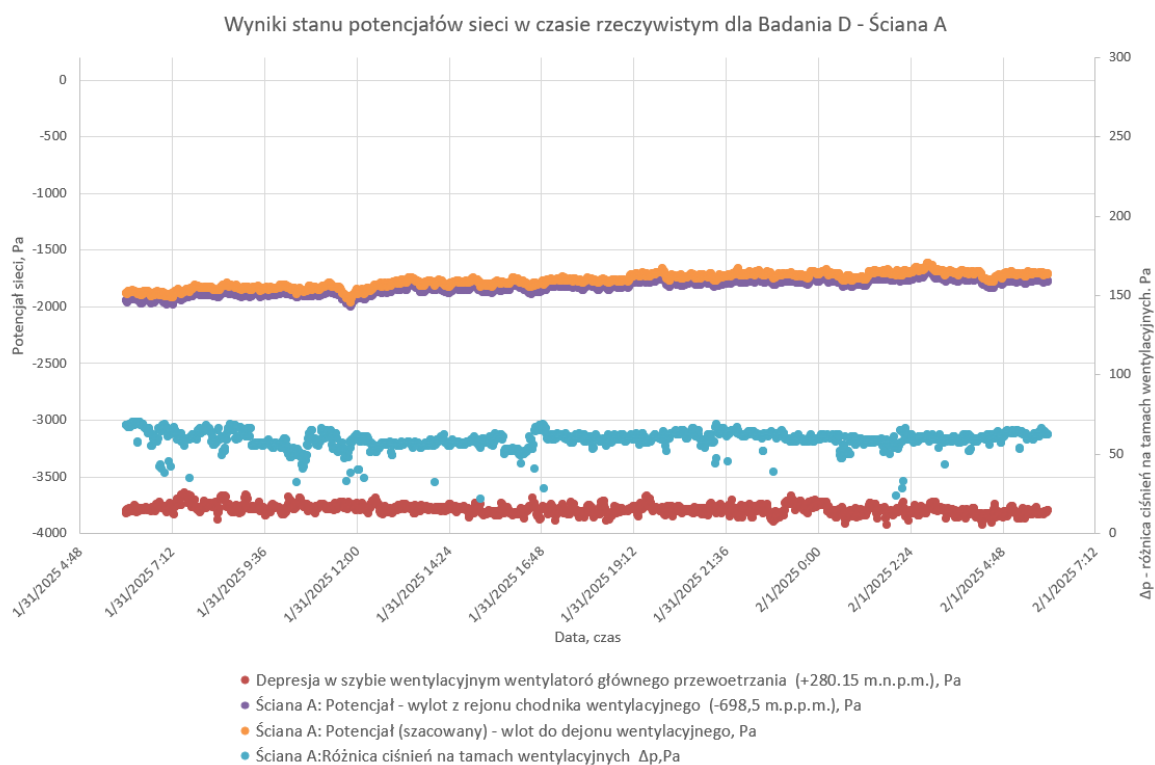
Zestawienie zbiorcze w tabeli 17 potwierdza zgodność danych uzyskanych z czujników w różnych lokalizacjach. Średnie wartości potencjałów w styczniu 2025 r. wynosiły odpowiednio:  $-1983,6$  Pa dla grupowego prądu powietrza „świeżego”,  $-1896,3$  Pa dla wylotu ze ściany A,  $-1773,5$  Pa dla wylotu ze ściany B oraz  $-2138,0$  Pa dla wylotu ze ściany C. Wartości różnic ciśnień  $\Delta p$  na tamach wahały się od kilkudziesięciu do ponad  $130$  Pa w typowych warunkach, a w skrajnych przypadkach przekraczały  $800$  Pa (rys. 83, rys. 84). W warunkach stabilnych (1 stycznia 2025 r., godziny 6:00–7:00) amplitudy zmian były minimalne i wynosiły:  $\sim 40$  Pa dla depresji w szybie wentylacyjnym,  $\sim 20$ – $40$  Pa dla potencjału ściany B oraz  $\sim 30$ – $60$  Pa dla grupowego prądu powietrza „świeżego” (rys. 87–89).

Podsumowując, wyniki Badania D jednoznacznie potwierdzają, że metoda oparta na równaniach (30) i (31) umożliwia wyznaczanie przybliżonych wartości potencjałów węzłowych w czasie rzeczywistym, ale także ich wizualizację w systemie Zefir, co znacząco zwiększa wartość diagnostyczną narzędzi wentylacyjnych kopalni. Rozwiązanie to stanowi krok w kierunku wdrożenia cyfrowych bliźniaków sieci wentylacyjnych, pozwalających na bieżące monitorowanie i prognozowanie zmian warunków przewietrzania.

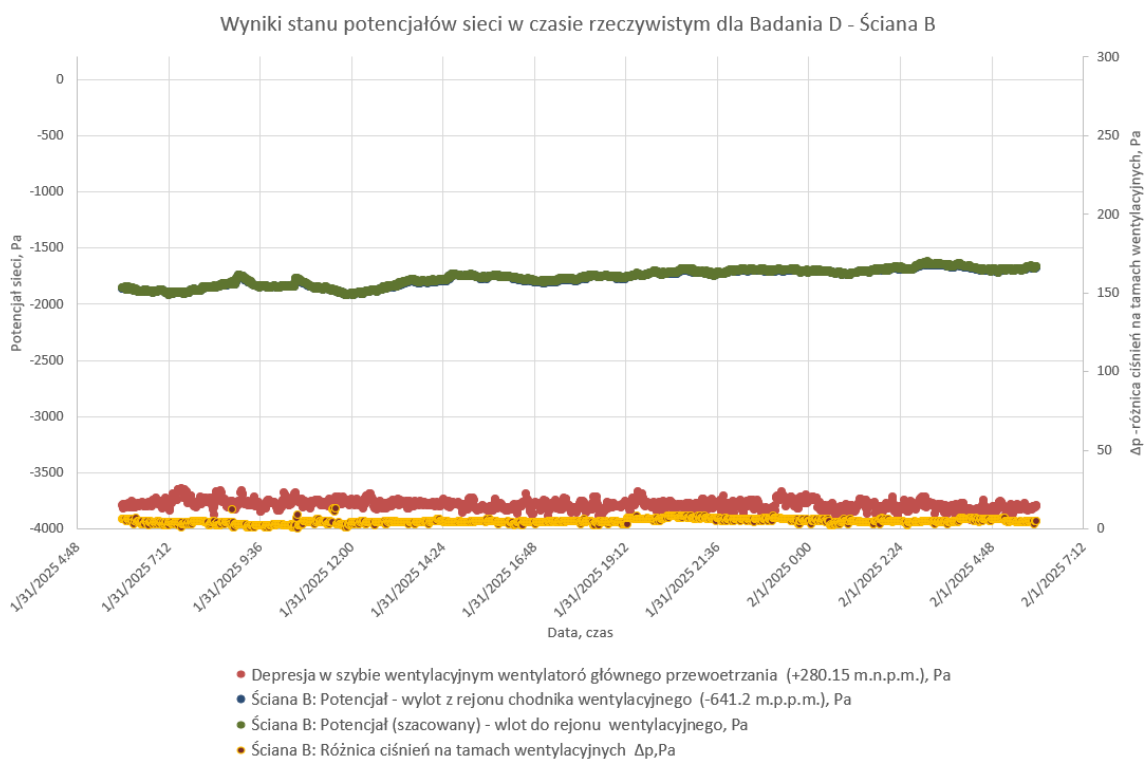


**Rys. 81** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D - Grupowe prądy powietrza

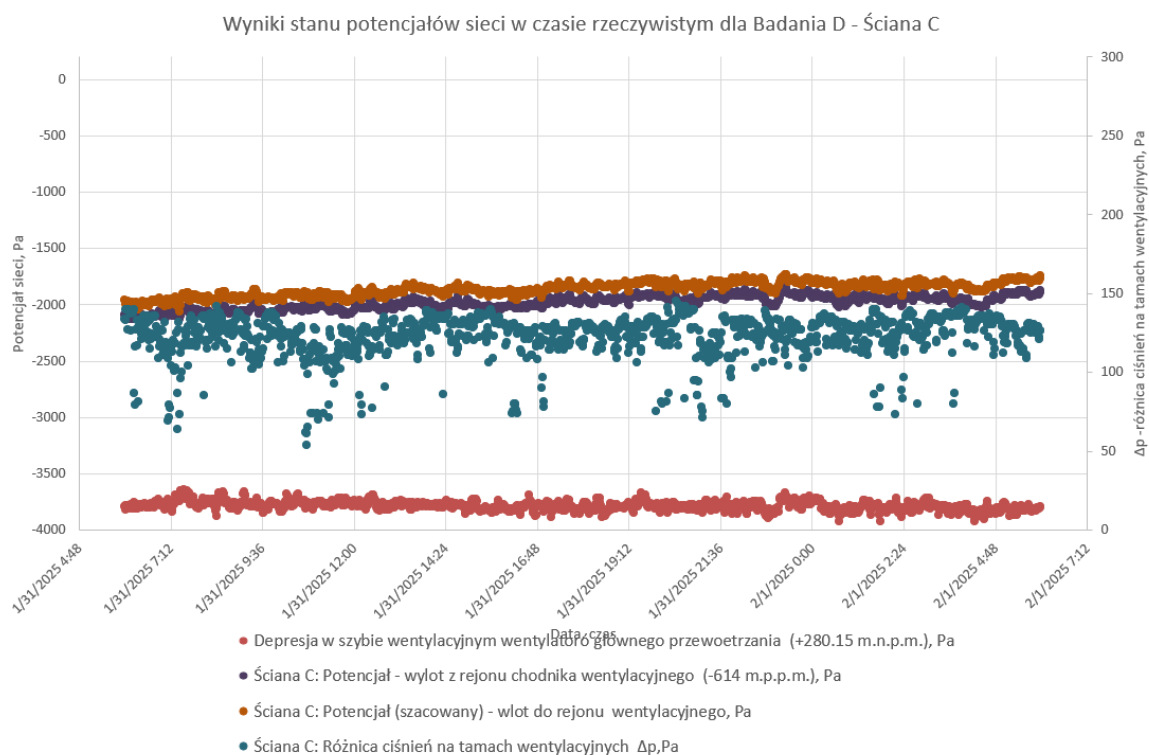




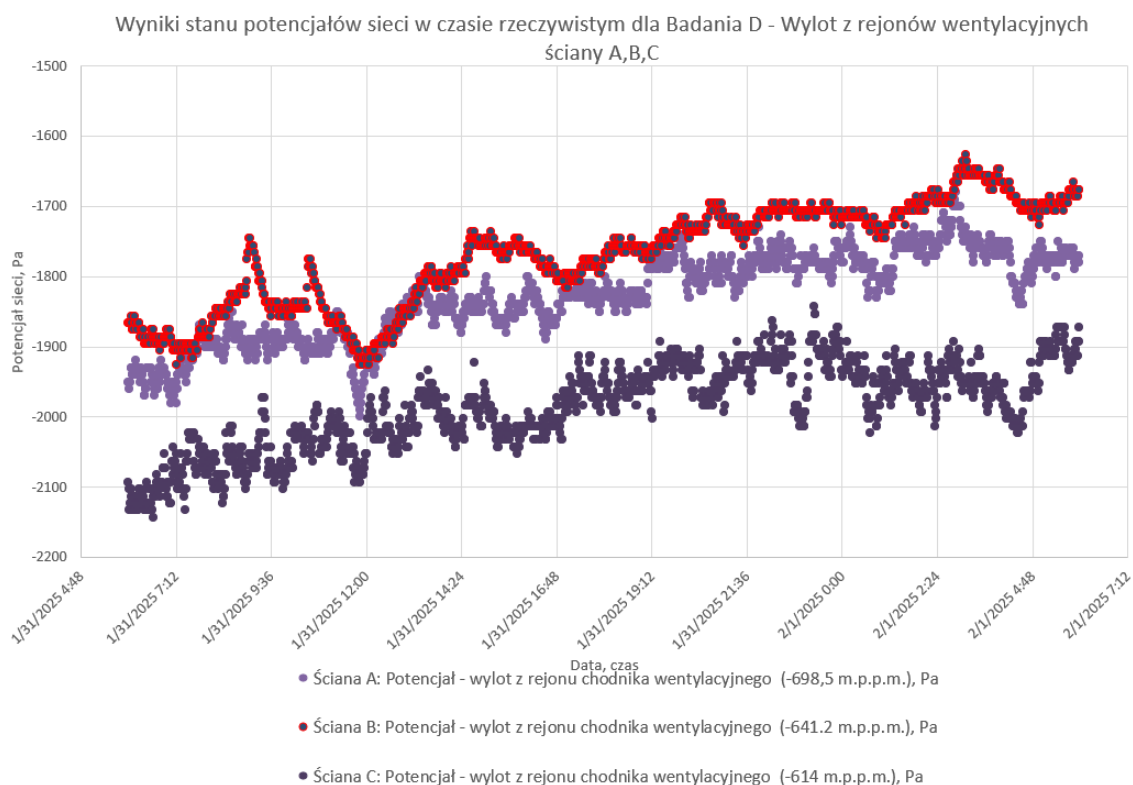
**Rys. 82** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Ściana A



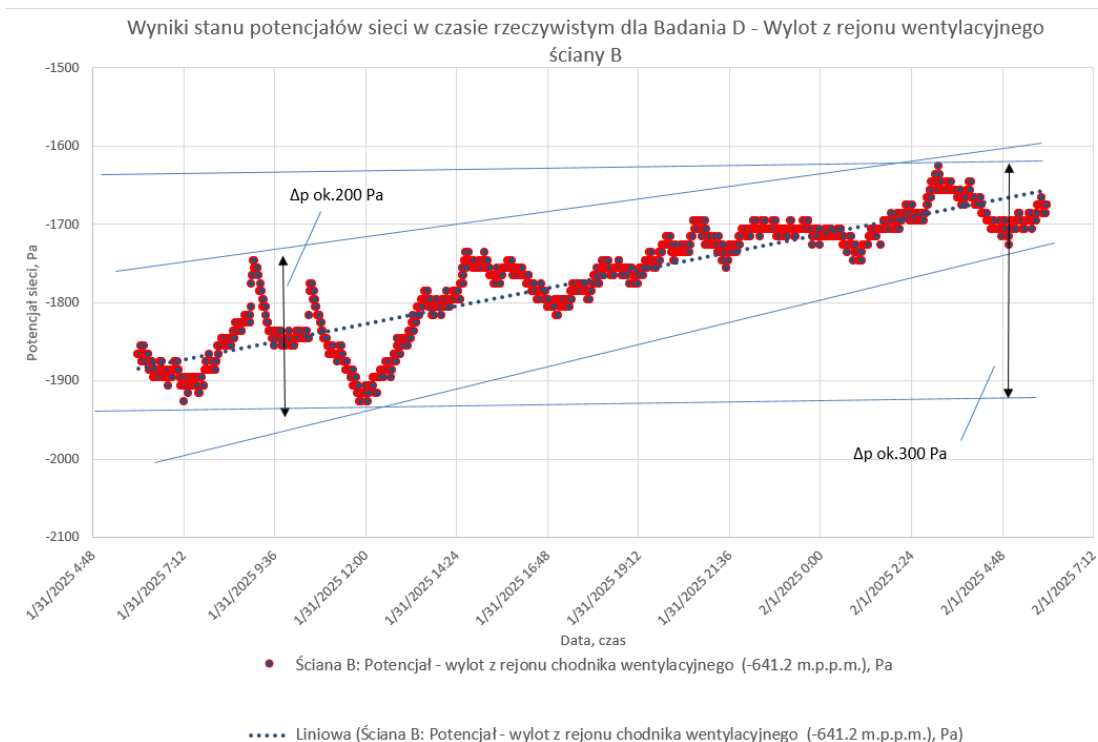
**Rys. 83** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Ściana B



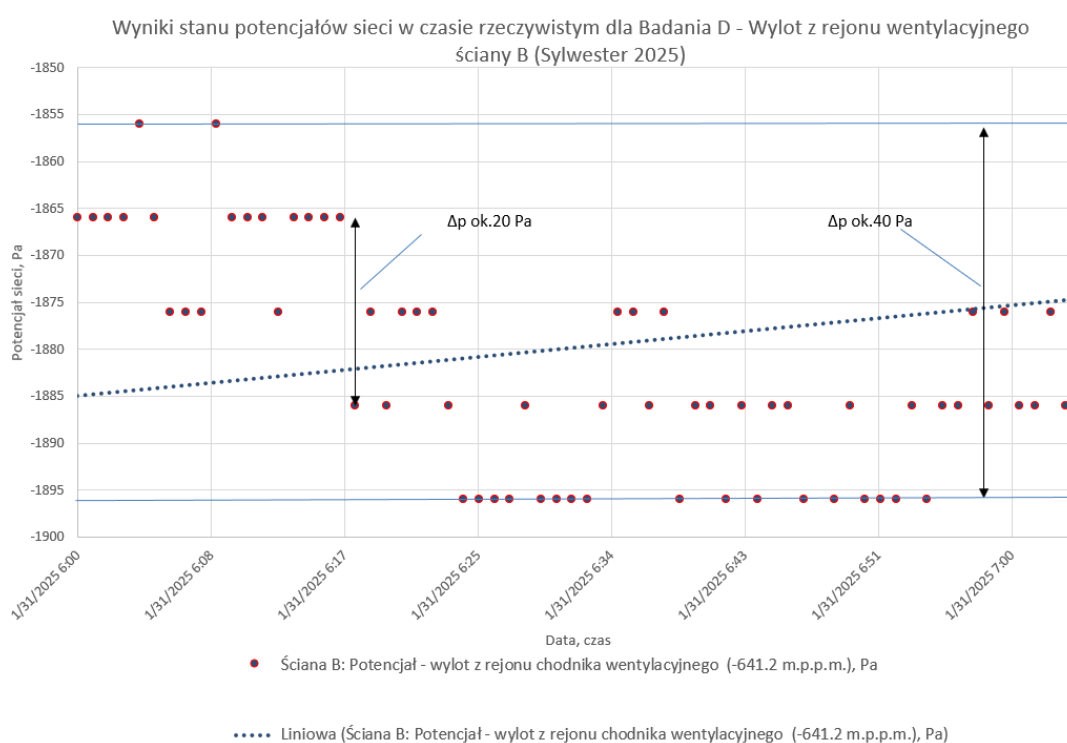
**Rys. 84** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Ściana C



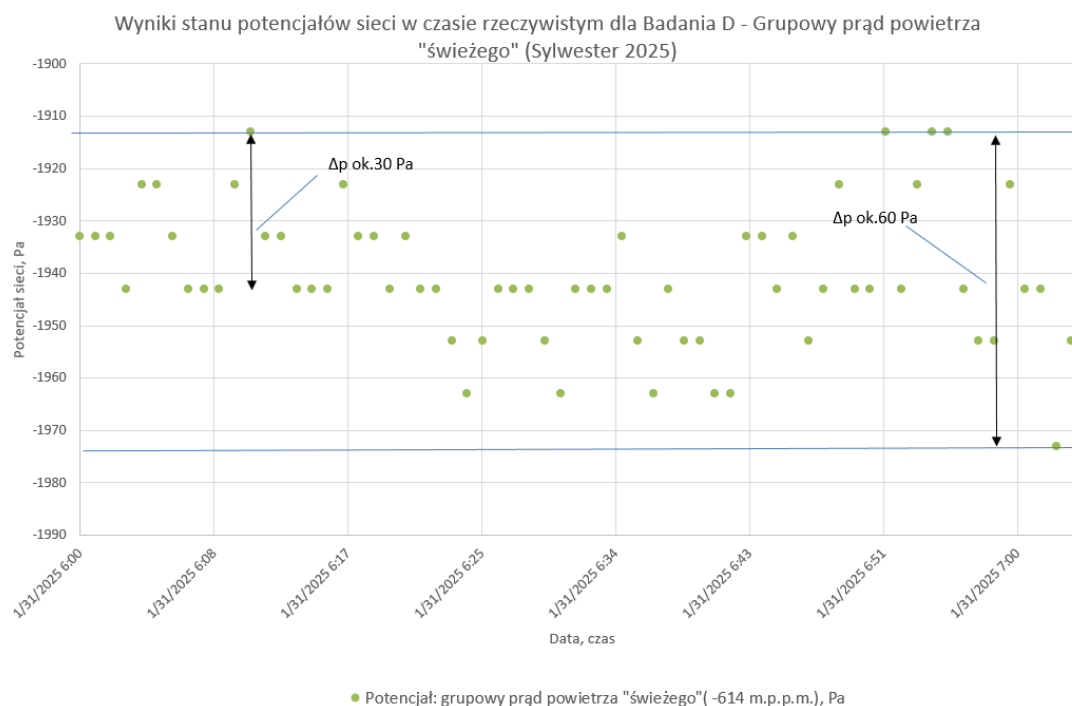
**Rys. 85** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Wylot z rejonów wentylacyjnych ściany: A, B, C



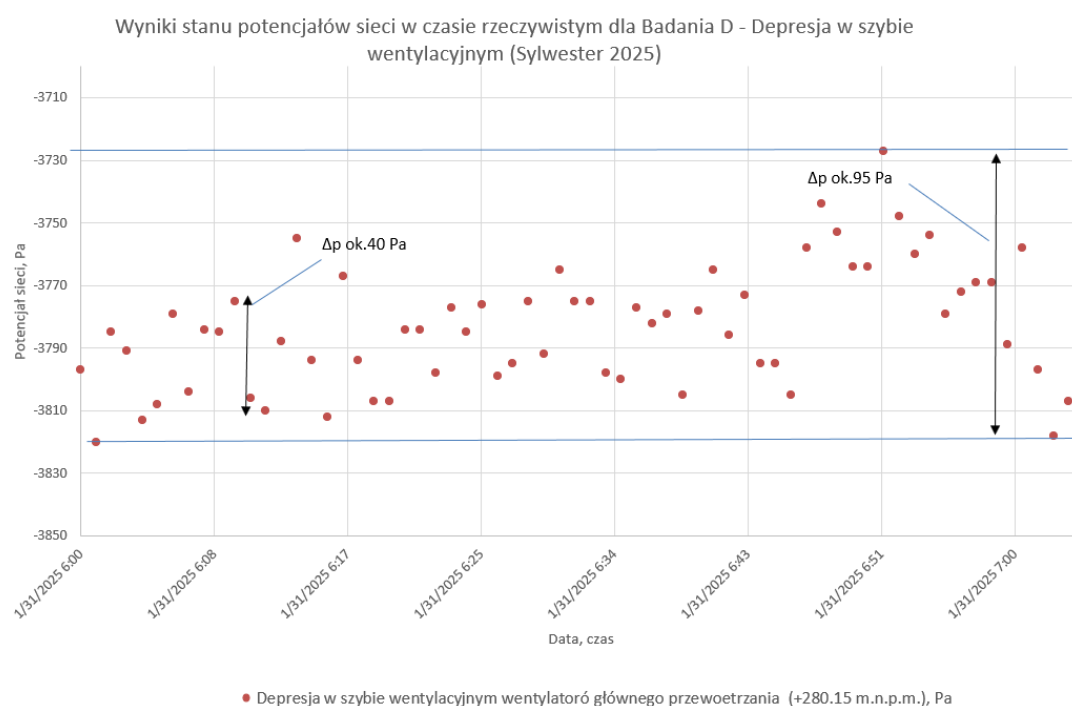
**Rys. 86** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym dla Badania D – Wylot z rejonu wentylacyjnego: Ściana A



**Rys. 87** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym dla Badania D – Wylot z rejonu wentylacyjnego: Ściana A (Sylwester 2025)



**Rys. 88** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym dla Badania D – Grupowy prąd powietrza „świeżego” (Sylwester 2025)



**Rys. 89** Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym dla Badania D – Depresja w szybie wentylacyjnym (Sylwester 2025)

**Tabela 17** Zbiorcze zestawienie wyników stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D

| Okres                    | Wartość | Powierzchnia                                       |                                                                 | Prąd grupowy                                                           | Ściana A                                                                        |                                                    |                                                              | Ściana B                                                                        |                                                    |                                                              | Ściana C                                                                     |                                                    |                                                              |
|--------------------------|---------|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                          |         | Barometr - powierzchnia<br>(+280.15 m n.p.m.), hPa | Depresja w szybie<br>wentylacyjnym WG (+280.15 m<br>n.p.m.), Pa | Potencjał: grupowy prąd<br>powietrza "świeżego" (-614 m<br>p.p.m.), Pa | Potencjał - wylot z rejonu<br>chodnika wentylacyjnego (-<br>698.5 m p.p.m.), Pa | Różnica ciśnień na tamach<br>wentylacyjnych Δp, Pa | Potencjał (szacowany) - wlot do<br>rejonu wentylacyjnego, Pa | Potencjał - wylot z rejonu<br>chodnika wentylacyjnego (-<br>641.2 m p.p.m.), Pa | Różnica ciśnień na tamach<br>wentylacyjnych Δp, Pa | Potencjał (szacowany) - wlot do<br>rejonu wentylacyjnego, Pa | Potencjał - wylot z rejonu<br>chodnika wentylacyjnego (-614<br>m p.p.m.), Pa | Różnica ciśnień na tamach<br>wentylacyjnych Δp, Pa | Potencjał (szacowany) - wlot do<br>rejonu wentylacyjnego, Pa |
| Styczeń 2025 r.          | Średnia | 983.3                                              | -3730.6                                                         | -1983.6                                                                | -1896.3                                                                         | 62.3                                               | -1834.0                                                      | -1773.5                                                                         | 6.1                                                | -1767.5                                                      | -2138.0                                                                      | 124.5                                              | -2013.5                                                      |
|                          | Mediana | 981.1                                              | -3731                                                           | -1983                                                                  | -1900                                                                           | 60                                                 | -1829                                                        | -1756                                                                           | 5                                                  | -1753                                                        | -2143                                                                        | 125                                                | -2017                                                        |
|                          | Min     | 963.2                                              | -4569                                                           | -2323                                                                  | -2220                                                                           | 20                                                 | -2159                                                        | -2166                                                                           | -6                                                 | -2163                                                        | -2473                                                                        | -378                                               | -2514                                                        |
|                          | Max     | 1006.4                                             | -3429                                                           | -1703                                                                  | -1630                                                                           | 101                                                | -1575                                                        | 254                                                                             | 39                                                 | 261                                                          | -1833                                                                        | 832                                                | -1292                                                        |
| 1.01.2025 r. (24h)       | Średnia | 984.0                                              | -3795.8                                                         | -1977.8                                                                | -1861.6                                                                         | 61.3                                               | -1800.3                                                      | -1771.7                                                                         | 13.1                                               | -1758.6                                                      | -2145.2                                                                      | 131.9                                              | -2013.3                                                      |
|                          | Mediana | 983.9                                              | -3796                                                           | -1973                                                                  | -1860                                                                           | 62                                                 | -1797                                                        | -1766                                                                           | 13                                                 | -1753                                                        | -2133                                                                        | 133                                                | -2001                                                        |
|                          | Min     | 976.4                                              | -3843                                                           | -2083                                                                  | -1980                                                                           | 27                                                 | -1921                                                        | -1896                                                                           | 10                                                 | -1883                                                        | -2253                                                                        | 96                                                 | -2125                                                        |
|                          | Max     | 989.6                                              | -3735                                                           | -1913                                                                  | -1790                                                                           | 64                                                 | -1726                                                        | -1696                                                                           | 17                                                 | -1683                                                        | -2083                                                                        | 137                                                | -1949                                                        |
| 1.01.2025 r. (6:00-7:00) | Średnia | 989.3                                              | -3798.6                                                         | -1935.5                                                                | -1830.3                                                                         | 61.8                                               | -1768.5                                                      | -1737.7                                                                         | 12.9                                               | -1724.8                                                      | -2105.5                                                                      | 133.4                                              | -1972.1                                                      |
|                          | Mediana | 989.4                                              | -3800                                                           | -1933                                                                  | -1830                                                                           | 62                                                 | -1768                                                        | -1736                                                                           | 13                                                 | -1723                                                        | -2103                                                                        | 134                                                | -1969                                                        |
|                          | Min     | 989.0                                              | -3831                                                           | -1953                                                                  | -1850                                                                           | 61                                                 | -1789                                                        | -1756                                                                           | 11                                                 | -1744                                                        | -2123                                                                        | 124                                                | -1993                                                        |
|                          | Max     | 989.5                                              | -3755                                                           | -1913                                                                  | -1810                                                                           | 63                                                 | -1748                                                        | -1706                                                                           | 13                                                 | -1693                                                        | -2083                                                                        | 135                                                | -1949                                                        |

### 4.3. Wnioski z porównania wyników badania C i D

Wyznaczona dynamika zmian podciśnienia (potencjałów) w sieci wentylacyjnej jest wartością bardzo istotną. Ma niewątpliwie wpływ na wartość wyznaczanych oporów bocznic w czasie badania sieci wentylacyjnej (zdjęcia potencjalnego kopalni).

Średnia wartość pulsacji, mierzonej w szybie wentylacyjnym wynosi 31,6 Pa (w czasookresie 15 minutowym). Wykonane dodatkowe badania sieci wentylacyjnej w okresie Sylwestra 2025 r., w czasie, gdy obłożenie prac na kopalni jest możliwie niewielkie, średnia wartość pulsacji była podobna.

Wyznaczona pulsacja zmniejsza się wraz z odległością od wentylatora głównego przewietrzania i maleje do zera na zrębie szybu wdechowego. Przykładowo analizując zmianę pulsacji dla przepływu powietrza od wlotu do szybu wdechowego, aż do szybu wentylacyjnego otrzymujemy wartości (przedział czasowy 15 minutowy – ściana A):

- zręb szybu wdechowego – 0 Pa;
- grupowy prąd powietrza świeżego – 17,5 Pa;
- wlot do rejonu wentylacyjnego ściany A – 19,5 Pa;
- wylot z rejonu wentylacyjnego ściany A – 20,5 Pa;
- szyb wentylacyjny, przed wlotem do kanału – 32,4 Pa.

Opracowana metoda badania stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym, jest kompromisem pomiędzy dokładnością, a praktycznością. Pozwala w oparciu o już stosowane typowe czujniki przeprowadzać automatyczne obliczenia sieci i ich bieżącą wizualizację.

Zabudowa dodatkowych czujników w grupowych prądach powietrza tylko zwiększa tą dokładność. W przypadku wystąpienia nagłego dodatkowego oporu w bocznicę wentylacyjnej (np. zawał wywołany tąpnięciem), można wstępnie szacować, czy wystąpił na drodze doprowadzenia powietrza do rejonu, czy na drodze odprowadzenia powietrza z rejonu wentylacyjnego.

Bardzo istotną korzyścią z wdrożenia automatycznego obliczenia potencjałów sieci wentylacyjnej, jest szybka ocena stopnia dokładności odwzorowania sieci wentylacyjnej w oprogramowaniu VentSim (w zakresie wartości potencjałów).

Dla wyznaczania wartości potencjałów, rekomenduje się wyznaczenie na podstawie 24 godzinnej obserwacji wskazań czujnika i zastosowanie obliczenia medianą (zamiast średniej).

## **5. Wyznaczenie współczynników oporu aerodynamicznego w typowych wyrobiskach górniczych**

### **5.1. Definicja problemu**

Głównym problemem w walidacji numerycznych modeli sieci wentylacyjnych jest dokładne wyznaczenie oporów aerodynamicznych wyrobisk górniczych, które wchodzą w skład sieci wentylacyjnej. [81]

W realiach polskich kopalń, typową metodą wyznaczania oporów realizowany jest poprzez wyznaczenie spadku naporu bocznicy wentylacyjnej, na podstawie określonych potencjałów w jej węzłach. [15,104]

Inną z metod jest wyznaczenie oporu bocznicy na podstawie znajomości przekroju poprzecznego i współczynnika oporu. [66]

Szczegółowo metody te są opisane w rozdziale 2.2, gdzie przedstawiono teorię rozplywu powietrza w bocznicach sieci wentylacyjnej.

Zarówno jedna jak i druga metoda posiada swoje zalety i wady. W przypadku metody pośredniej (barometrycznej) do najważniejszych zalet można zaliczyć: brak konieczności dokładnego określenia cech geometrycznych bocznicy (przekrój, współczynnik oporu, długość). Do wad można zaliczyć duże błędy, w przypadku wyrobisk z niewielkim spadkiem naporu. [56] Jak wykazano w pracy, stosunkowa wysoka pulsacja ciśnienia, przy przepływie turbulentnym, niedostateczna dokładność przyrządów pomiarowy, zmiany ciśnienia atmosferycznego w trakcie pomiarów i inne, powodują duże problemy z walidacją modelu numerycznego na podstawie wyników zdjęcia potencjalnego kopalni,

Rozwój oprogramowania do modelowania sieci wentylacyjnych (np. VentSim, Vuma3D i innych) oraz technologii skaningu laserowego, spowodował renesans wyznaczenia oporów bocznicy wentylacyjnych na podstawie znanej geometrii i współczynników oporu.

W Polsce już w latach 1969 opracowane były „Tymczasowe wytyczne ustalenia współczynników oporów i oporów 100m odcinków wyrobisk górniczych w kopalniach węgla.” MGIEDG [133]. Uzupełnione następnie w normie branżowej (BN-75 0422-02) „Wyrobiska korytarzowe w obudowie odrzwiami z łuków korytarzowych”. [132]

W literaturze znajdujemy tablice [13, 40, 66, 81, 111, 118] pozwalające na obliczenie oporów na podstawie współczynnika oporu wyrobiska, bezwymiarowego współczynnika oporu wyrobiska lub bezpośrednio z odczytując opór 100-metrowego odcinka wyrobiska

$R_{100}$  (uzależnione od typu wyrobiska, obudowy lub pola przekroju). Autorzy jednak często zwracają uwagę na konieczność wykonania pomiarów dla poszczególnych typów wyrobisk w danej kopalni [66].

W przedstawionych powyżej źródłach, brak było wyznaczonych średnich współczynników oporu dla czterech głównych typów wyrobisk wyznaczonych bezpośrednio dla kopalń JSW S.A. (szyby, wyrobiska ŁP bez odstawy, wyrobiska ŁP z odstawą, wyrobiska wybierkowe) rozumiane jako średni (najczęściej występujący) dla danego typu wyrobiska.

Aktualnie w kopalniach JSW S.A. stosowanych jest ok. 50 typów obudowy wyrobisk korytarzowych, co przedstawiono w tablicy 18.

**Tabela 18** Typy obudowy wyrobisk korytarzowych stosowanej w JSW S.A.

| Rozmiar | Typ obudowy       | Procentowy udział |
|---------|-------------------|-------------------|
| 6       | ŁP-6/V29/3        | 0,1%              |
| 7       | ŁP7/V32/3         | 0,6%              |
|         | ŁP-7/V32/4        |                   |
| 8       | ŁP-8/V32/3        | 4,9%              |
|         | ŁP-8/V32/4        |                   |
|         | ŁPP 8/V32/3       |                   |
| 9       | ŁP-9/V32/3        | 28,4%             |
|         | ŁP-9/V32/4        |                   |
|         | ŁP-9/V36/4 A      |                   |
|         | ŁPCBor 9/V32      |                   |
| 10      | ŁP-10/V32/3       | 28,4%             |
|         | ŁP-10/V32/4       |                   |
|         | ŁP-10/V36/4       |                   |
|         | ŁPCBor 10/V32     |                   |
|         | ŁPCBor 10/V36     |                   |
|         | ŁPP 10/V32/4      |                   |
| 11      | ŁPP 10/V32/3      | 8,7%              |
|         | ŁP11/V32/4        |                   |
|         | ŁP-11/V36/4       |                   |
| 12      | ŁP12/V32/4        | 38,6%             |
|         | ŁP-12/V36/4       |                   |
|         | ŁPCBor 12/V32     |                   |
|         | ŁPCBor 12/V36     |                   |
|         | ŁPOCW 12/V32      |                   |
| 14      | ŁP12P/32P/V32/5   | 4,6%              |
|         | ŁP-14/V32/4       |                   |
|         | ŁP-14/V36/4       |                   |
|         | ŁPCBor 14/V32     |                   |
| 15      | ŁPCBor 14/V36     | 0,2%              |
| 16      | ŁP-15/V36/4       | 0,6%              |
| Inne    | ŁP-16/V36/4       | 8,0%              |
|         | ŁPrw 34/V36       |                   |
|         | ŁPrPJ 6,4/4,0 V36 |                   |
|         | ŁPrPJ 6,4/3,4 V32 |                   |
|         | ŁPrPJ 6,2/3,0 V32 |                   |
|         | ŁPrPJ 6,2/3,6 V32 |                   |
|         | ŁPrPJ 7,0/4,0 V32 |                   |
|         | ŁPrPJ 7,0/3,2 V32 |                   |
|         | ŁPrPJ 6,6/3,0 V36 |                   |
|         | ŁPrPJ 7,0/3,4 V32 |                   |
|         | ŁPrPJ 7,0/3,4 V36 |                   |



|                     |      |
|---------------------|------|
| ŁPrPJ 7,4/3,4 V36   |      |
| ŁPrPJ 8,6/4,0 V36   |      |
| ŁPrPJ 7,4/3,0 V36   |      |
| ŁPrPJ 7,8/4,0 V32   |      |
| ŁPSpA/V32/4/7,2x3,1 |      |
| ŁPSzm/V36/4/6,4x4,1 |      |
| ŁPSzm/V36/4/6,7x4,4 |      |
| ŁPSpN-V32/6,85x4,1  |      |
| <b>SUMA:</b>        | 100% |

W każdym z wyrobisk zabudowane są instalacje (rurociągi, maszyny i urządzenia, zapory, tamy wentylacyjne, itp.), prowadzone są roboty górnicze. Dodatkowo na każde wyrobisko działa ciśnienie górotworu powodując jego deformacje w czasie lub w wyniku prowadzonych robót dochodzi do zmiany przekrojów poprzecznych (spadający urobek z przenośników taśmowych lub powstania rozlewisk wody – zamulenia).

Zastosowane początkowo współczynniki oporu dla wyrobisk korytarzowych, generowały duże niedoszacowania spadków naporu, a tym samym nie odpowiedni punkt pracy wentylatora głównego przewietrzania kopalni. Dobór odpowiedniego współczynnika również powodował problemy, ponieważ w różnych krajach stosuje się różne oznaczenia ( $\alpha$ ,  $k$ ,  $FF$ ). W trakcie budowania modeli sieci wentylacyjnych w JSW S.A. w oprogramowaniu VentSim brak było wytycznych odnoszących się do polskich kopalń węgla kamiennego.

W związku z powyższym, zwrócono uwagę na potrzebę opracowania nowych kryteriów wstępnej predykcji oporów sieci wentylacyjnej wraz z nową procedurę budowania modeli sieci wentylacyjnych i ich walidacji.

Nowa procedura powinna łączyć najlepsze cechy znanych metod oraz uwzględniać rozwój nowych technologii. Nową, kompletną procedurę budowy i walidacji modelu sieci wentylacyjnych kopalń zaproponowano w dalszej części pracy.

Z powodu bardzo dużej zmienności przekrojów poprzecznych wyrobiska na długości oraz istnienie wyposażenia zaproponowano nowy podział klasyfikacji typów wyrobisk na: szyby, wyrobiska wentylacyjne w obudowie ŁP, wyrobiska w obudowie ŁP i zabudowaną odstawą, ściany (wyrobiska wybierkowe). Klasyfikacja znacząco upraszcza predykcje współczynników oporu.

Dla wyznaczenia współczynników oporu w typowych wyrobiskach górniczych w celu predykcji oporów aerodynamicznych w sieci zaplanowano wykonanie dwóch badań.

- Badanie E – Metoda statystyczna wyznaczenia współczynników oporu dla typowych wyrobisk w JSW S.A. na podstawie badań sieci wentylacyjnych.

- Badanie F – Metoda odwzorowania sieci wentylacyjnej kopalni w oprogramowaniu VentSim z wykorzystaniem wyznaczonych współczynników oporu w badaniu E.

## 5.2. Metodyka badawcza

### 5.2.1. Badanie E – Metoda statystyczna wyznaczenia współczynników oporu dla typowych wyrobisk w JSW S.A. na podstawie badań sieci wentylacyjnych .

Badania przeprowadzono we wszystkich wyrobiskach i kopalniach JSW S.A. przez zewnętrzne jednostki w ramach prac zleconych w latach ubiegłych. Na podstawie wyników obliczeń poszczególnych sieci stworzono bazę danych bocznic wentylacyjnych z podziałem na następujące kategorie:

- szyby;
- wyrobiska w obudowie ŁP bez odstawy;
- wyrobiska ŁP z odstawą;
- wyrobiska ścianowe.

Z bazy danych wykluczono bocznicę, w których:

- zainstalowane są tamy wentylacyjne lub wentylatory;
- których długość bocznicy jest krótsza niż 100 metrów.

W celu wyznaczenia współczynnika oporu (Friction Factor), wykonano odpowiednie przekształcenia wzoru na spadek naporu powietrza J.J. Atkinsona. Uwzględniono przy tym zmiany gęstości powietrza wywołane temperaturą oraz głębokością wyrobisk [66]

$$\Delta p = k_{1.2} \frac{L O_z \dot{V}^2 \rho}{A^3 \cdot 1.2} \quad (32)$$

$$k_{1.2}(\text{FF}) = \frac{\Delta p A^3 \cdot 1.2}{L O_z \dot{V}^2 \rho} \quad (33)$$

gdzie:

$\Delta p$  - spadek naporu, Pa;

$k_{1.2}$  - współczynnik oporu Atkinsona, [kg/m<sup>3</sup>];

$L$  - długość wyrobiska, [m];

$\dot{V}$  – wydatek powietrza,  $\frac{\text{m}^3}{\text{s}}$

$O_z$  – obwód wyrobiska, m

$\rho$  - gęstość powietrza, kg/m<sup>3</sup>;

$A$  -przekrój poprzeczny, m<sup>2</sup>;

Dodatkowo, w celu badania charakteru przepływu powietrza, na podstawie dostępnych danych, wykonano obliczenia liczby Reynoldsa przy upraszczającym założeniu, że temperatura powietrza wynosi 25°C (Re<sub>25</sub>).

$$Re = \frac{\bar{v}D}{\nu} \quad (34)$$

Gdzie:

$\bar{v}$  – średnia prędkość przepływu,  $\frac{m}{s}$

$D$  – średnica hydrauliczna przewodu, m

$\nu$  – lepkość kinematyczna płynu,  $\frac{m^2}{s}$

Następnie wyznaczono dla każdego typu wyrobisk bezwymiarowy współczynnik oporu ( $\lambda$ ), z wykorzystaniem przybliżenia (Romeo i inni) równania Colebrooka-White'a, które ma postać: [12]

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} \approx -2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.7065 \cdot D} - \frac{5.0272}{Re} \cdot \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{3.827 \cdot D} - \frac{4.567}{Re} \cdot \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{7.7918 \cdot D} \right)^{0.9924} \cdot \left( \frac{5.3326}{208.815 + Re} \right)^{0.9345} \right) \right) \quad (35)$$

Gdzie:

$\varepsilon$  – chropowatość bezwzględna, m

$D$  – średnica hydrauliczna przewodu, m

$\lambda$  – bezwymiarowy współczynnik oporu, –

W celu wykonania obliczeń statystycznych dla czterech typów wyrobisk górniczych, opracowano algorytm w języku Python.

Algorytm wykorzystuje następujące biblioteki:

- pandas – do obsługi danych w formacie tabelarycznym,
- numpy – do operacji numerycznych,
- scipy.stats – do analizy statystycznej (m.in. testy normalności),
- matplotlib.pyplot i seaborn – do wizualizacji danych,
- sklearn.linear\_model.LinearRegression – do regresji liniowej,

- sklearn.preprocessing.StandardScaler – do standaryzacji danych.

Algorytm wczytuje dane z pliku, jak to przedstawiono w tabelach 19-22.

**Tabela 19** Szyby – fragment danych wejściowych w Badaniu E

| <b>D</b>     | <b>R100</b>       | <b>A</b>       | <b><math>\rho</math></b> | <b>v</b> | <b>Q</b>          | <b><math>\Delta P</math></b> | <b>L</b> | <b>Oz</b> | <b><math>k_{1,2}</math></b> | <b>f</b> | <b><math>\lambda</math></b> |
|--------------|-------------------|----------------|--------------------------|----------|-------------------|------------------------------|----------|-----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|
| <b>m</b>     | kg/m <sup>7</sup> | m <sup>2</sup> | kg/m <sup>3</sup>        | m/s      | m <sup>3</sup> /s | Pa                           | m        | m         | kg/m <sup>3</sup>           | -        | -                           |
| <b>6.43</b>  | 0.002632          | 32.5           | 1.25                     | 5.75     | 186.9             | 91.9                         | 100      | 20.2      | 0.0429                      | 0.0716   | 0.2981                      |
| <b>5.07</b>  | 0.008355          | 20.2           | 1.26                     | 3.55     | 71.7              | 43.0                         | 100      | 15.9      | 0.0412                      | 0.0686   | 0.2882                      |
| <b>7.11</b>  | 0.001061          | 39.7           | 1.2                      | 9.38     | 372.3             | 147.0                        | 100      | 22.3      | 0.0297                      | 0.0495   | 0.1982                      |
| <b>7.20</b>  | 0.000922          | 40.7           | 1.28                     | 6.22     | 253.3             | 59.2                         | 100      | 22.6      | 0.0258                      | 0.0429   | 0.1832                      |
| <b>(...)</b> |                   |                |                          |          |                   |                              |          |           |                             |          |                             |
| <b>8.00</b>  | 0.000528          | 50.2           | 1.17                     | 3.96     | 198.9             | 20.9                         | 100      | 25.1      | 0.0273                      | 0.0454   | 0.1772                      |

Gdzie:

D - średnica hydrauliczna równoważna wyrobiska, m,

R<sub>100</sub> - jednostkowy opór stumetrowego odcinka wyrobiska, kg/m<sup>7</sup>

A - powierzchnia przekroju poprzecznego, m<sup>2</sup>,

$\rho$  – gęstość powietrza, (kg/m<sup>3</sup>),

v – średnia prędkość przepływu powietrza, m/s,

Q – przepływ, m<sup>3</sup>/s,

$\Delta P$  - spadek naporu, Pa,

Oz - obwód przekroju wyrobiska, m,

$k_{1,2} = FF = \alpha$  - współczynnik oporu J.J. Atkinsonn'a, kg/m<sup>3</sup>,

$\lambda$  - bezwymiarowy współczynnik oporu Darcy'ego.,

**Tabela 20** Wyrobiska w obudowie ŁP - bez odstawy– fragment danych wejściowych w Badaniu E

| <b>D</b>     | <b>R100</b>       | <b>A</b>       | <b><math>\rho</math></b> | <b>v</b> | <b>Q</b>          | <b><math>\Delta P</math></b> | <b>L</b> | <b>Oz</b> | <b><math>k_{1,2}</math></b> | <b>f</b> | <b><math>\lambda</math></b> |
|--------------|-------------------|----------------|--------------------------|----------|-------------------|------------------------------|----------|-----------|-----------------------------|----------|-----------------------------|
| <b>m</b>     | kg/m <sup>7</sup> | m <sup>2</sup> | kg/m <sup>3</sup>        | m/s      | m <sup>3</sup> /s | Pa                           | m        | m         | kg/m <sup>3</sup>           | -        | -                           |
| <b>3.51</b>  | 0.171777          | 13.3           | 1.23                     | 0.53     | 7.0               | 8.4                          | 100      | 15.2      | 0.2599                      | 0.43314  | 1.77587                     |
| <b>3.60</b>  | 0.130085          | 14             | 1.25                     | 0.40     | 5.7               | 4.2                          | 100      | 15.6      | 0.2202                      | 0.36692  | 1.52885                     |
| <b>3.52</b>  | 0.136416          | 13.4           | 1.24                     | 0.42     | 5.7               | 4.4                          | 100      | 15.2      | 0.2086                      | 0.34765  | 1.43696                     |
| <b>3.33</b>  | 0.004786          | 12             | 1.22                     | 4.25     | 51.0              | 12.4                         | 100      | 14.4      | 0.0056                      | 0.00941  | 0.03826                     |
| <b>(...)</b> |                   |                |                          |          |                   |                              |          |           |                             |          |                             |
| <b>3.40</b>  | 0.001669          | 12.5           | 1.22                     | 4.08     | 51.0              | 4.3                          | 100      | 14.7      | 0.0022                      | 0.00363  | 0.01477                     |

**Tabela 21** Wyrobiska w obudowie ŁP – z odstawą– fragment danych wejściowych w Badaniu E

| <b>D</b>     | <b>R100</b>       | <b>A</b>       | <b>ρ</b>          | <b>v</b> | <b>Q</b>          | <b>ΔP</b> | <b>L</b> | <b>Oz</b> | <b>k<sub>1.2</sub></b> | <b>f</b> | <b>λ</b> |
|--------------|-------------------|----------------|-------------------|----------|-------------------|-----------|----------|-----------|------------------------|----------|----------|
| <b>m</b>     | kg/m <sup>7</sup> | m <sup>2</sup> | kg/m <sup>3</sup> | m/s      | m <sup>3</sup> /s | Pa        | m        | m         | kg/m <sup>3</sup>      | -        | -        |
| <b>4.49</b>  | 0.038372          | 21.8           | 1.25              | 2.28     | 49.8              | 95.16     | 100      | 19.42     | 0.1965                 | 0.3275   | 1.3645   |
| <b>4.06</b>  | 0.03846           | 17.8           | 1.26              | 1.31     | 23.4              | 21.06     | 100      | 17.55     | 0.1177                 | 0.1962   | 0.8239   |
| <b>4.49</b>  | 0.019219          | 21.8           | 1.26              | 1.45     | 31.7              | 19.31     | 100      | 19.42     | 0.0976                 | 0.1627   | 0.6834   |
| <b>3.40</b>  | 0.0596            | 12.5           | 1.28              | 1.74     | 21.7              | 28.07     | 100      | 14.71     | 0.0742                 | 0.1237   | 0.5276   |
| <b>(...)</b> |                   |                |                   |          |                   |           |          |           |                        |          |          |
| <b>4.19</b>  | 0.002391          | 19             | 1.28              | 1.52     | 28.8              | 1.98      | 100      | 18.13     | 0.0085                 | 0.0141   | 0.0603   |

**Tabela 22** Ściany (wyrobiska wybierkowe) – fragment danych wejściowych w Badaniu E

| <b>D</b>     | <b>R100</b>       | <b>A</b>       | <b>ρ</b>          | <b>v</b> | <b>Q</b>          | <b>ΔP</b> | <b>L</b> | <b>Oz</b> | <b>k<sub>1.2</sub></b> | <b>f</b> | <b>λ</b> |
|--------------|-------------------|----------------|-------------------|----------|-------------------|-----------|----------|-----------|------------------------|----------|----------|
| <b>m</b>     | kg/m <sup>7</sup> | m <sup>2</sup> | kg/m <sup>3</sup> | m/s      | m <sup>3</sup> /s | Pa        | m        | m         | kg/m <sup>3</sup>      | -        | -        |
| <b>3.60</b>  | 0.067119          | 14             | 1.2               | 0.38     | 5.3               | 1.91      | 100      | 15.57     | 0.1183                 | 0.1972   | 0.7888   |
| <b>3.60</b>  | 0.055326          | 14             | 1.2               | 1.32     | 18.5              | 18.87     | 100      | 15.57     | 0.0975                 | 0.1626   | 0.6502   |
| <b>3.58</b>  | 0.050872          | 13.9           | 1.2               | 1.41     | 19.6              | 19.50     | 100      | 15.51     | 0.0881                 | 0.1468   | 0.5873   |
| <b>3.60</b>  | 0.046615          | 14             | 1.2               | 2.11     | 29.5              | 40.62     | 100      | 15.57     | 0.0822                 | 0.1370   | 0.5479   |
| <b>(...)</b> |                   |                |                   |          |                   |           |          |           |                        |          |          |
| <b>2.72</b>  | 0.099316          | 8              | 1.24              | 1.58     | 12.6              | 15.77     | 100      | 11.77     | 0.0418                 | 0.0697   | 0.2881   |

Następnie, wykonywane są obliczenia statystyczne. Dla każdej kolumny obliczane są:

- Odchylenie standardowe (std ()),
- Średnia (mean ()),
- Mediana (median ()),
- Moda (mode ().iloc [0]),
- Minimum i maksimum (min (), max ()),
- Zakres wartości (max () – min ()),
- Wariancja (var ()),
- Miara asymetrii (skew()).

Dla każdej zmiennej wykonywany jest test normalności `stats.normaltest()`, który sprawdza, czy dane mają rozkład normalny.

Wyniki obliczeń są wizualizowane, dla każdej zmiennej:

- Tworzony jest boxplot (wykres pudełkowy) za pomocą `seaborn.boxplot()`, który pokazuje rozkład danych i wartości odstające.
- Tworzony jest histogram z estymacją gęstości (`sns.histplot(kde=True)`) dla wizualizacji rozkładu danych.
- W przypadku zmiennej *k* dodatkowo dopasowywany jest rozkład normalny `norm.fit()` i na histogramie dodawana jest jego krzywa.

Następnie obliczana jest macierz korelacji (`df.corr()`), która pokazuje, jak silnie zmienne są ze sobą powiązane.

Wyniki analizy zapisane są do plik jpg oraz txt.

**Tabela 23** Zestawienie ilości wyrobisk zakwalifikowanych do badania statystycznego w Badaniu E

| Typ wyrobiska                         | Ilość bocznic<br>zakwalifikowanych do badania |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Szyby                                 | 46                                            |
| Wyrobiska w obudowie ŁP - bez odstawy | 515                                           |
| Wyrobiska ŁP z odstawą                | 49                                            |
| Wyrobiska ścianowe (wybierkowe)       | 18                                            |

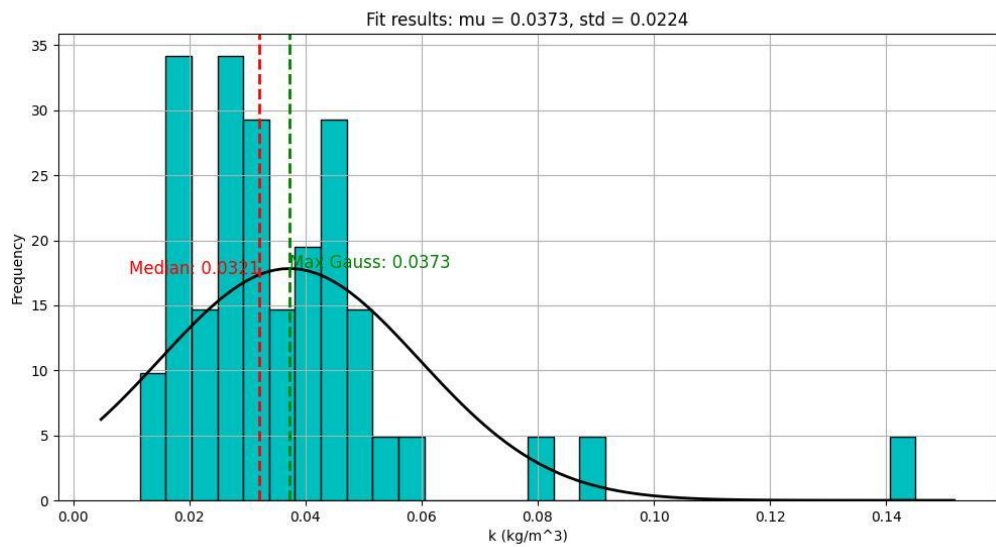
### 5.2.2. Analiza wyników - Badanie E

Analiza wyników Badania E dla szybów (tab. 24) wskazuje na dużą zmienność parametrów aerodynamicznych, co znajduje potwierdzenie w rozkładach statystycznych przedstawionych na rys. 90–99. Wartość współczynnika oporu  $k_{1,2}$  mieści się w przedziale od 0,011 do 0,145 kg/m<sup>3</sup>, przy średniej 0,0321 kg/m<sup>3</sup> (rys. 90), jednak rozkład jest asymetryczny i wykazuje obecność wartości odstających, co potwierdza wysoka miara skośności (2,81). Powierzchnia przekroju szybów A kształtuje się w granicach 20,2–63,6 m<sup>2</sup>, przy średniej 39,3 m<sup>2</sup> (rys. 91), natomiast średnica hydrauliczna D wynosi średnio 7,02 m, przy zakresie 5,07–9,0 m (rys. 92). Różnice ciśnień  $\Delta p$  wykazują znaczne wahania (od 6 do 163 Pa), co dobrze obrazuje histogram na rys. 93, natomiast natężenie przepływu powietrza *Q* osiąga wartości od 71,7 do 404 m<sup>3</sup>/s, ze średnią blisko 185 m<sup>3</sup>/s (rys. 94).

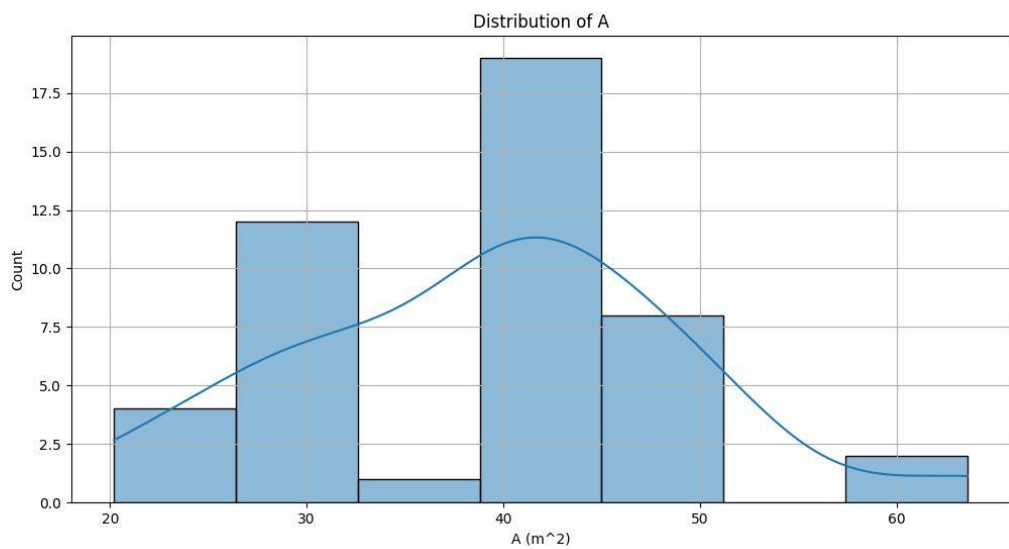
Dalsze analizy wskazują, że opór  $R_{100}$ , charakteryzuje się wyraźnie skośnym rozkładem i dużym zakresem (rys. 95), co odzwierciedla różnorodność warunków eksploatacyjnych. Prędkość przepływu  $v$  w szybach osiągała wartości od 2,0 do ponad 10 m/s, przy średniej 4,7 m/s (rys. 96), a gęstość powietrza  $\rho$  oscylowała wokół wartości 1,22 kg/m<sup>3</sup>, co odpowiada typowym warunkom termodynamicznym (rys. 97). Wysokie wartości liczby Reynoldsa  $Re_{25}$  (średnia  $2,95 \cdot 10^6$ , rys. 98) potwierdzają w pełni turbulentny charakter przepływu powietrza, co uzasadnia stosowanie wzorów Atkinsona i Darcy'ego–Weisbacha do wyznaczania strat ciśnienia. Rozkład wartości  $e$  (rys. 99), obrazujący zmienność geometrii przekrojów, wskazuje na średnią 2,45 m i medianę 2,16 m, co potwierdza znaczną różnorodność rzeczywistych warunków szybowych (wyposażenia).

**Tabela 24** Wyniki analizy statystycznej dla szybów w Badaniu E

| Dane       | J.m.               | Odchyl.<br>stand. | Wartości<br>średnie | Wartości<br>mediany | Wartości<br>moda | Wartości<br>mini. | Wartości<br>maks. | Zakres<br>wartości | Wariancja<br>danych | Miara<br>asymetrii<br>danych |
|------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| D          | m                  | 0.906242          | 7.020736            | 7.138306            | 6.434382         | 5.07272           | 9.001062          | 3.928342           | 0.821274            | -0.1997                      |
| $R_{100}$  | kg/m <sup>^7</sup> | 0.001801          | 0.001851            | 0.001176            | 0.000304         | 0.000304          | 0.008355          | 0.008051           | 3.24E-06            | 2.180314                     |
| A          | m <sup>2</sup>     | 9.902955          | 39.32391            | 40                  | 32.5             | 20.2              | 63.6              | 43.4               | 98.06853            | 0.168239                     |
| $\rho$     | m <sup>2</sup>     | 0.042015          | 1.222391            | 1.22                | 1.21             | 1.14              | 1.31              | 0.17               | 0.001765            | -0.07189                     |
| $v$        | m/s                | 1.8154            | 5.108257            | 4.705912            | 2.01626          | 2.01626           | 10.17632          | 8.160062           | 3.295677            | 0.657223                     |
| Q          | m <sup>3</sup> /s  | 89.05678          | 201.2001            | 184.9               | 71.7             | 71.7              | 404               | 332.3              | 7931.109            | 0.696195                     |
| $\Delta P$ | Pa                 | 42.34416          | 57.97794            | 47.36186            | 6.023733         | 6.023733          | 163.2824          | 157.2587           | 1793.028            | 1.170469                     |
| L          | m                  | 0                 | 100                 | 100                 | 100              | 100               | 100               | 0                  | 0                   | 0                            |
| Oz         | m                  | 2.845599          | 22.04511            | 22.41428            | 20.20396         | 15.92834          | 28.26333          | 12.33499           | 8.097436            | -0.1997                      |
| $k_{1,2}$  | kg/m <sup>3</sup>  | 0.022622          | 0.037264            | 0.032127            | 0.011484         | 0.011484          | 0.145051          | 0.133567           | 0.000512            | 2.812259                     |

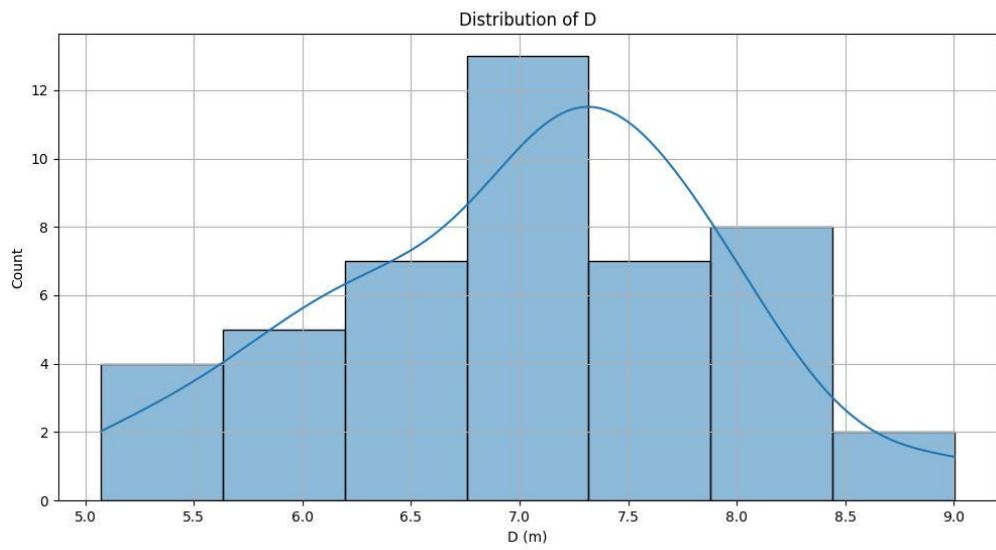


**Rys. 90** Histogram wartości  $k \text{ (kg/m}^3\text{)}$  z analizą statystyczną dla szybów w Badaniu E

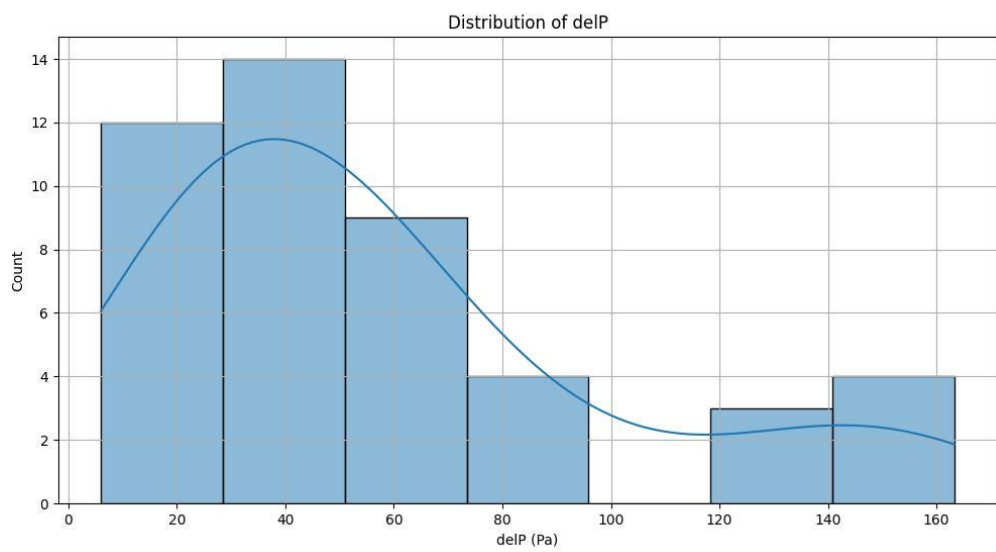


**Rys. 91** Rozkład zmiennej  $A \text{ (m}^2\text{)}$  dla szybów w Badaniu E

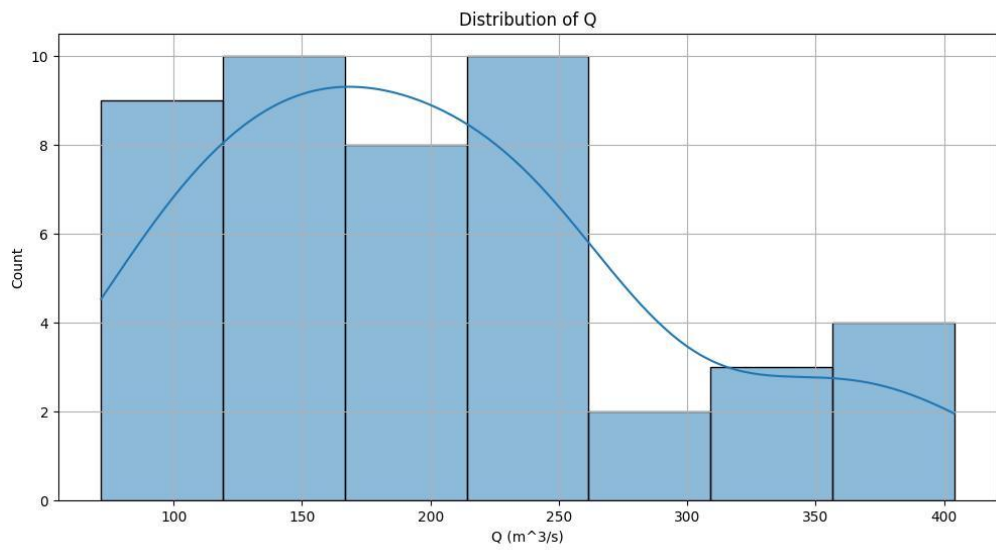




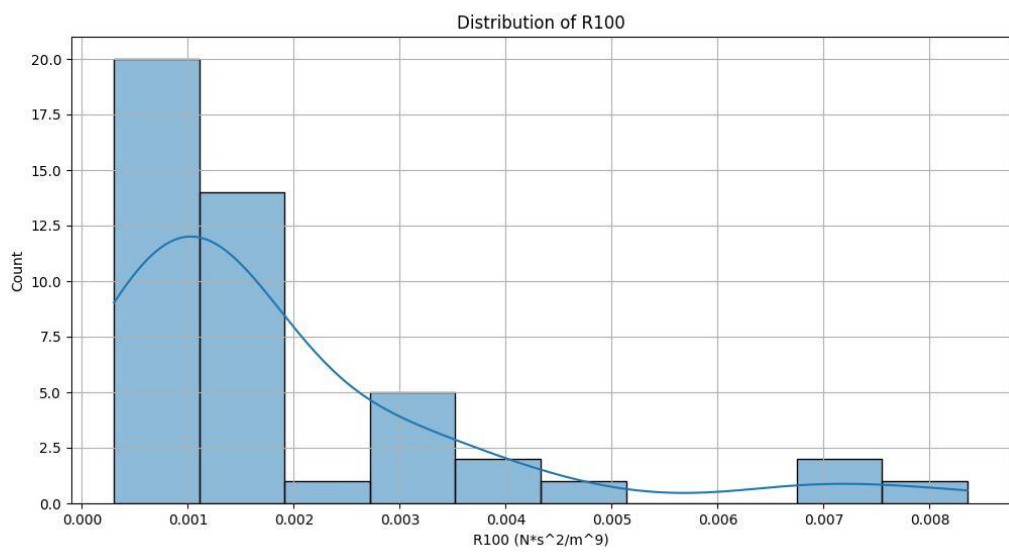
**Rys. 92** Rozkład zmiennej  $D$  (m) dla szybów w Badaniu E



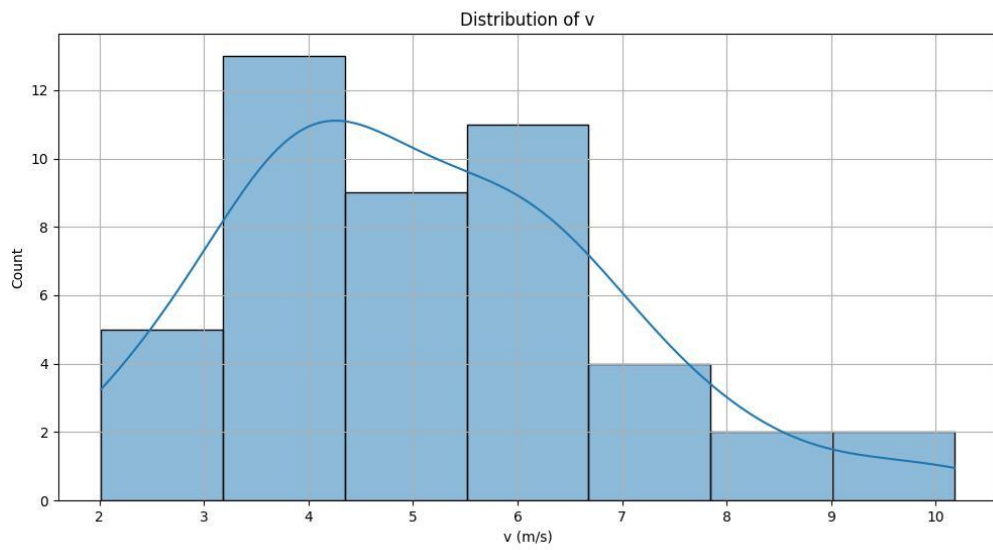
**Rys. 93** Rozkład różnicy ciśnień  $\Delta P$  (Pa) dla szybów w Badaniu E



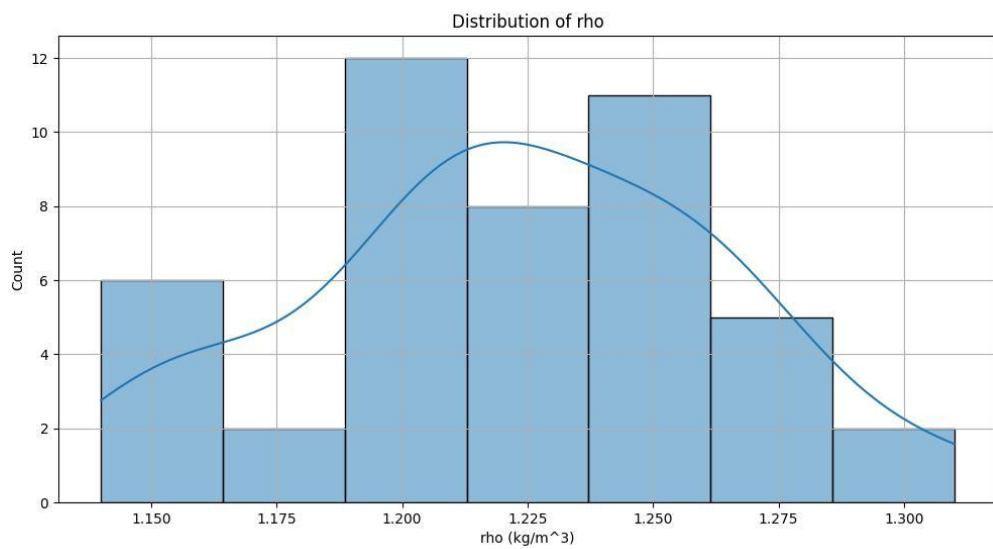
**Rys. 94** Rozkład natężenia przepływu  $Q$  (m³/s) dla szybów w Badaniu E



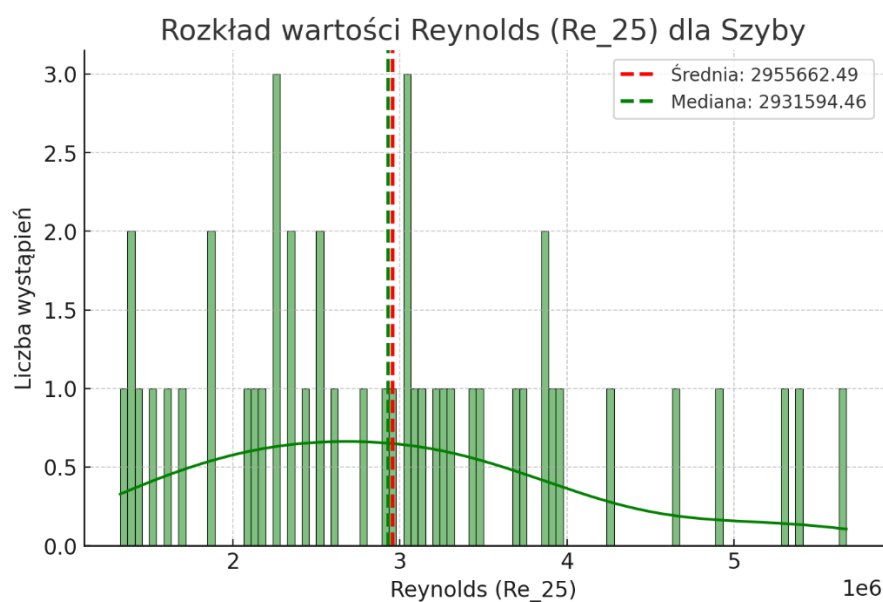
**Rys. 95** Rozkład wartości  $R_{100}$  (N·s²/m⁹) dla szybów w Badaniu E



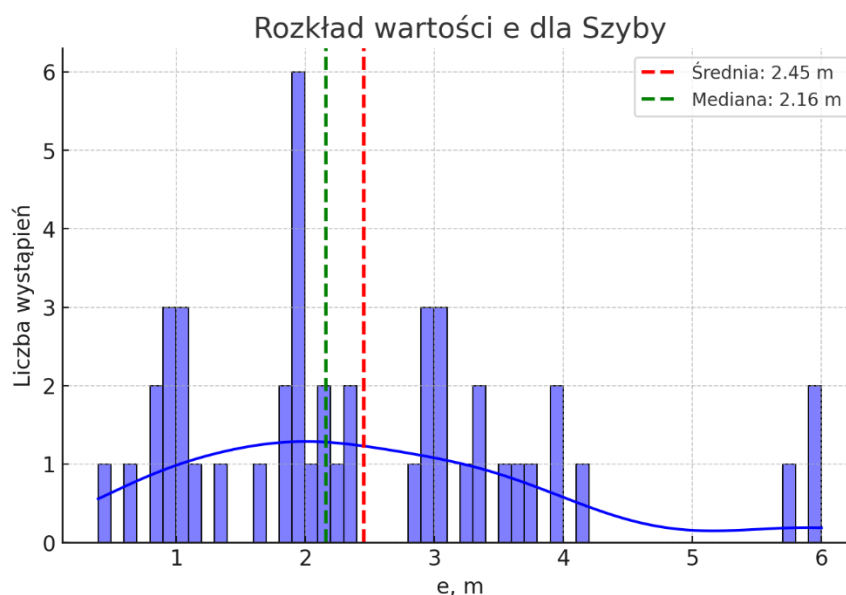
**Rys. 96** Rozkład prędkości  $v$  (m/s) dla szybów w Badaniu E



**Rys. 97** Rozkład gęstości  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) dla szybów w Badaniu E



**Rys. 98** Rozkład wartości liczby Reynoldsa ( $Re_{25}$ ) dla szybów w Badaniu E



**Rys. 99** Rozkład wartości  $e$  dla szyby w Badaniu E

Analiza wyników Badania E dla wyrobisk w obudowie ŁP bez odstawy (tab. 25) wykazuje, że wartości aerodynamiczne i geometryczne charakteryzują się znaczną zmiennością, co potwierdzają histogramy przedstawione na rys. 100–109. Współczynnik oporu  $k$  mieścił się w przedziale od 0,00015 do 0,4865  $\text{kg/m}^3$ , przy średniej 0,0281  $\text{kg/m}^3$  i medianie 0,0165  $\text{kg/m}^3$  (rys. 100). Rozkład ten cechuje się silną asymetrią (miara skośności = 5,76), co wskazuje na obecność wartości odstających. Powierzchnia przekroju A (rys. 101) osiągała wartości od 6,2 do 25,7  $\text{m}^2$ , ze średnią 13,6  $\text{m}^2$ , natomiast średnica hydrauliczna D (rys. 102) wynosiła średnio 3,53 m, przy rozpiętości od 2,39

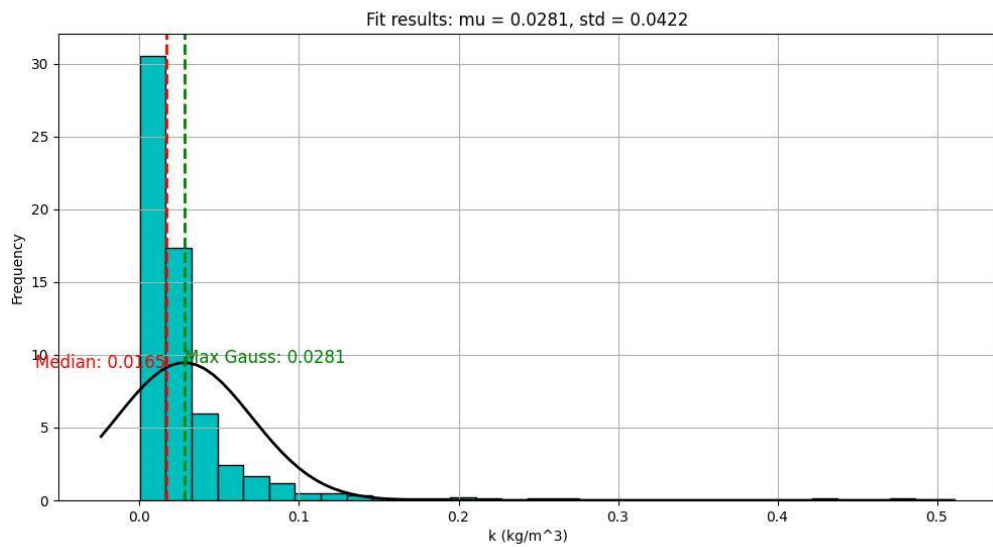
do 4,87 m. Parametr Oz (rys. 103), odpowiadający obwodowi wyrobiska, przyjmował średnio wartość 15,27 m, ze stosunkowo niewielkim zróżnicowaniem.

Analiza przepływowa wykazała duże zróżnicowanie strumienia objętościowego Q, którego wartości mieściły się w zakresie 0,7–152,7 m<sup>3</sup>/s, przy średniej 27,4 m<sup>3</sup>/s (rys. 104). Różnice ciśnień  $\Delta p$  były natomiast mocno rozproszone, od wartości minimalnych poniżej 1 Pa aż do 517 Pa, ze średnią 7,56 Pa (rys. 105), co wskazuje na zróżnicowanie warunków. Gęstość powietrza  $\rho$  oscylowała wokół wartości średniej 1,22 kg/m<sup>3</sup> (rys. 106). Prędkość przepływu v (rys. 107) mieściła się w zakresie od 0,09 do 10,4 m/s, przy średniej 1,96 m/s, co wskazuje na obecność zarówno rejonów z niską prędkością, jak i obszarów o intensywnym przepływie (rejonowe prądy powietrza).

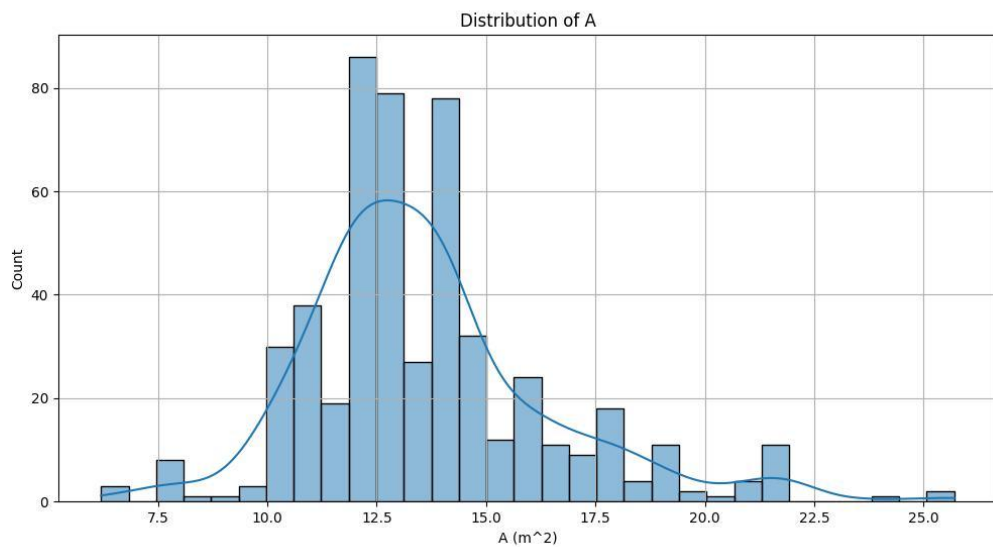
Wartości liczby Reynoldsa Re<sub>25</sub> (rys. 108) miały średnią  $7,36 \cdot 10^5$  i medianę  $5,87 \cdot 10^5$ , co jednoznacznie potwierdza turbulentny charakter przepływu powietrza w tych wyrobiskach. Z kolei parametr e, odzwierciedlający zmienność geometrii i nierówności wyrobisk, przyjmował średnio wartość 0,86 m, przy medianie 0,43 m (rys. 109). Widoczna jest duża rozpiętość wartości e, co sugeruje istotny wpływ nierówności obudowy lub wyposażenia wyrobiska w urządzenia.

**Tabela 25** Wyniki analizy statystycznej dla wyrobisk LP bez odstawy w Badaniu E

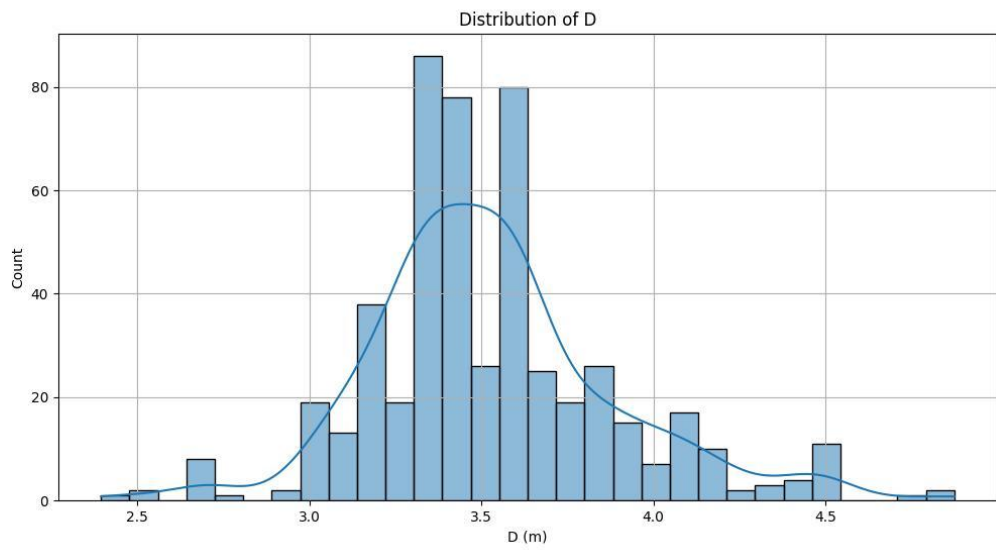
| Dane             | J.m.               | Odchyl.<br>stand. | Wartości<br>średnie | Wartości<br>mediany | Wartości<br>moda | Wartości<br>minimaln<br>e | Wartości<br>maksymaln<br>e | Zakres<br>wartości | Wariancja<br>danych | Miara<br>asymetrii<br>danych |
|------------------|--------------------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| D                | m                  | 0.358698          | 3.530318            | 3.466876            | 3.330867         | 2.394211                  | 4.874535                   | 2.480324           | 0.128664            | 0.610569                     |
| R <sub>100</sub> | kg/m <sup>^7</sup> | 0.029211          | 0.019148            | 0.011091            | 0.0011           | 0.000084                  | 0.33217                    | 0.332086           | 0.000853            | 5.273215                     |
| A                | m <sup>2</sup>     | 2.834163          | 13.61903            | 13                  | 12               | 6.2                       | 25.7                       | 19.5               | 8.032478            | 1.047992                     |
| $\rho$           | m <sup>2</sup>     | 0.031535          | 1.229437            | 1.22                | 1.2              | 1.17                      | 1.33                       | 0.16               | 0.000994            | 0.588231                     |
| v                | m/s                | 1.953126          | 2.52532             | 1.962963            | 0.595238         | 0.092105                  | 10.41254                   | 10.32044           | 3.814702            | 1.170069                     |
| Q                | m <sup>3</sup> /s  | 26.64533          | 34.13472            | 27.4                | 8.333333         | 0.7                       | 152.6667                   | 151.9667           | 709.9736            | 1.27731                      |
| $\Delta P$       | Pa                 | 40.37804          | 21.98032            | 7.5625              | 0.010667         | 0.010667                  | 517.392                    | 517.3813           | 1630.386            | 5.63148                      |
| L                | m                  | 0                 | 100                 | 100                 | 100              | 100                       | 100                        | 0                  | 0                   | 0                            |
| Oz               | m                  | 1.551871          | 15.27357            | 14.99909            | 14.41066         | 10.35832                  | 21.08919                   | 10.73087           | 2.408304            | 0.610569                     |
| k <sub>1.2</sub> | kg/m <sup>3</sup>  | 0.042205          | 0.028083            | 0.016495            | 0.000148         | 0.000148                  | 0.486547                   | 0.486399           | 0.001781            | 5.761279                     |



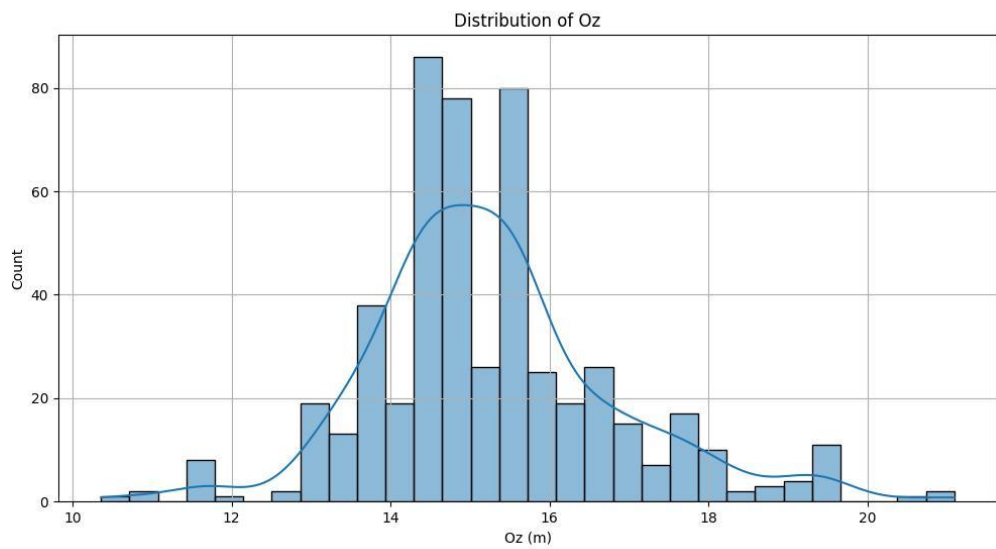
**Rys. 100** Histogram wartości  $k_{1,2}$  ( $\text{kg/m}^3$ ) z analizą statystyczną dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E



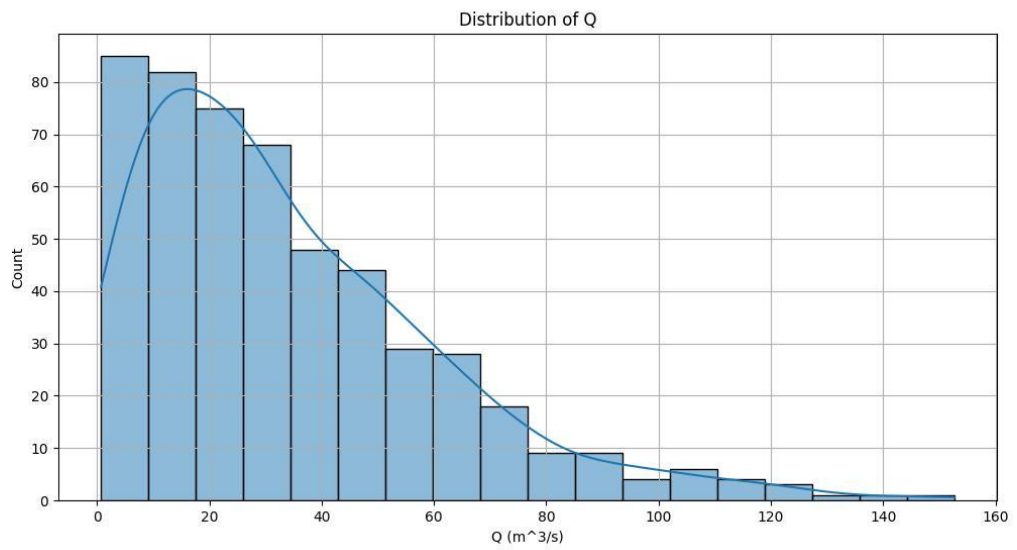
**Rys. 101** Rozkład zmiennej A ( $\text{m}^2$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E



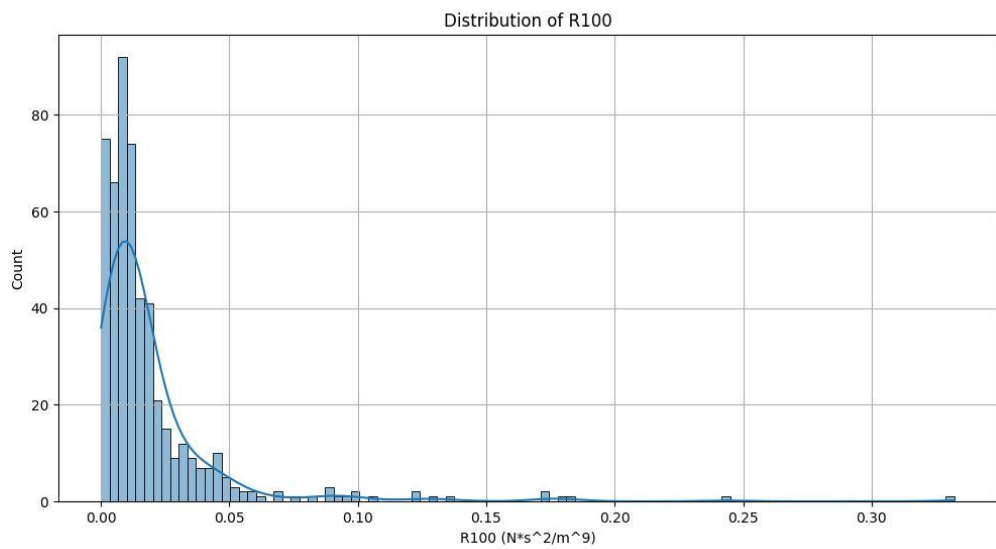
**Rys. 102** Rozkład zmiennej D (m) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E



**Rys. 103** Rozkład zmiennej Oz (m) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E

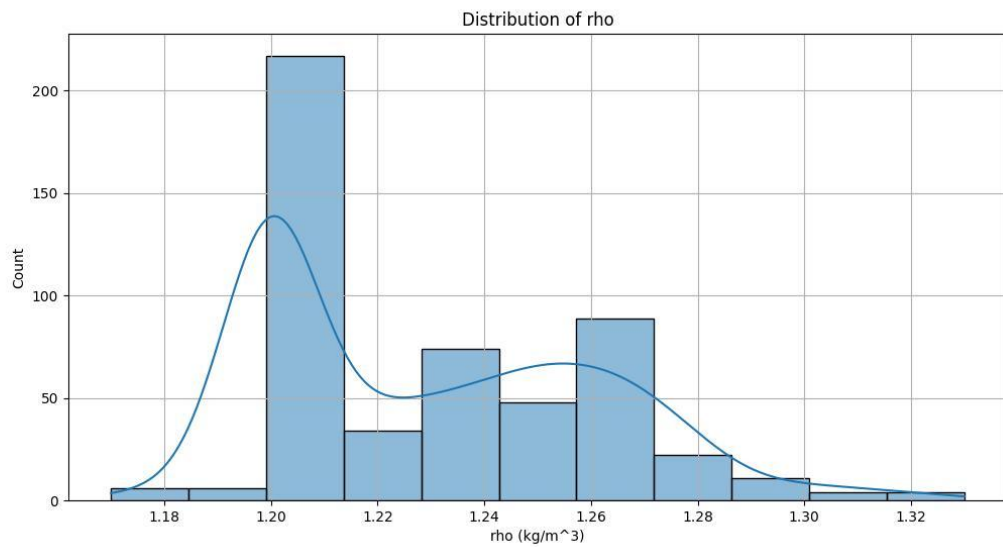


**Rys. 104** Rozkład natężenia przepływu  $Q$  (m<sup>3</sup>/s) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E

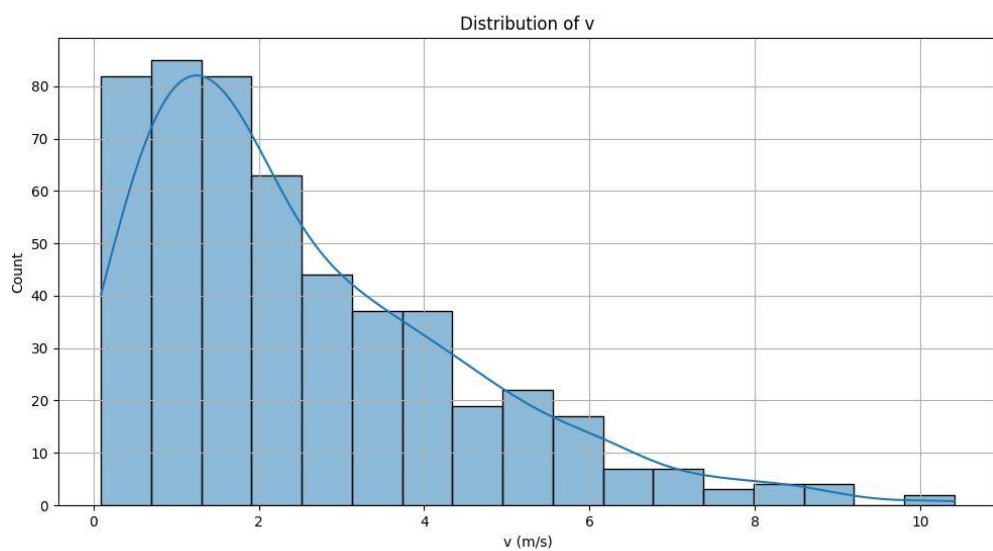


**Rys. 105** Rozkład wartości  $R_{100}$  (N·s<sup>2</sup>/m<sup>9</sup>) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E



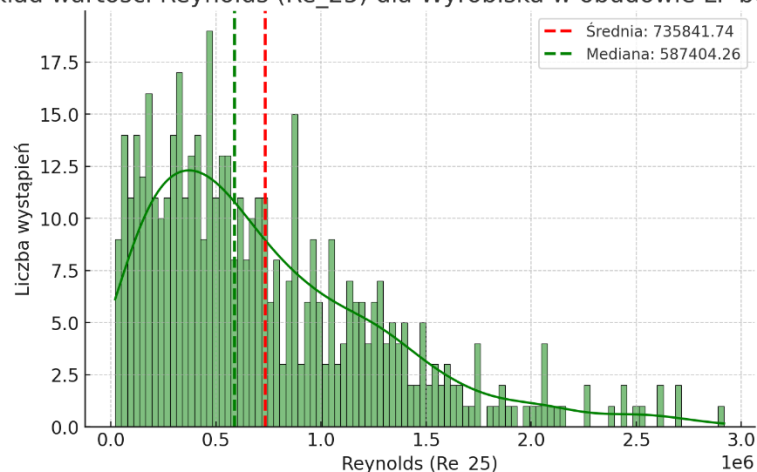


**Rys. 106** Rozkład gęstości  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E



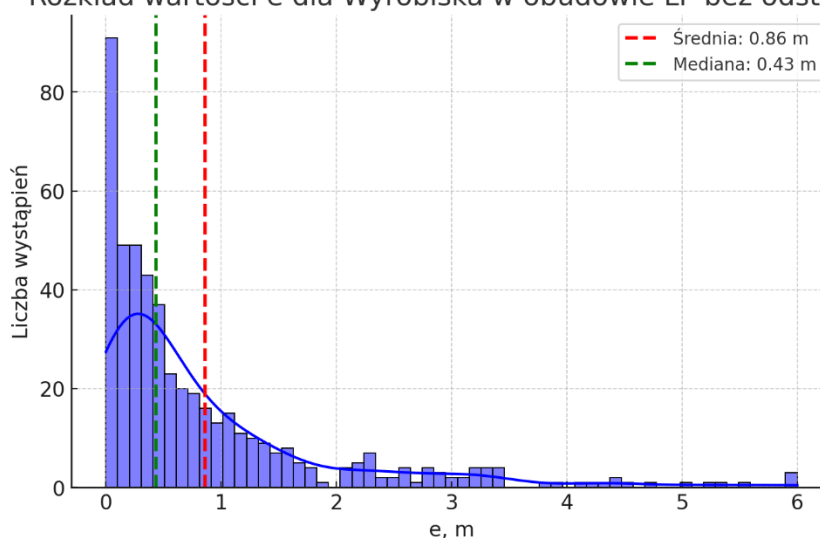
**Rys. 107** Rozkład prędkości  $v$  (m/s) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E

Rozkład wartości Reynolds (Re\_25) dla Wyrobiska w obudowie LP bez odstawy



**Rys. 108** Rozkład wartości liczby Reynoldsa (Re\_25) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E

Rozkład wartości e dla Wyrobiska w obudowie LP bez odstawy



**Rys. 109** Rozkład wartości e (m) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E

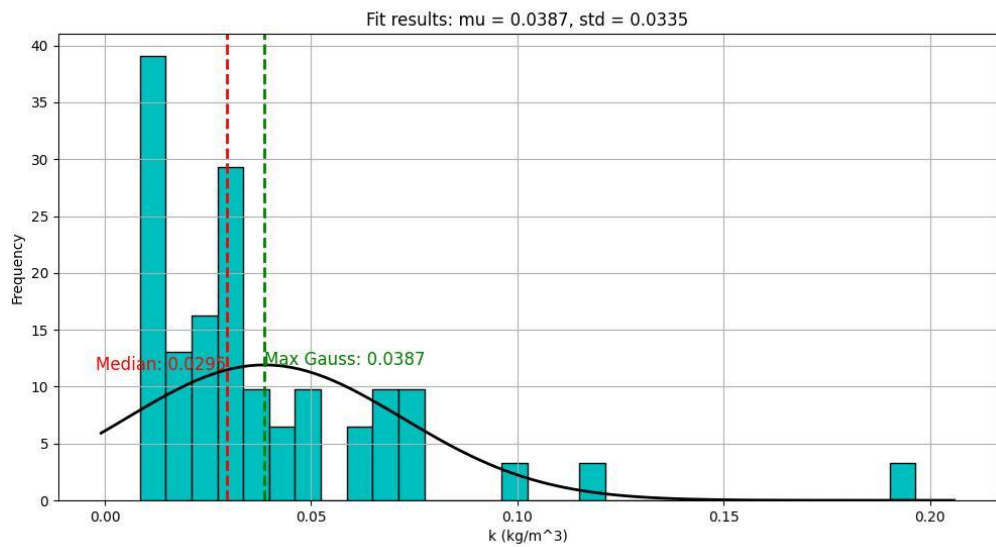
Analiza wyników Badania E dla wyrobisk w obudowie ŁP z odstawą (tab. 26) pokazuje, że charakterystyka tej grupy wyrobisk jest zróżnicowana, jednak wykazuje pewne cechy wspólne wynikające z obecności odstawy taśmowej. Współczynnik oporu  $k$  osiągał wartości od 0,0085 do 0,196  $\text{kg/m}^3$ , przy średniej 0,0338  $\text{kg/m}^3$  i medianie 0,0295  $\text{kg/m}^3$  (rys. 110). Rozkład ten wskazuje na obecność wartości odstających i wyraźną asymetrię (skośność 2,55), co świadczy o zróżnicowaniu warunków w wyrobiskach. Powierzchnia przekroju poprzecznego A mieściła się w granicach 10,5–25,7  $\text{m}^2$  (średnia 16,8  $\text{m}^2$ , rys. 111), a średnica hydrauliczna  $D$  osiągała średnio 3,91 m, przy rozrzucie od 3,1 do 4,87m (rys. 112).

Różnice ciśnień  $\Delta p$  w wyrobiskach tego typu wynosiły, średnio 10,6 Pa, przy maksymalnej wartości 95 Pa (rys. 113). Obwód wyrobiska Oz (rys. 114) oscylował wokół wartości 17,45 m. Strumień powietrza Q wynosił średnio 26,8 m<sup>3</sup>/s, przy zakresie od 8,5 do 66,5 m<sup>3</sup>/s (rys. 115), a wartości oporu R<sub>100</sub> (rys. 116) wskazują na duże zróżnicowanie, co jest typowe dla wyrobisk z odstawą, gdzie występują elementy instalacyjne i urządzenia zakłócające przepływ.

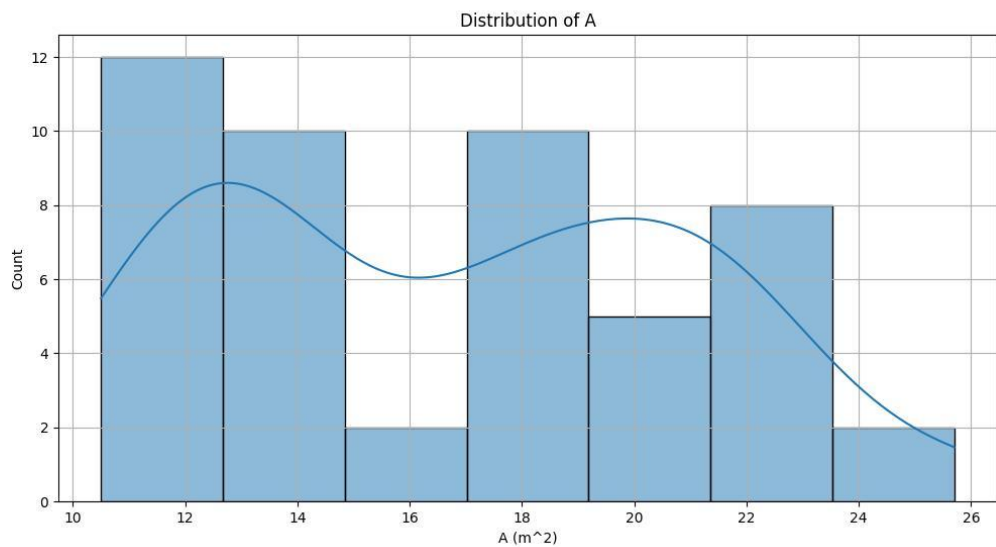
Gęstość powietrza  $\rho$  wynosiła średnio 1,27 kg/m<sup>3</sup> (rys. 117), a prędkość przepływu  $v$  – średnio 1,72 m/s, z maksymalną wartością 5,15 m/s (rys. 118). Analiza liczby Reynoldsa Re<sub>25</sub> (rys. 119) wykazała wartości rzędu  $6,3 \cdot 10^5$  (średnia), co potwierdza turbulentny charakter przepływu. Zmienność geometrii przekroju wyrobisk, wyrażona parametrem  $e$ , wynosiła średnio 0,86 m (rys. 120), co wskazuje na większą niejednorodność niż w przypadku wyrobisk bez odstawy, co tłumaczyć można obecnością przenośników taśmowych i związanych z nimi instalacjami.

**Tabela 26** Wyniki analizy statystycznej dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E

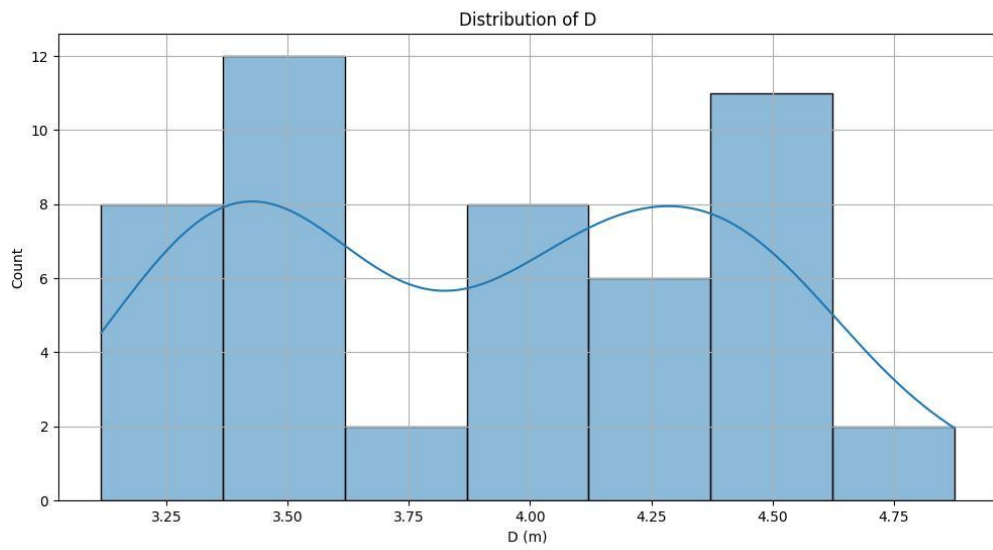
| Dane       | J.m.              | Odchyl.<br>stand. | Wartości<br>średnie | Wartości<br>mediany | Wartości<br>moda | Wartości<br>minimaln<br>e | Wartości<br>maksymaln<br>e | Zakres<br>wartości | Wariancja<br>danych | Miara<br>asymetrii<br>danych |
|------------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|---------------------------|----------------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| D          | m                 | 0.50002           | 3.909216            | 4.03388             | 4.489468         | 3.115741                  | 4.874535                   | 1.758795           | 0.25002             | 0.086311                     |
| R100       | kg/m <sup>7</sup> | 0.015254          | 0.016293            | 0.012257            | 0.002391         | 0.002391                  | 0.08919                    | 0.086799           | 0.000233            | 2.926349                     |
| A          | m <sup>2</sup>    | 4.256681          | 16.79388            | 17.6                | 21.8             | 10.5                      | 25.7                       | 15.2               | 18.11934            | 0.227179                     |
| $\rho$     | m <sup>2</sup>    | 0.018134          | 1.265918            | 1.27                | 1.26             | 1.22                      | 1.31                       | 0.09               | 0.000329            | -0.0998                      |
| $v$        | m/s               | 0.992131          | 1.924159            | 1.72                | 1.266667         | 0.558824                  | 5.155039                   | 4.596215           | 0.984325            | 1.380136                     |
| Q          | m <sup>3</sup> /s | 14.1965           | 31.00204            | 26.8                | 17.1             | 8.5                       | 66.5                       | 58                 | 201.5406            | 0.588315                     |
| $\Delta P$ | Pa                | 19.31157          | 16.81347            | 10.61568            | 0.588599         | 0.588599                  | 95.16433                   | 94.57573           | 372.9366            | 2.400475                     |
| L          | m                 | 0                 | 100                 | 100                 | 100              | 100                       | 100                        | 0                  | 0                   | 0                            |
| Oz         | m                 | 2.163285          | 16.91283            | 17.45218            | 19.42324         | 13.47994                  | 21.08919                   | 7.609249           | 4.679802            | 0.086311                     |
| k          | kg/m <sup>3</sup> | 0.033845          | 0.038724            | 0.02952             | 0.008478         | 0.008478                  | 0.196487                   | 0.188009           | 0.001145            | 2.551882                     |



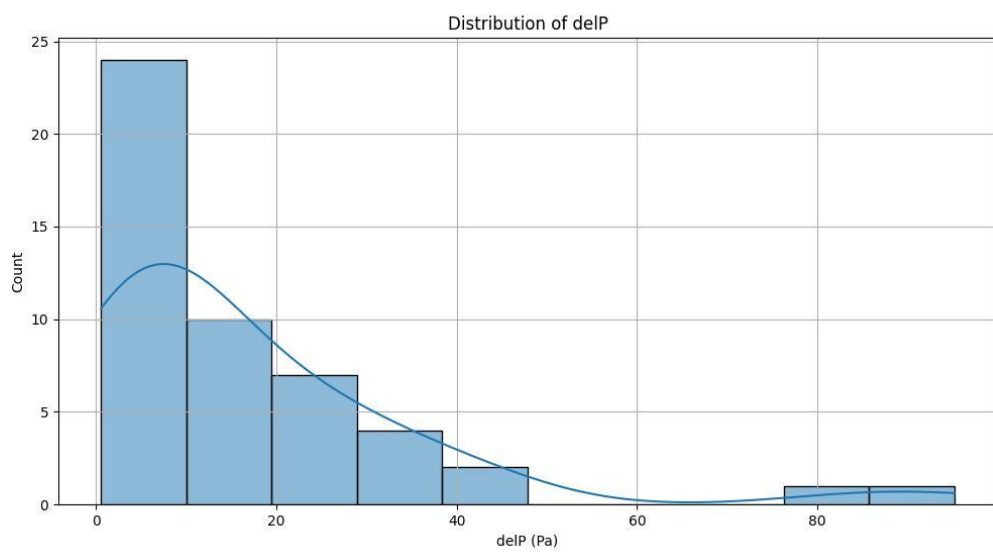
**Rys. 110** Histogram wartości  $k \text{ (kg/m}^3\text{)}$  z analizą statystyczną dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E



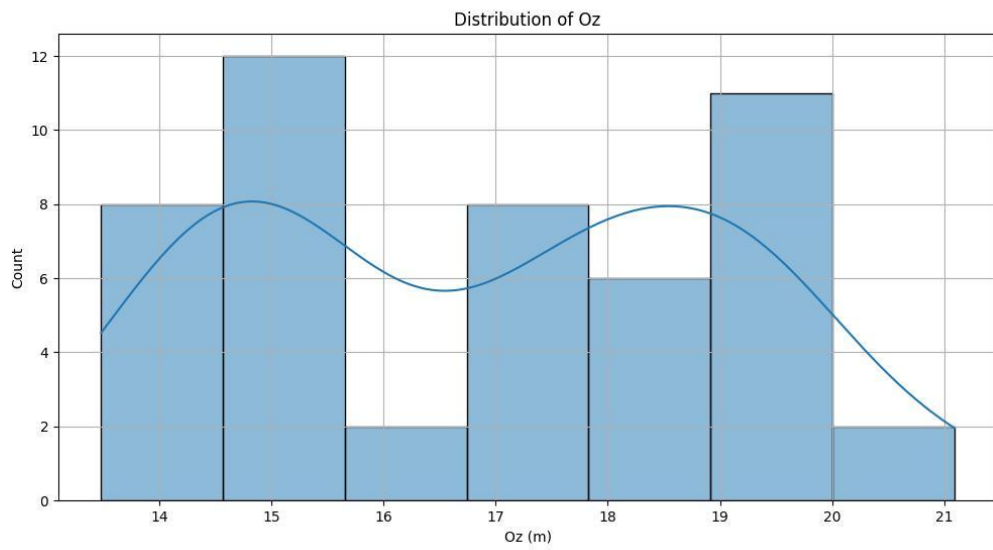
**Rys. 111** Rozkład zmiennej  $A \text{ (m}^2\text{)}$  dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E



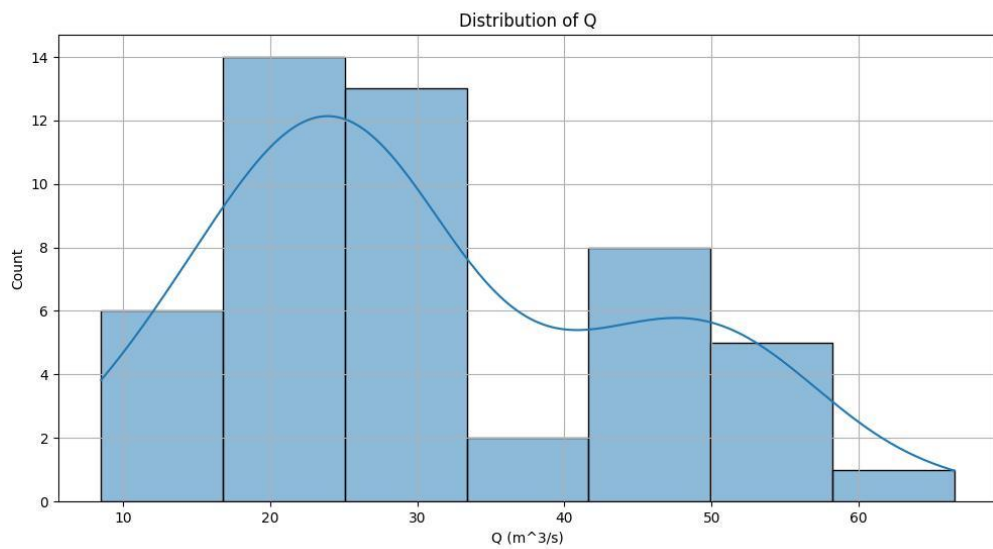
**Rys. 112** Rozkład zmiennej  $D$  (m) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E



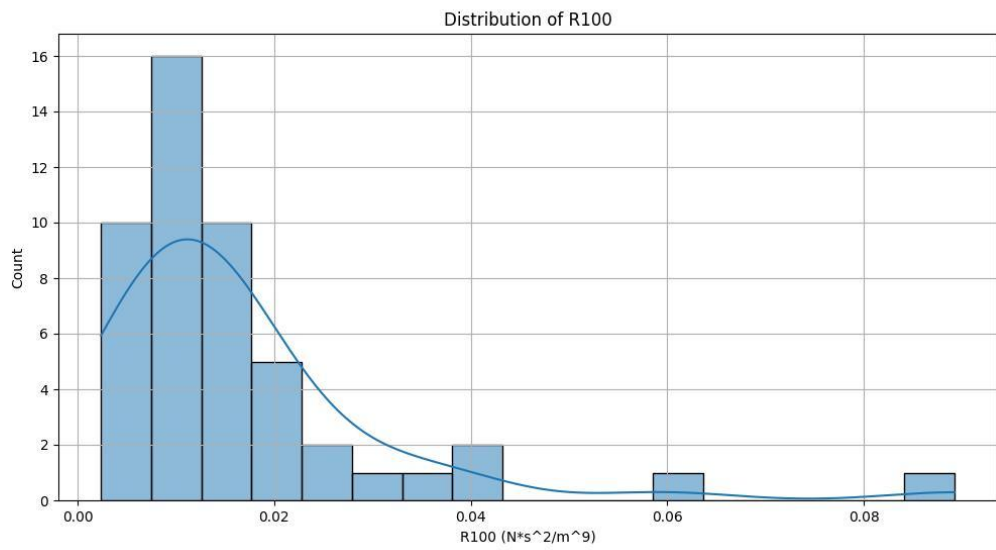
**Rys. 113** Rozkład różnicy ciśnień  $\Delta P$  (Pa) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E



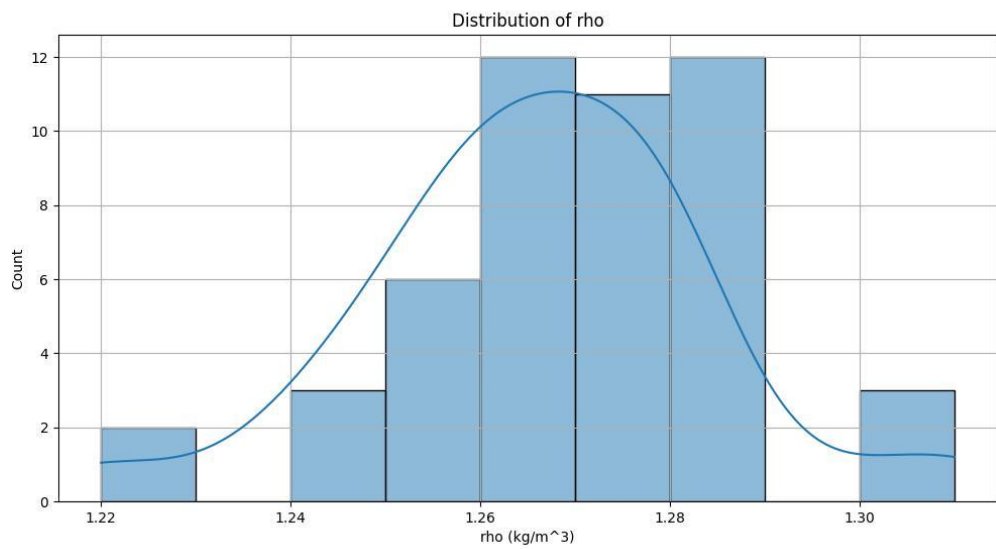
**Rys. 114** Rozkład zmiennej Oz (m) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E



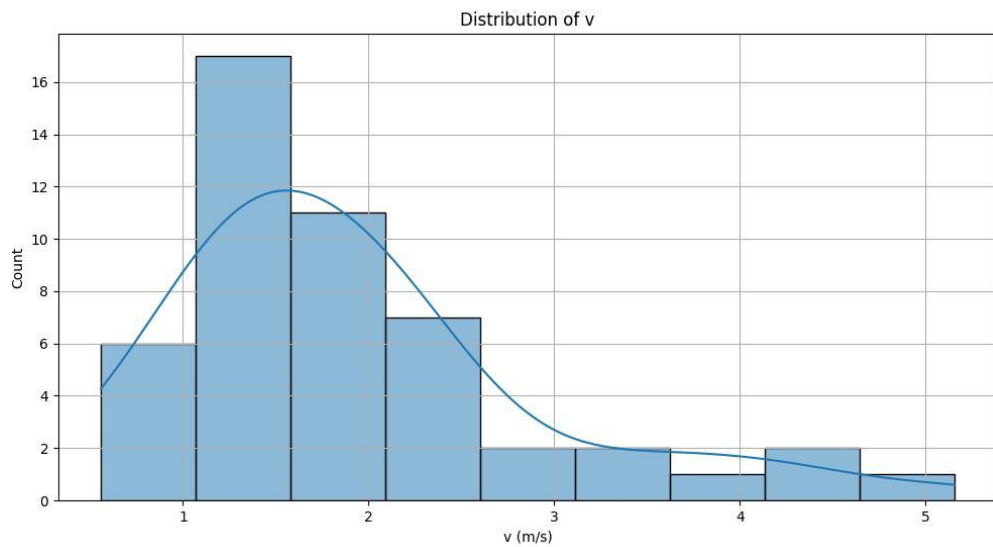
**Rys. 115** Rozkład natężenia przepływu Q (m³/s) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E



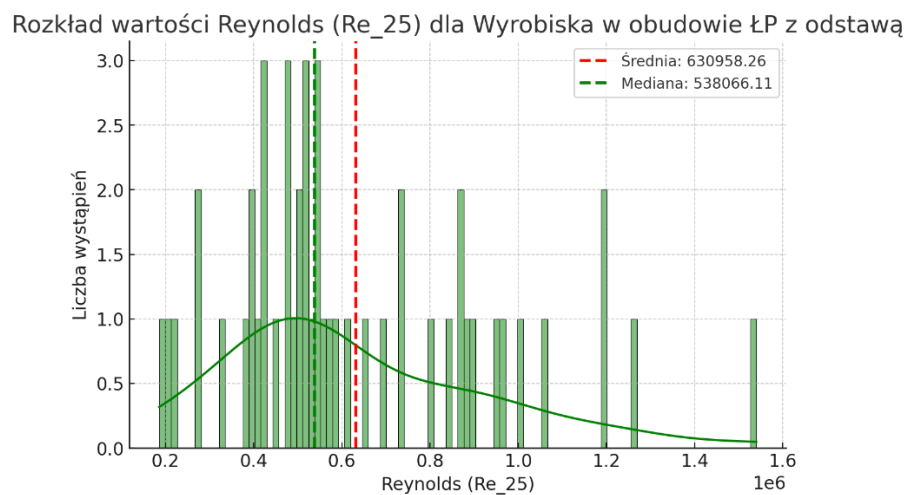
**Rys. 116** Rozkład wartości R100 ( $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}^9$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E



**Rys. 117** Rozkład gęstości  $\rho$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E

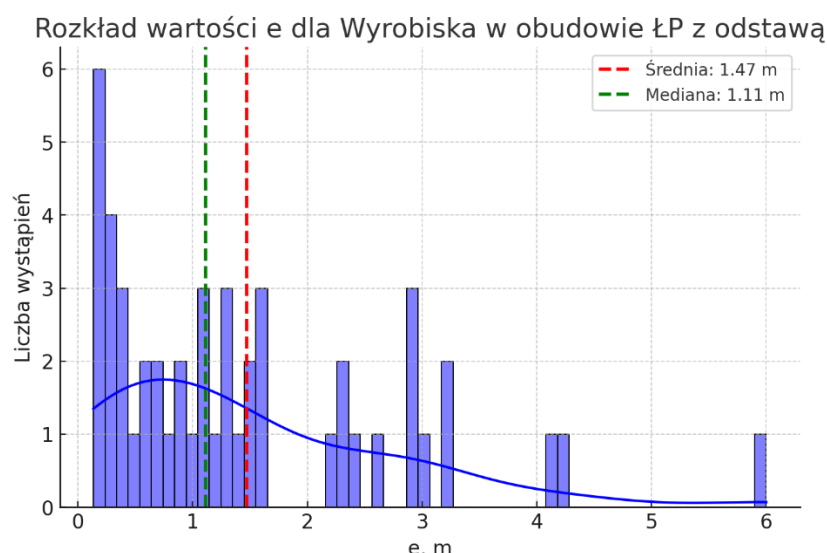


**Rys. 118** Rozkład prędkości  $v$  (m/s) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E



**Rys. 119** Rozkład wartości liczby Reynoldsa (Re\_25) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E





**Rys. 120** Rozkład wartości  $e$  (m) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E

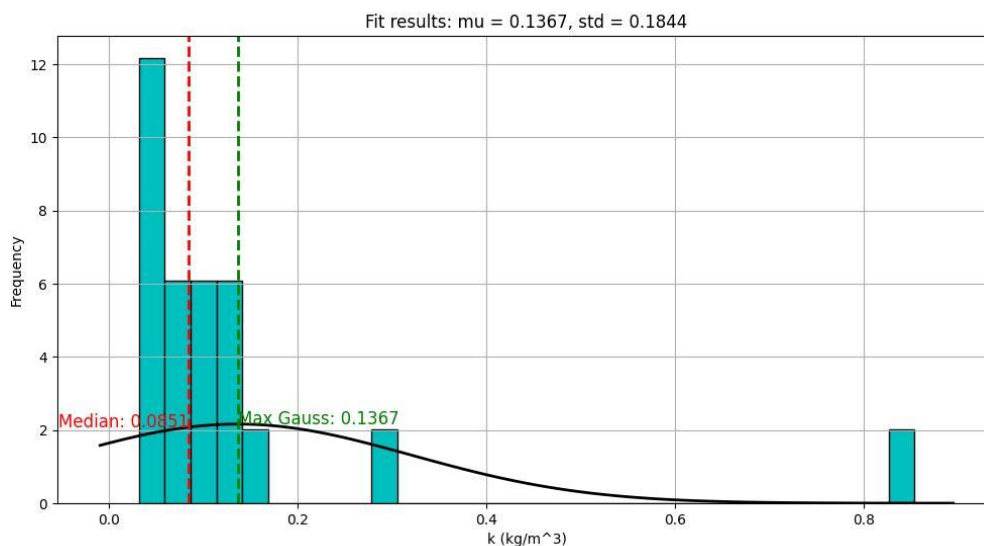
Analiza wyników Badania E dla ścian eksploatacyjnych (wyrobyśka wybierkowych) ujawnia, że parametry aerodynamiczne tej grupy są szczególnie zróżnicowane, co potwierdzają dane z tabeli 27 oraz rozkłady przedstawione na rys. 121–131. Współczynnik oporu  $k$  (rys. 120) osiągnął wartości od 0,0319 do 0,854 kg/m<sup>3</sup>, przy średniej 0,1367 kg/m<sup>3</sup> i medianie 0,0851 kg/m<sup>3</sup>, co wskazuje na znaczną zmienność i obecność wartości odstających wynikających z niejednorodnych warunków eksploatacji. Pole przekroju poprzecznego  $A$  wynosiło średnio 13,1 m<sup>2</sup> (rys. 122), natomiast średnica hydrauliczna  $D$  osiągnęła średnią 3,43 m (rys. 123), przy rozpiętości 2,41–4,49 m.

Różnice ciśnień  $\Delta p$  (rys. 124) mieściły się w zakresie od 1,6 do ponad 100 Pa, przy średniej 21,8 Pa. Obwód wyrobiska  $O_z$  (rys. 125) osiągał wartości średnie 14,85 m. Strumień objętościowy powietrza  $Q$  kształtował się na poziomie średnim 18,65 m<sup>3</sup>/s, przy zakresie 5,3–32 m<sup>3</sup>/s (rys. 126), a wartości oporu  $R_{100}$  (rys. 127) wskazują na bardzo duże zróżnicowanie – od 0,0097 do ponad 0,50 N·s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>.

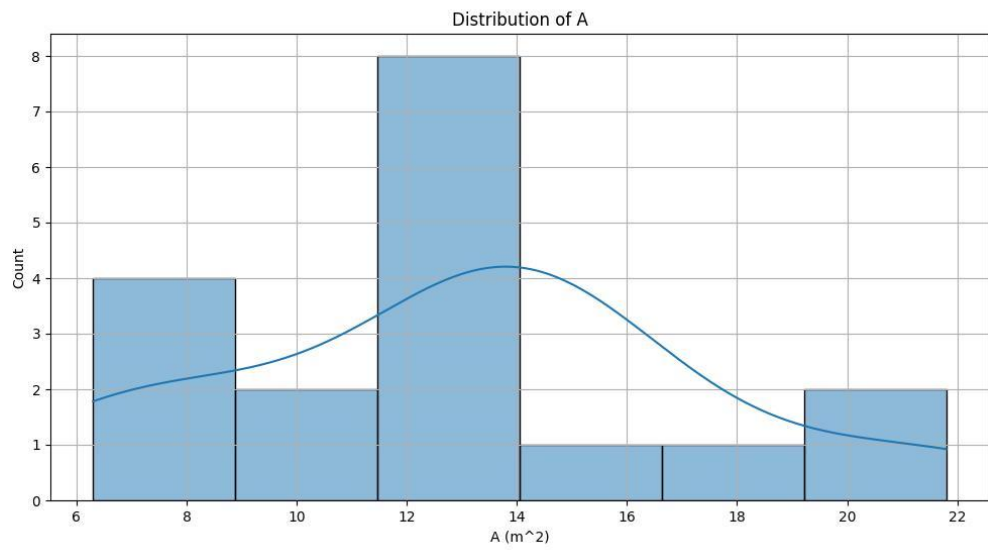
Gęstość powietrza  $\rho$  wynosiła średnio 1,21 kg/m<sup>3</sup> (rys. 128), natomiast prędkości przepływu  $v$  (rys. 129) mieściły się w przedziale 0,38–2,95 m/s, przy średniej 1,49 m/s. Liczba Reynoldsa  $Re_{25}$  (rys. 130) osiągała średnio  $4,25 \cdot 10^5$ , co jednoznacznie wskazuje na turbulentny charakter przepływu, choć wartości były niższe niż w szybach czy głównych wyrobiskach korytarzowych. Analiza zmienności geometrycznej  $e$  (rys. 131) wskazała średnią 2,59 m, co potwierdza większą niejednorodność przestrzenną wyrobisk ścianowych.

**Tabela 27** Wyniki analizy statystycznej dla ściany (wyrobiska wybierkowe) w Badaniu E

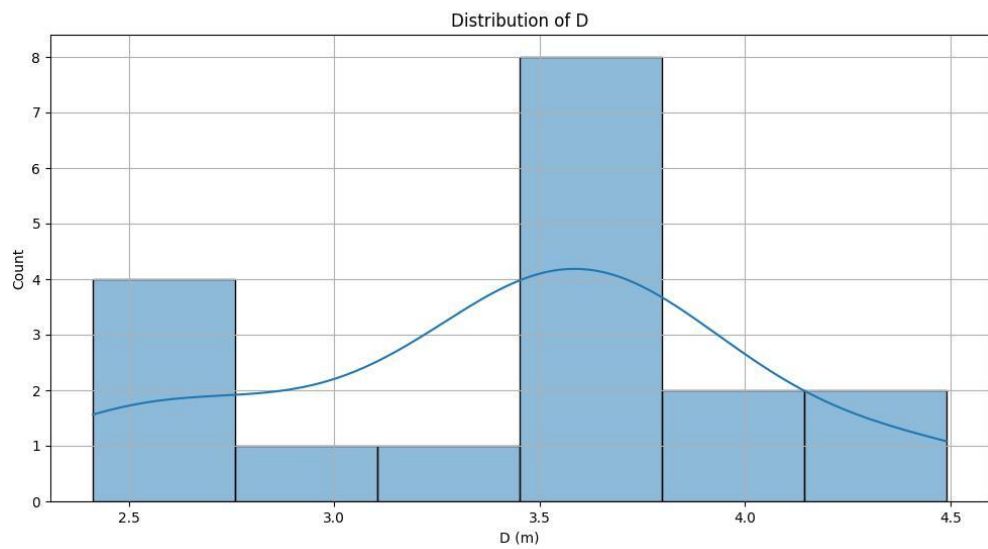
| Dane | J.m.              | Odchyl.<br>stand. | Wartości<br>średnie | Wartości<br>mediany | Wartości<br>moda | Wartości<br>mini. | Wartości<br>maks. | Zakres<br>wartości | Wariancja<br>danych | Miara<br>asymetrii<br>danych |
|------|-------------------|-------------------|---------------------|---------------------|------------------|-------------------|-------------------|--------------------|---------------------|------------------------------|
| D    | m                 | 0.598268          | 3.432023            | 3.591311            | 3.597747         | 2.413442          | 4.489468          | 2.076026           | 0.357924            | -0.19052                     |
| R100 | kg/m <sup>7</sup> | 0.111754          | 0.102309            | 0.060858            | 0.009725         | 0.009725          | 0.504491          | 0.494767           | 0.012489            | 3.024489                     |
| A    | m2                | 4.398459          | 13.10556            | 13.95               | 14               | 6.3               | 21.8              | 15.5               | 19.34644            | 0.213789                     |
| ρ    | m2                | 0.021113          | 1.218889            | 1.21                | 1.2              | 1.2               | 1.25              | 0.05               | 0.000446            | 0.416871                     |
| v    | m/s               | 0.733982          | 1.599514            | 1.487463            | 2                | 0.380714          | 2.952381          | 2.571667           | 0.538729            | 0.422473                     |
| Q    | m3/s              | 6.036305          | 18.66593            | 18.65               | 20               | 5.33              | 32                | 26.67              | 36.43697            | 0.257329                     |
| ΔP   | Pa                | 30.01481          | 35.21323            | 21.83115            | 1.5685           | 1.5685            | 100.3039          | 98.73538           | 900.8889            | 1.107446                     |
| L    | m                 | 0                 | 100                 | 100                 | 100              | 100               | 100               | 0                  | 0                   | 0                            |
| Oz   | m                 | 2.588345          | 14.84831            | 15.53745            | 15.56529         | 10.44152          | 19.42324          | 8.981718           | 6.699531            | -0.19052                     |
| k    | kg/m <sup>3</sup> | 0.189745          | 0.136743            | 0.085133            | 0.031908         | 0.031908          | 0.853791          | 0.821883           | 0.036003            | 3.557026                     |



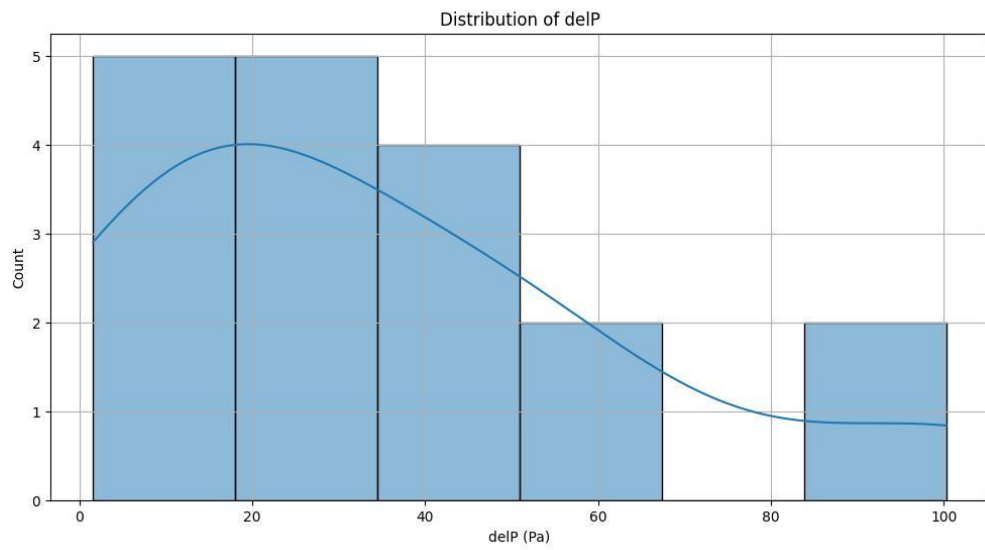
**Rys. 121** Histogram wartości  $k$  (kg/m<sup>3</sup>) z analizą statystyczną dla ściany (wyrobiska wybierkowe) w Badaniu E



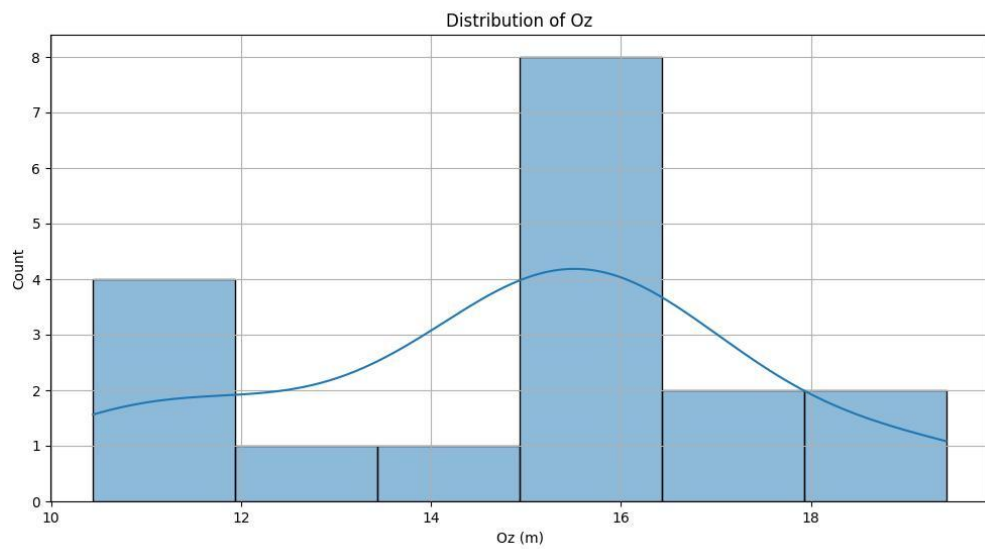
**Rys. 122** Rozkład zmiennej A (m<sup>2</sup>) dla ściany (wyróbiska wybierkowe) w Badaniu E



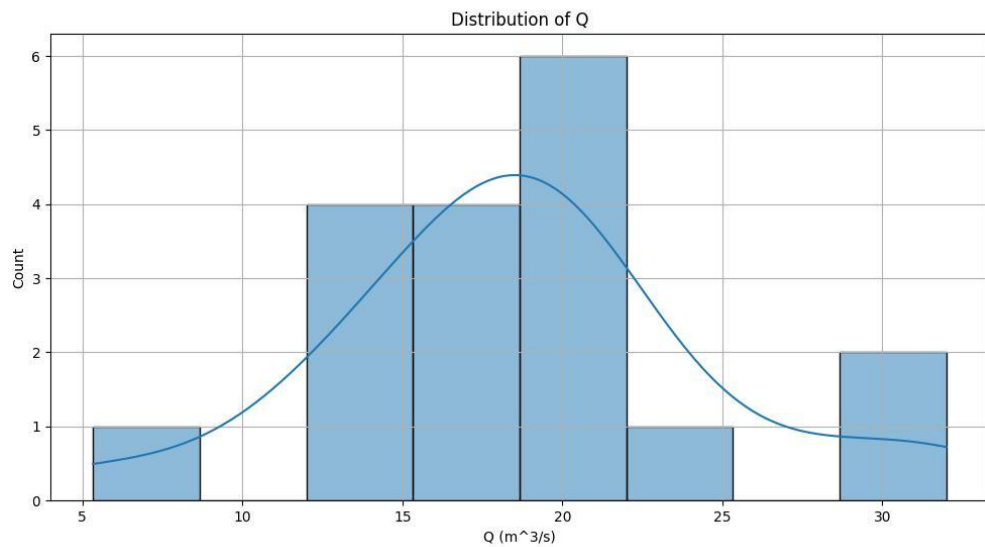
**Rys. 123** Rozkład zmiennej D (m) dla ściany (wyróbiska wybierkowe) w Badaniu E



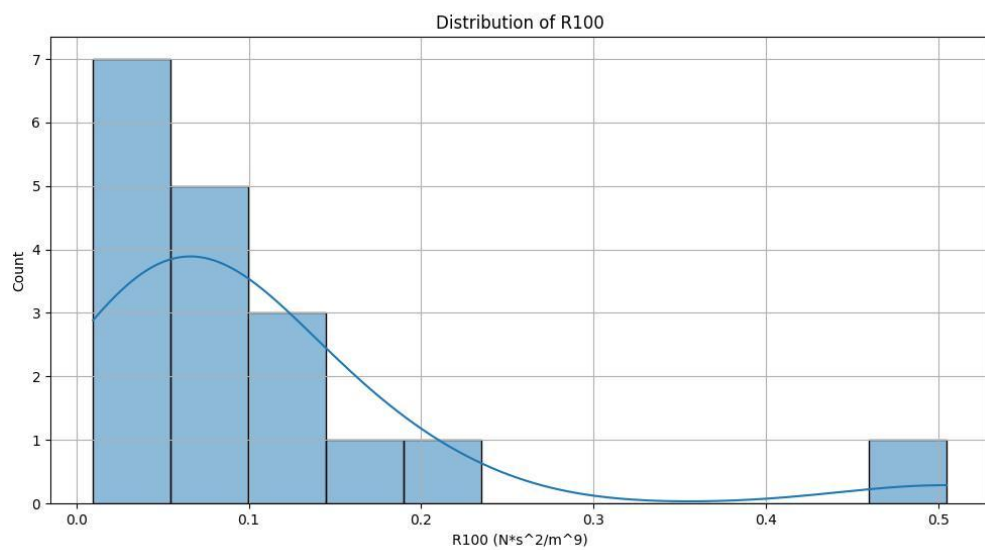
**Rys. 124** Rozkład różnicy ciśnień  $\Delta P$  (Pa) dla ściany (wyrobiska wybierkowe) w Badaniu E



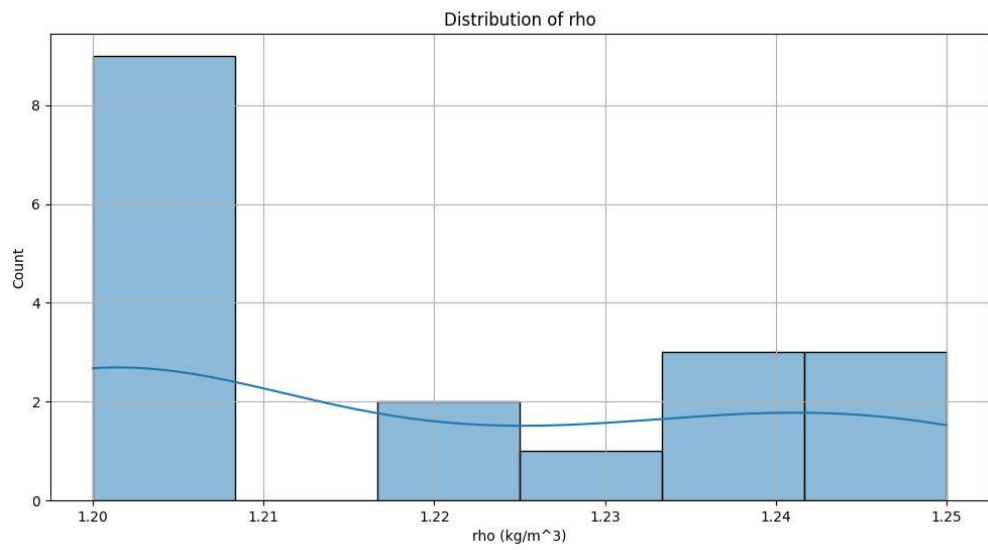
**Rys. 125** Rozkład zmiennej Oz (m) dla ściany (wyrobiska wybierkowe) w Badaniu E



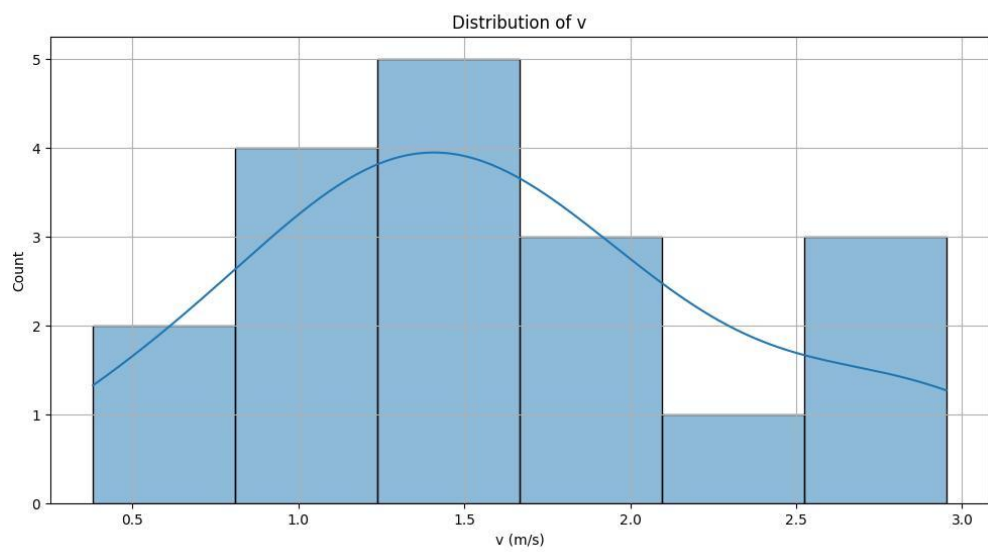
**Rys. 126** Rozkład natężenia przepływu  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) dla ściany (wytrobiska wybierkowe) w Badaniu E



**Rys. 127** Rozkład wartości  $R100$  ( $\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^9$ ) dla ściany (wytrobiska wybierkowe) w Badaniu E

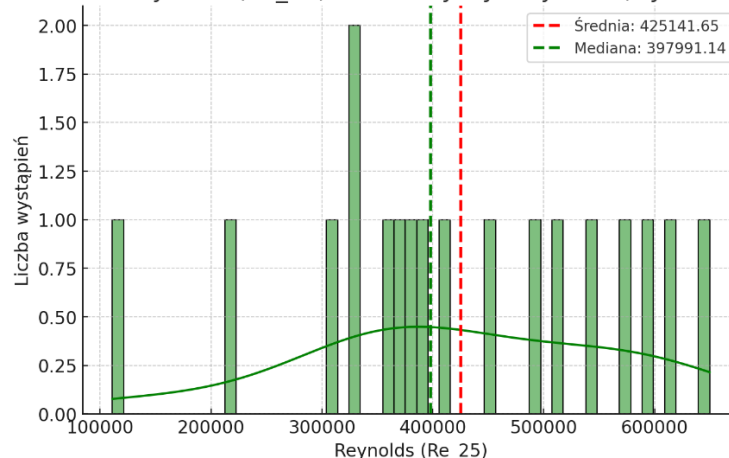


**Rys. 128** Rozkład gęstości  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) dla ściany (wytrobiska wybierkowe) w Badaniu E



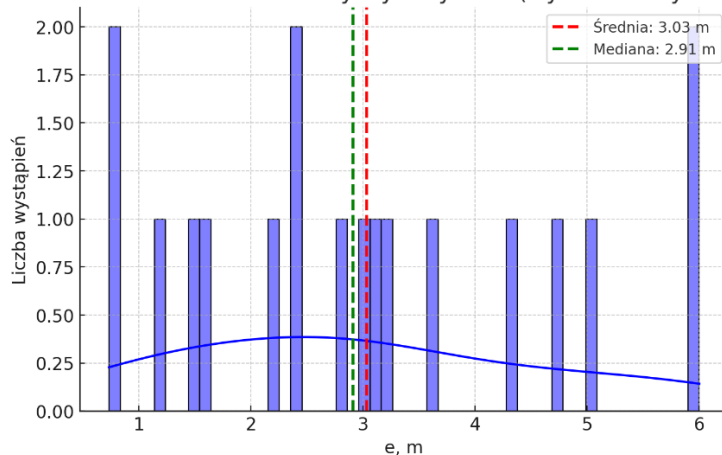
**Rys. 129** Rozkład prędkości  $v$  (m/s) dla ściany (wytrobiska wybierkowe) w Badaniu E

Rozkład wartości Reynolds (Re\_25) dla Ściany wydobywcze (wytrobiska wybierkowe)



**Rys. 130** Rozkład wartości liczby Reynoldsa (Re\_25) dla ściany (wytrobiska wybierkowe) w Badaniu E

Rozkład wartości e dla Ściany wydobywcze (wytrobiska wybierkowe)



**Rys. 131** Rozkład wartości e dla ściany (wytrobiska wybierkowe) w Badaniu E

Podsumowanie wyników Badania E jednoznacznie wskazuje na zróżnicowaną charakterystykę aerodynamiczną analizowanych typów wytrobisk, co ma istotne znaczenie w kontekście modelowania numerycznego sieci wentylacyjnych. Jak pokazano w tabeli 28, najniższe wartości współczynnika oporu (mediana  $k$ ) uzyskano dla wytrobisk w obudowie ŁP bez odstawy –  $0,0165 \text{ kg/m}^3$ , co odpowiada wartościom bezwymiarowym współczynników oporu  $f = 0,0099$  i  $\lambda = 0,0396$ . Z kolei wytrobiska z odstawą charakteryzują się już wyższymi wartościami ( $k = 0,0295 \text{ kg/m}^3$ ), co wynika z dodatkowych elementów zabudowy transportowej, zwiększających zaburzenia przepływu i w konsekwencji oporu. Szyby osiągnęły wartości pośrednie ( $k = 0,0321 \text{ kg/m}^3$ ), natomiast największym współczynnikiem oporu odznaczały się ściany eksploatacyjne ( $k = 0,0851 \text{ kg/m}^3$ ),

gdzie lokalne warunki prowadzenia wydobywania, nierówności obudowy oraz obecność maszyn i urządzeń generują znaczne zaburzenia przepływu.

**Tabela 28** Podsumowanie wyników wyznaczenia współczynników oporu (chropowatości) dla Badania E

| Typ wyrobiska                         | FF, $k_{1,2}$ , $\alpha$<br>(mediana)<br>kg/m <sup>3</sup> | f<br>-  | $\lambda$<br>- |
|---------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------|----------------|
| Szyby                                 | 0.0321                                                     | 0.01926 | 0.07704        |
| Wyrobiska w obudowie ŁP - bez odstawy | 0.0165                                                     | 0.0099  | 0.0396         |
| Wyrobiska ŁP z odstawą                | 0.0295                                                     | 0.0177  | 0.0708         |
| Wyrobiska ścianowe (wybierkowe)       | 0.0851                                                     | 0.05106 | 0.20424        |

### 5.2.3. Badanie F - Metoda odwzorowania sieci wentylacyjnej kopalni w oprogramowaniu VentSim z wykorzystaniem wyznaczonych współczynników oporu w badaniu E

Badanie zostało przeprowadzone w jednej z kopalń JSW S.A., której struktura wyrobisk opiera się na modelu kamiennym udostępniania pokładów na poszczególnych poziomach. Złoże udostępnione jest pięcioma szybami, z których trzy (A, B, C) zlokalizowane są w centralnej części złoży w rejonie zakładu głównego, natomiast dwa (D, E) pełnią funkcję szybów peryferyjnych. Kopalnia dysponuje łącznie pięcioma szybami, w tym dwoma szybami wydechowymi: szybem C oraz szybem E.

- Szyb A pełni funkcję szybu wydobywczego, jest szybem skipowym, dwuprzędziałowym o średnicy 7,2 m. Wyposażony został w dwa górnicze wyciągi szybowe: wschodni obsługujący poziom 838 m oraz zachodni obsługujący poziom 713 m. Skipy w obu przedziałach mają nośność 20 Mg. Na wieży wyciągowej basztowej zabudowano dwie maszyny wyciągowe typu 4L-4250 o mocy  $2 \times 2400$  kW.
- Szyb B to szyb dwuprzędziałowy o średnicy 7,2 m, którego podstawową funkcją jest jazda ludzi oraz transport materiałów.



- Szyb C jest szybem jednoprzędziowym o średnicy 7,2 m, wykorzystywanym do jazdy ludzi i transportu materiałów. W systemie wentylacyjnym pełni rolę szybu wydechowego. Przy tym szybie zainstalowano zespół wentylatorów głównego przewietrzania ( $3 \times \text{WPR-200/1,8}$ ).
- Szyb D ma charakter pomocniczy, jest szybem jednoprzędziowym o średnicy 5,5 m, pełniącym funkcję szybu wdechowego, materiałowego i rewizyjnego.
- Szyb E to szyb wydechowy o średnicy 8,0 m i głębokości 740,39 m, niewyposażony w urządzenie wyciągowe. W systemie wentylacyjnym kopalni pełni funkcję szybu wydechowego. Przy szybie zabudowane zostały dwa wentylatory głównego przewietrzania typu WPR-200/1,8.

W kopalni powietrze jest doprowadzane trzema szybami wdechowymi: Szyb A, Szyb B i Szyb E. Na poszczególnych poziomach powietrze rozprowadzane jest przekopami do rejonów wentylacyjnych. Powietrze w kopalni doprowadzane jest do kilku rejonów wentylacyjnych, gdzie aktualnie eksploatowane są ściany oraz prowadzone są roboty przygotowawcze.

W sąsiedztwie szybów wdechowych na poziomach, 713m, 838m i 950m zlokalizowane są komory funkcyjne. Są to m. in. komory pomp, rozdzielni głównych, odwadniania, napraw wozów, warsztatów elektrycznych i mechanicznych, składu materiałów wybuchowych oraz zajezdnie lokomotyw.

Po przewietrzeniu wyrobisk dołowych powietrze jest odprowadzane na powierzchnię dwoma szybami wydechowymi: Szyb C i Szyb E, na których zabudowane są wentylatory typu WPR-200/1,8. Przy szybie C zabudowane są trzy wentylatory (z czego jeden to rezerwa), a przy szybie E zabudowane są dwa wentylatory (z czego jeden to rezerwa).

W kopalni występuje również połączenie wentylacyjne z inną kopalnią poprzez przekop na poz.950. Wyrobiskiem tym po przewietrzeniu rejonu ściany powietrze odprowadzane jest na szyb wentylacyjny w sąsiedniej kopalni.

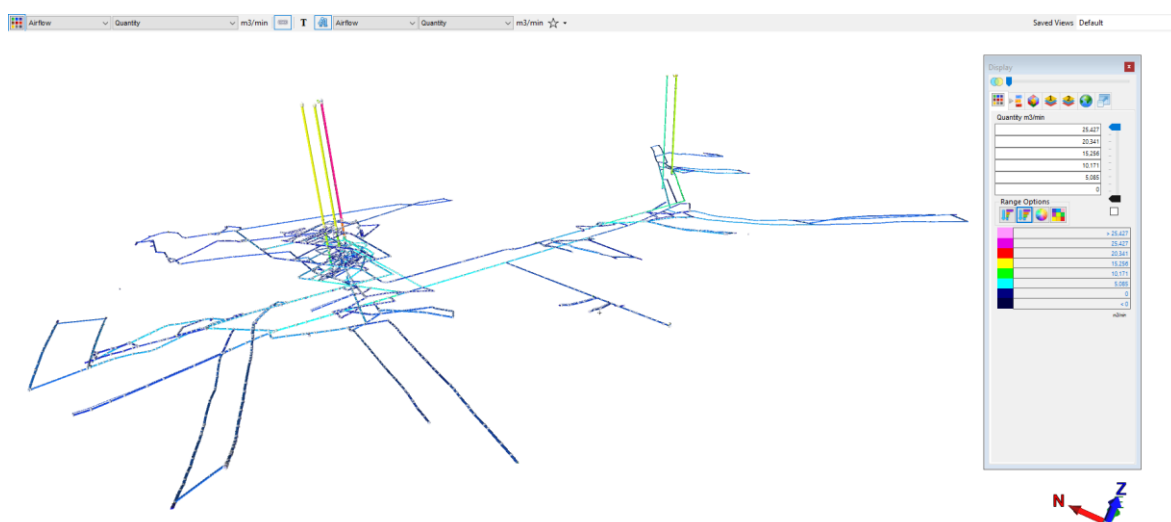
Metodyka badawcza składała się z dwóch części:

- Zbudowanie modelu jednej z kopalń JSW S.A. w oprogramowaniu VentSim oraz przeprowadzenie walidacji modelu w oparciu o następujące informacje: przestrzenną strukturę sieci wentylacyjnej, charakterystyki wentylatorów głównego przewietrzania, opory lokalne tam wentylacyjnych (dla każdej tamy osobno), przekroje poprzeczne wyrobisk (na podstawie znanych szerokości i wysokości w miejscach wykonywania pomiarów ilości powietrza), a także współczynniki oporu przypisane dla każdego typu wyrobiska w badaniu E

(z wyjątkiem szybów, dla których opory zostały określone na podstawie wcześniejszych, niezależnych pomiarów). W modelu uwzględniono przyrost strumienia ciepła od górotworu, bazując na wyznaczonym stopniu geotermicznym oraz wartościach początkowych określonych w badaniach A i B.

- Wykonanie badania sieci wentylacyjnej kopalni z wyznaczeniem następujących parametrów: punktów pracy wentylatorów głównych przy szybach wentylacyjnych, rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej (kierunków, ilości oraz temperatury), rozkładu potencjałów w węzłach sieci, spadków ciśnienia na tamach wentylacyjnych, oporów aerodynamicznych w bocznicach oraz analizy stabilności prądów dla rejonów ścian. Ponadto, zaktualizowano schemat wentylacji kopalni, nanosząc wartości potencjałów, a także wyznaczono wypadkowy opór i otwór równoznaczny kopalni. Pomiary wykonano w dniu 17.11.2024 r.

Na podstawie wykonanego modelu oraz przeprowadzonych badań dla najważniejszych punktów sieci dokonano porównania dokładności odwzorowania (predykcji wskazań modelu) z rzeczywistymi wartościami zmierzonymi w trakcie badania.



**Rys. 132** Widok modelu sieci wentylacyjnej wykonanego w Badaniu F

| Ventsim DESIGN Preset Values |                             |                            |                       |              |                         |         |
|------------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------|-------------------------|---------|
| File                         | Edit                        |                            |                       |              |                         |         |
| Resistances                  |                             |                            |                       |              |                         |         |
| Friction Factors             |                             |                            |                       |              |                         |         |
| Shock Losses                 |                             |                            |                       |              |                         |         |
| Air Type                     |                             |                            |                       |              |                         |         |
| Primary Layers               |                             |                            |                       |              |                         |         |
| Secondary Layers             |                             |                            |                       |              |                         |         |
|                              | # in use (total all stages) | Friction Name              | Friction Factor kg/m³ | Roughness mm | Reference Density kg/m³ | Comment |
|                              | 4047                        | KORYTARZOWE (LP)           | 0.0165                | 0            | 1.2                     |         |
|                              | 882 (885)                   | KORYTARZOWE (LP) z odstawą | 0.0295                | 0            | 1.2                     |         |
|                              | 117 (125)                   | LUTNIA ELASTYCZNA 1200     | 0.0028                | 0            | 1.2                     |         |
|                              | 51                          | ŚCIANA (TYPOWA)            | 0.085                 | 0            | 1.2                     |         |

**Rys. 133** Wycinek wartości przypisanych współczynników opory FF (Friction Factors) w bocznicach wentylacyjnych w Badaniu F

W trakcie wykonywania zdjęcia potencjałów sieci wentylacyjnej wykorzystano następujące urządzenia pomiarowe:

- Ręczny barometr, barometr i termometr BAR-TH firmy JMD [139]

Zakresy pomiarowe:

ciśnienia:  $800 \div 1300 \text{ hPa} \pm 25 \text{ Pa}$

temperatury:  $-20 \div +40 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

wilgotności:  $0 \div 100 \text{ \% RH} \pm 1,8 \text{ \% (10-90\%)}$



**Rys. 134** Ręczny barometr, termometr i higrometr BAR-TH firmy JMD

- Ręczny anemometr wirnikowy RAW firmy JMD [140]

Zakresy pomiarowe:

przepływu:  $0,2 \div 20 \text{ m/s} \pm 1\%$

strumienia obj.:  $0 \div 9999 \text{ m}^3/\text{s}$

temperatury:  $-20 \div +40 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$



**Rys. 135** Ręczny anemometr wirnikowy RAW firmy JMD

- Dwuczujnikowy miernik ciśnienia MC-10/100-2/Ex [141]

Zakresy pomiarowe dla czujnika 1:

Ciśnienie:  $\pm 10 \text{ kPa} \pm 0,4\%$

Zakresy pomiarowe dla czujnika 2:

Ciśnienie:  $\pm 100 \text{ kPa} \pm 0,4\%$



**Rys. 136** Dwuczujnikowy miernik ciśnienia MC-10/100-2/Ex

Obliczenie potencjałów w węzłach sieci obliczane zostało zgodnie z równaniem (opisanym szczegółowo w rozdziale 2 niniejszej pracy): [104]

$$h=p-p_s \quad (35)$$

gdzie:

$p$  - ciśnienie powietrza kopalnianego pod wpływem depresji wentylatora głównego i depresji naturalnej [ $N/m^2$ ],

$p_s$  - ciśnienie powietrza suchego tworzącego atmosferę uwarstwioną izentropowo w sieci, które występowałoby w danym węźle bez działania wentylatora głównego i depresji naturalnej [ $N/m^2$ ].

Pomiary badania sieci wentylacyjnej kopalni zorganizowano w dniu wolnym od pracy na zmianie od godziny 6:00 – 14:00. W pomiarach brało udział 12 osób – pracownicy działu wentylacji i pracownicy obsługi pracy wentylatorów głównego przewietrzania.

Urządzenia pomiarowe przed i po zakończonym badaniu zostały sprawdzone w celu wyznaczeniu pomiaru błędów względem siebie (Tab. 29).

**Tabela 29** Wyznaczenie kompensacji błędów pomiarów względem urządzeń

| Urządzenie      | Ciśnienie barometryczne | Wyznaczenie wartości do kompensacji błędów pomiarów | Wartość kompensacji (należy dodać do wyników odczytanych przez poszczególne urządzenia) | Ciśnienie barometryczne - sprawdzenie |
|-----------------|-------------------------|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| typ/ nr         | Pa                      | Pa                                                  | Pa                                                                                      | Pa                                    |
| Bar-Th/063/2012 | 97631                   | 97618                                               | -13                                                                                     | 0,0                                   |
| Bar-Th/133/2019 | 97617                   | 97618                                               | 1                                                                                       | 0,0                                   |
| Bar-Th/163/2022 | 97610                   | 97618                                               | 8                                                                                       | 0,0                                   |
| Bar-Th/064/2012 | 97616                   | 97618                                               | 2                                                                                       | 0,0                                   |
| Bar-Th/148/2021 | 97609                   | 97618                                               | 9                                                                                       | 0,0                                   |
| Bar-Th/149/2021 | 97604                   | 97618                                               | 14                                                                                      | 0,0                                   |
| Bar-Th/164/2022 | 97619                   | 97618                                               | -1                                                                                      | 0,0                                   |
| Bar-Th/150/2021 | 97631                   | 97618                                               | -13                                                                                     | 0,0                                   |
| Bar-Th/151/2021 | 97621                   | 97618                                               | -3                                                                                      | 0,0                                   |
| Bar-Th/132/2019 | 97623                   | 97618                                               | -5                                                                                      | 0,0                                   |

W celu uwzględnienia zmiany wpływu zmiany ciśnienia barometrycznego na powierzchni wykonywano ciągły pomiar na zrębie szybu A wdechowego (tab. 30).

**Tabela 30** Wycinek pomiarów ciśnienia, temperatury i wilgotności na powierzchni kopalni w Badaniu G

|                                                        |                 |                         |                                   |                    |       |
|--------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------------------------|--------------------|-------|
| Typ przyrządu: BAR-TH                                  |                 | Nr przyrządu: 063/2012  |                                   |                    |       |
| Ciśnienie barometryczne na zrzebie szybu (kalibracja): |                 | -4Pa Uwzględniono       | Czas kalibracji (godzina: minuta) | 6:00               |       |
| Nr węzła<br>(ze schematu)                              | Czas            | Ciśnienie barometryczne | Temperatura sucha, ts             | Wilgotność wzgl. Φ | Uwagi |
|                                                        | godzina: minuta | Pa                      | °C                                | %                  |       |
| 0                                                      | 6:20            | 97609                   | 3.8                               | 62                 |       |
| 0                                                      | 6:35            | 97641                   | 3.8                               | 62                 |       |
| 0                                                      | 6:50            | 97667                   | 4.0                               | 62                 |       |
| 0                                                      | 7:05            | 97688                   | 4.0                               | 63                 |       |
| 0                                                      | 7:20            | 97693                   | 4.1                               | 63                 |       |

Pracownicy działu wentylacji wykonywali pomiar ciśnienia, temperatury, wilgotności w węzłach sieci z dokładnym uwzględnieniem czasu pomiaru, a następnie ilości oraz gabarytów w każdej bocznicy wentylacyjnej w której pomiar był możliwy w miejscach, gdzie ze względu np. krótki odcinek wyrobiska, pomiary ilości przepływającego powietrza wyznaczany był z bilansu powietrza bocznic przyległych (tab. 31).

**Tabela 31** Wycinek pomiarów ciśnienia, temperatury i wilgotności na dole kopalni w Badaniu G

|                                                        |                    |                            |                          |                                   |       |          |  |
|--------------------------------------------------------|--------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-------|----------|--|
| Typ przyrządu:                                         |                    | BAR-TH                     |                          | Nr przyrządu:                     |       | 064/2012 |  |
| Ciśnienie barometryczne na zrzebie szybu (kalibracja): |                    | 1Pa Uwzględniono           |                          | Czas kalibracji (godzina: minuta) |       | 6:00     |  |
| Nr węzła<br>(ze schematu)                              | Czas               | Ciśnienie<br>barometryczne | Temperatura<br>sucha, ts | Wilgotność<br>wzgl. Φ             | Uwagi |          |  |
|                                                        | godzina:<br>minuta | Pa                         | °C                       | %                                 |       |          |  |
| 84                                                     | 6:33               | 108947                     | 18.5                     | 39                                |       |          |  |
| 136                                                    | 6:49               | 108714                     | 18.9                     | 49                                |       |          |  |
| 235                                                    | 7:27               | 108168                     | 22.6                     | 55                                |       |          |  |
| 719                                                    | 8:00               | 106291                     | 26.6                     | 65                                |       |          |  |
| 722                                                    | 8:24               | 106260                     | 25.4                     | 62                                |       |          |  |

Równocześnie na stacji wentylatorów głównego przewietrzania wykonywany był ciągły pomiar ciśnień (przed zasuwą, za zasuwą oraz w szybie) oraz prędkości powietrza w kanałach wentylacyjnych łączących szyb i stację wentylatorów głównego przewietrzania.

#### **5.2.4. Analiza wyników - Badanie F**

W ramach Badania F przeprowadzono ocenę pracy sieci wentylacyjnej kopalni na podstawie pomiarów terenowych oraz porównania ich z wynikami symulacji w programie VentSim. Analiza podciśnienia w szybach C i E (tabele 32–34) wskazała stabilne wartości: dla szybu C mediana wyniosła 3950 Pa, natomiast dla szybu E 3075 Pa. Dane te zostały wykorzystane do wyznaczenia punktów pracy wentylatorów głównego przewietrzania, które następnie porównano z symulacjami komputerowymi (rys. 137 i rys. 138). Różnice pomiędzy wartościami zmierzonymi a modelowanymi były niewielkie i wynosiły odpowiednio –2,54% dla szybu C i 3,91% dla szybu E (tabele 39–40), co świadczy o dobrej kalibracji modelu numerycznego.

Bilans ilości powietrza w kopalni (tabela 35) wykazał wysoką zgodność sum strumieni wlotowych i wylotowych – różnica wyniosła jedynie 850 m<sup>3</sup>/min. Obliczenia mocy prądu powietrza w rejonach ścianowych (tabela 36) potwierdziły występowanie stabilnych prądów przepływu powietrza: w rejonach ścian 1, 2 i 4 zostały zaklasyfikowane jako „bardzo mocne”, natomiast w ścianach 3 i 5 jako „mocne”, przy różnicach ciśnień  $\Delta p$  mieszczących się w zakresie od 75 Pa do 896 Pa.

Na podstawie pomiarów wyznaczono także wartości otworu równoznacznego (tabela 37), które wyniosły: 11,88 m<sup>2</sup> dla całej kopalni, 7,20 m<sup>2</sup> dla podsieci szybu C oraz 4,73 m<sup>2</sup> dla podsieci szybu E. Porównanie ilości powietrza z pomiarów i symulacji (tabela 38) potwierdziło bardzo dobrą zgodność – średni błąd 5,8%.

Analiza błędów względnych (tabele 41–42) wskazała, że największe odchylenia dotyczyły wartości potencjałów wylotowych z rejonów ścianowych, gdzie różnice względem pomiarów osiągały średnio – 26,8%.

**Tabela 32** Wycinek pomiarów podciśnienia w szybie E w Badaniu E

|                  |                           |                        |                       |
|------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| POMIAR WG Szyb E |                           | Data/Zmiana:           | 17.11.2024 r. Zm. "A" |
| Typ przyrządu:   | AKPiA                     |                        |                       |
| Czas             | Podciśnienie przed zasuwą | Podciśnienie za zasuwą | Podciśnienie w szybie |
| godzina: minuta  | Pa                        | Pa                     | Pa                    |
| 07:00            | 3350                      | 3300                   | 3100                  |
| 09:00            | 3300                      | 3250                   | 3100                  |
| 11:00            | 3250                      | 3200                   | 3050                  |
| 13:00            | 3300                      | 3250                   | 3050                  |
| Mediana          | 3300                      | 3250                   | 3075                  |

**Tabela 33** Wycinek pomiarów podciśnienia w szybie C (wentylator W-1) w Badaniu E

|                  |                           |                        |                       |
|------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| POMIAR WG Szyb C |                           | Data/Zmiana:           | 17.11.2024 r. Zm. "A" |
| Typ przyrządu:   | AKPiA                     |                        |                       |
| Czas             | Podciśnienie przed zasuwą | Podciśnienie za zasuwą | W szybie              |
| godzina: minuta  | Pa                        | Pa                     | Pa                    |
| 07:00            | 4300                      | 4250                   | 4050                  |
| 09:00            | 4300                      | 4250                   | 4050                  |
| 11:00            | 4250                      | 4200                   | 3850                  |
| 13:00            | 4250                      | 4200                   | 3850                  |
| MEDIANA          | 4275                      | 4225                   | 3950                  |

**Tabela 34** Wycinek pomiarów podciśnienia w szybie C (wentylator W-2) w Badaniu E

|                      |                           |                        |                       |
|----------------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|
| POMIAR WG Szyb C W-2 |                           | Data/Zmiana:           | 17.11.2024 r. Zm. "A" |
| Typ przyrządu:       | AKPiA                     | Nr przyrządu:          |                       |
| Czas                 | Podciśnienie przed zasuwą | Podciśnienie za zasuwą | W szybie              |
| godzina: minuta      | Pa                        | Pa                     | Pa                    |
| 07:00                | 4350                      | 4300                   | 4050                  |
| 09:00                | 4400                      | 4350                   | 4050                  |
| 11:00                | 4350                      | 4300                   | 3850                  |
| 13:00                | 4400                      | 4350                   | 3850                  |
| MEDIANA              | 4375                      | 4325                   | 3950                  |



**Tabela 35** Bilans ilości powietrza na podstawie pomiarów w Badaniu E

| Szyb A<br>m <sup>3</sup> /min                     | Szyb B<br>m <sup>3</sup> /min | Szyb D<br>m <sup>3</sup> /min | Szyb C<br>m <sup>3</sup> /min | Szyb E<br>m <sup>3</sup> /min | Połączenie<br>z sąsiednią<br>kopalnią<br>m <sup>3</sup> /min |
|---------------------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| <b>1080</b>                                       | 230                           | 8050                          | 490                           | 13230                         | 1010                                                         |
| <b>120</b>                                        | 570                           |                               | 1060                          |                               | 930                                                          |
| <b>560</b>                                        | 20                            |                               | 1500                          |                               |                                                              |
| <b>80</b>                                         | 1310                          |                               | 6790                          |                               |                                                              |
| <b>2530</b>                                       | 2030                          |                               | 6620                          |                               |                                                              |
| 5200                                              | 2990                          |                               | 6360                          |                               |                                                              |
| 2410                                              | 6520                          |                               |                               |                               |                                                              |
| 450                                               | 160                           |                               |                               |                               |                                                              |
| 770                                               | 260                           |                               |                               |                               |                                                              |
| 1350                                              | 450                           |                               |                               |                               |                                                              |
| Wloty - suma                                      |                               |                               | Wyloty - suma                 |                               |                                                              |
| 14550                                             | 14540                         | 8050                          | 22820                         | 13230                         | 1940                                                         |
|                                                   | 37140                         |                               |                               | 37990                         |                                                              |
| 850 (Różnica pomiędzy wlotem i wylotem z kopalni) |                               |                               |                               |                               |                                                              |

**Tabela 36** Moc prądu powietrza na podstawie pomiarów w kopalni w Badaniu F

| MOC PRĄDU POWIETRZA -<br>REJONT |                   | Rejon<br>ściany 1 | Rejon<br>ściany 2 | Rejon<br>ściany 3 | Rejon<br>ściany 4 | Rejon<br>ściany 5 |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Potencjał wylot z rejonu        | Pa                | -2877             | -2788             | -2270             | -2824             | -2157             |
| Potencjał wlot do rejonu        | Pa                | -1981             | -2167             | -2025             | -2527             | -2082             |
| Ilość powietrza                 | m <sup>3</sup> /s | 22                | 25                | 23                | 27                | 20                |
| N <sub>f</sub>                  | W                 | 19413             | 15525             | 5717              | 7920              | 1500              |
| Δp                              | Pa                | 896               | 621               | 245               | 297               | 75                |
| Moc prądu                       | -                 | Bardzo<br>mocny   | Bardzo<br>mocny   | Mocny             | Bardzo<br>mocny   | Mocny             |

**Tabela 37** Obliczenie otworu równoznacznego na podstawie pomiarów w Badaniu F

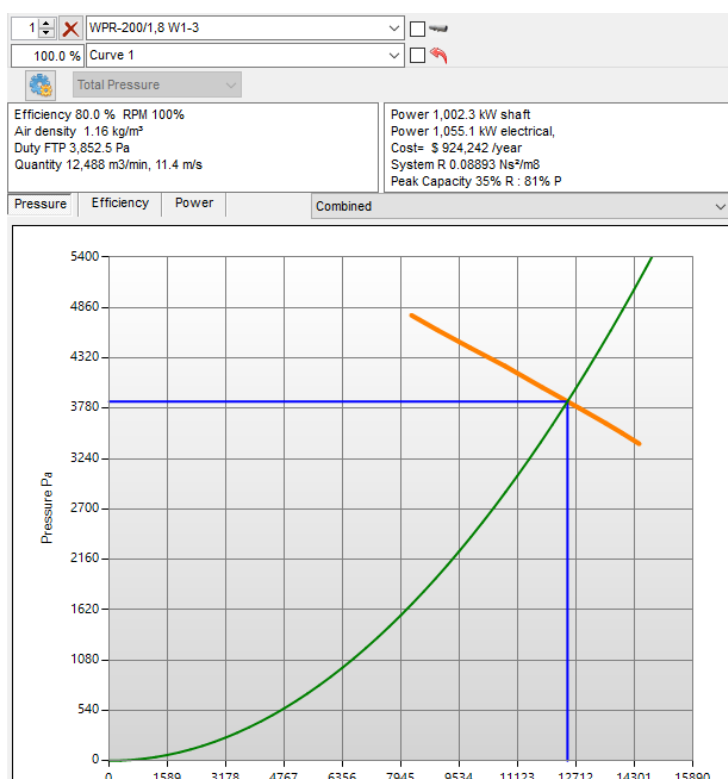
|                                              |                       |
|----------------------------------------------|-----------------------|
| Wypadkowy otwór równoznaczný kopalni wynosi: | A=11,88m <sup>2</sup> |
| Otwór równoznaczný podsieci szybu C wynosi:  | A=7,20 m <sup>2</sup> |
| Otwór równoznaczný podsieci szybu E wynosi:  | A=4,73 m <sup>2</sup> |

**Tabela 38** Porównanie wyników ilości powietrza w szybach pomiarów rzeczywistych do symulacji  
w Badaniu F

|                           |        | Szyb A | Szyb B | Szyb D | Szyb C | Szyb E | Połączenie<br>z sąsiednią<br>kopalnią | Błąd średni (MBE) | Średni błąd<br>kwadratowy (RMSE) |
|---------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------------------------|-------------------|----------------------------------|
| <b>Pomiary</b>            | m3/min | 14550  | 14540  | 8050   | 22820  | 13230  | 1940                                  |                   |                                  |
| <b>VentSim</b>            | m3/min | 13999  | 14726  | 8128   | 23711  | 13159  | 2040                                  |                   |                                  |
| <b>Różnica</b>            | Pa     | 551    | -186   | -78    | -891   | 71     | -100                                  |                   |                                  |
| <b>Błąd względny (RE)</b> | %      | 3.9%   | -1.3%  | -1.0%  | -3.8%  | 0.5%   | -4.9%                                 | -2.1%             | 2.9%                             |

**Tabela 39** Porównanie wyników punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania przy szybie C pomiarów rzeczywistych do symulacji w Badaniu F

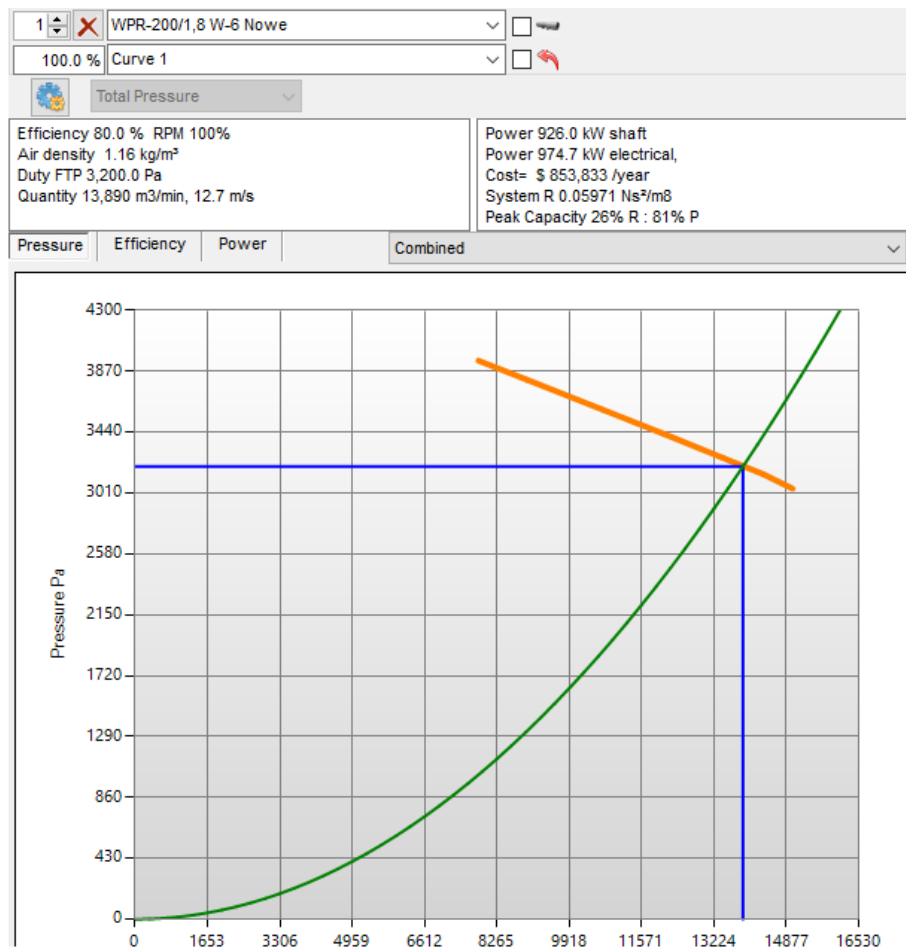
| Wentylatory (WG) przy szybie C |        |
|--------------------------------|--------|
| Ciśnienie przed zasuwą, Pa     |        |
| Pomiary AKPiA                  | -3950  |
| VentSim                        | -3852  |
| Błąd względny (RE)             | -2,54% |



**Rys. 137** Wynik punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania przy szybie C w oprogramowaniu VentSim w Badaniu F

**Tabela 40** Porównanie wyników punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania przy szybie E pomiarów rzeczywistych do symulacji w Badaniu F

| Wentylatory przy szybie E  |       |
|----------------------------|-------|
| Ciśnienie przed zasuwą, Pa |       |
| Pomiary AKPiA              | -3075 |
| VentSim                    | -3200 |
| Błąd względny (RE)         | 3,91% |



**Rys. 138** Wynik punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania przy szybie E w oprogramowaniu VentSim w Badaniu F

**Tabela 41** Wyniki analizy błędów względnych względem wartości pomiarowej w Badaniu F

|                                            |        | <b>Rejon<br/>ściany 1</b> | <b>Rejon<br/>ściany 2</b> | <b>Rejon<br/>ściany 3</b> | <b>Rejon<br/>ściany 4</b> | <b>Rejon<br/>ściany 5</b> | <b>Błąd średni<br/>(MBE)</b> | <b>Średni błąd<br/>kwadratowy<br/>(RMSE)</b> |
|--------------------------------------------|--------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------------------------|
| <b>Potencjał wylot z rejonu z pomiarów</b> | Pa     | -2877                     | -2788                     | -2270                     | -2824                     | -2157                     |                              |                                              |
| <b>Potencjał wylot z rejonu z VentSim</b>  | Pa     | -2400.4                   | -2279                     | -1650.6                   | -2479                     | -1622.2                   |                              |                                              |
| <b>Różnica</b>                             | Pa     | -476.6                    | -509                      | -619.4                    | -345                      | -534.8                    |                              |                                              |
| <b>Błąd względny (RE)</b>                  | %      | -19.9%                    | -22.3%                    | -37.5%                    | -13.9%                    | -33.0%                    | -25.3%                       | 26.8%                                        |
| <b>Potencjał wylot z rejonu z pomiarów</b> | Pa     | -1981                     | -2167                     | -2025                     | -2527                     | -2082                     |                              |                                              |
| <b>Potencjał wylot z rejonu z VentSim</b>  | Pa     | -2225.6                   | -1787.1                   | -1506.1                   | -2143.8                   | -1575.1                   |                              |                                              |
| <b>Różnica</b>                             | Pa     | 244.6                     | -379.9                    | -518.9                    | -383.2                    | -506.9                    |                              |                                              |
| <b>Błąd względny (RE)</b>                  | %      | 11.0%                     | -21.3%                    | -34.5%                    | -17.9%                    | -32.2%                    | -19.0%                       | 25.0%                                        |
| <b>Ilość powietrza z pomiarów</b>          | m3/min | 1300                      | 1500                      | 1400                      | 1600                      | 1200                      |                              |                                              |
| <b>Ilość powietrza z VenSim</b>            | m3/min | 1272                      | 1411                      | 1490                      | 1716                      | 1127                      |                              |                                              |
| <b>Różnica</b>                             | m3/min | 28                        | 89                        | -90                       | -116                      | 73                        |                              |                                              |
| <b>Błąd względny (RE)</b>                  | %      | 2.2%                      | 6.3%                      | -6.0%                     | -6.8%                     | 6.5%                      | 0.4%                         | 5.8%                                         |

**Tabela 42** Wyniki analizy błędów względnych względem wartości odniesienia (maksymalnej w pomiarach) w Badaniu F

|                                                                                                 |                     | <b>Rejon<br/>ściany<br/>1</b> | <b>Rejon<br/>ściany<br/>2</b> | <b>Rejon<br/>ściany<br/>3</b> | <b>Rejon<br/>ściany<br/>4</b> | <b>Rejon<br/>ściany<br/>5</b> | <b>Błąd<br/>średni<br/>(MBE)</b> | <b>Średni błąd<br/>kwadratow<br/>y (RMSE)</b> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>Potencjał wylot z rejonu<br/>z pomiarów</b>                                                  | Pa                  | -2877                         | -2788                         | -2270                         | -2824                         | -2157                         |                                  |                                               |
| <b>Potencjał wylot z rejonu z VentSim</b>                                                       | Pa                  | -2400                         | -2279                         | -1650                         | -2479                         | -1622                         |                                  |                                               |
| <b>Znormalizowany błąd względny (względem wartości odniesienia 4375 Pa) NRE</b>                 | %                   | -10.9%                        | -11.6%                        | -14.2%                        | -7.9%                         | -12.2%                        | -11.4%                           | 11.5%                                         |
| <b>Potencjał wylot z rejonu<br/>z pomiarów</b>                                                  | Pa                  | -1981                         | -2167                         | -2025                         | -2527                         | -2082                         |                                  |                                               |
| <b>Potencjał wylot z rejonu z VentSim</b>                                                       | Pa                  | -2225                         | -1787                         | -1506                         | -2143                         | -1575                         |                                  |                                               |
| <b>Znormalizowany błąd względny (względem wartości odniesienia 4375 Pa) NRE</b>                 | %                   | 5.6%                          | -8.7%                         | -11.9%                        | -8.8%                         | -11.6%                        | -7.1%                            | 9.6%                                          |
| <b>Ilość powietrza z pomiarów</b>                                                               | m <sup>3</sup> /min | 1300                          | 1500                          | 1400                          | 1600                          | 1200                          |                                  |                                               |
| <b>Ilość powietrza z VenSim</b>                                                                 | m <sup>3</sup> /min | 1272                          | 1411                          | 1490                          | 1716                          | 1127                          |                                  |                                               |
| <b>Znormalizowany błąd względny (względem wartości odniesienia 37140 m<sup>3</sup>/min) NRE</b> | %                   | -0.08%                        | -0.24%                        | 0.24%                         | 0.31%                         | -0.20%                        | 0.01%                            | 0.23%                                         |

### 5.3. Wnioski z porównania wyników badań E i F

Wyznaczone wartości współczynników oporu w badaniu E pozwoliły na dostatecznie dokładne odwzorowanie sieci wentylacyjnej w badaniu F. W związku z występowaniem wielu czynników podczas wykonywania badań sieci wentylacyjnych, takich jak:

- zmiany ciśnienia barometrycznego podczas pomiarów,
- pulsacyjny charakter przepływu turbulentnego powietrza,
- dokładność urządzeń pomiarowych,
- zmiany w stanie sieci wentylacyjnej (np. otwieranie tam wentylacyjnych, ruch transportowy),
- niewielkie spadki ciśnienia w krótkich bocznicach,
- lokalne źródła energii,
- nierówności spągu (określanie koty niwelacyjnej pomiaru),
- niedokładności w wyznaczaniu przekroju wyrobiska i średniej prędkości powietrza,
- zmienność współczynnika chropowatości,
- błędy ludzkie przy odczycie danych pomiarowych oraz inne.

Opieranie się wyłącznie na obliczeniach sieci wentylacyjnych i bezkrytyczne przenoszenie ich wyników do modelu VentSim może prowadzić do błędów, takich jak zasymulowanie nieprawidłowej ilości powietrza w wielu bocznicach, a nawet błędne kierunki przepływu.

Obliczone w badaniu błędy wynoszą:

- dla ilości powietrza w szybach: błąd średni (MBE) -2,1%, średni błąd kwadratowy (RMSE) 2,9%,
- dla punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania: błąd względny (RE) od -2,54% do +3,91%,
- dla ilości powietrza w rejonach eksploatacyjnych ścian: błąd średni (MBE) 0,4%, średni błąd kwadratowy (RMSE) 5,8%
- dla potencjałów wlotowych w rejonach eksploatacyjnych ścian: błąd średni (MBE) -19,0%, średni błąd kwadratowy (RMSE) 25,0%,
- dla potencjałów wylotowych w rejonach eksploatacyjnych ścian: błąd średni (MBE) -25,3%, średni błąd kwadratowy (RMSE) 26,8%

Określone w badaniu znormalizowane błędy względne (względem punktu odniesienia – maksymalnych wartości w sieci) wynoszą:

- dla ilości powietrza w rejonach eksploatacyjnych ścian: błąd średni (MBE) -0,01%, średni błąd kwadratowy (RMSE) 0,23%
- dla potencjałów wlotowych w rejonach eksploatacyjnych ścian: błąd średni (MBE) -7,1%, średni błąd kwadratowy (RMSE) 9,6%,
- dla potencjałów wylotowych w rejonach eksploatacyjnych ścian: błąd średni (MBE) -11,4%, średni błąd kwadratowy (RMSE) 11,5%.

Przedstawione powyżej wartości błędów, odnoszą się do wartości zmierzonych na dole kopalni z założeniem, że te pomiary są punktem odniesienia w porównaniu do wyników obliczonych w modelu numerycznym. Przeprowadzona analiza w Rozdziale 9 (Analiza poziomu błędów w wyznaczaniu spadków naporów bocznic wentylacyjnych w kopalnianej sieci wentylacyjnej) wykazała, że wyznaczone wartości potencjałów oraz ilości powietrza obarczone są również znacznymi wartościami błędów.

Uzyskano bardzo dobrą zgodność ilości powietrza w szybach oraz dobrą zgodność ilości powietrza w rejonach ścian. Punkty pracy wentylatorów głównego przewietrzania również uzyskały bardzo dobrą zgodność w porównaniu do warunków rzeczywistej pracy.

W zakresie obliczonych potencjałów, obliczone wartości w modelu numerycznym obarczone są znacznie większymi błędami. Potwierdza to konieczność bardziej dokładnego pomiaru oporów w grupowych prądach powietrza kopalni, aby można było zwiększyć wiarygodność generowanych symulacji.

Należy jednak pamiętać, że wartości wyników zdjęcia potencjalnego nie zostały wprowadzone do modelu (z wyjątkiem szybów). Symulacja w programie VentSim opierała się tylko na podstawie: modelu struktury sieci 3D, znanych oporach tam wentylacyjnych, szerokości i wysokości wyrobiska (w miejscu wykonywania pomiarów ilości powietrza), przypisanemu współczynnikowi oporu (odpowiednio do funkcji jaką wyrobisko pełniło – wartości z tabeli 28 w badaniu E). Oddziaływanie depresji cieplnej w modelu odbyło się automatycznie na podstawie znanego stopnia geotermicznego kopalni, szacunkowego czasu przewietrzania wyrobisk, temperatury suchej i wilgotności względnej powietrza wlotowego do kopalni w dniu pomiarów.

Średnie wartości współczynnika oporu  $k_{1,2}$  (FF) wyniosły:

- 0,0321 kg/m<sup>3</sup> dla szybów,
- 0,0165 kg/m<sup>3</sup> dla wyrobisk w obudowie ŁP bez odstawy,
- 0,0295 kg/m<sup>3</sup> dla wyrobisk w obudowie ŁP z odstawą,
- 0,0851 kg/m<sup>3</sup> dla wyrobisk ścianowych.



W trakcie wdrożeń oprogramowania VentSim oraz prowadzonych badań zwrócono szczególną uwagę na konieczność dokładnego poznania gabarytów wyrobisk oraz ujawniła się potrzeba opracowania nowej metody badania i odwzorowania sieci wentylacyjnej, opartej na nowoczesnych technologiach skaningu laserowego. Propozycja nowej metody, została opisana w kolejnym rozdziale pracy.

## **6. Nowa metoda budowy modelu wentylacyjnego kopalni w oparciu o skaningu laserowy**

### **6.1. Definicja problemu**

Rozwój technologii skaningu laserowego już od kilku lat z powodzeniem jest stosowany w polskich kopalniach, ale tylko w działach mierniczo-geologicznych lub BHP (dokumentacja miejsca wypadku). W Polsce trwają próby wykorzystania na skalę przemysłową skaningu w projekcie VOK3D [114], jednakże projekt ten do symulacji wykorzystuje metodę elementów skończonych (CFD). Na świecie, jak pokazano w rozdziale 2 (Przegląd literatury i stan wiedzy) trwają intensywne wdrożenia i badania w celu wykorzystania tej technologii w symulowaniu wentylacji kopalń czy robotyce.

Dostępne oprogramowania do analizy wykonanych skanów nie są projektowane (programowane) pod kątem wentylacji kopalń, a jeżeli już jakieś elementy znajdują się to moduły te są bardzo drogie i raczej z myślą o górnictwie miedziowym. Koszty oprogramowania często przewyższają koszty zakupu skanerów i brak wpływu na kod źródłowy.

W kontekście opracowania nowej metody budowy modelu wentylacyjnego 3D, opartego na skaningu laserowym, integracji z czujnikami oraz wyznaczeniu kluczowych parametrów wentylacyjnych, wyłaniają się następujące kluczowe zagadnienia wymagające rozwiązania:

- Geolokalizacja: Jak efektywnie skrócić czas skanowania i jednocześnie ograniczyć konieczność wykorzystania pełnej geolokalizacji?
- Synchronizacja danych: W jaki sposób zintegrować i połączyć dane z wielu źródeł (np. z różnych czujników i skanerów) w jednym spójnym modelu?
- Zmiana oporów na długości sieci wentylacyjnej ( $R(s)$ ): Jak dokładnie wyznaczyć zmienność oporów na długości bocznic wentylacyjnych, uwzględniając zmiany warunków?
- Moc obliczeniowa i redukcja danych: Jak ograniczyć ilość przetwarzanych danych bez utraty kluczowych informacji niezbędnych dla modelu wentylacyjnego?
- Czyszczenie chmury punktów: Jak skutecznie usunąć szum i dane zbędne z chmury punktów, zachowując najistotniejsze cechy geometryczne i strukturalne?
- Dokładność odwzorowania: Jakie są limity dokładności nowej metody w kontekście dryfu i potencjalnych błędów odwzorowania w trakcie tworzenia modelu?

- Drobniejsze kwestie technologiczne: Jak zoptymalizować procesy skanowania i przetwarzania, aby poprawić efektywność i skalowalność metody w różnych środowiskach?

Rozwiązanie powyższych problemów jest kluczowe dla stworzenia precyzyjnego i efektywnego modelu 3D, który znajdzie zastosowanie w analizie sieci wentylacyjnych i optymalizacji ich parametrów pracy.

## 6.2. Opracowanie nowej metody budowy modelu sieci wentylacyjnej

W czasie wykonywanych testów używano trzech typów skanerów ręcznych. Zestawienie podstawowych parametrów obrazuje tabela 43.

**Tabela 43** Porównanie ręcznych skanerów 3D które brały udział w testach przy opracowywaniu nowej metody budowania modelu sieci wentylacyjnej

| Parametr                  | BLK2GO                                       | Hovermap ST                                                      | FARO Orbis                          |
|---------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Zasięg                    | 0.5–25 m                                     | 0.4–100 m                                                        | 120 m                               |
| Dokładność pomiaru        | ±3 mm @ 10 m,<br>±10 mm w<br>pomieszczeniach | ±20 mm (ogólnie),<br>±15 mm (wewnątrz),<br>±5 mm (zmiany)        | 5 mm (mobilny),<br>2 mm (statyczny) |
| Szybkość skanowania       | 420 000 pkt/s                                | 300 000 pkt/s (Single<br>Return), 600 000 pkt/s<br>(Dual Return) | 640 000 pkt/s                       |
| Pole widzenia             | 270° (pionowy), 360°<br>(poziomy)            | 360° (sferyczne)                                                 | 360° x 290°                         |
| Liczba kanałów LiDAR      | 1 kanał                                      | 16 kanałów                                                       | 32 kanały                           |
| Technologia przetwarzania | SLAM                                         | SLAM                                                             | SLAM                                |
| Waga urządzenia           | 0.9 kg                                       | 1.8 kg                                                           | 3.5 kg                              |
| Czas pracy na baterii     | ~45 minut                                    | ~2 godziny                                                       | ~4 godziny                          |

W celu osiągnięcia założonych celów przy opracowywaniu nowej metody (brak konieczności geolokalizacji, specjalistycznego oprogramowania, szybkość obliczeń itp.) wykonano kilkaset roboczych algorytmów w języku Python. Samych prób związanym z określania lokalnych współczynników oporu było 92.

Zaproponowana poniżej metoda pozwala dokładniejsze budowanie modeli sieci wentylacyjnych bez konieczności pomiarów wentylacyjnych (z wyjątkiem wyznaczania charakterystyk wentylatorów głównego przewietrzania, wyznaczeniu oporów na tamach wentylacyjnych, wyznaczenia właściwości termodynamicznych górotworu i powietrza wlotowego do kopalni).

Metoda również jest przygotowana na kompleksowe łączenie różnych przyrządów pomiarowych do pomiaru gazów ( $O_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ , i innych), temperatury i wilgotności ( $t_s$ ,  $\phi$ ) oraz barometrów ( $p$ ). Kluczową koniecznością przy zastosowaniu dodatkowych przyrządów jest funkcja zapisywania ciągłego wartości pomiarów w pamięci urządzenia i dokładnej synchronizacji zegarów wszystkich urządzeń.

W odróżnieniu od klasycznego badania sieci wentylacyjnej (pomiar ciśnienia w węzłach sieci), pomiar odbywa się przez analizę chmury punktów (wykonanego skaningu wyrobiska) bezpośrednio w bocznicy dzieląc ją na segmenty, a wyznaczony opór jest sumą algebraiczną oporów poszczególnych segmentów.[81]

$$R_{\text{bocznicy}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (36)$$

Gdzie:

$R_{\text{bocznicy}}$  – opór bocznicy wentylacyjnej,

$R_n$  – opór cząstkowy kolejnego segmentu (kolejnego mb bocznicy).

### **6.3. Matematyczny opis nowej metody**

Opis symboli użytych w metodzie budowy modelu sieci wentylacyjnej na podstawie skaningu laserowego został przedstawiony w tabeli 44.

**Tabela 44** Symbole użyte w metodzie budowy modelu sieci wentylacyjnej na podstawie skaningu laserowego.

| Symbol            | Opis                                                                                                                        | Jednostka      |
|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| $P_o$             | Współrzędne punktu początkowego dla chmury punktów (najczęściej (0,0,0))                                                    | m              |
| $P_s$             | Współrzędne początkowego punktu węzła sieci pod ziemią (od którego zaczyna się skanowanie)                                  | m              |
| $P_{kp}$          | Współrzędne punktu końcowego skanowania (drugi węzłem sieci na którym kończy się skanowanie)                                | m              |
| $P_k$             | Współrzędne wyznaczone na podstawie najdalszego odcinka od $P_o$ i współrzędnej $\bar{P}_{kula}$                            | m              |
| $\vec{T}$         | Wektor przesunięcia chmury punktów (z punktu (0,0,0) do $P_o$ )                                                             | m              |
| $\vec{v}_o$       | Wektor od $P_o$ do środka punktów w kuli (kierunek lokalny)                                                                 | m              |
| $\vec{v}_{kp}$    | Wektor między punktami $P_o$ i $P_{kp}$                                                                                     | m              |
| $[K]$             | Macierz antysymetryczna utworzona z iloczynu wektorowego $\vec{v}_o \times \vec{v}_{kp}$                                    | -              |
| $R$               | Macierz obrotu przekształcająca $\vec{v}_o$ w $\vec{v}_{kp}$                                                                | (3x3)          |
| $\bar{P}_{kula}$  | Średni punkt w kuli o promieniu 10 m wokół najdalszego punktu                                                               | m              |
| $P_i$             | Pozycja i-tego punktu chmury: $P_i = (x_i, y_i, z_i)$                                                                       | m              |
| $C_k$             | Centroid (środek ciężkości) segmentu k wzdłuż osi tunelu                                                                    | m              |
| $N_k$             | Liczba punktów w segmencie k                                                                                                | -              |
| $\vec{e}_y^{(k)}$ | Jednostkowy wektor kierunku lokalnej osi tunelu dla segmentu k                                                              | -              |
| $\vec{e}_z^{(k)}$ | Jednostkowy wektor prostopadły do $\vec{e}_y^{(k)}$ , wskazujący lokalnie "w górę"                                          | -              |
| $\vec{e}_x^{(k)}$ | Jednostkowy wektor lokalnej osi poprzecznej,                                                                                | -              |
| $P_k$             | Zbiór punktów należących do segmentu k, tj. takich, które znajdują się w odległości $\leq 0,5$ m od $C_k$ wzdłuż osi tunelu | -              |
| $P_i^{xz}$        | Rzut punktu $P_i$ na lokalną płaszczyznę XZ segmentu k                                                                      | m              |
| $S_{lok}$         | Środek ciężkości punktów rzutowanych w lokalnym układzie segmentu k                                                         | m              |
| $M_k$             | Liczba punktów po rzutowaniu do lokalnego układu segmentu k                                                                 | -              |
| $R_i$             | Odległość punktu $P_i^{xz}$ od lokalnego środka ciężkości $S_{lok}$                                                         | m              |
| $R_{maks}$        | Średnia z 25% największych wartości $R_i$ ; przybliżenie „zewnątrznego promienia” profilu                                   | m              |
| $R_{średnia}$     | Średnia z wartości $R_i$ ; przybliżenie „średniego promienia” profilu                                                       | m              |
| $\epsilon$        | Chropowatość względna                                                                                                       | m              |
| $D$               | Efektywna średnica przekroju poprzecznego tunelu                                                                            | m              |
| $\lambda$         | Bezwymiarowy współczynnik oporu przepływu Darsiego–Weisbacha                                                                | -              |
| $A$               | Pole przekroju poprzecznego profilu, przy założeniu jego przybliżenia jako koła                                             | m <sup>2</sup> |

Algorytm przetwarzania chmury punktów realizowany jest w następujących krokach:

**Dla zeskanowanych punktów w przestrzeni:**

$$P_i = (x_i, y_i, z_i) \quad (37)$$

Znając współrzędne punktu  $P_s$  oraz  $P_k$  – punkty rozpoczęcia skanowania i zakończenia skanowania w węzłach sieci wentylacyjnej.

**Przesunięcie chmury punktów o wektor przesunięcia z punktu  $P_0(0,0,0)$  do  $P_s$**

$$P'_i = P_i + \vec{T}, \quad \vec{T} = (x_1, y_1, z_1) \quad (38)$$

**Wektor odniesienia i średnie współrzędne**

Dla danego punktu początkowego  $P_0$  oraz punktu końcowego  $P_{pk}$ , najpierw znajduje się punkt najdalszy od  $P_0$ , a następnie wyznacza się średnią współrzędnych punktów w kuli o promieniu  $r=10$  m wokół tego punktu.

Wektor od  $P_0$  do średniego punktu (lokalny kierunek tunelu):

$$\vec{v}_o = \bar{P}_{kula} - P_0 \quad (39)$$

Wektor odniesienia (teoretyczny kierunek tunelu na podstawie punktów kontrolnych):

$$\vec{v}_{kp} = P_{kp} - P_0 \quad (40)$$

**Macierz obrotu**

Obliczana jest macierz obrotu  $R$ , która przekształca wektor  $\vec{v}_o$  na  $\vec{v}_{kp}$ , zgodnie z równaniem Rodrigueza:

$$R = I + [K] + [K]^2 \cdot \left( \frac{1 - \vec{v}_o \cdot \vec{v}_{kp}}{\|\vec{v}_o \times \vec{v}_{kp}\|^2} \right) \quad (41)$$

gdzie  $[K]$  to macierz antysymetryczna utworzona z iloczynu wektorowego  $\vec{v}_o \times \vec{v}_{kp}$

**Podział chmury punktów na segmenty co 1 m**

centroidy obliczane są co 1 metr wzdłuż osi tunelu:

$$C_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} P_i \text{ dla } y_i \in [k, k+1) \quad (42)$$

**Tworzenie lokalnych układów współrzędnych**

Dla każdego segmentu  $k$ :

- Kierunek osi tunelu (wektor jednostkowy):

$$\vec{e}_y^{(k)} = \frac{C_{k+1} - C_k}{\|C_{k+1} - C_k\|} \quad (43)$$

- Wektor pionowy prostopadły do osi tunelu

$$\vec{e}_z^{(k)} = \text{wektor pionowy, prostopadły do } \vec{e}_y^{(k)}$$

- Trzeci wektor układu lokalnego:

$$\vec{e}_x^{(k)} = \vec{e}_z^{(k)} \times \vec{e}_y^{(k)} \quad (44)$$

Wektory te tworzą ortonormalną bazę układu lokalnego dla każdego segmentu.

### **Rzutowanie punktów na lokalną płaszczyznę przekroju XZ**

- Wybieramy tylko punkty w pobliżu danego przekroju (+/- 0,5m od płaszczyzny lokalnego układu współrzędnych):

$$P_k = \{P_i: |(P_i - C_k) \cdot \vec{e}_y^{(k)}| \leq 0.5m\} \quad (45)$$

- Rzutowanie na płaszczyznę lokalną (prostopadłą do osi tunelu):

$$P_i^{xz} = P_i - [(P_i - C_k) \cdot \vec{e}_y^{(k)}] \cdot \vec{e}_y^{(k)} \quad (46)$$

### **Wyznaczanie lokalnych środków ciężkości punktów przekroju**

$$S_{lok} = \frac{1}{M_k} \sum_{i=1}^{M_k} P_i^{xz} \quad (47)$$

### **Wyznaczanie promieni punktów od środka ciężkości**

$$R_i = \|P_i^{xz} - S_{lok}\| \quad (48)$$

Następnie wartości  $R_i$  są sortowane niemalejąco.

$$R_{(1)} \leq R_{(2)} \leq \dots \leq R_{(M_k)} \quad (49)$$

### **Wyznaczanie promieni maksymalnych i średnich**

- Promień maksymalny (średnia z 25% najdalszych punktów):

$$R_{maks} = \frac{1}{[0.25M_k]} \sum_{i=1}^{[0.25M_k]} R_{(M_k-i+1)} \quad (50)$$

- Promień średni (średnia z wszystkich punktów):

$$R_{\text{średnia}} = \frac{1}{M_k} \sum_{i=1}^{M_k} R_{(i)} \quad (51)$$

### **Chropowatość względna (szacowana wg Darcy-Weisbach)**

$$\varepsilon = R_{maks} - R_{\text{średnia}} \quad (52)$$

### **Efektywna średnica przekroju**

$$D = 2 \cdot R_{maks} \quad (53)$$

### **Bezwymiarowy współczynnik oporu dla przepływu turbulentnego**

Założono występowanie przepływu turbulentnego  $Re > 4000$ , wór Haalanda

$$\lambda = \left( 1.14 - 2 \log_{10} \left( \frac{\varepsilon}{D} \right) \right)^{-2} \quad (54)$$

### **Pole przekroju (przybliżone kołem)**

$$A = \pi R_{maks}^2 \quad (55)$$

## **6.4. Opis nowej metody budowy modelu wentylacyjnego 3D w oparciu o skaniny laserowe**

### **Etap I**

Tworzymy plik z numerami węzłów sieci wentylacyjnej w której określone są współrzędne punktów x, y, z i zapisujemy do pliku point.csv. Nie ma potrzeby w dokładnego określania wszystkich punktów węzłów sieci (faktycznie potrzeba określić tylko punkty rozpoczęcia i zakończenia początkowego skanu). Punkty muszą mieć współrzędne zgodnie z obowiązującą osnową (mapy górnicze).

### **Etap II**

Wykonanie skanów wyrobisk bez konieczności określania geolokalizacji, pamiętając o zasadach: skan zaczynamy i kończymy w środku węzła (nie musimy skanować osobno każdej bocznic – skanujemy ciąg wyrobisk np. 3 000m (kilka bocznic wentylacyjnych).

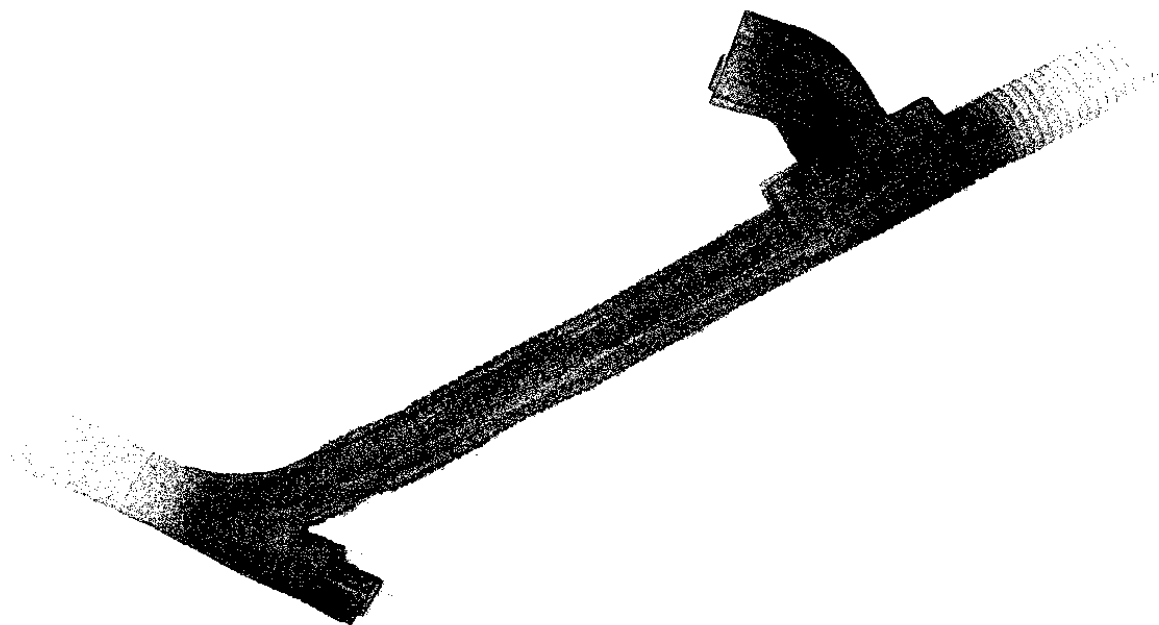
Wykonane skany chmury punktów zapisujemy w jednym z popularnych formatów np. las, laz, e57, pts w formie Ps\_Pk\_data.las (gdzie Ps, Pk – numer węzła sieci wentylacyjnej zaczynając i kończąc skan). Przykładowa chmura punktów po wykonanym skaningu obrazuje Rysunek 139.

Równolegle w czasie skanów wykonujemy pomiary parametrów (rejestracja co 1s): ciśnienia p [Pa], temperatury suchej ts [°C], wilgotności względnej  $\phi$  [%] – np. urządzeniem Bar-Th, dyktafon (transkrypcja), dowolne inne urządzenia pomiarowe których wartości chcemy przypisać do pomiarów (analizator wielogazowy, pirometr itp.). Wyniki tych pomiarów również zapisujemy i integrujemy w do pliku Ps\_\_Pk\_Data.csv. Pomiary te nie są wymagane bezwzględnie, ale ułatwiają kontrolę błędów lub wyznaczenie strumieni ciepła (jawne i utajone dla każdego segmentu osobno).

W poszczególnych bocznicach wykonujemy pomiary wydatków powietrza, faktycznie potrzebne są tylko w bocznicach z zabudowanymi tamami wentylacyjnymi (gdzie należy wyznaczyć opór lokalny). Równoczesny pomiar na powierzchni kopalni nie



jest już bezwzględnie wymagany, jednakże pozwala na wyznaczenie potencjałów i łatwiejszą późniejszą walidację modelu. Należy zapewnić precyzyjną synchronizację czasu we wszystkich urządzeniach pomiarowych.



Rys. 139 Przykładowa chmura punktów wyrobiska

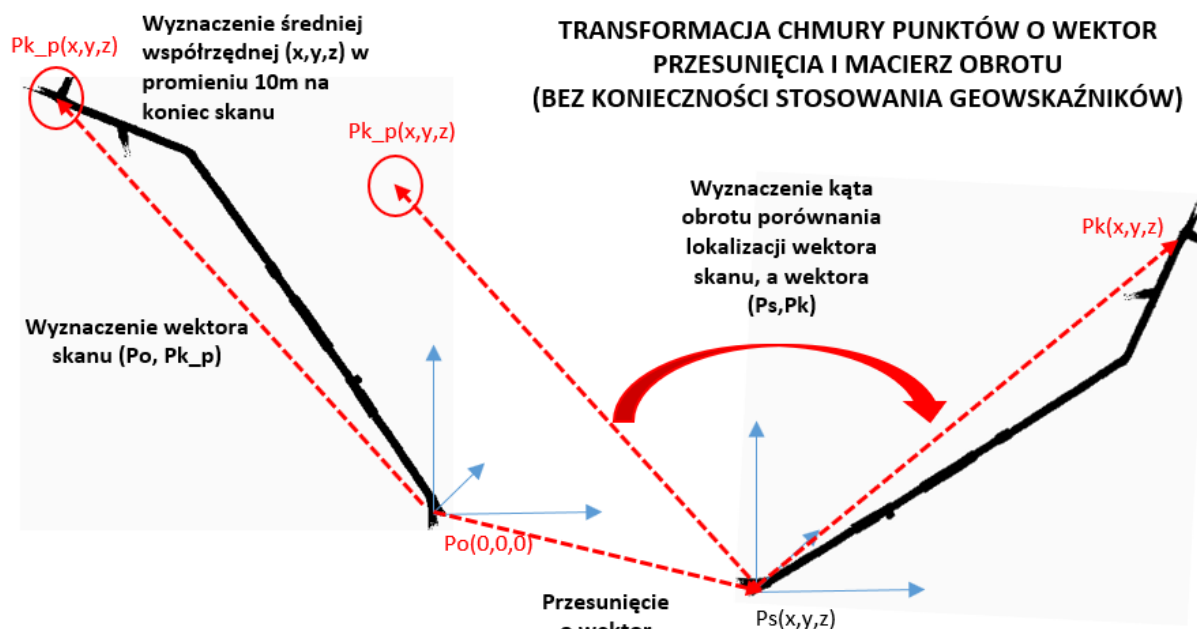
### Etap III

Po zapisaniu wszystkich skanów chmury punktów i pomiarów do jednego katalogu zachowując przyjęte powyżej nazewnictwo uruchamiamy autorski program w python który realizuje następujące algorytm.

Odszukuje pierwszy z plików źródłowych skanów oraz redukuje go do 2% pierwotnej chmury punktów (losowe usuwanie punktów). Zredukowany plik zapisuje do formatu csv. Następnie odszukuje z tablicy point.csv współrzędne początkowe i końcowe skanów oraz wykonuje transformacji w przestrzeni zredukowanej chmury punktów zgodnie z poniższym schematem.

Na rysunku 140 zilustrowano ideę transformacji chmury punktów przestrzennych za pomocą wektora przesunięcia i macierzy obrotu, bez konieczności stosowania geoskażników. Po lewej stronie przedstawiono proces wyznaczenia wektora skanu jako odcinka łączącego punkt początkowy  $P0=(0,0,0)$  z punktem końcowym skanowania  $Pk\_p(x,y,z)$ , uśrednionym z punktów znajdujących się w promieniu 10 metrów. Po prawej stronie pokazano aktualne położenie chmury punktów – od  $Ps(x,y,z)$  do  $Pk(x,y,z)$ . Transformacja polega najpierw na przesunięciu całej chmury do początku układu, a następnie na obrocie względem wektora

odniesienia tak, aby odwzorować lokalną geometrię rzeczywistego tunelu. Czerwona strzałka symbolizuje rotację względem kąta pomiędzy wektorem skanu a wektorem odniesienia. Schemat ten stanowi podstawę automatycznego dopasowania danych skanowania laserowego do siatki wentylacyjnej bez konieczności stosowania zewnętrznych punktów georeferencyjnych.



**Rys. 140** Idea transformacji chmury punktów o wektor przesunięcia oraz macierz obrotu

Punkt początkowy ( $P_o$ ) na skanach będzie mieć współrzędną  $(0,0,0)$ , a punkt końcowy skanów ( $P_{k\_p}$ ) - wyznaczany jest na podstawie średniej współrzędnej z ostatnich 5 sekund skanu. Na podstawie tych danych, algorytm wyznacza wektor przesunięcia z punktu  $0,0,0$  do  $P_s$  (odczytana współrzędna początku skanu z tablicy point.csv) oraz wyznaczenie macierzy obrotu (kąta obrotu) chmury punktów wyznaczonej na podstawie porównania dwóch wektorów pomocniczych  $W_1(0,0,0; P_{p\_p})$  i  $W_2(P_s; P_k)$ . Po wykonaniu transformacji w przestrzeni zredukowanej chmury punktów zapisuje do katalogu wraz z raportem z transformacji (na podstawie raportów można w przyszłości wykonać transformacje plików źródłowych skanów bez konieczności ich redukcji – utraty jakości skanu).

#### Etap IV

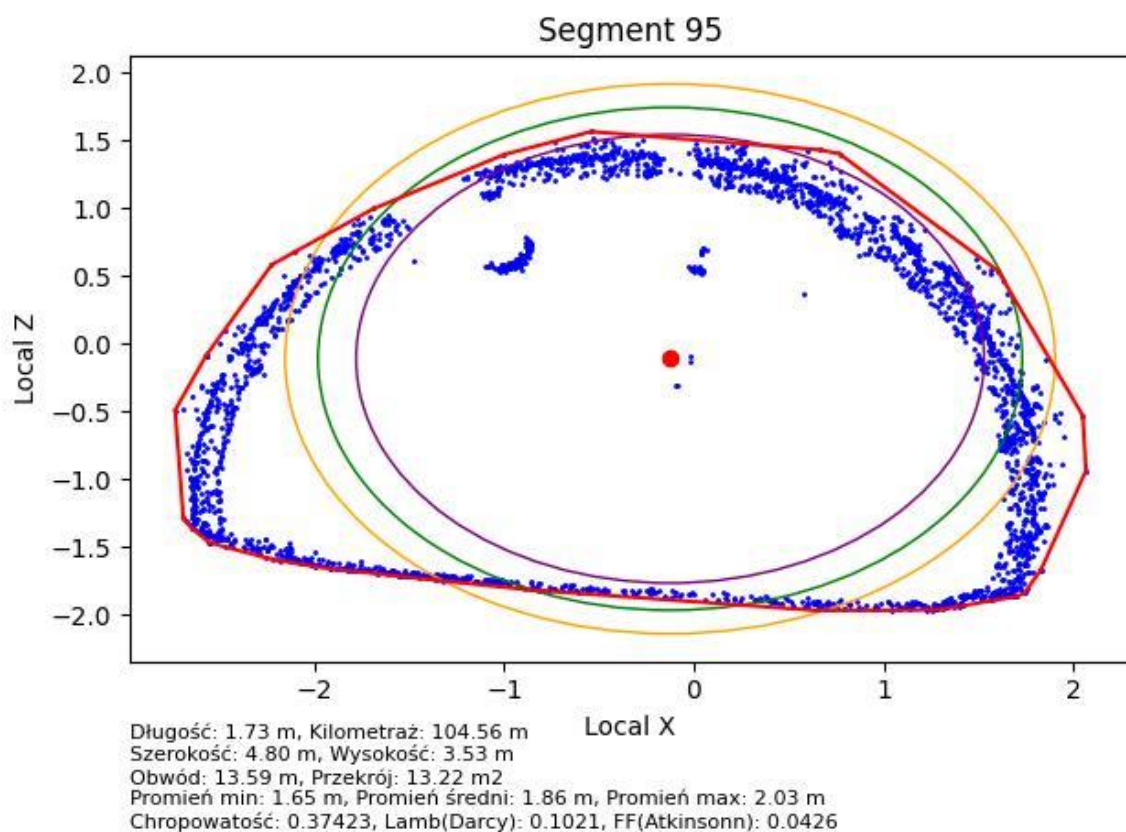
Integracja danych z przyrządów pomiarowych w celu utworzenia pliku  $P_s\_P_{k\_Data\_Trans}.csv$ . Plik ten łączy w sobie również komendy z transkrypcji, pomiary

ciśnienia, temperatury składu atmosfery lub innych przyrządów pomiarowych. Etap ten nie jest konieczny (w rozprawie nie jest szczegółowo omówiony), jeżeli nie wykonujemy równoległe pomiarów składu atmosfery, ciśnienia lub nie wykonujemy inwentaryzacji wyrobiska. Metoda umożliwia nanoszenie automatycznie na schematy (polilinia3D segmentu), schemat blokowy dxf urządzenia (tama, wentylator itp.). W czasie wykonywania skaningu, może być włączony dyktafon i rejestrować komentarze osoby skanującej. Nagranie poddanie procesowi transkrypcji i zapisaniu jej do pliku, (komentarz osoby skanującej np. „wentylator”) rozpozna jako konieczność wstawienia do schematu symbolu wentylatora.

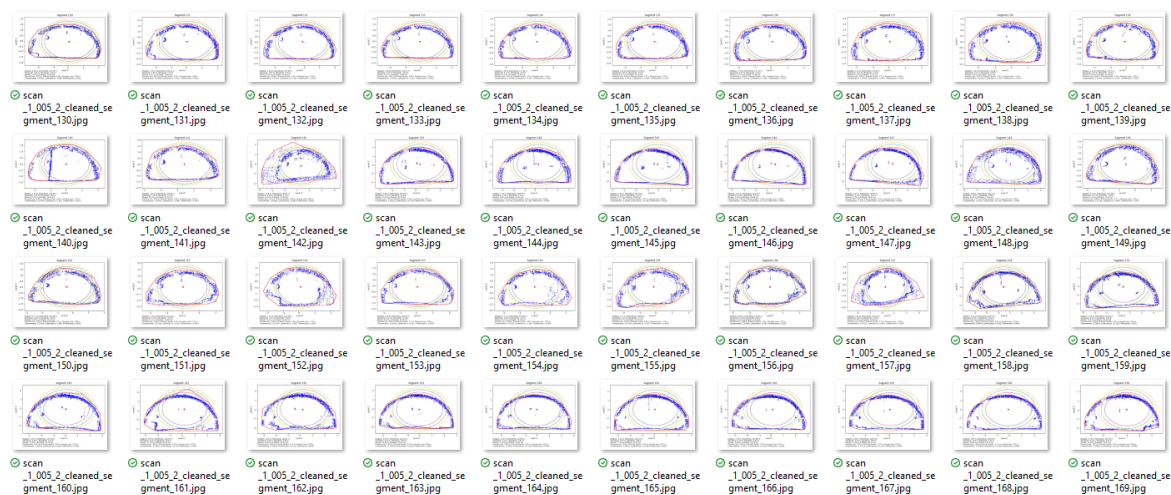
## **Etap V**

W etapie tym wyznaczamy centroid chmury punktów z segmentacją co 1m. W środku każdego segmentu tworzymy lokalny układ współrzędnych (prostopadły do lokalnej centroidy) i rzutujemy na nie lokalne punkty. Na podstawie tych punktów tworzymy obwódnie po skrajnych punktach badając ich lokalnym przekrojem.

Rysunek 141 przedstawia przykładową analizę geometryczno-oporową segmentu nr 95 wykonaną w ramach nowej metody budowy sieci wentylacyjnych. Na wykresie pokazano rzut punktów chmury (kolor niebieski) na lokalną płaszczyznę przekroju poprzecznego XZ. Widoczne są również kontury geometryczne: rzeczywisty obrys (czerwony), linie dopasowanych przekrojów kołowych (zielona, pomarańczowa, fioletowa) oraz centroid (czerwona kropka). W dolnej części wykresu podano charakterystyki przekroju: długość odcinka (1,73 m), szerokość (4,80 m), wysokość (3,53 m), pole powierzchni (13,22 m<sup>2</sup>), promień charakterystyczny, a także parametry aerodynamiczne – m.in. chropowatość względną (0,37423 m), bezwymiarowy współczynnik oporu  $\lambda$  (Lamb - Darsiego-Weisbacha) 0,1021 oraz współczynnik oporu  $FF=k_{1,2}$  (Atkinson) 0,0426 kg/m<sup>3</sup>. Z kolei rysunek 141 przedstawia zestaw miniatur graficznych reprezentujących analizę 40 kolejnych segmentów (od nr 130 do 169), przetworzonych przy użyciu tej samej metody. Dla każdego segmentu przedstawiono lokalny przekrój chmury punktów, kontury dopasowania oraz charakterystyki geometryczne. Zestawienie to pozwala szybko ocenić zmienność geometryczną wyrobiska na dłuższym odcinku oraz wykryć lokalne anomalie, deformacje lub przeszkody.



**Rys. 141** Przykładowa analiza segmentu nr 95 w nowej metodzie budowania sieci wentylacyjnych



**Rys. 142** Przykładowa analiza segmentów od nr 130-169 w nowej metodzie budowania sieci wentylacyjnych

Dla każdego centroidu dołączony jest plik z obliczeniami:

- Nr segmentu – Numer kolejnego segmentu (odcinka o długości 1m) w analizowanej chmurze punktów.

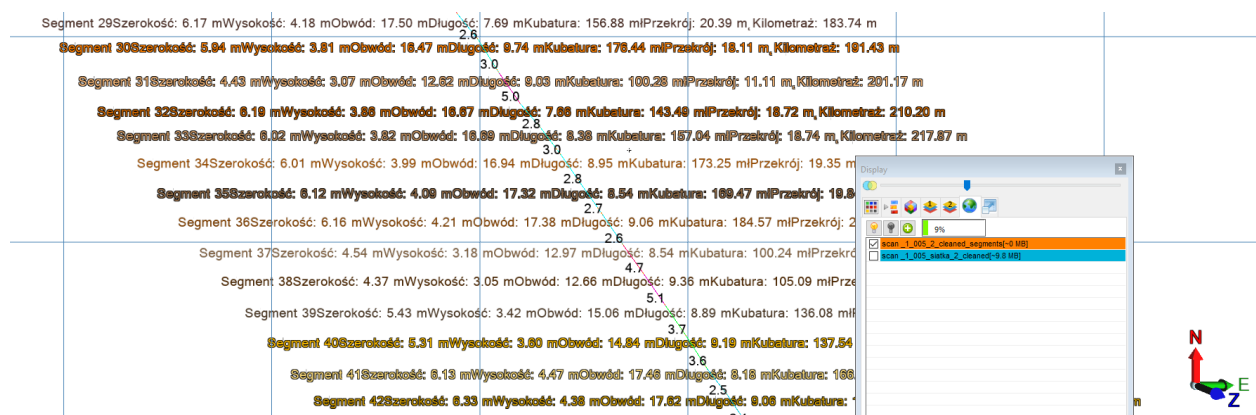
- Szerokość [m] – Maksymalna szerokość profilu segmentu w lokalnym układzie współrzędnych (oś X).
- Wysokość [m] – Maksymalna wysokość profilu segmentu w lokalnym układzie współrzędnych (oś Z).
- Obwód [m] – Długość obwodu profilu przekroju poprzecznego segmentu, obliczona na podstawie otoczki wypukłej (Convex Hull).
- Długość segmentu [m] – Rzeczywista długość segmentu, czyli odległość między centroidami sąsiednich przekrojów.
- Kubatura [m<sup>3</sup>] – Objętość segmentu, czyli pole powierzchni przekroju poprzecznego pomnożone przez długość segmentu.
- Średni przekrój poprzeczny [m<sup>2</sup>] – Średnie pole powierzchni przekroju poprzecznego danego segmentu.
- Kilometraż [m] – Położenie kilometrowe danego segmentu, liczone od początku analizy.
- Roughness\_149 – Wartość chropowatości, obliczona jako różnica między średnim najdalszym i najbliższym promieniem dla 25% punktów przekroju.
- Lambda (Darcy) – Bezwymiarowy współczynnik oporu Darcy’iego, wyliczony na podstawie chropowatości i średnicy przekroju.
- FF(Atkinsonn) – Współczynnik oporu Atkinsonn’a, wyliczony na podstawie chropowatości i średnicy.
- Farthest\_Radius – Średnia odległość najdalszych 25% punktów od środka przekroju (promień maksymalny).
- Closest\_Radius – Średnia odległość najbliższych 25% punktów od środka przekroju (promień minimalny).

W tabeli 45 przedstawiono przykładową zawartość pliku z obliczeniami parametrów geometrycznych i oporowych dla poszczególnych segmentów tunelu (odcinków chmury punktów) w nowej metodzie budowy sieci wentylacyjnych. Dla każdego segmentu (np. segment 21–34) podano podstawowe dane geometryczne. Dodatkowo zamieszczono kilometraż (KM), szacowaną chropowatość względną (Roughness), bezwymiarowy współczynnik oporu  $\lambda$  (według Darcy’ego–Weisbacha) i współczynnik oporu  $FF=k_{1,2}$  (według Atkinsona), a także promień maksymalny (Farthest Radius) i minimalny (Closest Radius) od środka ciężkości przekroju.

**Tabela 45** Przykładowa zawartość pliku z obliczeniami centroidu chmury punktów w nowej metodzie budowy sieci wentylacyjnych

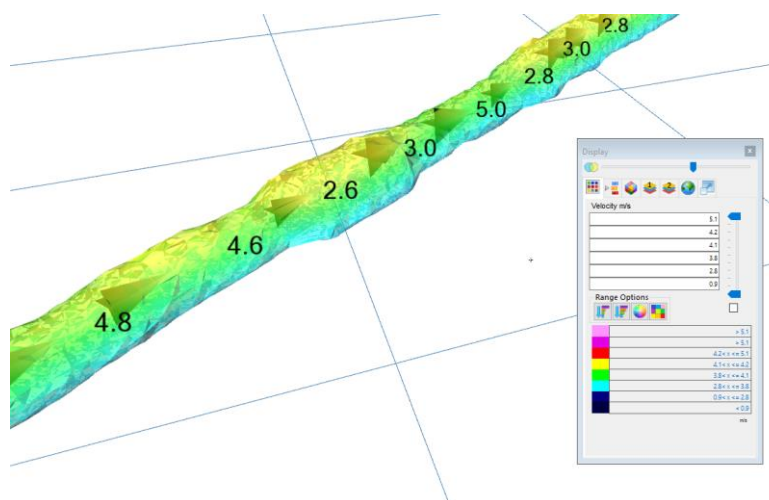
| Nr seg. | Szerokość [m] | Wysokość [m] | Obwód [m] | Długość<br>segmentu<br>[m] | Kubatura [m3] | Średni<br>przekrój poprzeczny<br>[m2] | KM [m]   | Roughness<br>149 | Lamb<br>(Darcy) 149 | FF<br>(Atkinsonn) 149 | Farthest<br>Radius<br>149 | Closest<br>Radius<br>149 |
|---------|---------------|--------------|-----------|----------------------------|---------------|---------------------------------------|----------|------------------|---------------------|-----------------------|---------------------------|--------------------------|
| 21      | 4.473145      | 3.676477     | 13.29949  | 1.016161                   | 13.30352      | 13.09193                              | 23.12215 | 0.352084         | 0.099398            | 0.041416              | 2.011152                  | 1.659068                 |
| 22      | 4.509535      | 3.632679     | 13.34815  | 1.072736                   | 14.19471      | 13.23225                              | 24.2293  | 0.350241         | 0.099826            | 0.041594              | 1.987599                  | 1.637357                 |
| 23      | 4.5749        | 3.761444     | 13.3347   | 1.079461                   | 14.13042      | 13.09026                              | 25.24546 | 0.37096          | 0.10332             | 0.04305               | 1.980021                  | 1.609061                 |
| 24      | 4.620438      | 3.625079     | 13.25984  | 1.084277                   | 14.08194      | 12.9874                               | 26.31819 | 0.320714         | 0.094512            | 0.03938               | 1.986884                  | 1.66617                  |
| 25      | 4.68766       | 3.661037     | 13.54216  | 1.054436                   | 14.08049      | 13.35358                              | 27.39766 | 0.337178         | 0.096422            | 0.040176              | 2.018372                  | 1.681194                 |
| 26      | 4.694266      | 3.510296     | 13.44542  | 1.064684                   | 14.09198      | 13.23584                              | 28.48193 | 0.326079         | 0.094597            | 0.039416              | 2.016845                  | 1.690766                 |
| 27      | 4.503006      | 3.854104     | 13.41271  | 1.071404                   | 14.37453      | 13.41654                              | 29.53637 | 0.336478         | 0.096301            | 0.040126              | 2.021821                  | 1.685343                 |
| 28      | 4.51784       | 3.748015     | 13.40283  | 1.080521                   | 14.31847      | 13.25145                              | 30.60105 | 0.349961         | 0.099206            | 0.041336              | 2.0046                    | 1.654638                 |
| 29      | 4.744128      | 3.540875     | 13.46325  | 1.0355                     | 13.40833      | 12.94866                              | 31.67246 | 0.356857         | 0.099922            | 0.041634              | 2.013518                  | 1.65666                  |
| 30      | 4.739604      | 3.402923     | 13.59327  | 1.07422                    | 13.95794      | 12.99356                              | 32.75298 | 0.389843         | 0.105785            | 0.044077              | 1.991587                  | 1.601744                 |
| 31      | 4.86925       | 3.773222     | 13.763    | 1.092657                   | 14.45725      | 13.23128                              | 33.78848 | 0.404178         | 0.10778             | 0.044908              | 2.002013                  | 1.597835                 |
| 32      | 4.87946       | 3.554323     | 13.87881  | 1.040935                   | 14.20699      | 13.6483                               | 34.8627  | 0.386122         | 0.103825            | 0.043261              | 2.036407                  | 1.650285                 |
| 33      | 4.721421      | 3.539383     | 13.61548  | 1.088279                   | 14.40388      | 13.23546                              | 35.95535 | 0.401424         | 0.107315            | 0.044715              | 2.00356                   | 1.602136                 |
| 34      | 4.720051      | 3.655727     | 13.68916  | 1.094047                   | 14.76156      | 13.49263                              | 36.99629 | 0.377986         | 0.103853            | 0.043272              | 1.986779                  | 1.608794                 |

Na podstawie wykonanych obliczeń generowana jest polilinia 3D w formacie DXF (rys. 143) wraz opisem każdego segmentu. Plik ten można bezpośrednio importować do programu VentSim.

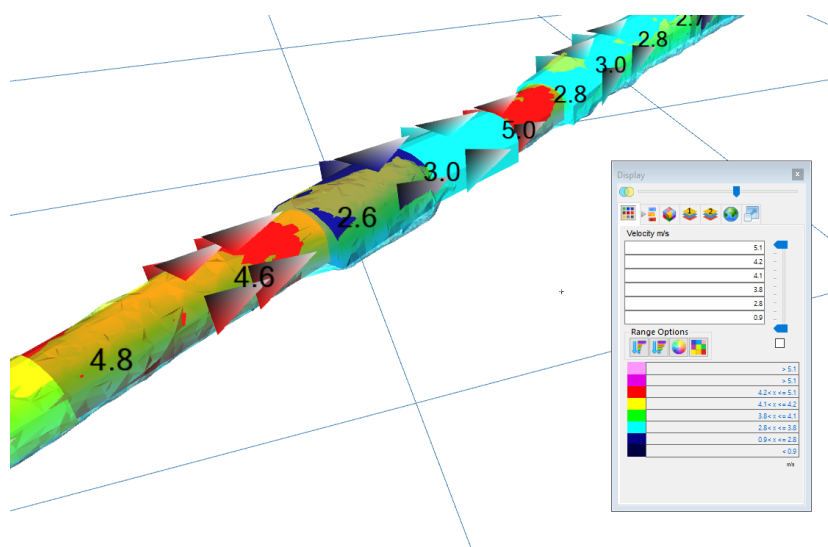


Rys. 143 Wycinek polilini 3D w formacie DXF w programie VentSim wraz z opisami segmentów

Na podstawie importowanej polilini 3D (rys. 144, rys 145)) oraz opisów w programie VentSim automatycznie buduje się bocznice wentylacyjną. Program „zaczytuje” przekroje, współczynniki oporu, przyrosty gazów itp. dla poszczególnych segmentów.



Rys. 144 Przykładowa Siatka mesh z naniesionym wektorowym modelem bocznicy wentylacyjnej w programie VentSim w Badaniu G



**Rys. 145** Przykładowa Siatka mesh z naniesionym widokiem 3D (solid) modelem bocznicy wentylacyjnej w programie VentSim

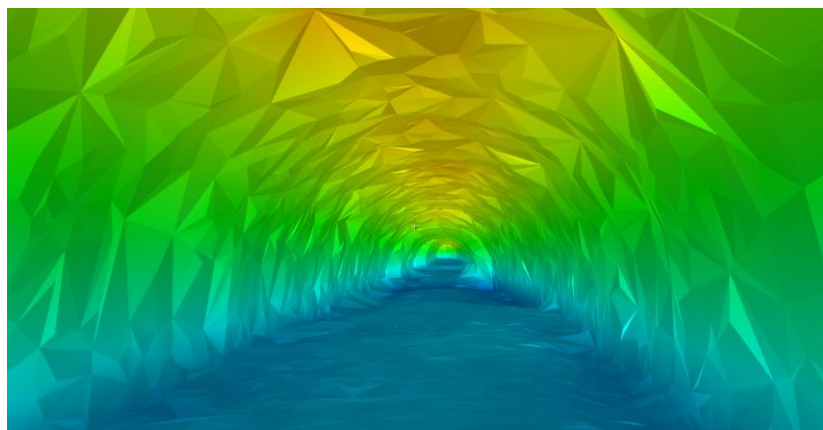
## Etap VI

Wykonanie czyszczenia oraz redukcji chmury punktów. Czyszczenie zredukowanej chmury punktów o szumy wykonywane jest wzdłuż największej lokalnej średniej gęstości punktów. Zbudowanie siatki (mesh) jest wykonane na podstawie 2% zredukowanej chmury punktów (siatka jest zbudowana na podstawie 0,04% pierwotnej chmury punktów). Siatka mesh zapisywana jest do pliku dxf w celu zobrazowania wyrobiska w VestSim lub programach CAD (rys. 146-148).

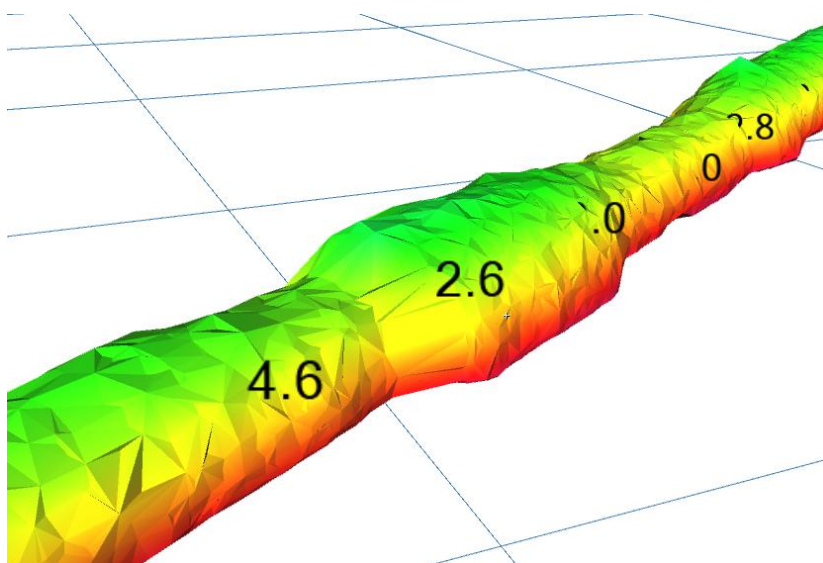


**Rys. 146** Wycinek zredukowanej chmury punktów przed operacją czyszczenia w nowej metodzie budowy modeli wentylacyjnych w Badaniu G





**Rys. 147** Wycinek wygenerowanej siatki mesh po operacji czyszczenia w nowej metodzie budowy modeli wentylacyjnych (widok wewnątrz chodnika) w Badaniu G



**Rys. 148** Wycinek wygenerowanej siatki mesh po operacji czyszczenia w nowej metodzie budowy modeli wentylacyjnych (widok „zewnątrz” chodnika) w Badaniu G

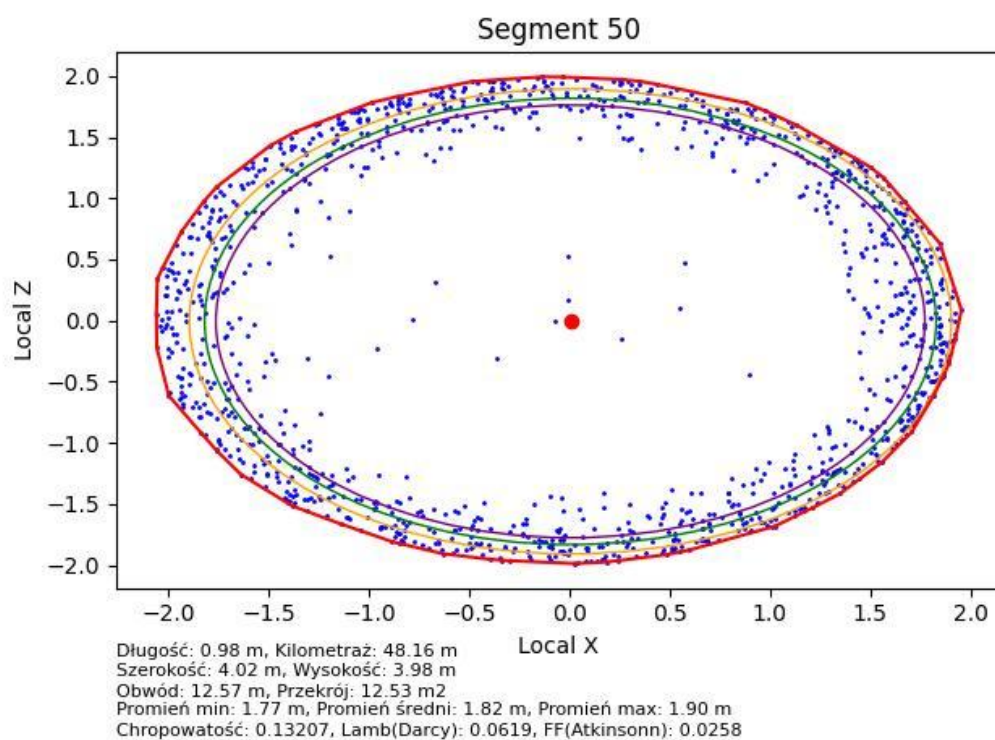
## 6.5. Sprawdzenie działania algorytmu budowy modelu wentylacyjnego w nowej metodzie

W celu sprawdzenia dokładności opracowanej metody segmentacji i analizy chmury punktów, wygenerowano syntetyczny model tuneli (każdy o długości 100m) i różnych przekrojach poprzecznych:

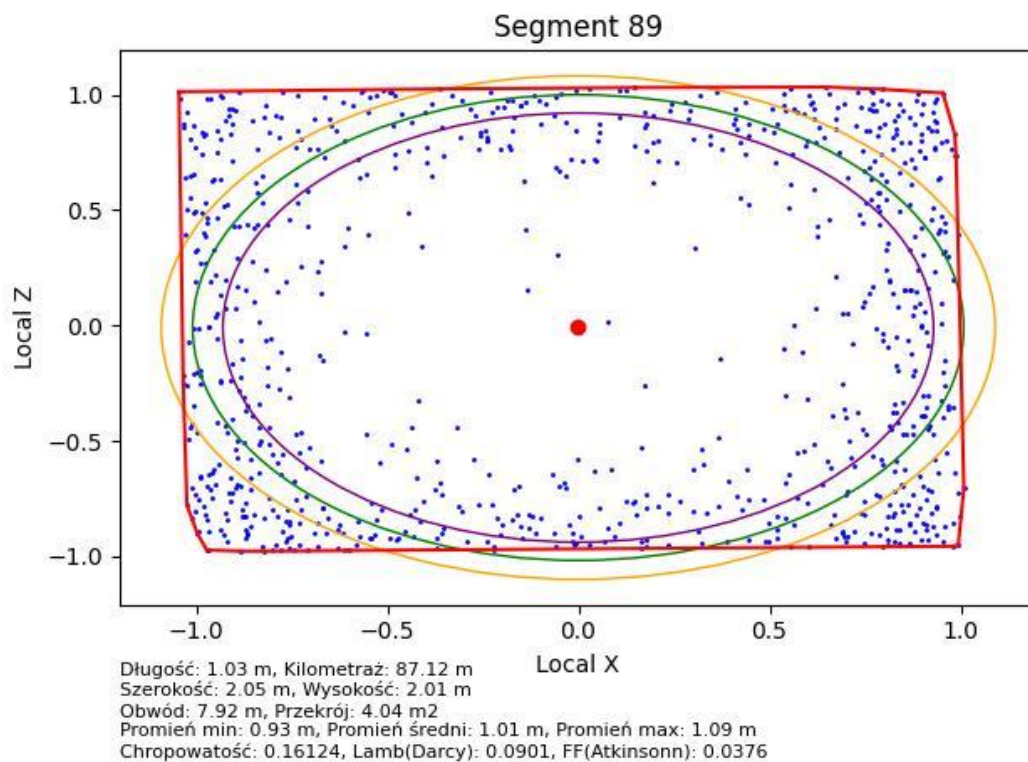
- kołowym o promieniu  $r=2\text{m}$ ,
- kwadratowym o wymiarach  $a=2\text{ m}$ ,
- prostokątnym o wymiarach  $a=6$  i  $b=2\text{m}$ ,
- trapezowym, o wymiarach  $a=6\text{m}$ ,  $b=4\text{m}$  i  $h=4\text{m}$
- wyrobisko o profilu łukowym z symulowanymi pustkami  $a=6\text{m}$  i  $h=4\text{m}$ .

Chmury punktów zostały wygenerowane losowo na wewnątrz części profilu wyrobiska, przy założonej gęstości skanowania wynoszącej 1000 punktów na metr kwadratowy z tolerancją  $\pm 10$  cm, co symuluje nierówności powierzchni w czasie rzeczywistego skanowania laserowego. Dodatkowo wprowadzono szum losowy stanowiący 2% całkowitej liczby punktów – punkty te zostały umieszczone losowo wewnątrz przekroju tunelu. Dane zapisano w formacie CSV z kolumnami x, y, z, zgodnie z orientacją tunelu wzdłuż osi.

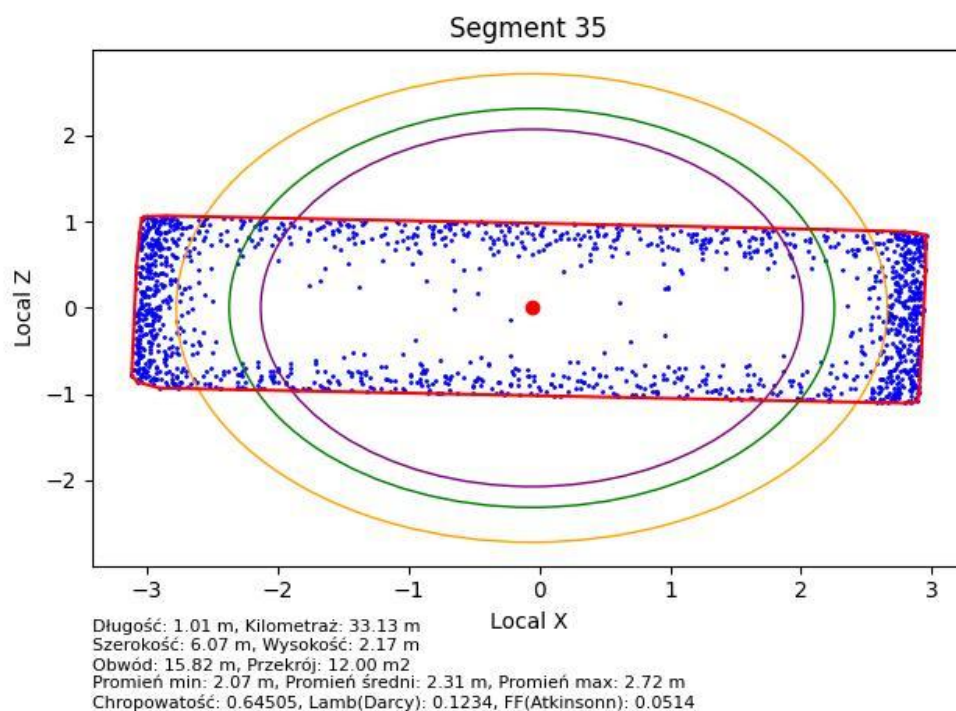
Wycinki przykładowo wygenerowane chmury punktów wraz z otrzymanymi wynikami obrazują poniższe rysunki od 149 do 153.



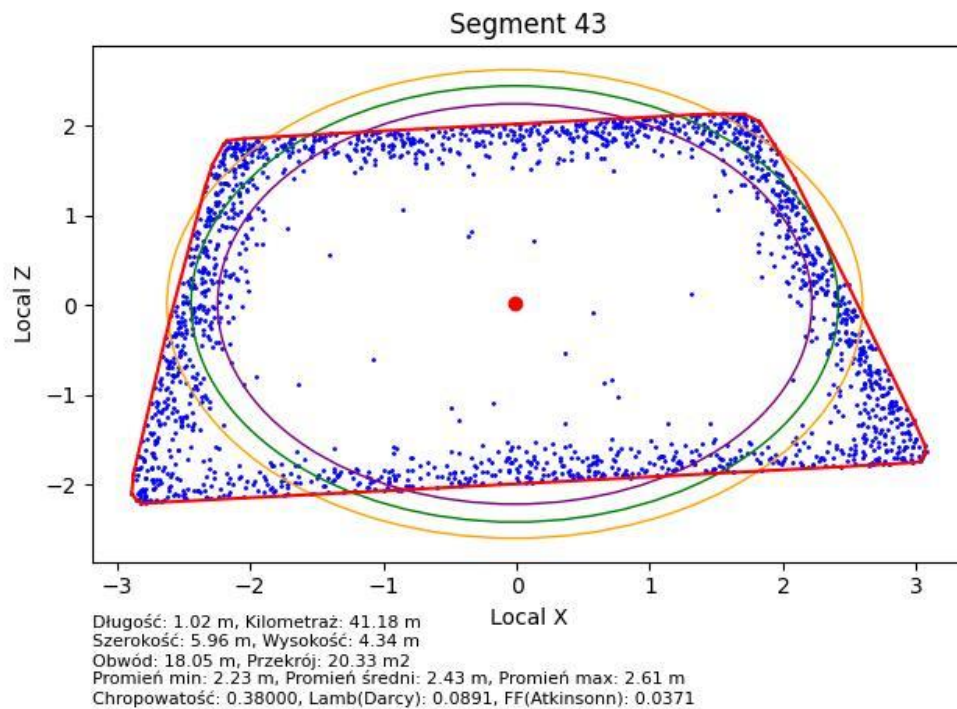
**Rys. 149** Wygenerowana chmura punktów o przekroju kołowym i promieniu  $r=2$ m.



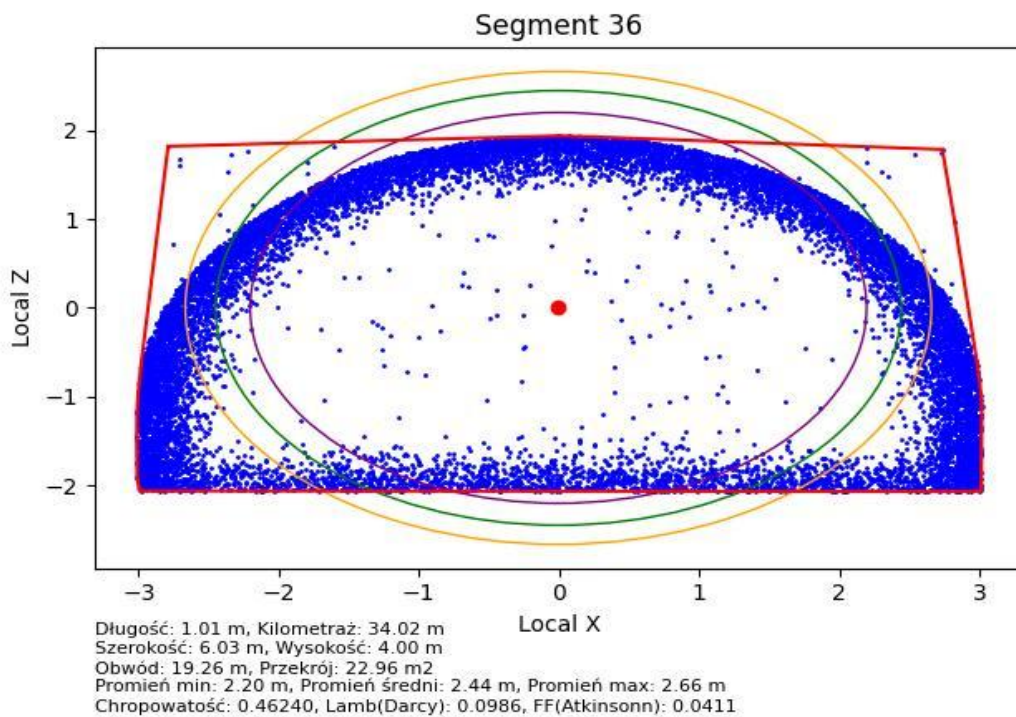
**Rys. 150** Wygenerowana chmura punktów o przekroju kwadratowym i boku  $a=2\text{m}$ .



**Rys. 151** Wygenerowana chmura punktów o przekroju prostokątnym i wymiarach  $a=6\text{m}$  i  $b=4\text{m}$ .



**Rys. 152** Wygenerowana chmura punktów o przekroju trapezowym i wymiarach  $a=6\text{m}$ ,  $b=4\text{m}$  i  $h=4\text{m}$ .



**Rys. 153** Wygenerowana chmura punktów dla wyrobiska w obudowie ŁP z pustkami nad obudową i wymiarach  $a=6\text{m}$  i  $h=4\text{m}$ .

W wyniku przeprowadzonej analizy porównawczej idealnego profilu przekroju wyrobiska wygenerowanego do obliczeń wykonanych przez algorytm w nowej metodzie budowy modeli wentylacyjnych otrzymano następujące wyniki.

**Tabela 46** Wyniki analizy porównawczej wygenerowanych chmur punktów imitujących wyrobiska (tunele) – punktowo dla segmentów 50 – KM 50

| Profil<br>chmury<br>punktów                                                                                                                            | Wygenerowane<br>chmury punktów |       | Obliczenia wykonane na podstawie algorytmu<br>- analizując wygenerowaną chmurę punktów -<br>segment 50 - KM 50 wyrobiska (środek) |                                                              |       |                                                                        |                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
|                                                                                                                                                        | Pole pow.                      | Obwód | Przekrój                                                                                                                          | Błąd<br>względny<br>wyznaczenia<br>przekroju<br>poprzedniego | Obwód | Błąd<br>względny<br>wyznaczenia<br>obwodu<br>przekroju<br>poprzedniego | Chropowatość<br>względna, $\epsilon$ |
|                                                                                                                                                        | m <sup>2</sup>                 | m     | m <sup>2</sup>                                                                                                                    | %                                                            | m     | %                                                                      | m                                    |
| Kołowy o<br>promieniu,<br>r= 2m                                                                                                                        | 12.6                           | 12.6  | 12.53                                                                                                                             | -0.24%                                                       | 12.57 | 0.08%                                                                  | 0.13207                              |
| Kwadratowy,<br>a=2m                                                                                                                                    | 4.0                            | 8.0   | 4.01                                                                                                                              | 0.25%                                                        | 7.84  | -2.04%                                                                 | 0.15812                              |
| Prostokątny,<br>a=6m b=2m                                                                                                                              | 12.0                           | 16.0  | 12.06                                                                                                                             | 0.50%                                                        | 15.9  | -0.63%                                                                 | 0.62331                              |
| Trapezowy,<br>a=6 b=4m<br>h=4m                                                                                                                         | 20.0                           | 18.2  | 20.62                                                                                                                             | 3.01%                                                        | 18.17 | -0.42%                                                                 | 0.38474                              |
| Obudowa ŁP,<br>a=6 h=4m<br>wraz z<br>pustkami nad<br>obudową*                                                                                          | 19.2                           | 18.2  | 22.71                                                                                                                             | 15.46%                                                       | 18.84 | 3.25%                                                                  | 0.45824                              |
| * Uwaga przekrój poprzeczny obliczony i porównany tylko do przekroju wyznaczonego wg wzoru<br>$A = \text{szerokość} \times \text{wysokość} \times 0.8$ |                                |       |                                                                                                                                   |                                                              |       |                                                                        |                                      |



**Tabela 47** Wyniki analizy porównawczej wygenerowanych chmur punktów imitujących wyrobiska (tunele) – średnia dla całego skanu – 100mb wyrobiska (99 segmentów)

| Profil<br>chmury<br>punktów                                                                                                | Wygenerowane<br>chmury punktów |       | Obliczenia wykonane na podstawie algorytmu - analizując<br>wygenerowaną chmurę punktów (średnia dla całego chodnika,<br>tunele) |                                                  |       |                                                            |                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------|--------------------------------|
|                                                                                                                            | Pole pow.                      | Obwód | Przekrój                                                                                                                        | Błąd<br>wyznaczenia<br>przekroju<br>poprzecznego | Obwód | Błąd<br>wyznaczenia<br>obwodu<br>przekroju<br>poprzecznego | Chropowatość,<br>$\varepsilon$ |
|                                                                                                                            | m <sup>2</sup>                 | m     | m <sup>2</sup>                                                                                                                  | %                                                | m     | %                                                          | m                              |
| Kołowy o<br>promieniu,<br>r= 2m                                                                                            | 12.6                           | 12.6  | 12.56                                                                                                                           | -0.08%                                           | 12.59 | 0.24%                                                      | 0.12721                        |
| Kwadratowy,<br>a=2m                                                                                                        | 4.0                            | 8.0   | 4.03                                                                                                                            | 0.74%                                            | 7.88  | -1.52%                                                     | 0.15924                        |
| Prostokątny,<br>a=6m b=2m                                                                                                  | 12.0                           | 16.0  | 12.16                                                                                                                           | 1.32%                                            | 15.96 | -0.25%                                                     | 0.63448                        |
| Trapezowy,<br>a=6 b=4m<br>h=4m                                                                                             | 20.0                           | 18.2  | 20.32                                                                                                                           | 1.57%                                            | 18.13 | -0.64%                                                     | 0.38374                        |
| Obudowa ŁP,<br>a=6 h=4m<br>wraz z<br>pustkami nad<br>obudową*                                                              | 19.2                           | 18.2  | 22.78                                                                                                                           | 15.72%                                           | 18.98 | 3.96%                                                      | 0.45927                        |
| * Uwaga przekrój poprzeczny obliczony i porównany tylko do przekroju wyznaczonego wg wzoru<br>A=szerokość x wysokość x 0.8 |                                |       |                                                                                                                                 |                                                  |       |                                                            |                                |

Najmniejsze błędy (poniżej 1%) występują dla koła i kwadratu, co świadczy o dobrej zgodności metody przy prostych, regularnych kształtach. Dla prostokąta i trapezu błędy są nieco większe (1–1.5%). Największe odchylenia pojawiają się dla profilu łukowego (obudowa ŁP) – 15.7% błędu pola oraz prawie 4% błędu obwodu. Wynika to z faktu nie uwzględniania w porównaniu pustek, które były wygenerowane w chmurze punktów. Faktyczna dokładność z pewnością byłaby dużo większa – algorytm dla punktów które zostały „złapane” ponad obrysem obudowy, zakłada istnienie wolnego przekroju i o tę wartość zwiększa obliczanie przekroju.

Chropowatość ( $\varepsilon$ ) rośnie wraz z większą złożonością profilu — dla prostych kształtów jest mniejsza, a dla nieregularnych znacznie większa (np. prostokąt:  $\varepsilon \approx 0.63$  m).

## **6.6. Badanie G - Metoda budowy szczegółowego modelu wentylacyjnego fragmentu kopalni w oparciu o skaning laserowy bocznicy wentylacyjnej i integracja z oprogramowaniem VentSim**

Badaniu poddano bocznicę wentylacyjną w jednej z kopalń węgla kamiennego o długości 369m. Bocznicę ta pełni rolę grupowego prądu powietrza odprowadzanego do szybu wydechowego tzw. „powietrze zużyte”. Wzrost wyrobisko wykonane jest w obudowie ŁP (różne typy obudowy), ma poziom 838 (-522,8 m p.p.m.).

W wyrobisku zabudowana jest trasa kolejki podwieszanej typu KSP oraz rurociągi.

Urządzenia pomiarowe wykorzystane w badaniu:

- Ręczny barometr BAR-TH firmy JMD (2 sztuki)

Zakresy pomiarowe:

ciśnienia:  $800 \div 1300 \text{ hPa} \pm 25 \text{ Pa}$

temperatury:  $-20 \div +40 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,3 \text{ }^{\circ}\text{C}$

wilgotności:  $0 \div 100 \% \text{ RH} \pm 1,8 \% (10-90\%)$

- Ręczny anemometr wirnikowy RAW firmy JMD

Zakresy pomiarowe:

przepływu:  $0,2 \div 20 \text{ m/s} \pm 1\%$ ,

strumienia obj.:  $0 \div 9999 \text{ m}^3/\text{s}$ ,

temperatury:  $-20 \div +40 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- Ręczny skaner laserowy typu BLK2GO firmy Leica

Zakresy pomiarowe:

zasięg skanowania: 0.5–25 m,

dokładność skanowania:  $\pm 3 \text{ mm @ } 10 \text{ m}$ ,  $\pm 10 \text{ mm}$  w pomieszczeniach,

szybkość skanowania: 420 000 pkt/s.

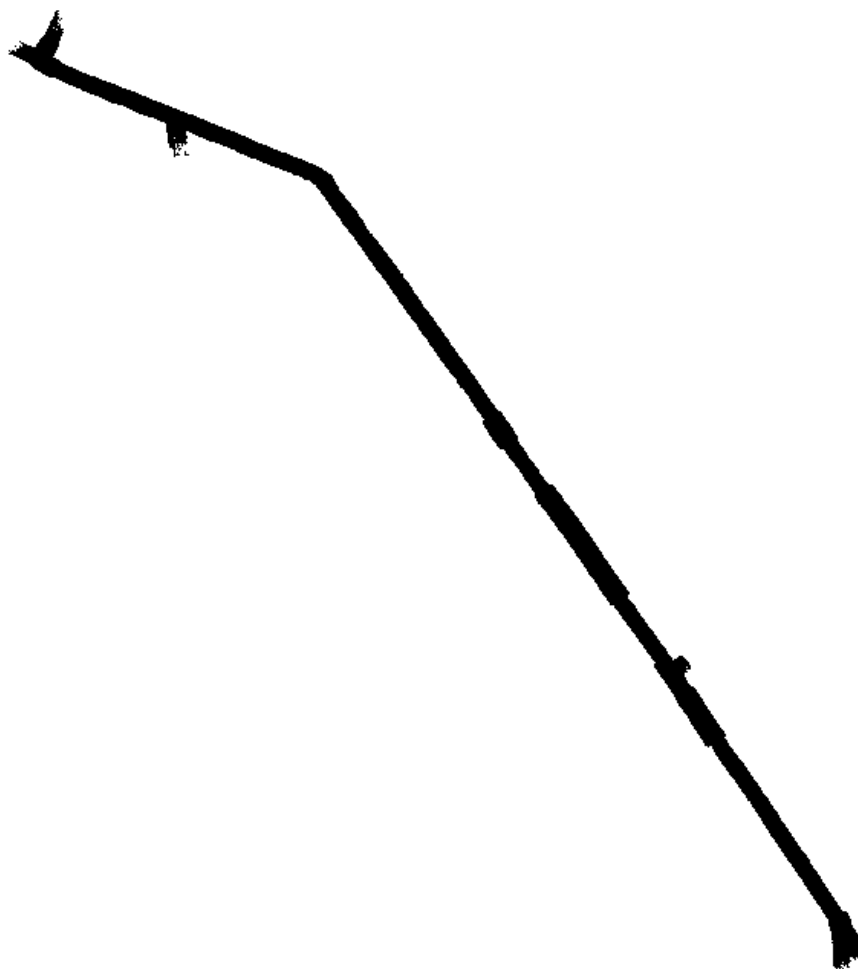
Opracowano plan badania, który polegał na:

- kalibracji dokładności wskazań barometrów BAR-TH względem siebie na dole,
- rozmieszczeniu barometrów na wlocie i wylocie badanego odcinka wyrobiska, załączeniu ciągłej rejestracji pomiarów ciśnienia, temperatury i wilgotności z częstotliwością co 1 minutę,

- równoczesnym mierzeniu w bocznicy stacji pomiarowej ilości powietrza z częstotliwością co 10 minut ręcznym anemometrem skrzydełkowym RAW,
- wykonywaniu pomiarów spadku naporu i ilości przepływającego powietrza nieprzerwanie przez 180 minut,
- skanowaniu badanej bocznicy oraz przyległych odcinków wyrobisk urządzeniem BLK2GO.

Następnie poddano automatycznej obróbce dane, stosując nową metodę budowy sieci wentylacyjnych, opisaną w rozdziale 6.3-6.4 (powyżej).

Na podstawie wykonanych pomiarów wentylacyjnych wyznaczono średnią ilość przepływającego powietrza oraz spadek naporu, a następnie porównano te wartości z wynikami obliczonymi nową metodą budowy sieci wentylacyjnych, wykorzystującą skanowanie laserowe i zwiualizowaną w oprogramowaniu VentSim.

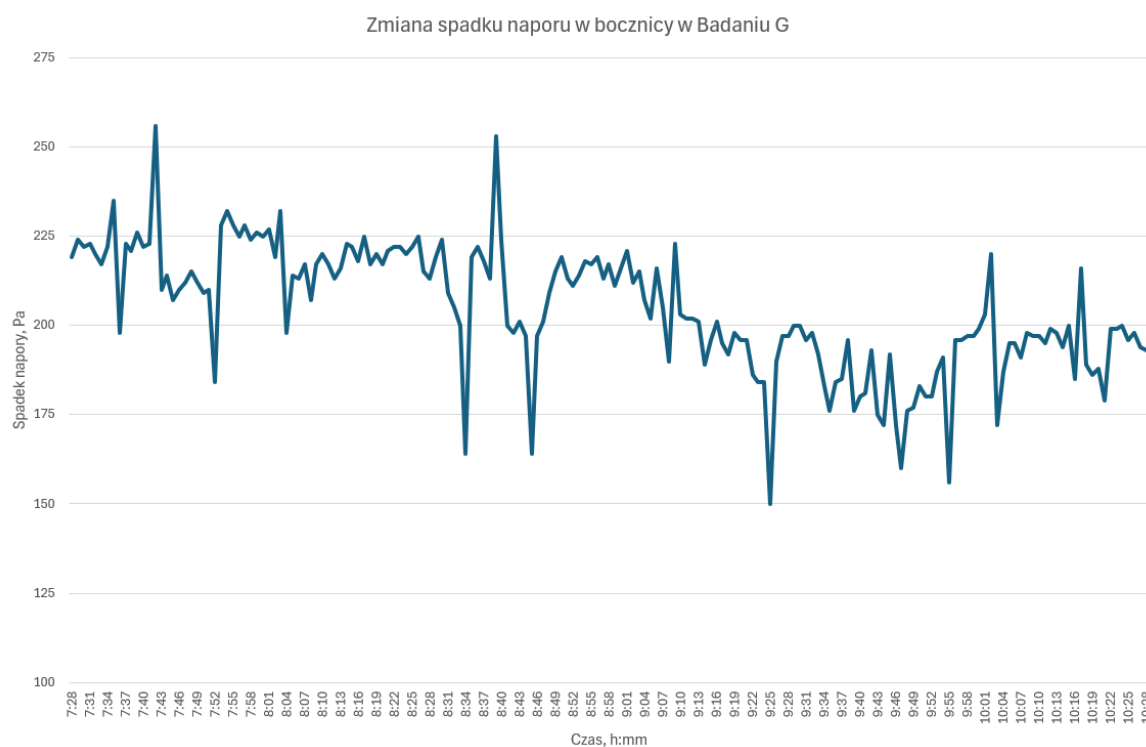


**Rys. 154** Widok z góry chmury punktów zeskanowanego wyrobiska w Badaniu G



## 6.7. Analiza wyników - Badanie G

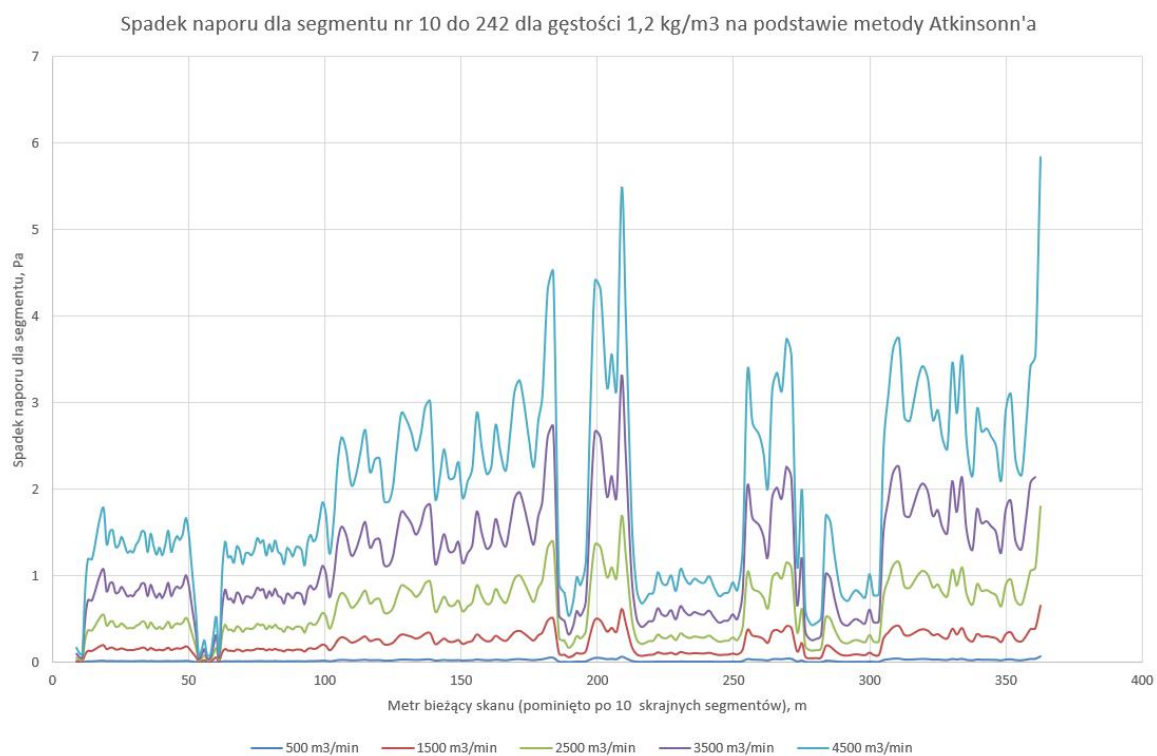
Na rysunkach 155-161 oraz w tabeli nr 48 zamieszczono wyniki przeprowadzonych obliczeń w Badaniu G.



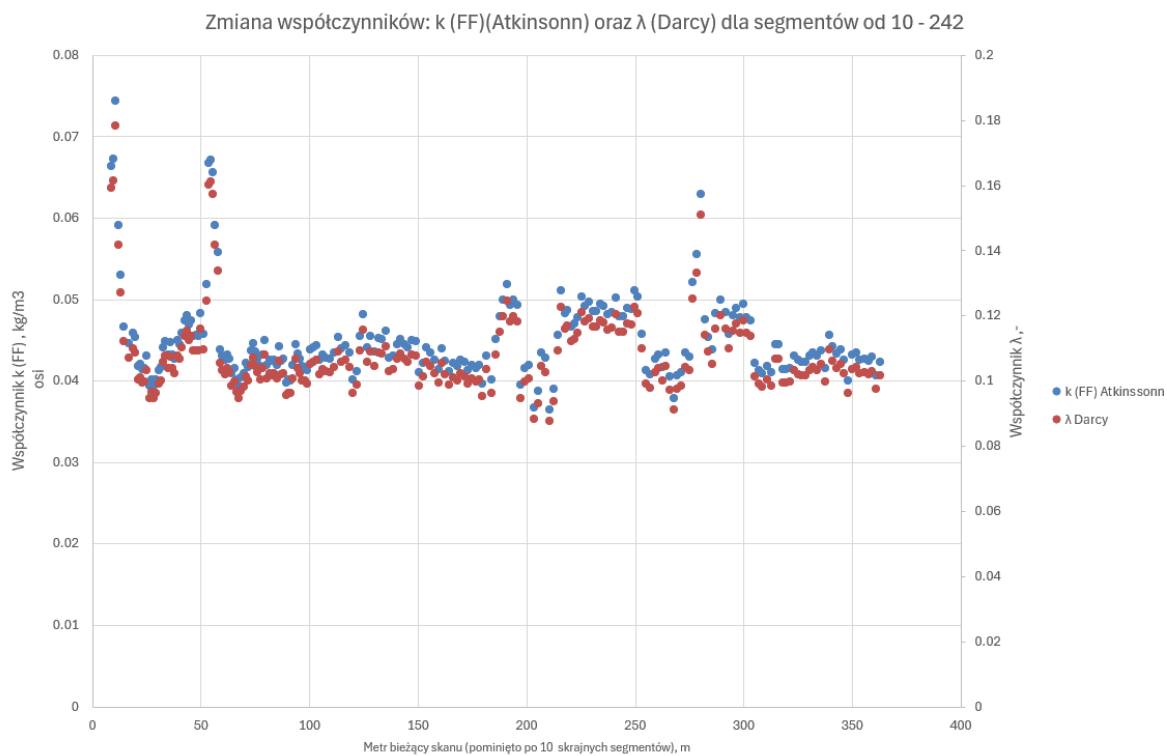
**Rys. 155** Zmiana spadku naporu w bocznicy w Badaniu G

**Tabela 48** Zbiorcze zestawienie wyników w Badaniu G

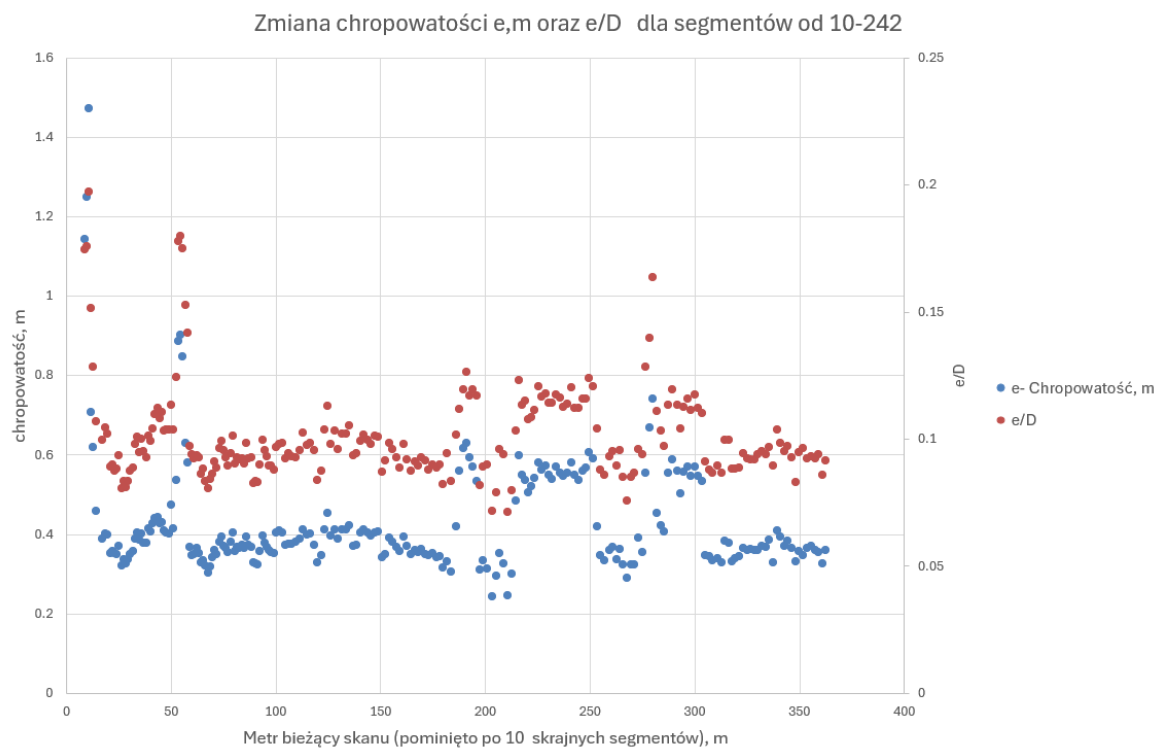
|                            | Średnia wartość 20 kolejnych pomiarów w analizowanej bocznicy | Wyniki uzyskane w programie VentSim | Błąd względny |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------|-------------------------------------|---------------|
| Prędkość powietrza         | 3,91 m/s                                                      | 3,752 m/s                           | -4,2%         |
| Wydatek powietrza          | 3690 m <sup>3</sup> /min                                      | 3678 m <sup>3</sup> /min            | -0,3%         |
| Przekrój poprzeczny        | 15,7 m <sup>2</sup>                                           | 18,44m <sup>2</sup>                 | +14,8%        |
| Spadek naporu dla bocznicy | 350,55 Pa                                                     | 354,6 Pa                            | +1,1%         |
| Spadek naporu dla 1mb      | 0,95 Pa/m                                                     | 0,9607 Pa/m                         | +1,1%         |



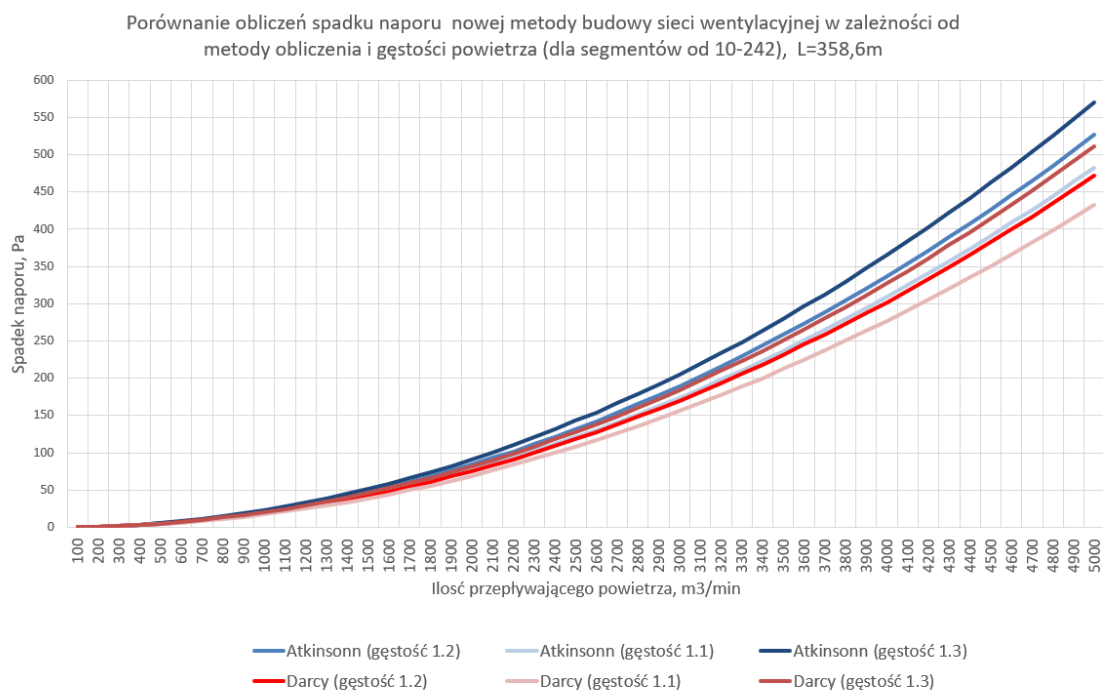
**Rys. 156** Spadek naporu dla segmentu nr 10 do 242 dla gęstości 1,2 kg/m<sup>3</sup> na podstawie metody Atkinson'a w Badaniu G



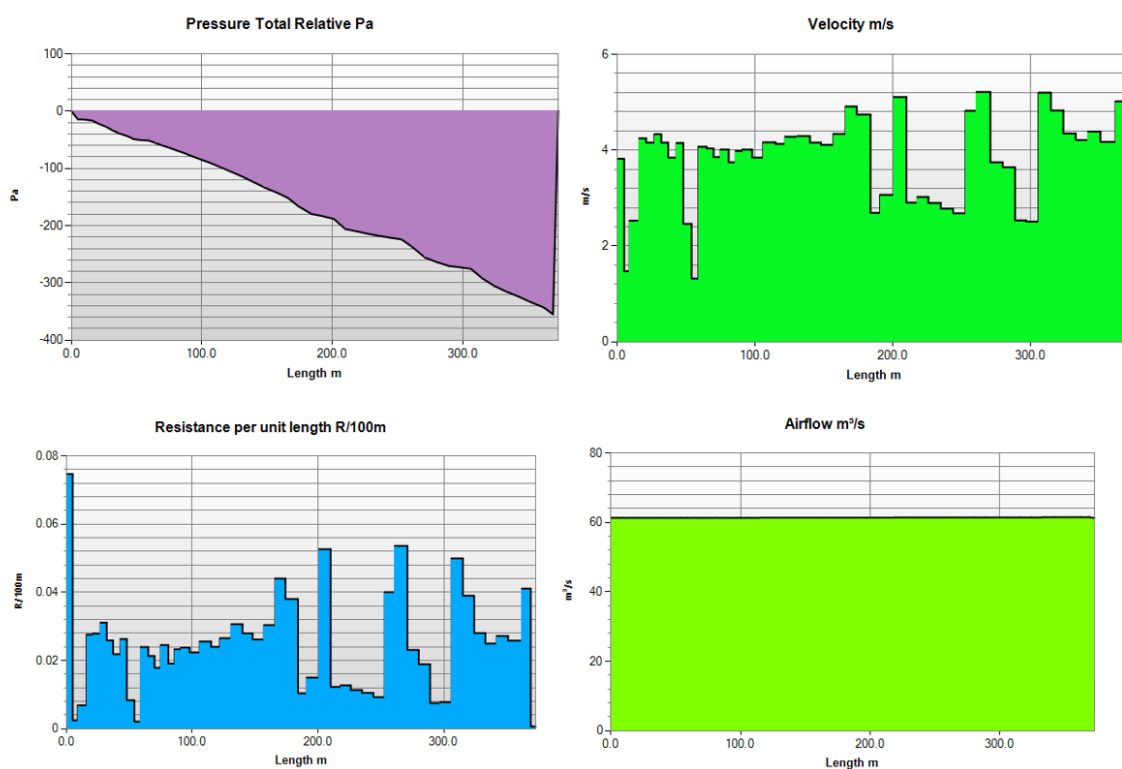
**Rys. 157** Zmiana współczynników:  $k$  (FF)(Atkinsonn) oraz  $\lambda$  (Darcy) dla segmentów od 10 – 242 w Badaniu G



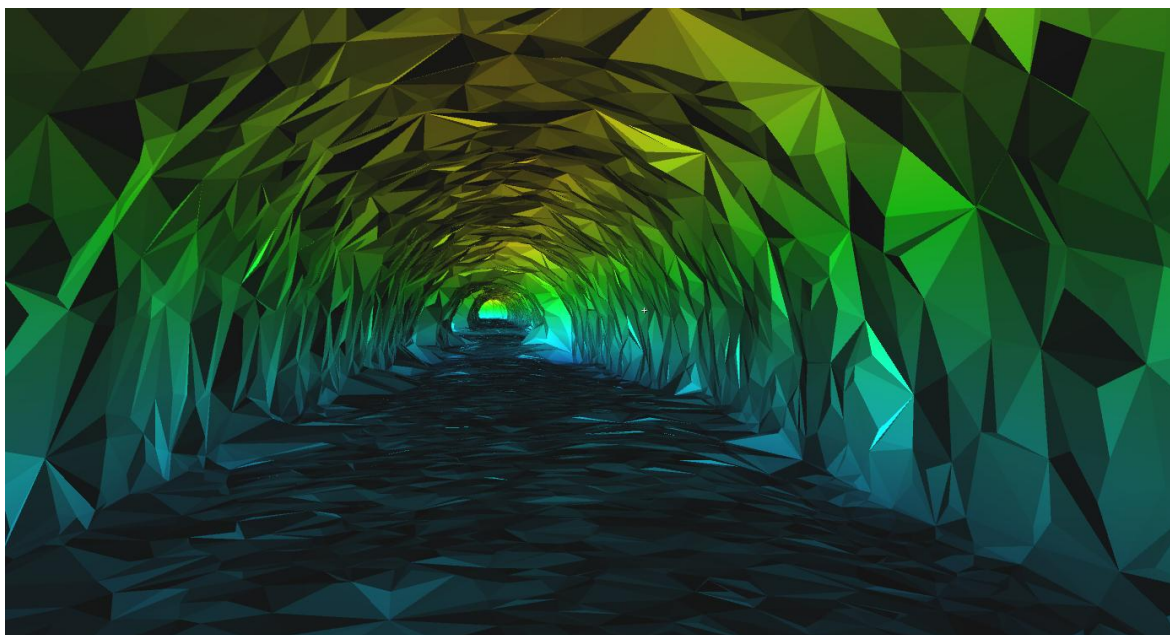
**Rys. 158** Zmiana chropowatości  $e, m$  oraz  $e/D$  dla segmentów od 10-242 w Badaniu G



**Rys. 159** Porównanie obliczeń spadku naporu nowej metody budowy sieci wentylacyjnej w zależności od metody obliczenia i gęstości powietrza (dla segmentów od 10-242), L=358,6m w Badaniu G



**Rys. 160** Wyniki obliczeń w oprogramowaniu VentSim według nowej metody budowy modeli wentylacyjnych w Badaniu G



**Rys. 161** Wizualizacja odwzorowania segmentów siatką mesh (według nowej metody budowy modeli wentylacyjnych) w Badaniu G

Pierwotny skan wyrobiska zawierał 114 535 742 punktów w chmurze i zajmował 2 184,6 MB w pliku LAS. Po redukcji chmury pozostało 1 144 748 punktów o łącznym rozmiarze 30,42 MB w pliku CSV.

Wygenerowana siatka (mesh) na podstawie zredukowanej chmury punktów zajmowała 32,83 MB w pliku DXF.

Można oszacować, że wykonanie skanu całej kopalni średniej wielkości (100 km) w wersji pierwotnej (niezredukowanej) zajmie około 600 GB, natomiast skan zredukowany dla wyznaczenia chropowatości – 8 GB, a wygenerowana siatka (mesh) – 8,6 GB.

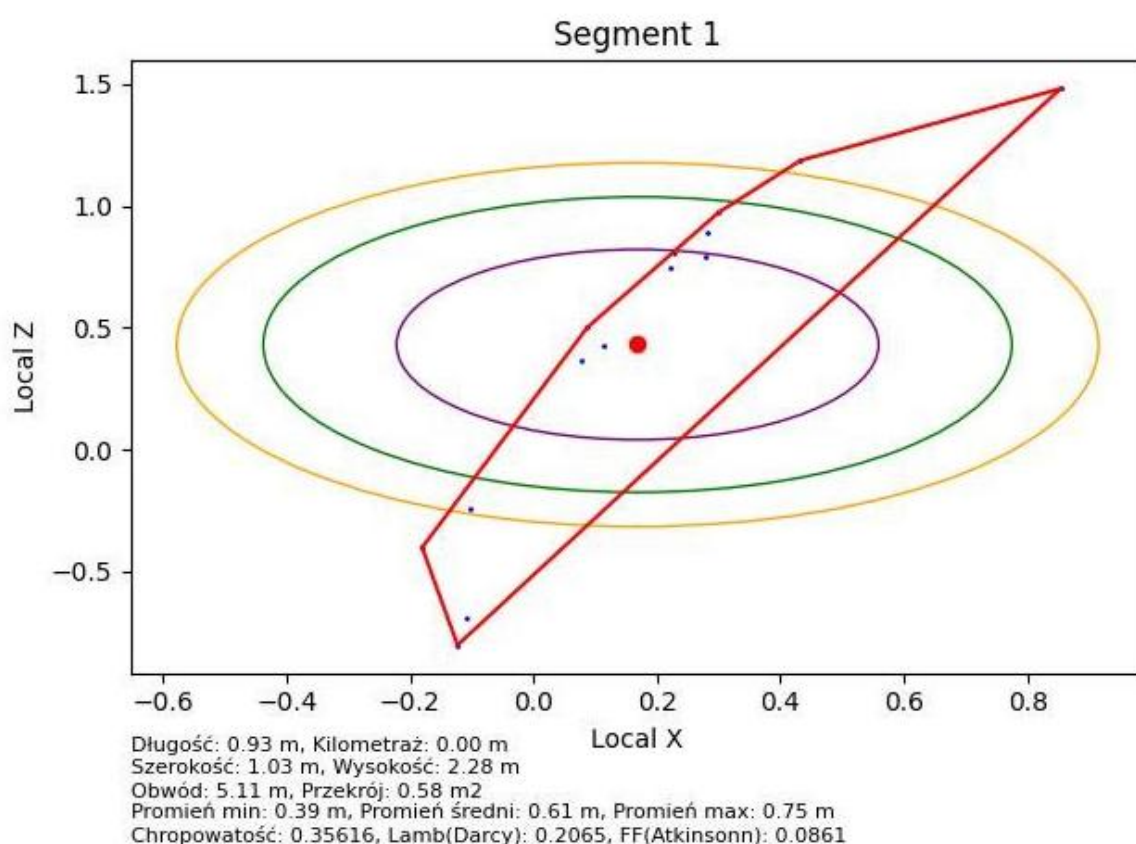
Czas obliczeń na komputerze PC (przez kompilator PyCharm) na podstawie zredukowanej chmury punktów, obejmujących utworzenie polilinii 3D, przekrojów oraz wyznaczenie współczynników oporu dla każdego segmentu (wraz z przekrojami – rysunki), wynosi około 90 s dla 369 mb (4,1 m wyrobiska/s). Dla 100 km wyrobiska czas obliczeń szacuje się na około 7 godzin.

## 6.8 Wnioski z badania G

Jak wykazano w Badaniu G, nowa metoda budowy sieci wentylacyjnych oparta na skaningu laserowym ma szansę na praktyczne zastosowanie w kopalniach podziemnych oraz tunelach.

Brak konieczności geolokalizacji (znaczników) pozwala na szybkie wykonywanie skaningu. Według obserwacji i testów przeprowadzonych podczas opracowywania metody, niektóre skanery wykazują „dryf” kierunku skanu na poziomie do około 5 m na każde 1000 mb skanu. Taka dokładność odwzorowania jest wystarczająca dla służb wentylacji (poziom odwzorowania tzw. GIS-owski).

Podczas analizy wyników zrezygnowano z prezentacji pierwszych i ostatnich 10 segmentów wyrobiska. Decyzja ta spowodowana była powstałymi błędami w skrajnych punktach chmury punktów. Błędy spowodowane były próbą opracowania przekrojów i wyznaczenia chropowatości względnej wyrobiska przez algorytm już od pierwszych punktów chmury punktów (gdzie ilość ich była niewielka).



**Rys. 162** Segment 1 – błędy w opracowaniu przekroju i wyznaczenia chropowatości w badaniu G

Błąd pierwszych i ostatnich metrów skanowanego wyrobiska w został skorygowany w opisie nowej metody budowania sieci wentylacyjnej (rozpoczęcie skanu należy zacząć na środku skrzyżowania wyrobisk – w węzłach sieci).

Założenia metody wykorzystują wszystkie informacje zawarte w chmurze punktów – celowo nie rezygnując z „szumów” oraz skanów wyposażenia wyrobiska. Jest to spowodowane chęcią uwzględnienia elementów infrastruktury wyrobiska

(np. odstawy urobku taśmociągami, rurociągów itp.) przy określaniu współczynników oporu. Zauważono, że chropowatość względną dla każdego segmentu można pośrednio wyznaczyć poprzez analizę gęstości (liczby) rozłożenia punktów względem lokalnego centrum (środek segmentu jest średnią współrzędną wszystkich punktów).

Wszystkie te operacje są realizowane przy użyciu open-source'owych programów, co eliminuje konieczność korzystania z kosztownego oprogramowania komercyjnego. Dzięki temu możliwe jest zachowanie elastyczności oraz dostępności narzędzi bez dodatkowych kosztów licencyjnych.

Metoda wyznaczania oporów bocznic na podstawie współczynnika oporu oraz geometrii wyrobiska nie była popularna w Polsce ze względu na teoretyczną niedokładność przy dużych zmianach gęstości powietrza (depresja naturalna w głębokich kopalniach) oraz konieczność dokładnego wprowadzenia geometrii wyrobiska. Jednakże rozwój programów symulacyjnych (np. VentSim, VUMA3D itp.) pozwala uwzględniać w obliczeniach wpływ depresji cieplnej oraz zmianę gęstości powietrza wynikającą ze zmiany jego składu gazowego, stopnia geotermicznego kopalni, budowy geologicznej, czasu przewietrzania i innych - automatycznie.

Prezentowane wyniki obliczeń stanowią jedynie fragment całego materiału badawczego zebranego podczas opracowywania metody. Konieczność redukcji chmury punktów, sposób usuwania szumów przed generowaniem siatki, metoda wyznaczania centroidów chmury punktów itp. są efektem setek godzin pracy nad przetwarzaniem dużych zbiorów danych chmury punktów. W ramach testów zeskanowano około 5000 mb wyrobisk.

## **7. Integracja modelu numerycznego z systemem gazometrycznym kopalni**

### **7.1. Opracowanie sposobu łączenia modelu sieci wentylacyjnej w VentSim z czujnikami gazometrycznymi JSW S.A**

W systemie gazometrycznym kopalń JSW S.A. funkcjonuje program wizualizacji wartości czujników - Zefir. Prezentowane są w nim przetworzone sygnały pochodzące z centrali gazometrycznej kopalni, udostępniane użytkownikom (dyspozytorom, osobom z kierownictwa oraz dozoru ruchu).

Program VentSim umożliwia prezentację danych z czujników systemu gazometrycznego oraz na ich podstawie, uwzględniania ich wartości w symulacjach dynamicznych. Umieszczenie czujnika w modelu sieci wentylacyjnej oraz aktywacja funkcji symulacji powodują, że jego wskazania zostają „sprzężone” z przebiegiem symulacji. W efekcie wartości przepływów wejściowych i wyjściowych w danym węźle zostają dostosowane do aktualnych danych pomiarowych z czujnika.

Oznacza to, że jeżeli – przykładowo – w bocznicy symulacja bez czujników wykazuje wydatek powietrza na poziomie  $800 \text{ m}^3/\text{min}$  przy prędkości przepływu  $v = 0,8 \text{ m/s}$ , a czujnik systemu Zefir wskazuje rzeczywistą prędkość  $v = 1,0 \text{ m/s}$ , program przeliczy i „wymusi” w modelu nowy wydatek powietrza wynikający z tego pomiaru.

Aby umożliwić współpracę programu VentSim z czujnikami gazometrycznymi kopalni, należy spełnić kluczowy warunek - brak ingerencji w dane źródłowe gromadzone przez centrale gazometryczne. Wynika to zarówno z wymogów bezpieczeństwa systemu, jak i konieczności zachowania integralności danych rejestrowanych. Warunek ten można spełnić poprzez uruchomienie tzw. serwera lustrzanego, pracującego w sieci odizolowanej od systemu produkcyjnego.

Na podstawie licznych prób integracji danych, analiz stabilności działania oraz wymagań w zakresie cyberbezpieczeństwa opracowano model połączenia systemów, przedstawiony poniżej.



## 7.2. Zbieranie danych pomiarowych z czujników Zefir

System Zefir rejestruje dane z czujników rozmieszczonych w sieci wyrobisk podziemnych. Dane te obejmują:

- ID czujnika (np. ZX:001)
- Czas pomiaru (np. 2021-03-01 10:13:39)
- Wartość pomiaru (np. 1)
- Typ czujnika (np. Centralka)
- Jednostka pomiarowa (brak lub ppm, °C itd.)
- Lokalizacja opisowa (np. Komora olejowa poz.705)
- Współrzędne X, Y, Z (jeśli dostępne)

Plik z danymi ma format .txt, .csv lub inny bazodanowy, a każda linia zawiera ostatnią wartość każdego czujnika w systemie. Plik jest nadpisywany co minutę (tab. 49).

**Tabela 49** Przykładowy forma zapisu danych z programu Zefir

| IDENT# | CZAS POMIAR         | TypCzujnika | JEDN#     | LOKALIZACJA                                                        | X | Y | Z |
|--------|---------------------|-------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|---|---|---|
| ZX:001 | 2021-03-01 10:13:39 | 1           | Centralka | Komora olejowa poz.705                                             |   |   |   |
| ZX:004 | 2021-03-01 10:13:39 | 1           | Centralka | Przekop taśmowy DF poz.1080                                        |   |   |   |
| ZX:005 | 2021-03-01 10:13:39 | 1           | Centralka | Upadowa równoległa do poz.1110                                     |   |   |   |
| ZX:006 | 2021-03-01 10:13:39 | 1           | Centralka | Ch. podścianowy G-4 p.416/3, 10-50m od wlotu do ściany G-4 p.416/3 |   |   |   |
| ZX:007 | 2021-03-01 10:13:39 | 1           | Centralka | Przecinka transportowa G-2 poz. 900                                |   |   |   |

Przygotowany algorytm w języku VBScript umożliwia automatyczne nadpisywanie danych do pliku w formacie tekstowym (np. .csv lub .txt), zgodnie z wymaganiami programu VentSim.

Plik z danymi, generowany przez skrypt, musi zawierać następujące kolumny (tabela 50 i 51). Tabela 50 zawiera zestawienie nazw kolumn wykorzystywanych podczas importu danych z systemu Zefir do programu VentSim. Struktura pliku danych musi być zgodna z tym schematem, aby umożliwić poprawne odwzorowanie i dynamiczną symulację parametrów środowiskowych w modelu wentylacyjnym. Kolumny takie jak SENSORID, TIMESTAMP, VALUE czy SENSORTYPE identyfikują czujnik, czas i wartość pomiaru. Kolumny X, Y, Z definiują jego lokalizację przestrzenną, natomiast VSLOCATION oraz EQUIPMENTTYPE pozwalają zmapować dane bezpośrednio na elementy modelu VentSim. Dodatkowe pola, jak DESCRIPTION, SIMULATE, COMMENTS i RECORDUNITS, umożliwiają przypisanie opisów, aktywację w symulacjach oraz dostosowanie jednostek i progów alarmowych.

Tabela 51 zawiera z kolei pełen spis typów czujników (SENSORTYPE) obsługiwanych w VentSim, wraz z odpowiadającą numeracją. Typy czujników podzielono na grupy

funkcjonalne: czujniki ciśnienia (0–5), przepływu (6–7), temperatury i wilgotności (8–12), gazów (13–31), regulatory przepływu (32–33), wentylatory (34–37) oraz urządzenia (38–41). Dzięki tej klasyfikacji dane mogą być poprawnie przetwarzane przez silnik symulacyjny VentSim – np. czujnik ciśnienia barometrycznego będzie miał przypisany kod 2, a czujnik gazu metanu – kod 21.

**Tabela 50** Nazwy kolumn dla integracji danych Zefir w VentSim

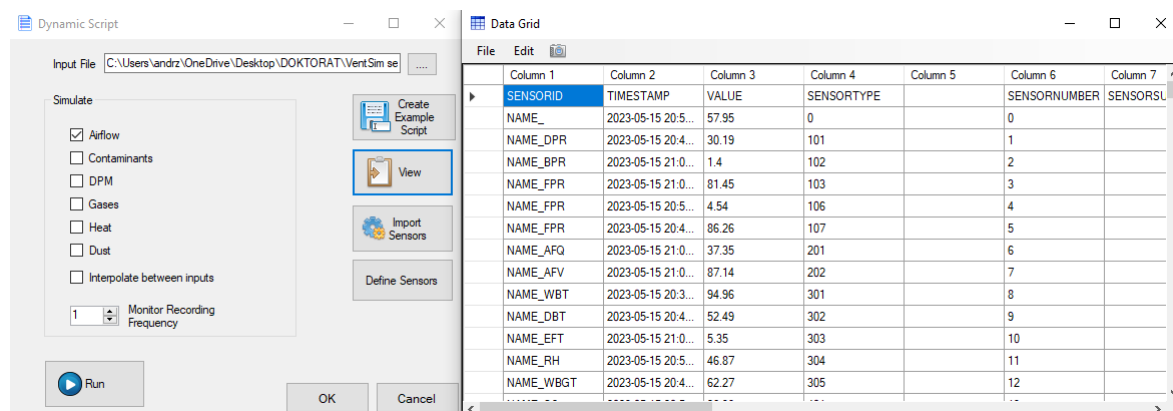
| Nazwa (EN)    | Tłumaczenie (PL)                        |
|---------------|-----------------------------------------|
| SENSORID      | Identyfikator czujnika                  |
| TIMESTAMP     | Znacznik czasu (data i godzina pomiaru) |
| VALUE         | Wartość pomiaru                         |
| SENSORTYPE    | Typ czujnika                            |
| SENSORNUMBER  | Numer czujnika                          |
| SENSORSUB     | Podtyp czujnika                         |
| DESCRIPTION   | Opis lokalizacji / funkcji czujnika     |
| UNITS         | Jednostka pomiarowa                     |
| SIMULATE      | Uwzględnić w symulacji (tak/nie)        |
| X             | Współrzędna X                           |
| Y             | Współrzędna Y                           |
| Z             | Współrzędna Z                           |
| VSLOCATION    | Lokalizacja w modelu VentSim            |
| EQUIPMENTTYPE | Typ urządzenia                          |
| COMMENTS      | Komentarze                              |
| UNITSTYPE     | Typ jednostki (np. analogowa, binarna)  |
| RECORDUNITS   | Jednostka zapisu (np. °C, ppm, m/s)     |

**Tabela 51** Spis typoszeregu czujników rozpoznawanych w VentSim i ich numeracja (SENSORTYPE)

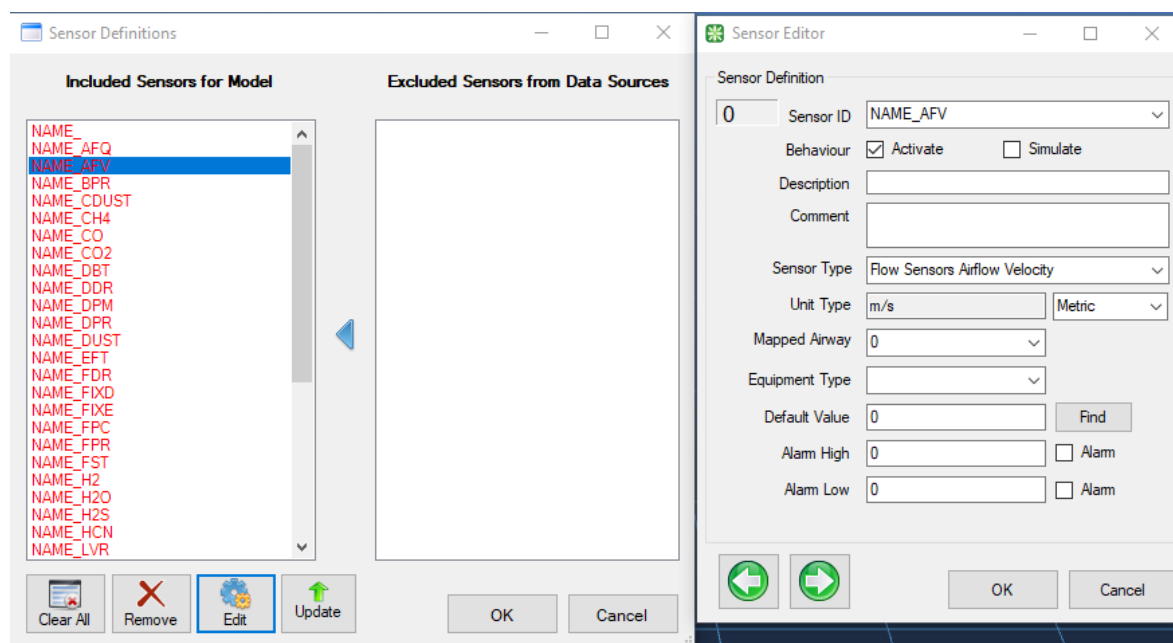
| Nr | SensorType (EN)                                          | Tłumaczenie (PL)                       |
|----|----------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| 0  | Unknown                                                  | Nieznane                               |
| 1  | Pressure Sensors Differential Pressure                   | Czujnik ciśnienia różnicowego          |
| 2  | Pressure Sensors Barometric pressure                     | Czujnik ciśnienia barometrycznego      |
| 3  | Pressure Sensors Fan Pressure                            | Czujnik ciśnienia wentylatora          |
| 4  | Pressure Sensors Length                                  | Czujnik długości                       |
| 5  | Pressure Sensors Resistance                              | Czujnik oporu                          |
| 6  | Flow Sensors Airflow Volume                              | Czujnik objętości przepływu powietrza  |
| 7  | Flow Sensors Airflow Velocity                            | Czujnik prędkości przepływu powietrza  |
| 8  | Temperature Sensors Wet Bulb Temperature                 | Czujnik temperatury mokrego termometru |
| 9  | Temperature Sensors Dry Bulb Temperature                 | Czujnik temperatury suchego termometru |
| 10 | Temperature Sensors Effective Temperature Tables Missing | Czujnik temperatura efektywna          |
| 11 | Temperature Sensors Relative Humidity                    | Czujnik wilgotności względnej          |
| 12 | Temperature Sensors Relative Humidity                    | Czujnik wilgotności względnej          |
| 13 | Gas Sensors Oxygen                                       | Czujnik gazu: Tlen                     |
| 14 | Gas Sensors Carbon Dioxide                               | Czujnik gazu: Dwutlenek węgla          |
| 15 | Gas Sensors Nitrogen                                     | Czujnik gazu: Azot                     |
| 16 | Gas Sensors Carbon Monoxide                              | Czujnik gazu: Tlenek węgla             |
| 17 | Gas Sensors Nitrous Oxide                                | Czujnik gazu: Podtlenek azotu          |
| 18 | Gas Sensors Nitrogen Dioxide                             | Czujnik gazu: Dwutlenek azotu          |
| 19 | Gas Sensors Nitrogen Oxides                              | Czujnik gazu: Tlenki azotu             |
| 20 | Gas Sensors Sulphur Dioxide                              | Czujnik gazu: Dwutlenek siarki         |
| 21 | Gas Sensors Methane                                      | Czujnik gazu: Metan                    |
| 22 | Gas Sensors Hydrogen                                     | Czujnik gazu: Wodór                    |
| 23 | Gas Sensors Hydrogen Sulphide                            | Czujnik gazu: Siarkowodór              |
| 24 | Gas Sensors Ammonia                                      | Czujnik gazu: Amoniak                  |
| 25 | Gas Sensors Hydrogen Cyanide                             | Czujnik gazu: Cyjanowodór              |
| 26 | Gas Sensors Diesel Particulates                          | Czujnik cząstek spalin diesla          |
| 27 | Gas Sensors Silica                                       | Czujnik gazu: Krzemionka               |
| 28 | Gas Sensors Nuisance Dust                                | Czujnik: Pył uciążliwy                 |
| 29 | Gas Sensors Smoke                                        | Czujnik: Dym                           |
| 30 | Gas Sensors H2OVapour                                    | Czujnik: Para wodna                    |
| 31 | Gas Sensors Custom                                       | Czujnik gazu: Niestandardowy           |
| 32 | Regulator Louve                                          | Regulator przepustnicy                 |
| 33 | Regulator Door                                           | Regulator drzwiowy                     |
| 34 | Fans Fan Operating                                       | Stan pracy wentylatora                 |
| 35 | Fans Fan Direction                                       | Kierunek pracy wentylatora             |
| 36 | Fans Fan Speed RPM                                       | Obroty wentylatora [RPM]               |
| 37 | Fans Fan Speed %                                         | Prędkość wentylatora [%]               |
| 38 | Equipment Fixed Diesel                                   | Sprzęt stacjonarny: Diesel             |
| 39 | Equipment Fixed Electric                                 | Sprzęt stacjonarny: Elektryczny        |
| 40 | Equipment Mobile Diesel                                  | Sprzęt mobilny: Diesel                 |
| 41 | Equipment Mobile Electric                                | Sprzęt mobilny: Elektryczny            |
| 42 | Contaminant Dust                                         | Zanieczyszczenia: Pył                  |

### 7.3. Łączenie danych

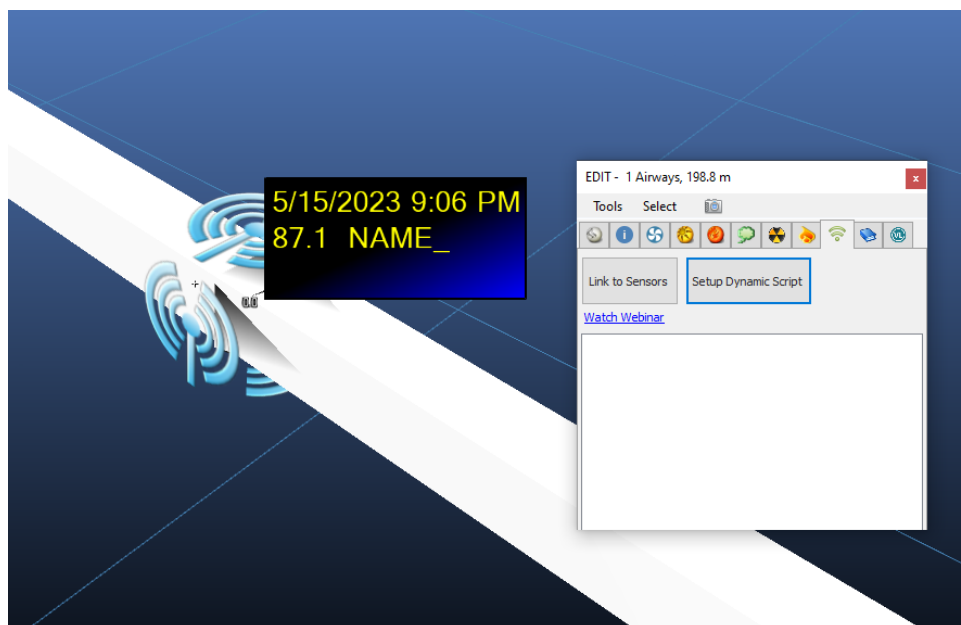
Przygotowany plik łączy się z programem VentSim poprzez funkcję Dynamic Script został przedstawiony na rysunkach 163-165.



Rys. 163 Połączenie danych z czujników gazometrii automatycznej z systemu Zefir do VentSim



Rys. 164 Konfiguracja poszczególnego czujnika w programie VentSim



**Rys. 165** Widok połączanego czujnika w programie VentSim z systemu Zefir.

Zaprezentowana powyżej procedura pozwala na skonfigurowanie bezpiecznego połączenia systemów i integrację czujników gazometrii automatycznej z modelem numerycznym w programie VentSim.

Przygotowanie danych odbywa się automatycznie poprzez działające w „tle” systemu operacyjnego Windows skryptu, który co 1 minutę pobiera ostatnie dane wszystkich czujników, ich wartości, opisy itp. i konwertując do pliku z nowymi (właściwymi dla programu VentSim opisami kolumn) nadpisując do pliku \*.txt, \*.csv, \*.xlsx.

#### **7.4. Wnioski z współpracy danych z czujników z modelem numerycznym sieci.**

W trakcie pracy z modelem numerycznym podłączono do niego szereg typoszeregów czujników, obejmujących pomiary prędkości przepływu powietrza, temperatury, stężenia metanu oraz tlenu węgla. Na podstawie obserwacji w trakcie pracy z różnymi konfiguracjami modelu sformułowano następujące wnioski:

- Zbyt duża liczba podłączonych czujników spowalnia działanie programu i może negatywnie wpływać na stabilność symulacji.
- Nie ma konieczności podłączania wszystkich czujników ani zastępowania pełnej wizualizacji oferowanej przez system Zefir (co prowadziłoby do dublowania systemów). Do tego celu służy dedykowane oprogramowanie VentSim Control.
- Zasadne jest wprowadzenie czujników, dla których prognozowane wartości są obarczone największym błędem, takich jak temperatura i wilgotność

powietrza. Czujniki te warto lokalizować w rejonach wlotowych prądów „świeżego” powietrza, doprowadzanego z szybów wdechowych.

- Symulacje dynamiczne oparte na danych z czujników powinny być wykonywane automatycznie co około 20 minut. Zbyt częste przeliczanie modelu (np. co 5 sekund) może doprowadzić do „zawieszenia” programu, ponieważ nowe obliczenia inicjowane są przed zakończeniem poprzednich.
- Integracja danych z czujników może być bardzo przydatna w analizie sytuacji zagrożeniowych, np. w odtwarzaniu przebiegu pożaru na podstawie zmian stężenia tlenu węgla zarejestrowanych przez czujniki.
- Istotną funkcjonalnością jest możliwość takiej konfiguracji pliku Excel, zawierającego dane ze stacji pomiarowych powietrza (główna książka przewietrzania), tak aby wartości te były automatycznie wczytywane i wykorzystywane w modelu numerycznym w programie VentSim. Stanowi to znaczne uproszczenie w porównaniu do integracji z zewnętrznym modulem VentLog.

## **8. Propozycja wytycznych do budowania i walidacji modeli wentylacyjnych w podziemnych zakładach górniczych**

W celu usystematyzowania budowania i walidacji cyfrowych modeli wentylacyjnych w podziemnych zakładach górniczych opracowano procedurę podzieloną na sześć etapów.

### **ETAP I – Odwzorowanie kopalni w przestrzeni**

Na tym etapie należy wyznaczyć wszystkie osie istniejących wyrobisk na podstawie map cyfrowych i przekształcić je w polilinie 3D w programie AutoCAD, uwzględniając układ współrzędnych. W kopalniach w których funkcjonuje cyfrowy model złoża można importować strukturę sieci z programu Deswik.

Przypisując atrybuty poszczególnych wyrobisk należy uwzględnić podział na poziomy, pokłady i funkcję, jaką dane wyrobisko spełnia. Sytuacją idealną jest przeniesienie wszystkich wyrobisk, które powstały od początku istnienia kopalni.

Jeżeli dostępny jest skaner laserowy, należy wykonać skanowanie i wprowadzić dane do modelu, rozpoczynając od najważniejszych dróg wentylacyjnych (grupowe prądy powietrza).

Należy skonfigurować ustawienia podstawowe programu – dla kopalń JSW S.A. można posłużyć się wartościami określone w Badaniach A i B (Badanie dynamiki zmiany parametrów atmosfery).

### **ETAP II – Nadanie wyrobiskom atrybutów**

Na tym etapie należy zintegrować wszystkie dostępne dane z różnych źródeł w celu nadania wyrobiskom odpowiednich cech fizycznych oraz przypisania wstępnych współczynników oporu.

Należy uwzględnić m.in.:

- średnice szybów wraz z ich wyposażeniem,
- szerokość i wysokość wyrobisk,
- średnice otworów wentylacyjnych.

### **ETAP III – Wprowadzenie urządzeń i tam wentylacyjnych**

W tym etapie należy wprowadzić charakterystyki używanych wentylatorów oraz lokalizację tam wentylacyjnych.

Ważne, aby tamy były wprowadzone już z uwzględnieniem ich rzeczywistego oporu. W celu jego wyznaczenia należy wykonać pomiary spadku naporu oraz ilości powietrza

w bocznicy i wprowadzić wyniki do programu. Jeżeli tylko pozwala na to układ i funkcjonalność tam wentylacyjnych, opory dla każdej z tam wentylacyjnych powinien być wyznaczany osobno (np. gdy są dwie tamy wentylacyjne - opór tamy wyznaczamy, gdy druga tama wentylacyjna jest otwarta).

#### **ETAP IV – Wykonanie badania potencjałów w sieci kopalnianej**

Podstawowym problemem przy prawidłowym wykonaniu zdjęcia potencjalnego kopalni są liczne błędy pomiarowe wynikające m.in. z:

- niedokładności pomiarów ciśnienia barometrycznego w na dole kopalni,
- wpływu otwierania lub zamykania tam wentylacyjnych,
- ruchu kolejek lub klatki maszyny wyciągowej,
- zmian ciśnienia atmosferycznego,
- błędów ludzkich (np. błędne odczyty lub zapisy godziny, ciśnienia, temperatury).

W wyrobiskach o bardzo małej ilości powietrza spadek naporu jest często niższy od błędu pomiarowego barometru, opory należy wprowadzić na podstawie statystycznie wyznaczonych oporów ( $FF$ ,  $k_{1,2}$ ) w Badaniu E (statystyczne wyznaczenie współczynników oporu dla typowych wyrobisk w JSW S.A. na podstawie badań sieci wentylacyjnych).

Jeżeli wcześniej wykonano skanowanie kopalni lub jej części, przypisane wartości współczynników oporu i geometrii wprowadzić nową metodą budowania sieci wentylacyjnych z wykorzystaniem skaningu laserowego – opisanej w Badaniu G.

#### **Automatyczne przypisanie oporów w VentSim**

Istotną funkcją programu VentSim jest możliwość automatycznego przypisania oporów wyrobiska bez konieczności wykonania zdjęcia potencjalnego. Bazuje to na znanych parametrach, takich jak:

- długość wyrobiska,
- przekrój poprzeczny,
- typ obudowy lub funkcja wyrobiska.

#### **Określenie oporów dla różnych typów wyrobisk**

Opory w szybach mogą odpowiadać nawet za 30-40% całkowitego oporu kopalni, dlatego ich poprawne wyznaczenie jest kluczowe. Należy wykonywać je dla każdego poziomu osobno, najlepiej w okresach średniorocznych depresji naturalnych (marzec–kwiecień lub wrzesień–październik).



W przypadku wstępnej walidacji modelu, do czasu dokładnego badania oporów w szybach, należy przyjąć  $FF = 0,0321 \text{ kg/m}^3$ .

Opory w grupowych prądach powietrza, podobnie jak w przypadku szybów, należy określić z dużą starannością – stanowią 25-35% oporu kopalni.

Wstępnie można przyjąć wartości:

Wyrobyśka w obudowie ŁP – bez odstawy:  $FF = 0,0165 \text{ kg/m}^3$

Wyrobyśka ŁP z odstawą:  $FF = 0,0295 \text{ kg/m}^3$

Opory w wyrobiskach wybierkowych (ścian) są zmienne w czasie i mogą się znacznie różnić w ciągu doby, zwłaszcza w trudnych warunkach geologiczno-górnictwowych. Przyjęto medianę dla tego typu wyrobisk:  $FF = 0,0851 \text{ kg/m}^3$ . Wyznaczenie oporów wyrobisk ścianowych może odbywać się z wykorzystaniem obserwacji wskazań czujników różnicy ciśnienia na tamach wentylacyjnych oraz czujników barometrycznych zabudowanych w rejonach – zgodnie z „Metoda badania stanu potencjałów sieci wentylacyjnej w czasie rzeczywistym” opisaną w Badaniu D.

#### **ETAP V – Uszczegółowienie modelu kopalni**

W tym etapie należy uwzględnić kluczowe dane, które mogą wpływać na: temperaturę powietrza, wyznaczenie dróg ucieczkowych, akcje ratownicze.

Do modelu należy wprowadzić m.in.:

- emisję metanu w wyrobiskach,
- lokalizację chłodnic powietrza,
- trasy kolejek spalinowych,
- lokalizację rozlewisk wody,
- lokalne źródła ciepła i inne.

Uwaga! Dodawanie nadmiernej ilości szczegółów może spowolnić obliczenia i obniżyć czytelność modelu. Należy wprowadzać tylko istotne dane, które mają realny wpływ na sieć wentylacyjną kopalni.

#### **ETAP VI – Utrzymanie dostatecznego odwzorowania stanu sieci w modelu**

Odpowiednio aktualizowany model sieci wentylacyjnej, może być istotną pomocą w trakcie podejmowania trudnych decyzji (Akcja Ratownicza, zmiana decyzji związanych z udostępnieniem i przygotowaniem złoża do eksploatacji w kopalni i innych). Model z niedostatecznie odwzorowaną siecią oraz obsługiwany przez niedostatecznie przeszkoloną osobę, będą generować błędne wyniki symulacji. Podjęcie decyzji o te niepewne dane mogą prowadzić do powstania zagrożenia lub generować wysokie koszty.

Dlatego też dbanie o aktualność modelu sieci wentylacyjnej jest ważne. Proces jest ciągły – nigdy nie kończący się.

Na podstawie wieloletnich prac z modelami sieci wentylacyjnych w JSW S.A. proponuje się następującą częstotliwość aktualizacji:

- minimum 1 x w roku wykonanie zdjęcia potencjalnego kopalni z wyznaczeniem kierunków i ilości powietrza, wraz z wyznaczeniem wszystkich oporów skupionych (tamy wentylacyjne),
- minimum 1 x w miesiącu aktualizacja postępu robót przygotowawczych oraz wydobywczych na podstawie odbiorów. Koniecznie należy sprawdzić, czy stan sieci i jego wyposażenie nie zmieniło się (spadki naporów na tamach w rejonie, ilości powietrza, typy pracujących wentylatorów, itp.),
- w ciągu 24h od wprowadzonej zmiany stanu wentylacji w tym zwłaszcza zbiccia wyrobisk, uruchomienie lub likwidacja tamy wentylacyjnych, izolacja rejonów (tamowanie), zmiana lokalizacji komory SUSOUO itp.

Zaktualizowana sieć powinna być zapisana na USB oraz w ogólnie dostępnym w dziale wentylacji katalogu.

Dodatkowo dla ciągłej kontroli stanu odwzorowania, proponuje się o wprowadzenie w systemach dyspozytorskich (np. Zefir) – obliczenia aktualnego stanu potencjałów sieci na podstawie wskazań czujników barometrycznych i różnicy ciśnień, przynajmniej w miejscach wskazanych w Badaniu D.

## 9. Analiza poziomu błędów w wyznaczaniu spadków naporów bocznic wentylacyjnych w kopalnianej sieci wentylacyjnej

### 9.1. Błąd obliczenia prędkości powietrza w bocznicy wentylacyjnej

W procesie pomiaru prędkości powietrza w wyrobiskach górniczych przy użyciu anemometrów skrzydełkowych lub innych urządzeń pomiarowych, nieuniknione jest występowanie błędów, które mogą mieć charakter systematyczny lub losowy. Ich źródłem mogą być m.in. właściwości przepływu powietrza, sposób wykonania pomiaru oraz dokładność pomiarowa zastosowanego przyrządu.

W celu właściwego oszacowania niepewności pomiaru, zakłada się niezależność poszczególnych źródeł błędów, co umożliwia zastosowanie zasady sumowania kwadratów niepewności. Całkowity błąd pomiaru prędkości powietrza wyznacza się wtedy jako pierwiastek kwadratowy z sumy kwadratów błędów cząstkowych:[93]

$$\Delta v = \sqrt{(\Delta v_1)^2 + (\Delta v_2)^2 + \dots + (\Delta v_n)^2} \quad (56)$$

Gdzie:

$\Delta v_1, \Delta v_2, \dots, \Delta v_n$  – to błędy związane z poszczególnymi czynnikami wpływającymi na pomiar.

W kontekście pomiaru prędkości powietrza w bocznicy, uwzględniono sześć źródeł błędów dla anemometru skrzydełkowego RAW:

- fluktuacje prędkości powietrza -  $\Delta v_{\text{fluk}}$ ,
- niewłaściwy kształt drogi trawersowania -  $\Delta v_{\text{traw}}$ ,
- prędkość przemieszczania anemometru -  $\Delta v_{\text{przes}}$ ,
- niejednorodny profil prędkości powietrza -  $\Delta v_{\text{prof}}$ ,
- zakłócenia wywołane obecnością osoby wykonującej pomiar -  $\Delta v_{\text{człow}}$ ,
- błąd przyrządu pomiarowego -  $\Delta v_{\text{przy}}$ .

Wzór do obliczenia błędu prędkości powietrza uwzględniamy błędy niezależne

$$\Delta v = \sqrt{(\Delta v_{\text{fluk}})^2 + (\Delta v_{\text{traw}})^2 + (\Delta v_{\text{przes}})^2 + (\Delta v_{\text{prof}})^2 + (\Delta v_{\text{człow}})^2 + (\Delta v_{\text{przy}})^2} \quad (57)$$

Wartości błędów poszczególnych czynników przyjęto dla uproszczenia jako 10% wartości pomiaru (z wyjątkiem błędu wskazania samego przyrządu – 1%).

Wartość błędu standardowego średniej prędkości przepływu wyraża się wzorem:[93]

$$\Delta v_{\text{średni}} = \frac{\Delta v}{\sqrt{N}} \quad (58)$$

Gdzie:

- N – liczba niezależnych pomiarów lub prób (zwyczajowo 3)

Błąd względny obliczamy:[93]

$$\text{Błąd względny} = \frac{\Delta v_{\text{średni}}}{v_{\text{pomiar}}} \cdot 100\% \quad (59)$$

Wynik wyznaczenia błędu pomiaru prędkości powietrza znajduje się w tabeli 52.

**Tabela 52** Wyniki wyznaczenia błędu pomiaru prędkości powietrza

| Parametr                   | Wartość | Jednostka | Opis                                                 |
|----------------------------|---------|-----------|------------------------------------------------------|
| $v_{\text{pomiar}}$        | 2.5     | m/s       | Zmierzona prędkość przepływu powietrza               |
| $\Delta v_{\text{fluk}}$   | 0.25    | m/s       | Błąd wynikający z niestabilności przepływu           |
| $\Delta v_{\text{traw}}$   | 0.25    | m/s       | Błąd wynikający z niedokładności trawersowania       |
| $\Delta v_{\text{przes}}$  | 0.25    | m/s       | Błąd wynikający z niejednorodnego przesuwu przyrządu |
| $\Delta v_{\text{prof}}$   | 0.25    | m/s       | Błąd wynikający z profilu przepływu                  |
| $\Delta v_{\text{człow}}$  | 0.25    | m/s       | Obecność osoby mogąca zaburzać przepływ              |
| $\Delta v_{\text{przy}}$   | 0.025   | m/s       | Błąd własny przyrządu pomiarowego                    |
| $\Delta v$                 | 0.6     | m/s       | Obliczony błąd z sumy kwadratów                      |
| N                          | 3       | -         | Liczba niezależnych prób                             |
| $\Delta v_{\text{średni}}$ | 0.3     | m/s       | Błąd standardowy średniej z pomiarów                 |
| Błąd względny              | 12.9    | %         |                                                      |

Jak wykazano w przykładzie, błąd względny i jego niepewność potrafi być bardzo znaczny i dla zmierzonej prędkości powietrza 2,5m/s wynosi 12.9%. Wartość ta jest zbliżona do wyznaczonej przez program Trawers, gdzie w monografii [31] dla prędkości anemometru 2,52 m/s niepewność wyniosła  $\pm 0,3$  m/s (12,62%)

## 9.2. Błąd obliczenia pola przekroju poprzecznego wyrobiska

### 9.2.1. Tradycyjna metoda pomiaru w przekroju wyrobiska

W analizie przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych kluczowe znaczenie ma poprawne wyznaczenie pola przekroju poprzecznego  $A$ , przez który przepływa powietrze. Pomiar ten wykonuje się zazwyczaj poprzez pomiar szerokości i wysokości wyrobiska. Pole przekroju dla wyrobiska w obudowie łukowo-podatnej (ŁP) można wtedy oszacować jako [40]:

$$A = S_z \cdot W \cdot 0,8 \quad (60)$$

Gdzie:

$S_z$  – szerokość wyrobiska,

$W$  – wysokość wyrobiska,

0,8 – współczynnik na profil łukowy (względem przekroju prostokątnego).

W praktyce, każdy z pomiarów  $S_z$  i  $W$  obarczony jest błędem, który wpływa na niepewność wyznaczonego pola  $A$ . Błąd względny pola przekroju  $\frac{\Delta A}{A}$  można wyznaczyć z reguły propagacji niepewności dla iloczynu dwóch zmiennych:[93]

$$\left(\frac{\Delta A}{A}\right)^2 = \left(\frac{\Delta S_z}{S_z}\right)^2 + \left(\frac{\Delta W}{W}\right)^2 \quad (61)$$

Następnie błąd bezwzględny:

$$\Delta A = A \cdot \frac{\Delta A}{A} \quad (62)$$

gdzie:

$\Delta S_z, \Delta W$  – błędy pomiaru szerokości i wysokości,

$\Delta A$  – błąd pomiaru powierzchni przekroju,

$A$  – wyznaczona powierzchnia przekroju.

Dla danych pomiarowych (założono niedokładność pomiaru szerokości wyrobiska 0.2m, a wysokości 0.5m – ze względu na możliwość występowania pustek w stropie i nierówności spągu) wynik wyznaczenia błędu znajduje się w tabeli 53.

**Tabela 53** Wyniki wyznaczenia błędu pomiaru przekroju poprzecznego (pomiar miejscowy)

| Parametr                                               | Szerokość | Wysokość |
|--------------------------------------------------------|-----------|----------|
| Wartość [m]                                            | 5.5       | 3.5      |
| Błąd pomiaru [m]                                       | 0.2       | 0.5      |
| Pole powierzchni przekroju A, m <sup>2</sup>           | 15.4      |          |
| Błąd bezwzględny $\frac{\Delta A}{A}$ , m <sup>2</sup> | 2.3       |          |
| Błąd względny, %                                       | 14,7%     |          |

Błąd pomiaru pola przekroju poprzecznego wyrobiska w analizowanym przypadku wynosi około 2.27 m<sup>2</sup>, co odpowiada 14.7% błędowi względnemu. Wartość ta jest bardzo duża i ma istotny wpływ na wyznaczenie błędu pomiaru ilości powietrza.

### 9.2.2. Metoda skaningu laserowego

Skaning laserowy (LiDAR) jest obecnie najdokładniejszą metodą pomiarową stosowaną do dokumentowania geometrii wyrobisk górniczych. W procesie tym uzyskuje się chmurę punktów odwzorowującą kształt wyrobiska z bardzo dużą rozdzielczością przestrzenną (rzędu milimetrów do centymetrów). Na podstawie przecięcia tej chmury z płaszczyzną poprzeczną wyznacza się przekrój, który może następnie posłużyć do obliczeń ilości powietrza, wymiany ciepła czy oporów przepływu.

Pomimo bardzo dużej dokładności, skaning 3D również obarczony jest niepewnością pomiarową, wynikającą z:

- dokładności urządzenia (rozrzut pojedynczych punktów),
- ilości punktów (gęstość chmury),
- jakości odwzorowania obwiedni przekroju,
- interpolacji obszaru,
- zakłóceń środowiskowych (np. pył, odbicia).

Zakładając, że przekrój składa się z N punktów pomiarowych, a dokładność pojedynczego punktu (np. w promieniu) wynosi  $\Delta r$ , to niepewność średniej pojedynczego pomiaru można wyrazić wzorem:[93]

$$u(\bar{x}) = \frac{\Delta r}{\sqrt{N}} \quad (64)$$

Ponieważ pole przekroju poprzecznego A zależy kwadratowo od charakterystycznego wymiaru (np. promienia w przypadku kształtu zbliżonego do koła), to względny błąd pola przekroju wynosi:[93]

$$\frac{\Delta A}{A} \approx 2 \cdot \frac{u(\bar{x})}{x} \quad (65)$$

Gdzie:

$x$  – średnia wartość charakterystycznego wymiaru przekroju (promień),

$u(\bar{x})$  – standardowa niepewność średniej wartości  $x$ , oszacowana na podstawie N punktów pomiarowych. .

Założenia zostały tak dobrane, aby można było je porównać z tradycyjną dokładnością wyznaczenia przekroju poprzecznego:

- charakterystyczny wymiar przekroju (promień): 2,22 m,
- dokładność pojedynczego punktu: 0,005 m,
- liczba punktów w przekroju:  $N = 1000$ ,
- powierzchnia przekroju: 15,4752 m<sup>2</sup>.

**Tabela 54** Wyniki wyznaczenia błędu pomiaru przekroju poprzecznego (pomiar skanowaniem laserowym)

| Parametr                               | Wartość  | Jednostka      |
|----------------------------------------|----------|----------------|
| Powierzchnia przekroju A               | 15,475   | m <sup>2</sup> |
| Niepewność średniej wartości promienia | 0,000158 | m              |
| Błąd bezwzględny $\Delta A$            | 0,0022   | m <sup>2</sup> |
| Błąd względny $\frac{\Delta A}{A}$     | 0,0142%  | %              |

Bezpośrednio z nową metodą budowania modeli wentylacyjnych zachodzi konieczność wyznaczenia obwodu koła na podstawie wykonanego skaningu laserowego (tabela 55).

**Tabela 55** Parametry do obliczenia obwodu koła na podstawie skaningu laserowego

| Parametr                        | Wartość | Jednostka |
|---------------------------------|---------|-----------|
| Wyznaczony promień r            | 2,22    | m         |
| Niepewność pojedynczego pomiaru | 0,005   | m         |
| Liczba punktów N                | 1000    | -         |
| Obwód Ob                        | 13,9416 | m         |

Na podstawie powyższych obliczeń obliczono błąd wyznaczenia obwodu średniego koła na podstawie skaningu laserowego (tabela 56).

**Tabela 56** Wyniki wyznaczenia błędu obwodu koła na podstawie skaningu laserowego

| Parametr                                    | Wartość              |
|---------------------------------------------|----------------------|
| Obwód Ob                                    | 13,9416 m            |
| Błąd bezwzględny $\Delta Ob$                | 0,000993 m (0,99 mm) |
| Błąd względny obwodu $\frac{\Delta Ob}{Ob}$ | 0,00712%             |

Skaning laserowy zapewnia dużo większą dokładność wyznaczenia przekroju, rzędu 0,01–0,02%, przy odpowiedniej gęstości chmury punktów. W porównaniu z tradycyjnymi metodami opartymi na pomiarze szerokości i wysokości, w których błędy mogą sięgać 10–15%, technologia skanowania laserowego oferuje znaczną przewagę pod względem dokładności oraz możliwości automatycznej analizy dużej liczby przekrojów (tak jak to zaproponowano w nowej metodzie budowania modeli wentylacyjnych).

Porównując te wartości z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu nowej metody budowy modelu opartego na skaningu laserowym, gdzie średni błąd względny dla przekroju kołowego o promieniu  $r=2,0\text{m}$  wyniósł 0,08% (Tabela 48) – otrzymane wyniki można uznać za wiarygodne. Należy jednak zaznaczyć, że nie wszystkie przypadki zostały uwzględnione w analizie, m.in. z powodu przesłonięć wynikających z obecności lutniociągów lub innych instalacji, co skutkowało brakiem pełnych danych skanowania. Mimo to, precyzja wyników



uzyskanych metodą skaningu pozostaje nieporównywalnie wyższa w stosunku do metody tradycyjnej.

### 9.3. Błąd obliczenia spadku naporu metodą barometryczną

W celu określenia błędów pomiarowych wyznaczenia spadku naporu metoda barometryczną w analizie zastosowano uproszczenie polegające na porównaniu mierzonych ciśnień barometrycznych w trzech punktach (na zrębie szybu wdechowego, na wlocie i wylocie z bocznicy wentylacyjnej w jej węzłach).

Błąd całkowity pojedynczego pomiaru ciśnienia barometrycznego wyznaczono na podstawie następującego wzoru:

$$\Delta(\Delta p) = \sqrt{(\Delta p_{\text{przyrząd}})^2 + (\Delta p_{\text{pulsacja}})^2 + (\Delta p_{\text{wysokość}})^2 + (\Delta p_{\text{opóźnienie}})^2} \quad (66)$$

Gdzie:

$\Delta p_{\text{przyrząd}}$  - błąd dokładności czujnika BAR-TH  $\pm 25$  Pa

$\Delta p_{\text{pulsacja}}$  – błąd wynikająca z pulsacji sieci (średnia pulsacja ciśnienia w czasie 15 min 31.6 Pa – na podstawie Badania C)

$\Delta p_{\text{wysokość}}$  - błąd wynikający z nieprecyzyjnego oszacowania koty niwelacyjnej wliczając nierówność spągu i zakładając błąd ludzki (1m  $\sim 12.3$ Pa)

$\Delta p_{\text{opóźnienie}}$  - błąd wynikający z niesynchronicznych odczytów ciśnień na powierzchni i na dole kopalni (w 1min średnia zmiana ciśnienia 0,75 Pa – na podstawie Badania A i Badania C)

Na podstawie powyższych założeń obliczono błędy pomiarowe dla każdego z punktów (tab. 57).

**Tabela 57** Wyniki błędów pomiarowych ciśnienia barometrycznego

| Parametr                       | Jedn. | (p <sub>1</sub> ) | (p <sub>2</sub> ) | (p <sub>3</sub> ) |
|--------------------------------|-------|-------------------|-------------------|-------------------|
| Ciśnienie zmierzone            | Pa    | 100 000           | 100 000           | 100 000           |
| $\Delta p_{\text{przyrząd}}$   | Pa    | 25                | 25                | 25                |
| $\Delta p_{\text{pulsacja}}$   | Pa    | 31.6              | 31.6              | 0                 |
| $\Delta p_{\text{wysokość}}$   | Pa    | 12.3              | 12.3              | 12.3              |
| $\Delta p_{\text{opóźnienie}}$ | Pa    | 0.75              | 0.75              | 0.75              |
| Łączny błąd $\Delta(\Delta p)$ | Pa    | 42.1              | 42.1              | 27.9              |

|                                                                              |    |      |       |      |
|------------------------------------------------------------------------------|----|------|-------|------|
| Błąd średni (N=3)                                                            | Pa | 24.3 | 24.3  | 16.1 |
| Błąd średni błąd (p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub> , p <sub>3</sub> ) dla N=1 | Pa |      | 37.96 |      |
| Błąd średni błąd (p <sub>1</sub> , p <sub>2</sub> , p <sub>3</sub> ) dla N=3 | Pa |      | 21.92 |      |

W celu spełnienia kryterium poprawności (założenie, że błąd względny wyznaczonego spadku naporu wynosił  $\leq 10\%$ ) wyznaczone różnica ciśnień powinna spełniać warunek:

$$\frac{\Delta p}{|p|} \leq 10\% \quad (67)$$

gdzie:

$\Delta p$  - niepewność pomiaru spadku naporu (Pa) wyznaczona na podstawie p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub>

|p| - wartość bezwzględna spadku naporu (Pa) wyznaczona na podstawie p<sub>1</sub>, p<sub>2</sub>, p<sub>3</sub>

Z powyższych założeń otrzymujemy, że w metodzie barometrycznej wyznaczania spadku naporu |p|, dokładność obliczeń zależy bezpośrednio od liczby wykonanych niezależnych pomiarów. W tabeli poniżej zestawiono wartości spadków naporu uzyskane dla pojedynczego pomiaru oraz dla uśrednionego pomiaru na podstawie trzech prób jak w tabeli 58.

**Tabela 58** Wyznaczenie spadków naporu w metodzie barometrycznej spełniający warunek błędu względnego  $\leq 10\%$

| Liczba pomiarów N | Spadek naporu [Pa] |
|-------------------|--------------------|
| 1                 | 380                |
| 3                 | 219                |

Z przedstawionej analizy wynika, że aby wyznaczenie spadku naporu metodą barometryczną, a wraz z nim wyznaczenie oporu bocznicy, było wykonane z dokładnością nie mniejszą niż 10%, w przypadku, gdy wartość ciśnienia w węzłach bocznicy mierzona jest jednokrotnie (N = 1), spadek naporu musi wynosić powyżej 380Pa.

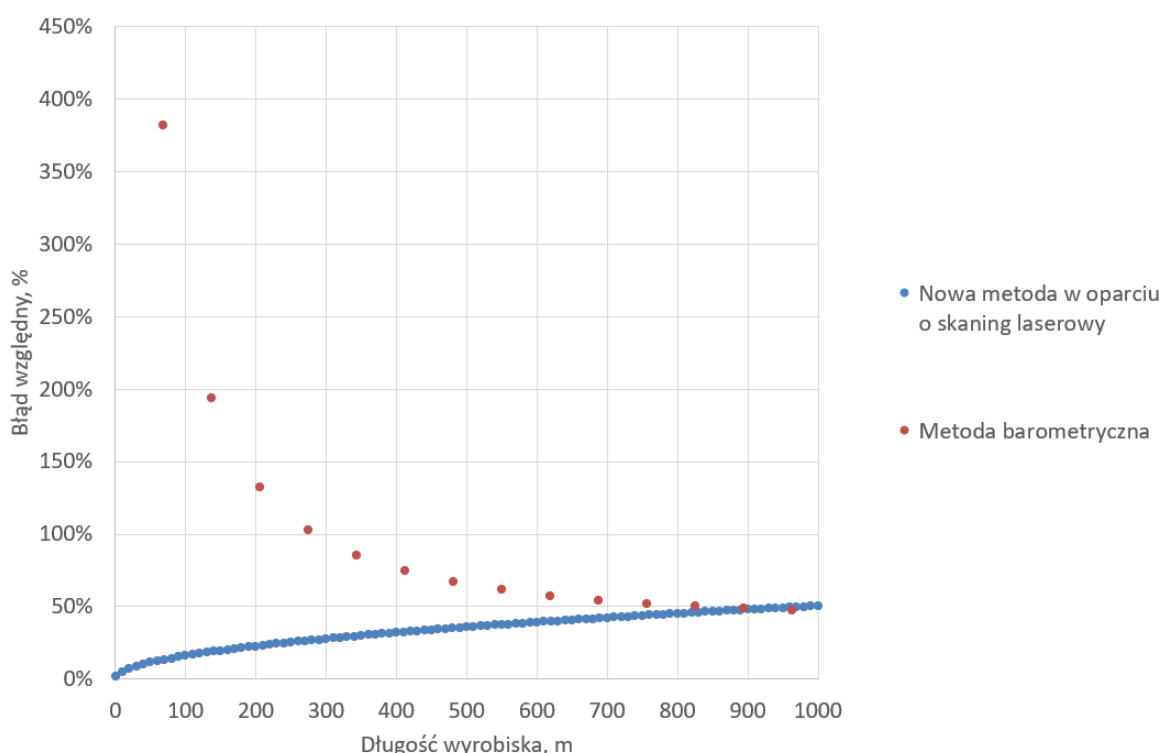
Z kolei zachowanie dokładności nie mniejszą niż 10% dla spadku naporu do wartości poniżej 290 Pa jest możliwe jedynie w przypadku co najmniej trzykrotnego (N = 3) powtórzenia pomiarów ciśnienia barometrycznego.

W praktyce górniczej zazwyczaj wykonuje się jednak pojedynczy odczyt ciśnienia w węzłach, co może skutkować istotnym wzrostem niepewności wyznaczonych oporów.

#### 9.4. Porównanie dokładności wyznaczenia oporów bocznicy metodą barometryczną i skaningu laserowego

W oparciu o przedstawione wcześniej oszacowania błędów pomiarowych dotyczących wyznaczania prędkości przepływu powietrza, przekroju, ilości powietrza oraz ciśnień barometrycznych, przeprowadzono symulację określającą błąd wyznaczenia oporu bocznicy w zależności od jej długości.

Obliczenia wykonano dla dwóch metod: klasycznej metody barometrycznej oraz nowej metody budowy modelu opartej na skaningu laserowym.



**Rys. 166** Porównanie błędów wyznaczenia oporów bocznicy w zależności od metody

Na wykresie przedstawiono względny błąd wyznaczenia oporu bocznicy w funkcji długości wyrobiska dla dwóch metod:

- metody barometrycznej (czerwone punkty),
- nowej metody opartej na skaningu laserowym (niebieskie punkty).

Wyznaczone wartości są tylko dla jednego warunku – wyrobiska o przekroju ok.  $15.4\text{m}^2$  i prędkością powietrza  $2.5\text{ m/s}$  z przykładowym oporem jednostkowym. Porównanie te ma na celu porównania i wyznaczenie w jaki sposób zmienia się błąd względny w zależności od długości wyrobiska i zastosowanej metody obliczeniowej.

### **9.4.1. Metoda barometryczna**

Dla krótkich bocznicy (poniżej 100 m) błąd względny oporu przekracza 400%, co oznacza, że wyniki są skrajnie niepewne i niereprezentatywne. Błąd zmniejsza się wraz ze wzrostem długości wyrobiska, jednak dopiero dla bocznicy o długości powyżej 800 m spada do poziomu poniżej 50%. W przedziale 200–500 m błąd wciąż oscyluje w granicach 100–60%, co nadal jest wartością bardzo dużą. W celu zwiększenia dokładności należy zwiększyć ilość wykonanych pomiarów dla tej samej bocznicy. Dlatego też metoda ta szczególnie dobrze sprawdza się dla wyznaczenia oporów szybów i wyrobisk o długości >800m lub znacznych prędkościach powierza (powodujących duże spadki naporu).

### **9.4.2. Nowa metoda w oparciu o skaning laserowy**

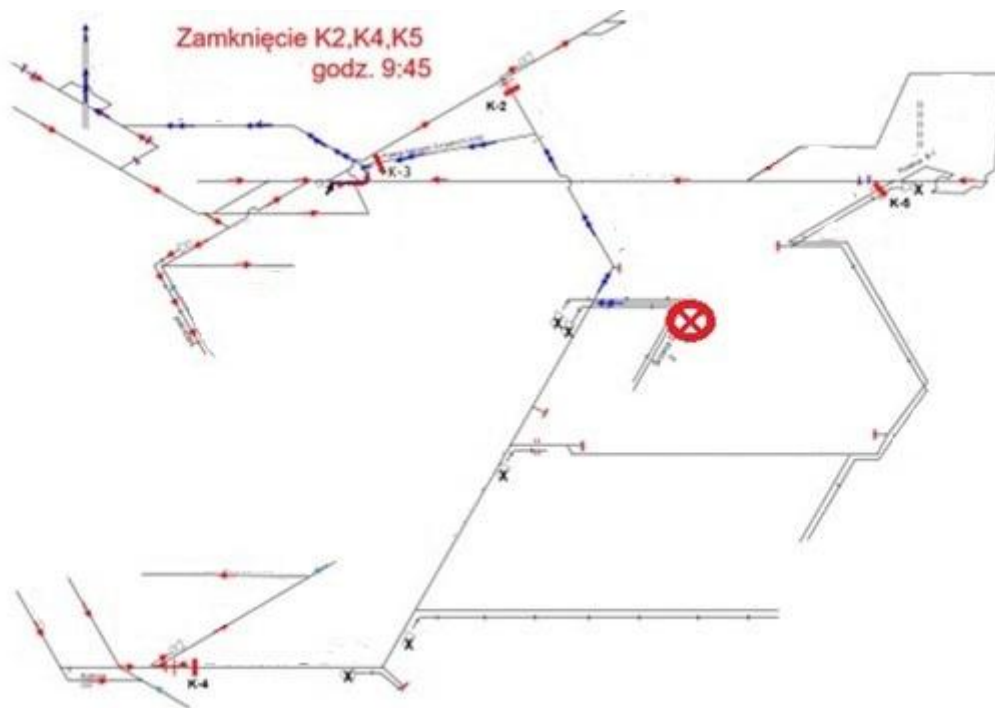
Charakteryzuje się znacznie niższym i stabilniejszym błędem względnym w całym analizowanym zakresie długości. Nawet dla najkrótszych wyrobisk (np. 20–50 m) błąd nie przekracza 20%, a dla długości rzędu 500–1000 m utrzymuje się poniżej 50%. Wzrost błędu w funkcji długości jest stopniowy i znacznie łagodniejszy niż w metodzie barometrycznej. Osiągnięcie tak niskich błędów spowodowane jest brakiem konieczności wykonania pomiarów ciśnienia, prędkości i ilości powietrza, a jedynie wyznaczenie przekrojów, które w tej metodzie wyznaczane są z bardzo dobrą dokładnością. Metoda ta może mieć większe błędy w przypadkach, gdy wyposażenie wyrobiska uniemożliwia wykonania dokładnego skanu („cienie” – braki w chmurze punktów).

## **10. Zastosowanie modeli symulacyjnych w sytuacjach awaryjnych**

### **10.1. Studium przypadku wykorzystania programu VentSim w trakcie pożaru endogenicznego w jednej z kopalń JSW S.A.**

W jednej z kopalń JSW S.A. doszło do powstania pożaru endogenicznego w likwidowanej ścianie. Ze względu na duże zagrożenie wybuchem oraz brak możliwości równoczesnego wykonania i zamknięcia wszystkich tam izolacyjnych o konstrukcji przeciwwybuchowej, mających na celu odizolowanie pola pożarowego, Kierownik Akcji Ratowniczej (KAR), po zasięgnięciu opinii Sztabu Akcji oraz Zespołu ds. Zagrożeń Naturalnych, poszerzonego o specjalistów, podjął decyzję o równoczesnym zamknięciu tam zasadniczych — z wyjątkiem tamy izolacyjnej wylotowej.

Podczas prac związanych z izolowaniem pola pożarowego prowadzono stały monitoring składu atmosfery kopalnianej, realizowany poprzez zabudowę czterech linii chromatograficznych przez Centralną Stację Ratownictwa Górniczego (CSRG) w Bytomiu. Analiza składu atmosfery w rejonie pożaru, uzyskana z linii chromatograficznych, stanowiła podstawę do oceny dokładności wykonanej symulacji w programie VentSim. Schemat sieci wentylacyjnej w rejonie pożaru obrazuje rysunek 167.



**Rys. 167** Schemat wentylacyjny rejonu pożaru.

W czasie konfiguracji scenariusza izolacji rejonu pożaru w programie VentSim zaznaczono jedynie prawdopodobną lokalizację ogniska pożaru, przyjmując intensywność spalania węgla na poziomie 4 ton na godzinę. Rozwój mocy pożaru w programie jest ograniczany przez dostępność tlenu. Symulacja uwzględnia dyfuzję gazów w rejonie ogniska pożaru, działanie depresji cieplnej na sieć wentylacyjną kopalni i inne.

Dodatkowo w modelu zdefiniowano lokalizacje tam izolacyjnych oraz momenty ich zamknięcia poprzez przypisanie odpowiednich wartości oporu lokalnego w bocznicach wentylacyjnych.

W celu ostatecznego wyizolowania rejonu pożaru, ze względu na bardzo trudne warunki klimatyczne panujące w rejonie wylotu (przy tamie izolacyjnej K3), podjęto decyzję o zamknięciu tam K2, K4 i K5, przy jednoczesnym pozostawieniu otwartej tamy K3.

Na wykonanie symulacji oraz analizę danych dostępne było jedynie 30 minut.

Poniżej przedstawione wykresy pochodzą bezpośrednio z przeprowadzonej symulacji — nie były one w żaden sposób modyfikowane. Weryfikacja uzyskanych wyników miała miejsce już w trakcie rzeczywistego zamykania rejonu pożaru przez OSRG, przy wykorzystaniu danych pochodzących z linii chromatograficznych.

## 10.2. Porównanie wyników symulacji ze stanem faktycznym

Przed rozpoczęciem pożaru ilość powietrza w rejonie tamy K-3 wynosiła około 1500 m<sup>3</sup>/h. W trakcie pożaru, ze względu na gęste zadymienie oraz bardzo wysoką temperaturę na wylocie, dokładne oszacowanie strumienia powietrza było utrudnione. W symulacji wykonanej w programie VentSim przy założonej temperaturze wynoszącej 120°C, ilość powietrza wzrosła do około 2750 m<sup>3</sup>/h. Wzrost ten jest wartością prawdopodobną i wynika z działania depresji pożaru oraz zmiany gęstości powietrza wskutek oddziaływania wysokiej temperatury.

Tabela 59 Pomiary rzeczywiste z linii chromatograficznych na wylocie z rejonu wentylacyjnego (tama K-3)

| (L-1) 250 m K-3              |       |                    |                     |        |                     |
|------------------------------|-------|--------------------|---------------------|--------|---------------------|
| NP                           | Godz. | O <sub>2</sub> [%] | CO <sub>2</sub> [%] | CO [%] | CH <sub>4</sub> [%] |
| 100                          | 03:00 | 16,12              | 3,62                | 0,4500 | 0,12                |
| 101                          | 04:00 | 17,21              | 2,63                | 0,3700 | 0,09                |
| 102                          | 05:00 | 17,02              | 2,58                | 0,3300 | 0,09                |
| 103                          | 06:00 | 18,45              | 1,48                | 0,1700 | 0,05                |
| 104                          | 07:00 | 18,30              | 1,62                | 0,1800 | 0,04                |
| 105                          | 08:00 | 16,43              | 3,34                | 0,3790 | 0,09                |
| 106                          | 09:00 | 16,74              | 3,00                | 0,3500 | 0,09                |
| MOMENT ZAMKNIĘCIA GODZ. 9:45 |       |                    |                     |        |                     |
| 107                          | 10:00 | 8,80               | 9,80                | 1,0120 | 0,29                |
| 108                          | 10:20 | 7,60               | 10,90               | 1,3960 | 0,46                |
| 109                          | 11:00 | 6,60               | 11,83               | 1,5700 | 0,49                |
| 110                          | 11:30 | 5,64               | 12,69               | 1,6400 | 0,54                |
| 111                          | 12:00 | 6,90               | 11,62               | 1,4500 | 0,53                |
| 112                          | 12:30 | 6,77               | 11,83               | 1,4800 | 0,50                |
| 113                          | 13:00 | 6,74               | 11,89               | 1,4700 | 0,51                |
| 114                          | 13:30 | 6,64               | 12,00               | 1,4600 | 0,51                |
| 115                          | 14:00 | 7,21               | 11,50               | 1,3900 | 0,49                |
| 116                          | 15:00 | 5,17               | 13,17               | 1,5400 | 0,57                |
| 117                          | 16:00 | 5,10               | 13,16               | 1,5100 | 0,57                |
| 118                          | 17:00 | 5,16               | 13,17               | 1,4700 | 0,56                |
| 119                          | 18:00 | 5,06               | 13,42               | 1,5300 | 0,57                |
| 120                          | 19:00 | 5,23               | 13,17               | 1,4600 | 0,57                |
| 121                          | 20:00 | 5,95               | 12,48               | 1,3700 | 0,55                |
| 122                          | 21:00 | 6,11               | 12,42               | 1,3300 | 0,55                |

Wycinek wyników symulacji obrazuje rysunek 168.



**Rys. 168** Wyniki symulacji zmiany ilości, składu i temperatury powietrza na wylocie z rejonu wentylacyjnego (K-3) - moment zamknięcia K-2, K-4, K-5 01:05:00 w symulacji.

Porównanie danych rzeczywistych z wynikami symulacji numerycznej przebiegu pożaru w programie VentSim obrazuje poniższa tabela.



**Tabela 60** Porównanie wyników symulacji pożaru z wartościami rzeczywistymi na wylocie z rejonu wentylacyjnego (K3)

| Parametr                           | Jednostka         | Rzeczywiste przed zamknięciem | Rzeczywiste po zamknięciu | Symulacja przed zamknięciem (VentSim) | Symulacja po zamknięciu (VentSim)                                |
|------------------------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Strumień powietrza                 | m <sup>3</sup> /h | ok. 1500                      | trudny do oszacowania     | ok.1300                               | ok. 2750<br>(bezpośrednio przed zamknięciem na wylocie z rejonu) |
| Tlen (O <sub>2</sub> )             | %                 | 18,45–16,74                   | 8,8–5,1                   | ok. 17                                | ok. 6                                                            |
| Dwutlenek węgla (CO <sub>2</sub> ) | %                 | 1,48–3,8                      | 9,8–13,42                 | ok. 3                                 | 12–12,5                                                          |
| Tlenek węgla (CO)                  | ppm               | 1700–4500                     | 10120–15400               | ok. 3000                              | 12000–12500                                                      |
| Metan (CH <sub>4</sub> )           | %                 | 0,04–0,12                     | 0,29–0,57                 | ok. 0,2                               | 2–3                                                              |

### 10.3. Wnioski z wykorzystania symulacji w modelu numerycznym

Jak wykazała powyższa analiza, przeprowadzona symulacja zamknięcia w programie VentSim bardzo dokładnie odwzorowała rzeczywisty przebieg zdarzeń. Istotne różnice wystąpiły jedynie w przypadku metanu, co można wytłumaczyć jego wypalaniem przez ogień w rzeczywistych warunkach – czego program nie uwzględnił. W modelu numerycznym lokalizacje emisji metanu oraz ogniska pożaru musiały zostać rozdzielone, co wpłynęło na odmiennosc wyników w tym zakresie.

Biorąc pod uwagę ograniczony czas dostępny na wykonanie analizy (30 minut) oraz znaczną niepewność danych wejściowych, należy uznać, że symulacja okazała się bardzo przydatnym narzędziem wspomagającym decyzje podejmowane w trakcie akcji ratowniczej. W okresie wyczekiwania jej wyniki były szeroko komentowane i poddawane bieżącej weryfikacji. Symulacja uwiarygodniła skalę zagrożenia wybuchem gazów pożarowych oraz pozwoliła przewidzieć potencjalne skutki zdarzeń w dalszym przebiegu akcji.

Wykonanie wiarygodnej symulacji w tak krótkim czasie było możliwe dzięki posiadaniu uprzednio zweryfikowanego modelu numerycznego kopalni oraz odpowiednim kompetencjom w zakresie obsługi oprogramowania.

Należy jednak pamiętać, że model numeryczny stanowi jedynie próbę odzwierciedlenia rzeczywistej kopalni, w której występuje duża zmienność warunków oraz istotna niepewność danych wejściowych. Model taki może generować błędne sygnały oraz wyniki symulacji. Dlatego kluczowe znaczenie ma weryfikacja rezultatów, która umożliwia lepsze zrozumienie mechanizmów prawdopodobnie dominujących w strefie zagrożenia oraz pozwala zobrazować w przestrzeni układ wyrobisk i rzeczywisty stan wentylacji.

## **11. Wdrożenie programu VentSim w kopalniach JSW S.A. oraz w CSRG S.A. w Bytomiu**

### **11.1. Stan wdrożenia programu VentSim w kopalniach JSW S.A.**

Dla każdej kopalni/ruchu zostały zakupione po dwa klucze USB umożliwiające pracę w programie VentSim Professional z pełnymi funkcjonalnościami. Klucze te zostały przydzielone do działów wentylacji. Idea zakupu dwóch kluczy wynika z podziału obowiązków związanych z utrzymaniem modelu zgodnego z aktualnym stanem sieci wentylacyjnej oraz z potrzeby ograniczenia liczby osób mogących wprowadzać zmiany w modelu.

W tym podziale inspektor działu wentylacji jest odpowiedzialny za bieżącą aktualizację zmian w sieci (minimum raz w miesiącu lub przy każdej istotnej zmianie stanu wentylacji, np. zbiecie, uruchomienie tam wentylacyjnych itp.). Drugi klucz USB przypisany jest do Głównego Inżyniera Wentylacji lub osoby przez niego wskazanej. Pozostali pracownicy zainteresowani mogą przeglądać model sieci – bez możliwości jego edycji.

We wszystkich kopalniach JSW S.A. zostały zbudowane modele wentylacyjne w programie VentSim, na podstawie dostępnych map cyfrowych oraz modeli złoża przygotowanych w Deswik. W oparciu o istniejące dokumentacje potencjalnych sieci wentylacyjnych oraz dostępne oprogramowanie, przeprowadzono walidację modeli w celu uzyskania wymaganej zgodności stanu faktycznego z modelem.

W kopalniach, w których sieci wentylacyjne są połączone (zespolone, dwu- lub trójruchowe), sieci te prowadzone są oddzielnie. Ich łączenie następuje okresowo,

w zależności od potrzeb. Bocznice łączące te sieci zakończone są „sztucznym” wentylatorem głównego przewietrzania.

W celu zapoznania działów wentylacji z obsługą programu przeprowadzono wewnętrzne szkolenia. Pierwsze z nich odbyło się w 2018 roku i miało charakter podstawowy. Celem szkolenia było zapoznanie pracowników działów wentylacji z podstawowymi funkcjami programu. Uczestnicy uczyli się obsługi poprzez budowanie modeli wentylacyjnych swoich kopalń. Walidacja i standaryzacja modeli była prowadzona pod nadzorem i stanowiła integralną część procesu wdrożenia.

Po zakończeniu okresu wdrożeniowego i nabraniu przez kadrę inżynierską swobody w korzystaniu z programem, wiosną 2025 roku przeprowadzono kolejne, dwuetapowe szkolenia wewnętrzne. Odbywały się one na dwóch poziomach: podstawowym (dla nowych użytkowników w działach wentylacji) oraz zaawansowanym (dla pracowników mających już doświadczenie z programem).

## **11.2. Rekomendacje dotyczące implementacji w JSW S.A.**

Rekomendowane kierunki dalszej implementacji w kopalniach JSW S.A.

- Ujednolicenie pomiarów sieci wentylacyjnej – Opracować i wdrożyć jednolite procedury pomiarowe dla wszystkich działów wentylacji.
- Nowoczesna aparatura kontrolno-pomiarowa – Wyposażyć działy wentylacji w urządzenia z pomiarem i rejestracją ciągłą: barometry, termohigrometry i anemometry.
- Stanowisko VentSim w Sztapie Akcji Ratowniczej – Zainstalować pełne stanowisko VentSim z możliwością projekcji w pomieszczeniu Kierownika Akcji Ratowniczej (KAR).
- Symulacja dynamiczna akcji ratowniczych – Wprowadzić obowiązek przeanalizowania każdego etapu planowanej akcji ratowniczej w trybie dynamicznym VentSim na etapie przygotowania oraz prezentowania stanu bieżącego podczas jej prowadzenia.
- Mobilny dostęp do danych – Wyposażyć służby wentylacji w tablety umożliwiające zdalną aktualizację bazy danych pomiarowych i wizualizację wyników w VentSim.
- Skaniny 3-D wyrobisk – Utworzyć zespół 2-3 pracowników wyposażonych w mobilny skaner LiDAR; zespół odpowiada za pomiary, opracowanie wyników i integrację danych z VentSim we wszystkich kopalniach spółki.

- Ciągły monitoring potencjałów aerodynamicznych – Zweryfikować i wdrożyć pomiary ciągłe (ciśnienie, temperatura, wilgotność) w kluczowych węzłach: wentylatory głównego przewietrzania, skrzyżowania prądów świeżych i zużytych oraz wloty do rejonów ścianowych.
- Stałe doskonalenie kadry – Regularnie szkolić inżynierów wentylacji i przygotowania produkcji w projektowaniu, analizie i walidacji sieci w VentSim.
- Integracja danych on-line z modelami numerycznymi – Uruchomić skrypty na serwerach lustrzanych gazometrii automatycznej, które będą przekazywać dane czujnikowe bezpośrednio do modeli VentSim.
- Program R&D dla nowych technologii wykorzystywania w wentylacji – Rozwijać: technikę pomiarową, przetwarzanie danych wentylacyjnych, skaniny laserowe, ML/AI oraz wykorzystanie robotów autonomicznych. Zbudować przeglądarkę cyfrowego modelu kopalni (3-D) opartą na skanach LiDAR, dostępną dla upoważnionych użytkowników.

### **11.3. CSRG S.A. w Bytomiu**

W 2024 r. w siedzibie CSRG w Bytomiu przeprowadzono szkolenie dotyczące możliwości, jakie oferuje oprogramowanie VentSim. Podczas zajęć wykonano robocze testy symulujące stany zagrożenia pod ziemią. W trakcie szkolenia zwracano szczególną uwagę na potencjalny zakres zastosowań programu w czasie rzeczywistej akcji ratowniczej.

Szkolenie oraz prezentacja możliwości oprogramowania spotkały się z dużym zainteresowaniem. W wyniku tych szkoleń CSRG w Bytomiu zwróciła się do JSW S.A. z prośbą o udostępnienie modeli sieci wentylacyjnych poszczególnych kopalń, które mogłyby być wykorzystywane w kursach dla osób dozoru. Efektem była podpisana umowa i przekazanie modeli.

Na dzień pisania pracy (wiosną 2025 r.) CSRG w Bytomiu dysponuje w pełni wyposażoną salą szkoleniową z komputerami, na których zainstalowano VentSim, i przygotowuje się do uwzględnienia symulacji akcji ratowniczych w szkoleniach osób dozoru JSW S.A.

### **11.4. Możliwości zastosowania VentSim w zarządzaniu bezpieczeństwem w akcjach ratowniczych.**

Program pozwala na symulowanie między innymi następujących sytuacji zagrożenia:

- pożarów podziemnych,

- wyrzutów gazów i skał,
- wybuchów gazów,
- awaryjnego postępu wentylatorów głównego przewietrzania,
- oraz innych, w formie dowolnie programowalnych scenariuszy zdarzeń.

W każdym z tych przypadków umożliwia symulację: ilości i prędkości przepływu powietrza, temperatury, wilgotności, składu gazów, widoczności itp. w całej kopalni.

Tak szeroka funkcjonalność pozwala na stosunkowo szybkie uzyskanie danych przydatnych w czasie akcji ratowniczej, takich jak:

- weryfikacja lokalizacji bazy ratowniczej ze względu na ewentualne skutki wybuchu,
- wyznaczenie drogi ewakuacyjnej z uwzględnieniem czasu przejścia, odległości oraz ekspozycji na dymy, temperaturę i inne parametry wentylacyjne,
- symulacja zmian stanu atmosfery w przypadku rozwoju pożaru, otwarcia tam itp.,
- identyfikacja prawdopodobnych miejsc zalania wyrobisk wodą,
- wyznaczenie strefy zagrożenia i jej szybka aktualizacja w wyniku zmiany warunków wentylacyjnych,
- analiza wpływu podawania gazów inertnych lub uruchomienia odmetanowania,
- wizualizacja w skali 1:1 faktycznego układu wyrobisk,
- i inne.

Przedstawione powyżej możliwości wykorzystania programu podczas akcji ratowniczej pozwalają na szybsze i pełniejsze zrozumienie stanu zagrożenia, potencjalnych skutków oraz możliwego dalszego rozwoju zdarzeń. Ta wiedza może pomóc Kierownikowi Akcji w podejmowaniu decyzji, co bezpośrednio przekłada się na wzrost bezpieczeństwa ratowników oraz zwiększa szanse osób poszkodowanych, a także ogranicza straty materialne.

**Należy jednak pamiętać, że modele numeryczne są jedynie próbą odwzorowania rzeczywistej sytuacji w postaci cyfrowej. Dokładność prezentowanych danych może być obciążona znacznymi błędami wynikającymi z dużej zmienności działań ratowniczych, panującego chaosu, napływających do Kierownika Akcji Ratowniczej (KAR) sprzecznych komunikatów lub po prostu błędów ludzkich. Zawsze należy zachować ograniczone zaufanie do generowanych wyników. Skuteczne wykorzystanie programu wymaga również modelu zaktualizowanego do stanu bezpośrednio przed zdarzeniem oraz obsługi przez osobę o odpowiednich umiejętnościach.**

## **12. Propozycja zmian legislacyjnych w zakresie wymagania posiadania cyfrowego modelu wentylacyjnego dla podziemnych zakładów górniczych**

W polskim prawie występują cztery główne akty prawne w oparciu, o które wykonuje ruch w podziemnych zakładach górniczych i mają związek z poruszaną tematyką w rozprawie:

- Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze. [128]
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych. [129]
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych. [130]
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 16 marca 2017 r. w sprawie ratownictwa górniczego. [131]

Obowiązujące przepisy regulujące organizację sieci wentylacyjnej w podziemnych zakładach górniczych nie są szczegółowo określone. Jedyne wzmianki znajdują się w Rozporządzeniu Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych - zgodnie z § 167 tego rozporządzenia:

1. *„Projektując wyrobiska, tworzy się jak najmniej złożoną sieć wentylacyjną.*
2. *W sieci wentylacyjnej wydziela się rejony wentylacyjne przewietrzane niezależnymi prądami powietrza.*
3. *Dla rejonów wentylacyjnych ścian wykonuje się schemat przestrzenny sieci wentylacyjnej z naniesionymi potencjałami w punktach węzłowych.*
4. *Częstotliwość aktualizacji potencjałów, o których mowa w ust. 3, jest określana przez kierownika działu wentylacji zakładu górniczego.”*

Choć przepisy wskazują na konieczność sporządzania przestrzennego schematu sieci, brakuje jednoznacznych wymagań dotyczących formy cyfrowej, dokładności odwzorowania czy minimalnych funkcjonalności programów komputerowych. To sprawia, że praktyka

w zakresie cyfrowego modelowania sieci wentylacyjnej może się znacznie różnić między zakładami, a samo podejście do aktualizacji danych bywa niejednolite i nie zawsze dostosowane do dynamiki zmian w kopalniach. Propozycja nowelizacji przepisów dotyczących cyfrowego modelu sieci wentylacyjnej.

W odpowiedzi na rosnące znaczenie cyfryzacji w zarządzaniu bezpieczeństwem pracy w kopalniach oraz występowanie zagrożeń naturalnych, wydaje się zasadne uzupełnienie obowiązujących przepisów o wymóg stosowania i utrzymywania cyfrowego modelu sieci wentylacyjnej. Proponuje się następującą redakcję nowego brzmienia paragrafu:

- „§ 167. 1. Projektując wyrobiska, tworzy się jak najmniej złożoną sieć wentylacyjną.*
- 2. W sieci wentylacyjnej wydziela się rejony wentylacyjne przewietrzane niezależnymi prądami powietrza.*
- 3. Dla rejonów wentylacyjnych ścian wykonuje się schemat przestrzenny **lub model cyfrowy** sieci wentylacyjnej z naniesionymi potencjałami w punktach węzłowych.*
- 4. Częstotliwość aktualizacji potencjałów, o których mowa w ust. 3, jest określana przez kierownika działu wentylacji zakładu górniczego.*
- 5. W zakładach górniczych, w których występuje co najmniej jedno z następujących zagrożeń: tąpniętami, metanowe, wyrzutu gazów i skał, wybuch pyłu węglowego lub zagrożenie klimatyczne –utrzymuje się cyfrowy model sieci wentylacyjnej.*
- a. Aktualizacja modelu musi być aktualizowana nie rzadziej niż raz w miesiącu oraz każdorazowo w przypadku istotnych zmian w stanie przewietrzania.*
- b. Dokładność odwzorowania ilości powietrza w bocznicach sieci w modelu powinna wynosić nie mniej niż  $\pm 10\%$  w stosunku do zmierzonych ilości powietrza na stacjach pomiarowych zgodnie z danymi z głównej książki przewietrzania.*
- c. Program komputerowy wykorzystywany do tworzenia cyfrowego modelu sieci wentylacyjnej powinien umożliwiać co najmniej:*
- symulację kierunku i rozptyłu powietrza w poszczególnych bocznicach wentylacyjnych;*
  - określanie potencjałów w węzłach sieci wentylacyjnej;*
  - modelowanie rozprzestrzeniania się dymów w przypadku pożaru;*
  - symulację zasięgu oraz propagacji fali wybuchu gazów lub pyłu węglowego;*

- *prognozowanie zmian temperatury powietrza z uwzględnieniem działania urządzeń chłodniczych.*
- d. *Kierownik ruchu zakładu górniczego wyznacza osobę odpowiedzialną za aktualizację cyfrowego modelu sieci wentylacyjnej. Obowiązki te mogą być wykonywane przez podmiot zewnętrzny.”*

Tego rodzaju zmiana stanowiłaby znaczący krok w stronę standaryzacji i profesjonalizacji zarządzania siecią wentylacyjną w oparciu o nowoczesne narzędzia informatyczne oraz wzmocniłaby nadzór nad bezpieczeństwem sieci wentylacyjnej. Równocześnie w przypadku wystąpienia zagrożenia, w którym może dojść do zmiany stanu wentylacji (np. pożar, tąpnięcie, itp.) zaktualizowany model może być użyteczny w czasie prowadzenia akcji ratowniczej.

Dodatkowo, w celu umożliwienia wykorzystania przez Kierownika Akcji Ratowniczej (KAR) w czasie prowadzenia akcji zobrazowanie prawdopodobnej sytuacji stanu wentylacji w kopalni, proponuje się rozszerzenie obowiązków Kierownika Sztabu Akcji Ratowniczej. Obowiązki te określone są w Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 30 maja 2022 r. w sprawie ratownictwa górniczego w §82, który ma brzmienie:

*„1. Kierownik Sztabu Akcji Ratowniczej, działając w porozumieniu z Kierownikiem Akcji Ratowniczej (KAR), jest odpowiedzialny za:*

- 1) prawidłowe rozliczenie liczby pracowników zakładu górniczego znajdujących się w strefie zagrożenia i sposobu wycofania tych pracowników;*
- 2) bieżące śledzenie przebiegu akcji ratowniczej oraz analizowanie skuteczności działań podejmowanych w ramach realizacji planu akcji ratowniczej oraz przekazywanie wniosków kierownikowi tej akcji;*
- 3) powiadomienia rodzin pracowników zagrożonych lub poszkodowanych o powstałych wypadkach;*
- 4) zorganizowanie specjalistycznej opieki lekarskiej dla poszkodowanych i transportu poszkodowanych do szpitali;*
- 5) opracowanie projektów decyzji dotyczących likwidacji zagrożenia, dostosowanych do aktualnej sytuacji i przekazywanie na piśmie uwag kierownikowi akcji ratowniczej;*
- 6) prawidłową realizację poleceń wydanych przez kierownika akcji ratowniczej służbom pomocniczym w zakładzie górniczym oraz innym służbom spoza zakładu;*



7) zapewnienie odpowiedniej liczby ratowników górniczych i pracowników pomocniczych do realizacji planu akcji ratowniczej na każdej zmianie roboczej;

8) zapewnienie sprzętu i materiałów do wyposażenia ratowników górniczych uczestniczących w akcji ratowniczej oraz do prac wykonywanych przez pomocnicze służby w zakładzie górniczym;

9) sporządzanie dokumentów dla kierownictwa akcji ratowniczej oraz dla osób kontrolujących przebieg tej akcji.”

Proponuje się o zwiększenie obowiązków o punkt 10:

**„10) organizację stanowiska komputerowego z cyfrowym modelem sieci wentylacyjnej na którym prowadzi się ciągłą aktualizację stanu wentylacji i działań ratowniczych przez osobę lub podmiot zewnętrzny odpowiedzialny za cyfrowy model sieci wentylacyjnej w kopalni. Organizacja stanowiska dotyczy przypadku prowadzaniu akcji ratowniczej w której może dojść lub doszło do powstania zagrożenia przez zmianę stanu wentylacji, w podziemnych zakładzie górniczym w którym występuje zagrożenie: tąpniętami, metanowe, wyrzutu gazów i skał, wybuch pyłu węglowego lub zagrożenie klimatyczne.”**

Delegowanie tego zadania Kierownikowi Sztabu Akcji Ratowniczej pozwoli na odciążanie KAR w pierwszych, niezwykle ważnych, godzinach akcji ratowniczej. Świadomość o odpowiedzialności za organizację takiego stanowiska, powinno spowodować w kopalniach już wcześniejsze wyposażenie Sztabu Akcji w niezbędny sprzęt i organizację miejsca.

Kierownik Akcji Ratowniczej lub osoba odpowiedzialna za stan wentylacji w kopalni (Główny Inżynier Wentylacji lub jego zastępca) będą mieli możliwość żądać zaprezentowania w pomieszczeniu KAR wyników symulacji lub zobrazowania prawdopodobnego stanu wentylacji w kopalni i rejonie działań ratowniczych.

Zaprezentowane powyżej propozycję zmian przepisów wymagają szczegółowej i szerokiej konsultacji z jednostkami ratownictwa górniczego oraz przedsiębiorcami. Wydaje się jednak, że aktualny poziom możliwości odwzorowania sieci wentylacyjnych, szerokiego zakresu symulowanych zdarzeń (pożary, wybuchy, itp.) powinien być już wymagany w przepisami prawa.

Warunkiem do użytecznej informacji, jaką idzie pozyskać z cyfrowych modeli sieci wentylacyjnych, jest:

- odpowiednio dokładnie odwzorowany model sieci wentylacyjnej;
- obecność przeszkolonych z obsługi osób posiadających niezbędne doświadczenie;
- oraz świadomość KAR i osób odpowiedzialnych za stan wentylacji z możliwości i ograniczeń użytkowanego programu.

## 13. Podsumowanie i wnioski.

Celem pracy była weryfikacja tez sformułowanych na wstępie.

1. Wyznaczenie oporów aerodynamicznych bocznic wentylacyjnych w kopalniach podziemnych z zastosowaniem nowej metody obliczania współczynnika oporu wyrobiska z wykorzystaniem technologii skaningu laserowego, pozwala na zwiększenie dokładności odwzorowania sieci wentylacyjnych w modelach numerycznych.

2. Precyzyjne odwzorowanie sieci wentylacyjnych kopalń w modelach numerycznych pozwala na znaczącą poprawę bezpieczeństwa pracy oraz optymalizację sposobu przewietrzania.

W celu sprawdzenia postawionych na początku pracy tez, przeprowadzono prace badawcze obejmujące analizę następujących problemów:

- wyznaczenie dynamiki zmian fizyki atmosfery w celu określenia wartości parametrów powietrza na wlocie do kopalni;
- wyznaczenie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej kopalni wraz z opracowaniem badania stanu potencjałów sieci w czasie rzeczywistym;
- wyznaczenie współczynników oporu w typowych wyrobiskach górniczych w celu predykcji oporów aerodynamicznych w sieci wentylacyjnej;
- stworzenie nowego sposobu budowy modeli cyfrowych sieci wentylacyjnych z wykorzystaniem skaningu laserowego;
- opracowanie procedur budowania i walidacji modeli sieci wentylacyjnych, tak aby można było zaufać generowanym obliczeniom przy planowaniu robót górniczych i sytuacjach awaryjnych w czasie prowadzenia działań ratowniczych.

Analiza dynamiki zmian fizyki atmosfery przeprowadzona w badaniach A i B wykazała, że czujniki CSPA-2 posiadają wystarczającą dokładność, aby pełnić funkcję stacji pogodowej dla kopalni, pod warunkiem ich prawidłowego umiejscowienia oraz określenia wysokości n.p.m. Uzyskane wartości ciśnienia barometrycznego i temperatury powietrza w pomiarach lokalnych i w danych archiwalnych były zbieżne, a różnice mieściły się w granicach błędów pomiarowych. Zaobserwowano wyraźną sezonowość zmian ciśnienia, z większą amplitudą w miesiącach zimowych oraz stabilizacją w okresie letnim. Średnioroczna temperatura powietrza w rejonie kopalni była istotnie wyższa niż wartości podawane w literaturze górniczej, co potwierdza wpływ lokalnych uwarunkowań i zmian klimatycznych, które należy uwzględniać w symulacjach. Opracowane tabele parametrów atmosferycznych umożliwiają poprawną konfigurację początkowych warunków

w oprogramowaniu VentSim i przyczyniają się do zwiększenia dokładności modelowania depresji naturalnej kopalni. Wyniki badań stanowią również podstawę do lepszej oceny wpływu warunków atmosferycznych na zagrożenia metanowe i klimatyczne oraz mogą wspierać systemy ostrzegania załogi w sytuacjach niekorzystnych zmian ciśnienia.

Badania C i D pozwoliły określić dynamikę zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej oraz opracować metodę badania stanu potencjałów w czasie rzeczywistym. Ustalono, że średnia pulsacja ciśnienia w szybie wentylacyjnym wynosi ok. 31,6 Pa w okresie piętnastominutowym i pozostaje na podobnym poziomie nawet przy minimalnym „obciążeniu” kopalni. Zaobserwowano, że amplituda pulsacji maleje wraz z oddaleniem od wentylatora głównego i spada do zera na zrębie szybu wdechowego. Opracowana metoda automatycznego wyznaczania potencjałów, wykorzystująca typowe czujniki sieci wentylacyjnej, stanowi kompromis między dokładnością a praktycznością i umożliwia bieżące obliczenia oraz wizualizację stanu sieci. Dodatkowe czujniki w kluczowych prądach powietrza pozwalają zwiększyć precyzję diagnozy i umożliwiają szybkie wykrywanie nagłych zmian oporu, np. po zawałach. Wdrożenie automatycznych obliczeń potencjałów wspiera walidację modeli numerycznych w VentSim, a rekomendowane stosowanie mediany z 24-godzinnych danych pozwala na bardziej stabilne i odporne na zakłócenia określanie wartości potencjałów w sieci.

Badania E i F pozwoliły na statystyczne wyznaczenie współczynników oporu dla typowych wyrobisk JSW S.A. oraz na ich zastosowanie do odwzorowania sieci wentylacyjnej w modelu numerycznym VentSim. Uzyskane wartości współczynników oporu umożliwiły dostatecznie dokładne odwzorowanie ilości powietrza w szybach, rejonach eksploatacyjnych i punktach pracy wentylatorów. Wyniki wykazały bardzo dobrą zgodność ilości powietrza w szybach i dobrą zgodność w rejonach ścian, jednak wartości obliczonych potencjałów charakteryzowały się znacznie większymi błędami – nawet do ok. 26% w przypadku rejonów eksploatacyjnych. Potwierdza to potrzebę dokładniejszego wyznaczania oporów w grupowych prądach powietrza, aby zwiększyć wiarygodność generowanych symulacji.

Średnie wartości współczynników oporu  $k$  (FF) określono odpowiednio: dla szybów 0,0321 kg/m<sup>3</sup>, dla wyrobisk w obudowie ŁP bez odstawy 0,0165 kg/m<sup>3</sup>, z odstawą 0,0295 kg/m<sup>3</sup>, a dla wyrobisk ścianowych 0,0851 kg/m<sup>3</sup>. Zwrócono także uwagę na liczne czynniki zakłócające pomiary, takie jak zmienność ciśnienia barometrycznego, pulsacje przepływu turbulentnego, błędy pomiarowe czy zmiany w stanie sieci wentylacyjnej, które

mogą prowadzić do istotnych rozbieżności między rzeczywistymi a obliczonymi wartościami.

Uzyskane wyniki dowodzą, że opieranie się wyłącznie na tradycyjnych pomiarach sieci bez dodatkowej weryfikacji geometrycznej może skutkować błędnym odwzorowaniem ilości powietrza i kierunków przepływu. Wnioski z badań wskazują na konieczność zastosowania nowoczesnych technologii skaningu laserowego do dokładniejszego odwzorowania geometrii wyrobisk, co stało się podstawą do opracowania nowej metody budowy modelu sieci wentylacyjnej.

Badanie G pozwoliło opracować nową metodę budowy szczegółowego modelu wentylacyjnego z wykorzystaniem skaningu laserowego, która może znaleźć praktyczne zastosowanie w kopalniach podziemnych i tunelach. Kluczową zaletą metody jest brak konieczności stosowania znaczników geolokalizacyjnych, co znacząco przyspiesza proces pozyskiwania danych oraz szybkość obliczeń przy wyznaczaniu współczynników chropowatości w wyrobiskach zabudowanymi instalacjami i urządzeniami. Testy wykazały, że dokładność odwzorowania przy zastosowaniu typowych skanerów, mimo występującego dryfu kierunku rzędu 5 m na 1000 m, jest wystarczająca dla potrzeb służb wentylacji. W metodzie uwzględniono korektę błędów powstających na początku i końcu chmury punktów, rekomendując rozpoczynanie skanu w węzłach sieci, co poprawia jakość odwzorowania geometrii.

Wykorzystanie w analizach pełnej chmury punktów skaningu, w tym elementów infrastruktury, pozwala na dokładniejsze określenie współczynników oporu i lepsze odwzorowanie rzeczywistych warunków przepływu powietrza. Dodatkowo możliwe jest pośrednie wyznaczanie chropowatości względnej na podstawie gęstości punktów w poszczególnych segmentach wyrobiska. Cały proces opiera się na narzędziach open-source, co ogranicza koszty i zwiększa dostępność technologii. Rozwój nowoczesnych programów symulacyjnych, takich jak VentSim, umożliwia automatyczne uwzględnianie zmian gęstości powietrza, depresji cieplnej i innych czynników, co zwiększa wiarygodność wyników modelowania.

Badanie G obejmowało około 5000 m bieżących wyrobisk i wymagało opracowania zaawansowanych procedur przetwarzania chmur punktów, w tym metod redukcji danych, filtracji szumów oraz wyznaczania centroidów. Wyniki potwierdzają, że metoda da skaningu laserowego oraz barometryczna mogą wzajemnie się uzupełniać w celu dokładniejszej walidacji modelu numerycznego.

Integracja modelu numerycznego z systemem gazometrycznym kopalni pozwoliła na połączenie symulacji przepływu powietrza z danymi z czujników prędkości, temperatury, stężenia metanu, tlenku węgla i innych. Przeprowadzone testy wykazały, że nadmiar wprowadzonych czujników obniża wydajność programu i może negatywnie wpływać na stabilność symulacji, dlatego zaleca się selektywny dobór punktów pomiarowych. Największy efekt poprawy dokładności uzyskuje się, integrując czujniki odpowiadające parametrom o największych błędach predykcji, zwłaszcza temperatury i wilgotności powietrza, które powinny być lokalizowane w rejonach doprowadzania świeżego powietrza z szybów wdechowych.

Optymalny cykl przeliczeń dynamicznych modelu wynosi około 20 minut – częstsze uruchamianie obliczeń prowadzi do nakładania się procesów i może skutkować zatrzymaniem pracy programu. Integracja danych czujnikowych ma szczególne znaczenie w analizach sytuacji awaryjnych, umożliwiając np. odtworzenie rozwoju pożaru na podstawie rejestracji wzrostu stężenia CO. Dodatkową zaletą jest możliwość automatycznego wczytywania danych z głównej książki przewietrzania (np. w formacie Excel) bezpośrednio do modelu VentSim, co upraszcza obsługę i eliminuje konieczność użycia zewnętrznych modułów, takich jak VentLog.

W pracy zaproponowano kompleksową procedurę budowy i walidacji modeli wentylacyjnych w podziemnych zakładach górniczych, obejmującą sześć etapów – od odwzorowania kopalni w przestrzeni, poprzez nadanie atrybutów wyrobiskom i wprowadzenie urządzeń wentylacyjnych, aż po szczegółową walidację i bieżącą aktualizację modelu. Podkreślono konieczność korzystania z cyfrowych map wyrobisk i, w miarę możliwości, technologii skaningu laserowego w celu uzyskania precyzyjnych danych geometrycznych. Wskazano, że poprawne wyznaczenie oporów szybów i grupowych prądów powietrza jest kluczowe dla wiarygodności modelu, a w przypadku braku możliwości ich pomiaru należy stosować wartości uśrednione z badań statystycznych.

Istotnym elementem procedury jest badanie potencjałów w sieci, wykonywane z uwzględnieniem źródeł błędów pomiarowych i zmian stanu sieci w czasie pomiarów. Program VentSim może automatycznie przypisywać opory na podstawie geometrii i rodzaju wyrobiska, jednak wymaga to dokładnych danych wejściowych. Kolejne etapy obejmują wprowadzenie istotnych danych wpływających na warunki przewietrzania, takich jak emisja metanu, lokalizacja chłodnic czy źródła ciepła, przy czym zbyt duża liczba szczegółów może spowolnić obliczenia i obniżyć czytelność modelu.

Podkreślono, że model musi być stale aktualizowany – minimum raz w roku należy wykonywać zdjęcie potencjalne, raz w miesiącu uzupełniać postęp robót, a każdą zmianę w sieci wentylacyjnej odzwierciedlać w modelu w ciągu 24 godzin. Dla utrzymania wysokiej jakości odwzorowania rekomenduje się także integrację danych czujnikowych w systemach dyspozytorskich i ciągłą kontrolę potencjałów w kluczowych punktach sieci. Tylko aktualny i obsługiwany przez wykwalifikowany personel model może stanowić realne wsparcie w planowaniu robót, podejmowaniu decyzji eksploatacyjnych i prowadzeniu akcji ratowniczych.

Dla krótkich wyrobisk (poniżej 100 m) metoda barometryczna obarczona jest bardzo dużym błędem względnym, co czyni uzyskane wyniki mało wiarygodnymi. Dopiero dla bocznic o długości powyżej 800 m lub odpowiednio dużym spadku naporu w wyrobiskach krótkich, błąd spada do poziomu akceptowalnego, co oznacza, że metoda barometryczna powinna być użyteczna głównie dla szybów i długich wyrobisk o znacznych spadkach naporu.

Z kolei nowa metoda, oparta na skaningu laserowym, zapewnia znacznie stabilniejsze i bardziej precyzyjne wyniki, dla krótkich bocznic wentylacyjnych, a dla dłuższych wyrobisk pozostaje wyraźnie niższy niż w przypadku metody klasycznej. Wzrost błędu jest stopniowy i przewidywalny, a jego niska wartość wynika z braku konieczności wykonywania pomiarów ciśnienia i prędkości powietrza oraz z wysokiej dokładności wyznaczania przekrojów wyrobiska na podstawie chmury punktów. Jedynym ograniczeniem metody mogą być przypadki występowania małych gabarytów w skanowanym wyrobisku.

Studium przypadku wykorzystania programu VentSim w trakcie pożaru endogenicznego w jednej z kopalń JSW S.A. wykazało, że symulacja numeryczna może być użytecznym narzędziem wspierającym proces podejmowania decyzji w sytuacjach kryzysowych. Model bardzo dobrze odwzorował rzeczywisty przebieg zdarzeń, a różnice dotyczyły głównie stężeń metanu, co wynikało z faktu, że w warunkach rzeczywistych gaz ten ulegał spalaniu, podczas gdy w symulacji był traktowany jako składnik bierny. Dzięki posiadaniu wcześniej zwalidowanego modelu kopalni możliwe było przeprowadzenie wiarygodnej symulacji w ciągu zaledwie 30 minut, co pozwoliło na szybkie zobrazowanie skali zagrożenia i przewidzenie potencjalnych scenariuszy rozwoju sytuacji.

Symulacja stanowiła wsparcie dla Kierownika Akcji Ratowniczej, umożliwiając bieżącą weryfikację i analizę skutków planowanych działań, a także lepsze zobrazowanie układu wyrobisk i kierunków przepływu powietrza. Podkreślono jednak, że model numeryczny jest jedynie przybliżeniem rzeczywistej kopalni i obarczony jest niepewnością danych

wejściowych. Wyniki symulacji wymagają więc krytycznej oceny i konfrontacji z rzeczywistymi obserwacjami, aby mogły stanowić wiarygodną podstawę do podejmowania decyzji w warunkach zagrożenia.

W ramach wdrożenia programu VentSim we wszystkich kopalniach JSW S.A. zbudowano i zwalidowano modele sieci wentylacyjnych w oparciu o mapy cyfrowe i modele złoża, zapewniając ich zgodność ze stanem rzeczywistym. Działy wentylacji zostały wyposażone w dwa klucze licencyjne na kopalnię, co umożliwia rozdział odpowiedzialności za bieżącą aktualizację modelu oraz nadzór nad jego integralnością. Prowadzone szkolenia wewnętrzne pozwoliły pracownikom działów wentylacji na nabycie praktycznych umiejętności budowy i analizy modeli, a kolejne kursy z 2025 r. ujednoliciły poziom wiedzy i wprowadziły moduły zaawansowane.

Wskazano kierunki dalszej implementacji systemu, obejmujące standaryzację pomiarów sieci wentylacyjnej, doposażenie w nowoczesną aparaturę pomiarową, uruchomienie stanowisk VentSim w sztabach akcji ratowniczych, mobilny dostęp do danych, skaniny 3D wyrobisk oraz ciągły monitoring potencjałów aerodynamicznych. Rekomenduje się także rozwój narzędzi w zakresie przetwarzania danych, sztucznej inteligencji i robotyki oraz udostępnienie przeglądarek cyfrowych modeli 3D dla uprawnionych użytkowników.

W CSRG S.A. w Bytomiu przeprowadzono szkolenia i testy symulacji zagrożeń z wykorzystaniem VentSim, które spotkały się z dużym zainteresowaniem i doprowadziły do zawarcia umowy o udostępnienie modeli kopalń JSW S.A. Dziś CSRG dysponuje w pełni wyposażoną salą szkoleniową, przygotowując się do wdrożenia symulacji akcji ratowniczych do programów szkoleniowych dozoru górniczego.

Program VentSim umożliwia modelowanie szerokiego spektrum zagrożeń, takich jak pożary, wyrzuty gazów i skał, wybuchy czy awaryjne zatrzymanie wentylatorów. Pozwala również na symulację ewakuacji, zmian stanu atmosfery, wyznaczenie stref zagrożenia i analizę skutków działań ratowniczych w czasie rzeczywistym. Jego zastosowanie w sztabie akcji ratowniczej pozwala szybciej ocenić sytuację i wspiera proces podejmowania decyzji, co może przekładać się na bezpieczeństwo ratowników i efektywność działań. Podkreślono jednak, że skuteczność programu zależy od aktualności modelu, jakości danych wejściowych oraz kompetencji operatora – wyniki symulacji zawsze powinny być poddane krytycznej ocenie.

W pracy zaproponowano uzupełnienie polskich przepisów górniczych o obowiązek posiadania i utrzymywania cyfrowego modelu sieci wentylacyjnej w kopalniach, w których występują zagrożenia naturalne takie jak tąpnięcia, metanowe, wyrzuty gazów i skał, wybuch



pyłu węglowego czy zagrożenie klimatyczne. Obecne regulacje, choć wymagają tworzenia schematów sieci i wyznaczania potencjałów, nie określają formy cyfrowej, poziomu dokładności odwzorowania ani częstotliwości aktualizacji modelu.

Proponowane zmiany obejmują wprowadzenie wymogu comiesięcznej aktualizacji modelu oraz jego korekty po każdej istotnej zmianie w stanie przewietrzania, zapewnienie dokładności odwzorowania ilości powietrza w bocznicach na poziomie  $\pm 10\%$  oraz określenie minimalnych funkcjonalności oprogramowania (symulacja kierunku i rozplywu powietrza, określanie potencjałów, modelowanie pożarów i wybuchów, prognozowanie temperatury powietrza). Ponadto zaproponowano, aby Kierownik Ruchu Zakładu Górniczego wyznaczał osobę odpowiedzialną za aktualizację modelu, a w razie potrzeby dopuszczono możliwość zlecania tego zadania podmiotom zewnętrznym.

Istotnym elementem propozycji jest rozszerzenie obowiązków Kierownika Sztabu Akcji Ratowniczej o organizację stanowiska komputerowego z cyfrowym modelem sieci wentylacyjnej, na którym prowadzona byłaby bieżąca aktualizacja stanu wentylacji i działań ratowniczych. Takie rozwiązanie pozwoliłoby odciążyć Kierownika Akcji Ratowniczej w kluczowych godzinach akcji i umożliwić bieżącą wizualizację sytuacji w kopalni, co usprawniłoby proces podejmowania decyzji i zwiększyło bezpieczeństwo ratowników oraz załogi.

Wskazano również warunki skutecznego wykorzystania modeli cyfrowych, obejmujące konieczność ich precyzyjnego odwzorowania, udziału przeszkolonego personelu oraz świadomość możliwości i ograniczeń narzędzi symulacyjnych. Proponowane zmiany legislacyjne stanowiłyby istotny krok w stronę standaryzacji i profesjonalizacji zarządzania wentylacją w polskich kopalniach oraz podniosłyby poziom bezpieczeństwa w sytuacjach awaryjnych.

**Przedstawione w pracy wyniki i wnioski jednoznacznie potwierdzają słuszność postawionych tez. Należy jednak pamiętać, że modele numeryczne są jedynie próbą odwzorowania rzeczywistej sytuacji w postaci cyfrowej. Zawsze należy zachować ograniczone zaufanie do generowanych wyników.**

## Spis rysunków

|                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Rys. 1 Schemat przestrzenny w rzucie izometrycznym kopalni .....                                                                                      | 0  |
| Rys. 2 Schemat kanoniczny kopalni .....                                                                                                               | 1  |
| Rys. 3 Model 3D kopalni w oprogramowaniu VentSim. ....                                                                                                | 1  |
| Rys. 4 Przybliżenia równania Colebrook’a z szacowanym błędem do 0,4% Źródło: opracowano na podstawie [12] .....                                       | 7  |
| Rys. 5 Model 3D kopalni KWK „Borynia-Zofówka-Bzie” Ruch „Zofiówka” w programie VentSim – odwzorowanie rejonu B w pokł. 407/1 na etapie rozcinki. .... | 15 |
| Rys. 6 Menu EDIT w oprogramowaniu VentSim. ....                                                                                                       | 15 |
| Rys. 7 Zmiana ilości powietrza w szybie w oprogramowaniu VentSim w zależności od miesiąca. ....                                                       | 16 |
| Rys. 8 Wprowadzenie pomiarów zdjęcia potencjalnego kopalni w oprogramowaniu VentSim .....                                                             | 16 |
| Rys. 9 Wyniki obliczeń punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania w oprogramowaniu VentSim. ....                                                | 17 |
| Rys. 10 Wyniki symulacji ilości powietrza w chodniku z wentylacją odrębną w oprogramowaniu VentSim. ....                                              | 17 |
| Rys. 11 Wyniki symulacji klimatycznej w rejonie ściany w oprogramowaniu VentSim .....                                                                 | 18 |
| Rys. 12 Wyniki symulacji emisji metanu w rejonie ściany w oprogramowaniu VentSim .....                                                                | 18 |
| Rys. 13 Podgląd wczytanych czujników z gazometrii automatycznej w oprogramowaniu VentSim .....                                                        | 18 |
| Rys. 14 Wyniki symulacji dynamicznej przyrostu tlenku węgla w czasie pożaru w oprogramowaniu VentSim. ....                                            | 19 |
| Rys. 15 Wyniki symulacji rozprzestrzeniania się ciśnienia wybuchu gazu w rejonie w oprogramowaniu VentSim. ....                                       | 19 |
| Rys. 16 Wyniki symulacji rozprzestrzeniania się tlenku węgla po robotach strzałowych w oprogramowaniu VentSim. ....                                   | 20 |
| Rys. 17 Widok wyrobisk przyszybowych w oprogramowaniu VentSim .....                                                                                   | 20 |
| Rys. 18 Widok projektowanych ścian w rejonie kopalni w oprogramowaniu VentSim .....                                                                   | 21 |
| Rys. 19 Okno ustawień w oprogramowaniu VentSim .....                                                                                                  | 23 |
| Rys. 20 Widok czujnika CSPA-2 z rozmieszczeniem elementów na obudowie .....                                                                           | 27 |
| Rys. 21 Wycinek z wizualizacji pomiarów z czujnika CSPA-2 w systemie ZEFIR .....                                                                      | 28 |
| Rys. 22 Przebieg zmian ciśnienia barometrycznego w badaniu A. ....                                                                                    | 30 |
| Rys. 23 Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 1 miesiąc dla badania A .....                                                                   | 31 |
| Rys. 24 Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 1 miesiąca dla badania A. ....                                                       | 31 |
| Rys. 25 Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 7 dni dla badania A .....                                                                       | 32 |
| Rys. 26 Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 7 dni dla badania A. ....                                                            | 32 |
| Rys. 27 Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 3 dni dla badania A .....                                                                       | 33 |
| Rys. 28 Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 3 dni dla badania A. ....                                                            | 33 |
| Rys. 29 Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 24 godziny dla badania A .....                                                                  | 34 |
| Rys. 30 Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 3 dni dla badania A. ....                                                            | 34 |
| Rys. 31 Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 12 godzin dla badania A .....                                                                   | 35 |
| Rys. 32 Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 12 godzin dla badania A. ....                                                        | 35 |
| Rys. 33 Zmiana ciśnienia barometrycznego w okresie co 1 godzinę dla badania A. ....                                                                   | 36 |
| Rys. 34 Histogram dla zmiany ciśnienia barometrycznego w okresie 12 godzin dla badania A. ....                                                        | 36 |
| Rys. 35 Przebieg zmian temperatury powietrza w badaniu A .....                                                                                        | 37 |
| Rys. 36 Zmiana temperatury powietrza w okresie co jeden miesiąc dla badania A .....                                                                   | 38 |
| Rys. 37 Histogram dla zmiany temperatury powietrza co jeden miesiąc dla badania A .....                                                               | 39 |
| Rys. 38 Zmiana temperatury powietrza w okresie co 7 dni dla badania A .....                                                                           | 39 |
| Rys. 39 Histogram dla zmiany temperatury powietrza co 7 dni dla badania A .....                                                                       | 40 |
| Rys. 40 Zmiana temperatury powietrza w okresie co 24 godziny dla badania A .....                                                                      | 40 |
| Rys. 41 Histogram dla zmiany temperatury powietrza co 24 godziny dla badania A .....                                                                  | 41 |

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Rys. 42 Zmiana temperatury powietrza w okresie co 1 godzinę dla badania A .....                                                                          | 41 |
| Rys. 43 Histogram dla zmiany temperatury powietrza co 1 godzinę dla badania A.....                                                                       | 42 |
| Rys. 44 Przebieg zmian wilgotności względnej powietrza w badaniu A.....                                                                                  | 42 |
| Rys. 45 Zmiana wilgotności względnej powietrza w okresie co 1 miesiąc dla badania A .....                                                                | 44 |
| Rys. 46 Histogram dla zmiany wilgotności względnej powietrza w okresie co 1 miesiąc dla badania A .....                                                  | 44 |
| Rys. 47 Zmiana wilgotności względnej powietrza w okresie co 7 dni dla badania A .....                                                                    | 45 |
| Rys. 48 Histogram dla zmiany wilgotności względnej powietrza w okresie co 7 dni dla badania A .....                                                      | 45 |
| Rys. 49 Zmiana wilgotności względnej powietrza w okresie co 24 godziny dla badania A .....                                                               | 46 |
| Rys. 50 Histogram dla zmiany wilgotności względnej powietrza w okresie co 24 godziny dla badania A .....                                                 | 46 |
| Rys. 51 Zmiana wilgotności względnej powietrza w okresie co 1 godzinę dla badania A.....                                                                 | 47 |
| Rys. 52 Histogram dla zmiany wilgotności względnej powietrza w okresie co 1 godzinę dla badania A .....                                                  | 47 |
| Rys. 53 Wspólny wykres przebiegu zmian ciśnienia barometrycznego w latach 2013-2022 dla miasta Jastrzębie-Zdrój Źródło:www.meteoblue.com: .....          | 53 |
| Rys. 54 Wspólny wykres przebiegu zmian temperatury powietrza w latach 2013-2022 dla miasta Jastrzębie-Zdrój Źródło:www.meteoblue.com .....               | 54 |
| Rys. 55 Wspólny wykres przebiegu zmian wilgotności względnej powietrza w latach 2013-2022 dla miasta Jastrzębie-Zdrój Źródło:www.meteoblue.com.....      | 55 |
| Rys. 56 Wykres zmiany ciśnienia barometrycznego dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 dla wysokości 280,15 m.n.p.m. ....                        | 57 |
| Rys. 57 Wykres zmiany ciśnienia barometrycznego dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 wartości zredukowane do poz. morza.....                   | 59 |
| Rys. 58 Wykres zmiany temperatury powietrza dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 .                                                             | 61 |
| Rys. 59 Wykres zmiany wilgotności właściwej powietrza dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 .....                                               | 63 |
| Rys. 60 Widok czujnika typu CSPD-4 firmy HASO S.C. [138] .....                                                                                           | 69 |
| Rys. 61 Widok zabudowy czujników różnicy ciśnień w systemie ZEFIR .....                                                                                  | 69 |
| Rys. 62 Przebieg zmian depresji w szybie IVz dla Badania C .....                                                                                         | 71 |
| Rys. 63 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie 15 min.....                                                                               | 72 |
| Rys. 64 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie 1 godziny .....                                                                           | 72 |
| Rys. 65 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie 24 godzin .....                                                                           | 73 |
| Rys. 66 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie 7 dni .....                                                                               | 73 |
| Rys. 67 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie IV w czasie miesiąca .....                                                                            | 74 |
| Rys. 68 Przebieg zmian depresji w szybie V dla Badania C – wraz z błędami pomiarowymi .....                                                              | 75 |
| Rys. 69 Przebieg zmian depresji w szybie V dla Badania C – okres 24 godzin .....                                                                         | 75 |
| Rys. 70 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie 15 minut .....                                                                             | 76 |
| Rys. 71 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie 1 godziny.....                                                                             | 76 |
| Rys. 72 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie 24 godzin.....                                                                             | 77 |
| Rys. 73 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie 7 dni .....                                                                                | 77 |
| Rys. 74 Dynamika zmiany różnicy ciśnienia w szybie V w czasie miesiąca .....                                                                             | 78 |
| Rys. 75 Schemat ideowy rozmieszczenia czujników dla automatycznego wyznaczania potencjałów .....                                                         | 81 |
| Rys. 76 Wizualizacja w Zefirze czujników barometrycznych wykorzystywanych do automatycznego obliczania potencjałów w Badaniu D .....                     | 84 |
| Rys. 77 Wizualizacja zbiorczego zestawienia wyników automatycznych obliczeń potencjałów w Zefirze w Badaniu D.....                                       | 85 |
| Rys. 78 Wycinek schematu w systemie Zefir z obliczonym automatycznym potencjałem na wylocie z rejonu ściany (kolor niebieski) w Badaniu D.....           | 85 |
| Rys. 79 Wycinek schematu w systemie Zefir z obliczonym automatycznym potencjałem – grupowy prąd powietrza „świeżego” (kolor niebieski) w Badaniu D ..... | 85 |
| Rys. 80 Wycinek wskazań obliczonego potencjału w systemie Zefir dla okresu 24 godzin co 1 minuta w Badaniu D .....                                       | 86 |

|                                                                                                                                                     |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 81 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D - Grupowe prądy powietrza .....                                 | 88  |
| Rys. 82 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Ściana A .....                                                | 89  |
| Rys. 83 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Ściana B .....                                                | 89  |
| Rys. 84 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Ściana C .....                                                | 90  |
| Rys. 85 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Wylot z rejonów wentylacyjnych ściany: A, B, C .....          | 90  |
| Rys. 86 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Wylot z rejonu wentylacyjnego: Ściana A .....                 | 91  |
| Rys. 87 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Wylot z rejonu wentylacyjnego: Ściana A (Sylwester 2025)..... | 91  |
| Rys. 88 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Grupowy prąd powietrza „świeżego” (Sylwester 2025).....       | 92  |
| Rys. 89 Wyniki stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D – Depresja w szybie wentylacyjnym (Sylwester 2025) .....        | 92  |
| Rys. 90 Histogram wartości $k$ ( $\text{kg/m}^3$ ) z analizą statystyczną dla szybów w Badaniu E.....                                               | 104 |
| Rys. 91 Rozkład zmiennej $A$ ( $\text{m}^2$ ) dla szybów w Badaniu E .....                                                                          | 104 |
| Rys. 92 Rozkład zmiennej $D$ ( $\text{m}$ ) dla szybów w Badaniu E .....                                                                            | 105 |
| Rys. 93 Rozkład różnicy ciśnień $\Delta P$ ( $\text{Pa}$ ) dla szybów w Badaniu E .....                                                             | 105 |
| Rys. 94 Rozkład natężenia przepływu $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) dla szybów w Badaniu E .....                                                      | 106 |
| Rys. 95 Rozkład wartości $R_{100}$ ( $\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^9$ ) dla szybów w Badaniu E .....                                            | 106 |
| Rys. 96 Rozkład prędkości $v$ ( $\text{m/s}$ ) dla szybów w Badaniu E.....                                                                          | 107 |
| Rys. 97 Rozkład gęstości $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) dla szybów w Badaniu E.....                                                                     | 107 |
| Rys. 98 Rozkład wartości liczby Reynoldsa ( $Re_{25}$ ) dla szybów w Badaniu E .....                                                                | 108 |
| Rys. 99 Rozkład wartości $e$ dla szyby w Badaniu E .....                                                                                            | 108 |
| Rys. 100 Histogram wartości $k_{1,2}$ ( $\text{kg/m}^3$ ) z analizą statystyczną dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                      | 110 |
| Rys. 101 Rozkład zmiennej $A$ ( $\text{m}^2$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                                                        | 110 |
| Rys. 102 Rozkład zmiennej $D$ ( $\text{m}$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                                                          | 111 |
| Rys. 103 Rozkład zmiennej $Oz$ ( $\text{m}$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                                                         | 111 |
| Rys. 104 Rozkład natężenia przepływu $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                                    | 112 |
| Rys. 105 Rozkład wartości $R_{100}$ ( $\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^9$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                          | 112 |
| Rys. 106 Rozkład gęstości $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                                                  | 113 |
| Rys. 107 Rozkład prędkości $v$ ( $\text{m/s}$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E.....                                                        | 113 |
| Rys. 108 Rozkład wartości liczby Reynoldsa ( $Re_{25}$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                                              | 114 |
| Rys. 109 Rozkład wartości $e$ ( $\text{m}$ ) dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                                                          | 114 |
| Rys. 110 Histogram wartości $k$ ( $\text{kg/m}^3$ ) z analizą statystyczną dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E.....                               | 116 |
| Rys. 111 Rozkład zmiennej $A$ ( $\text{m}^2$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                                                          | 116 |
| Rys. 112 Rozkład zmiennej $D$ ( $\text{m}$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                                                            | 117 |
| Rys. 113 Rozkład różnicy ciśnień $\Delta P$ ( $\text{Pa}$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E.....                                              | 117 |
| Rys. 114 Rozkład zmiennej $Oz$ ( $\text{m}$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                                                           | 118 |
| Rys. 115 Rozkład natężenia przepływu $Q$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                                      | 118 |
| Rys. 116 Rozkład wartości $R_{100}$ ( $\text{N}\cdot\text{s}^2/\text{m}^9$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                            | 119 |
| Rys. 117 Rozkład gęstości $\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                                                    | 119 |
| Rys. 118 Rozkład prędkości $v$ ( $\text{m/s}$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                                                         | 120 |
| Rys. 119 Rozkład wartości liczby Reynoldsa ( $Re_{25}$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                                                | 120 |
| Rys. 120 Rozkład wartości $e$ ( $\text{m}$ ) dla wyrobisk ŁP z odstawą w Badaniu E .....                                                            | 121 |
| Rys. 121 Histogram wartości $k$ ( $\text{kg/m}^3$ ) z analizą statystyczną dla ściany (wyrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                      | 122 |
| Rys. 122 Rozkład zmiennej $A$ ( $\text{m}^2$ ) dla ściany (wyrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                  | 123 |

|                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 123 Rozkład zmiennej $D$ (m) dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                                           | 123 |
| Rys. 124 Rozkład różnicy ciśnień $\Delta P$ (Pa) dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                            | 124 |
| Rys. 125 Rozkład zmiennej $Oz$ (m) dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                                          | 124 |
| Rys. 126 Rozkład natężenia przepływu $Q$ ( $m^3/s$ ) dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                        | 125 |
| Rys. 127 Rozkład wartości $R100$ ( $N \cdot s^2/m^9$ ) dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E ...                                                        | 125 |
| Rys. 128 Rozkład gęstości $\rho$ ( $kg/m^3$ ) dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                               | 126 |
| Rys. 129 Rozkład prędkości $v$ (m/s) dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                                        | 126 |
| Rys. 130 Rozkład wartości liczby Reynoldsa ( $Re_{25}$ ) dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                    | 127 |
| Rys. 131 Rozkład wartości $e$ dla ściany (wrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                                               | 127 |
| Rys. 132 Widok modelu sieci wentylacyjnej wykonanego w Badaniu F .....                                                                                         | 130 |
| Rys. 133 Wycinek wartości przypisanych współczynników opory FF (Friction Factors) w bocznicach wentylacyjnych w Badaniu F .....                                | 131 |
| Rys. 134 Ręczny barometr, termometr i higrometr BAR-TH firmy JMD .....                                                                                         | 131 |
| Rys. 135 Ręczny anemometr wirnikowy RAW firmy JMD .....                                                                                                        | 132 |
| Rys. 136 Dwuczujnikowy miernik ciśnienia MC-10/100-2/Ex .....                                                                                                  | 132 |
| Rys. 137 Wynik punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania przy szybie C w oprogramowaniu VentSim w Badaniu F .....                                       | 139 |
| Rys. 138 Wynik punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania przy szybie E w oprogramowaniu VentSim w Badaniu F .....                                       | 140 |
| Rys. 139 Przykładowa chmura punktów wrobiska .....                                                                                                             | 153 |
| Rys. 140 Idea transformacji chmury punktów o wektor przesunięcia oraz macierz obrotu .....                                                                     | 154 |
| Rys. 141 Przykładowa analiza segmentu nr 95 w nowej metodzie budowania sieci wentylacyjnych .....                                                              | 156 |
| Rys. 142 Przykładowa analiza segmentów od nr 130-169 w nowej metodzie budowania sieci wentylacyjnych .....                                                     | 156 |
| Rys. 143 Wycinek polilini 3D w formacie DXF w programie VentSim wraz z opisami segmentów .....                                                                 | 159 |
| Rys. 144 Przykładowa Siatka mesh z naniesionym wektorowym modelem bocznicy wentylacyjnej w programie VentSim w Badaniu G .....                                 | 159 |
| Rys. 145 Przykładowa Siatka mesh z naniesionym widokiem 3D (solid) modelem bocznicy wentylacyjnej w programie VentSim .....                                    | 160 |
| Rys. 146 Wycinek zredukowanej chmury punktów przed operacją czyszczenia w nowej metodzie budowy modeli wentylacyjnych w Badaniu G .....                        | 160 |
| Rys. 147 Wycinek wygenerowanej siatki mesh po operacji czyszczenia w nowej metodzie budowy modeli wentylacyjnych (widok wewnątrz chodnika) w Badaniu G .....   | 161 |
| Rys. 148 Wycinek wygenerowanej siatki mesh po operacji czyszczenia w nowej metodzie budowy modeli wentylacyjnych (widok „zewnątrz” chodnika) w Badaniu G ..... | 161 |
| Rys. 149 Wygenerowana chmura punktów o przekroju kołowym i promieniu $r=2m$ .....                                                                              | 162 |
| Rys. 150 Wygenerowana chmura punktów o przekroju kwadratowym i boku $a=2m$ .....                                                                               | 163 |
| Rys. 151 Wygenerowana chmura punktów o przekroju prostokątnym i wymiarach $a=6m$ i $b=4m$ .....                                                                | 163 |
| Rys. 152 Wygenerowana chmura punktów o przekroju trapezowym i wymiarach $a=6m$ , $b=4m$ i $h=4m$ .....                                                         | 164 |
| Rys. 153 Wygenerowana chmura punktów dla wrobiska w obudowie ŁP z pustkami nad obudową i wymiarach $a=6m$ i $h=4m$ .....                                       | 164 |
| Rys. 154 Widok z góry chmury punktów zeskanowanego wrobiska w Badaniu G .....                                                                                  | 168 |
| Rys. 155 Zmiana spadku naporu w bocznicach w Badaniu G .....                                                                                                   | 169 |
| Rys. 156 Spadek naporu dla segmentu nr 10 do 242 dla gęstości $1,2 kg/m^3$ na podstawie metody Atkinsonn'a w Badaniu G .....                                   | 170 |
| Rys. 157 Zmiana współczynników: $k$ (FF)(Atkinsonn) oraz $\lambda$ (Darcy) dla segmentów od 10 – 242 w Badaniu G .....                                         | 171 |
| Rys. 158 Zmiana chropowatości $e$ , $m$ oraz $e/D$ dla segmentów od 10-242 w Badaniu G .....                                                                   | 171 |

|                                                                                                                                                                                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Rys. 159 Porównanie obliczeń spadku naporu nowej metody budowy sieci wentylacyjnej w zależności od metody obliczenia i gęstości powietrza (dla segmentów od 10-242), L=358,6m w Badaniu G ..... | 172 |
| Rys. 160 Wyniki obliczeń w oprogramowaniu VentSim według nowej metody budowy modeli wentylacyjnych w Badaniu G .....                                                                            | 172 |
| Rys. 161 Wizualizacja odwzorowania segmentów siatką mesh (według nowej metody budowy modeli wentylacyjnych) w Badaniu G .....                                                                   | 173 |
| Rys. 162 Segment 1 – błędy w opracowaniu przekroju i wyznaczenia chropowatości w badaniu G .....                                                                                                | 174 |
| Rys. 163 Połączenie danych z czujników gazometrii automatycznej z systemu Zefir do VentSim .....                                                                                                | 180 |
| Rys. 164 Konfiguracja poszczególnego czujnika w programie VentSim .....                                                                                                                         | 180 |
| Rys. 165 Widok połączonego czujnika w programie VentSim z systemu Zefir.....                                                                                                                    | 181 |
| Rys. 166 Porównanie błędów wyznaczenia oporów bocznic w zależności od metody .....                                                                                                              | 195 |
| Rys. 167 Schemat wentylacyjny rejonu pożaru. ....                                                                                                                                               | 198 |
| Rys. 168 Wyniki symulacji zmiany ilości, składu i temperatury powietrza na wylocie z rejonu wentylacyjnego (K-3) - moment zamknięcia K-2, K-4, K-5 01:05:00 w symulacji. ....                   | 200 |

## Spis tabel

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 1 Okno ustawień (environment) w oprogramowaniu VentSim .....                                                                                                      | 24  |
| Tabela 2 Okno ustawień (thermal flywheel – annual) w oprogramowaniu VentSim .....                                                                                        | 24  |
| Tabela 3 Okno ustawień thermal flywheel – daily) w oprogramowaniu VentSim .....                                                                                          | 25  |
| Tabela 4 Dane techniczne czujnika typu CSPA-2 firmy HASO S.C [...instrukcja] .....                                                                                       | 26  |
| Tabela 5 Wycinek danych z rejestracji ciśnienia atmosferycznego .....                                                                                                    | 27  |
| Tabela 6 Zestawienie otrzymanych wyników dla ciśnienia barometrycznego w badaniu A.....                                                                                  | 30  |
| Tabela 7 Zestawienie otrzymanych wyników dla temperatury powietrza w badaniu A.....                                                                                      | 37  |
| Tabela 8 Zestawienie otrzymanych wyników wilgotności względnej powietrza w badaniu A.....                                                                                | 43  |
| Tabela 9 Wycinek danych źródłowych z portalu meteoblue.com.....                                                                                                          | 50  |
| Tabela 10 Zestawienie wyników obliczeń dynamiki zmiany ciśnienia barometrycznego dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 dla wysokości 280,15 m.n.p.m.....        | 56  |
| Tabela 11 Zestawienie wyników obliczeń dynamiki zmiany ciśnienia barometrycznego dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 wartości zredukowane do poz. morza ..... | 58  |
| Tabela 12 Zestawienie wyników obliczeń dynamiki zmiany temperatury powietrza dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 .....                                        | 60  |
| Tabela 13 Zestawienie wyników obliczeń dynamiki zmiany wilgotności właściwej powietrza dla miasta Jastrzębie-Zdrój w latach 2013-2022 .....                              | 62  |
| Tabela 14 Dane techniczne czujnika typu CSPD-4 firmy HASO S.C. ....                                                                                                      | 68  |
| Tabela 15 Wycinek danych czujnika różnicy ciśnień CSPD-4 przy Szybie IV .....                                                                                            | 70  |
| Tabela 16 Wyznaczenie dynamiki zmian podciśnienia w sieci wentylacyjnej dla Badania C .....                                                                              | 79  |
| Tabela 17 Zbiorcze zestawienie wyników stanu potencjałów sieci w czasie w czasie rzeczywistym dla Badania D .....                                                        | 93  |
| Tabela 18 Typy obudowy wyrobisk korytarzowych stosowanej w JSW S.A.....                                                                                                  | 96  |
| Tabela 19 Szyby – fragment danych wejściowych w Badaniu E.....                                                                                                           | 100 |
| Tabela 20 Wyrobiska w obudowie ŁP - bez odstawy– fragment danych wejściowych w Badaniu E .....                                                                           | 100 |
| Tabela 21 Wyrobiska w obudowie ŁP – z odstawa– fragment danych wejściowych w Badaniu E .....                                                                             | 101 |
| Tabela 22 Ściany (wyrobiska wybierkowe) – fragment danych wejściowych w Badaniu E.....                                                                                   | 101 |
| Tabela 23 Zestawienie ilości wyrobisk zakwalifikowanych do badania statystycznego w Badaniu E .....                                                                      | 102 |
| Tabela 24 Wyniki analizy statystycznej dla szybów w Badaniu E .....                                                                                                      | 103 |
| Tabela 25 Wyniki analizy statystycznej dla wyrobisk ŁP bez odstawy w Badaniu E .....                                                                                     | 109 |
| Tabela 26 Wyniki analizy statystycznej dla wyrobisk ŁP z odstawa w Badaniu E .....                                                                                       | 115 |
| Tabela 27 Wyniki analizy statystycznej dla ściany (wyrobiska wybierkowe) w Badaniu E .....                                                                               | 122 |
| Tabela 28 Podsumowanie wyników wyznaczenia współczynników oporu (chropowatości) dla Badania E .....                                                                      | 128 |
| Tabela 29 Wyznaczenie kompensacji błędów pomiarów względem urządzeń .....                                                                                                | 133 |
| Tabela 30 Wycinek pomiarów ciśnienia, temperatury i wilgotności na powierzchni kopalni w Badaniu G.....                                                                  | 134 |
| Tabela 31 Wycinek pomiarów ciśnienia, temperatury i wilgotności na dole kopalni w Badaniu G .....                                                                        | 134 |
| Tabela 32 Wycinek pomiarów podciśnienia w szybie E w Badaniu E .....                                                                                                     | 136 |
| Tabela 33 Wycinek pomiarów podciśnienia w szybie C (wentylator W-1) w Badaniu E.....                                                                                     | 136 |
| Tabela 34 Wycinek pomiarów podciśnienia w szybie C (wentylator W-2) w Badaniu E.....                                                                                     | 136 |
| Tabela 35 Bilans ilości powietrza na podstawie pomiarów w Badaniu E.....                                                                                                 | 137 |
| Tabela 36 Moc prądu powietrza na podstawie pomiarów w kopalni w Badaniu F .....                                                                                          | 137 |
| Tabela 37 Obliczenie otworu równoznacznego na podstawie pomiarów w Badaniu F .....                                                                                       | 137 |
| Tabela 38 Porównanie wyników ilości powietrza w szybach pomiarów rzeczywistych do symulacji w Badaniu F .....                                                            | 138 |

|                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 39 Porównanie wyników punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania przy szybie C pomiarów rzeczywistych do symulacji w Badaniu F .....                   | 139 |
| Tabela 40 Porównanie wyników punktu pracy wentylatora głównego przewietrzania przy szybie E pomiarów rzeczywistych do symulacji w Badaniu F .....                   | 139 |
| Tabela 41 Wyniki analizy błędów względnych względem wartości pomiarowej w Badaniu F ....                                                                            | 141 |
| Tabela 42 Wyniki analizy błędów względnych względem wartości odniesienia (maksymalnej w pomiarach) w Badaniu F .....                                                | 142 |
| Tabela 43 Porównanie ręcznych skanerów 3D które brały udział w testach przy opracowywaniu nowej metody budowania modelu sieci wentylacyjnej .....                   | 147 |
| Tabela 44 Symbole użyte w metodzie budowy modelu sieci wentylacyjnej na podstawie skaningu laserowego.....                                                          | 149 |
| Tabela 45 Przykładowa zawartość pliku z obliczeniami centroidu chmury punktów w nowej metodzie budowy sieci wentylacyjnych.....                                     | 158 |
| Tabela 46 Wyniki analizy porównawczej wygenerowanych chmur punktów imitujących wyrobiska (tunele) – punktowo dla segmentów 50 – KM 50 .....                         | 165 |
| Tabela 47 Wyniki analizy porównawczej wygenerowanych chmur punktów imitujących wyrobiska (tunele) – średnia dla całego skanu – 100mb wyrobiska (99 segmentów) ..... | 166 |
| Tabela 48 Zbiorcze zestawienie wyników w Badaniu G .....                                                                                                            | 169 |
| Tabela 49. Przykładowy forma zapisu danych z programu Zefir .....                                                                                                   | 177 |
| Tabela 50 Nazwy kolumn dla integracji danych Zefir w VentSim .....                                                                                                  | 178 |
| Tabela 51 Spis typoszeregu czujników rozpoznawanych w VentSim i ich numeracja (SENSORTYPE).....                                                                     | 179 |
| Tabela 52 Wyniki wyznaczenia błędu pomiaru prędkości powietrza .....                                                                                                | 188 |
| Tabela 53 Wyniki wyznaczenia błędu pomiaru przekroju poprzecznego (pomiar miejscowy) ....                                                                           | 190 |
| Tabela 54 Wyniki wyznaczenia błędu pomiaru przekroju poprzecznego (pomiar skanowaniem laserowym) .....                                                              | 191 |
| Tabela 55 Parametry do obliczenia obwodu koła na podstawie skaningu laserowego .....                                                                                | 192 |
| Tabela 56 Wyniki wyznaczenia błędu obwodu koła na podstawie skaningu laserowego .....                                                                               | 192 |
| Tabela 57 Wyniki błędów pomiarowych ciśnienia barometrycznego .....                                                                                                 | 193 |
| Tabela 58 Wyznaczenie spadków naporu w metodzie barometrycznej spełniający warunek błędu względnego $\leq 10\%$ .....                                               | 194 |
| Tabela 59 Pomiary rzeczywiste z linii chromatograficznych na wylocie z rejonu wentylacyjnego (tama K-3) .....                                                       | 199 |
| Tabela 60 Porównanie wyników symulacji pożaru z wartościami rzeczywistymi na wylocie z rejonu wentylacyjnego (K3) .....                                             | 201 |



## Bibliografia

1. Agricola G. De Re Metallica Libri XII. O górnictwie i hutnictwie: dwanaście ksiąg. Tłum. z czeskiego Karina Kurková. Jelenia Góra: Muzeum Karkonoskie; 2000. (Oryg. 1556).
2. Akhtar S, Kumral M, Sasmito AP. Correlating variability of the leakage characteristics with the hydraulic performance of an auxiliary ventilation system. *Building and Environment*. 2017;121:189-201. doi:10.1016/j.buildenv.2017.05.029.
3. Aminossadati S.M., Hooman K. Numerical simulation of ventilation air flow in underground mine workings. In: *Proceedings of the 12th U.S./North American Mine Ventilation Symposium*; 9–11 June 2008; Reno, NV. Reno: University of Nevada; 2008:253–259.
4. Atkinson J.J. A practical treatise on friction of air in mines. New York: D. Van Nostrand; 1875.
5. Bascompta M., Sanmiquel L., Anticoi H.F., Oliva J. Ventilation friction factor determination and comparison: two case studies of potash mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*. 2019;119(10):865–870. doi:10.17159/2411-9717/707/2019.
6. Bascompta M. Some approaches to improve the ventilation system in underground potash mines [PhD thesis]. Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya; 2016.
7. Borowski M., Szmuk A., Krokos K. Integracja nowoczesnych technologii wizualizacji i symulacji w optymalizacji systemów wentylacyjnych w górnictwie podziemnym – studium przypadku. W: 12. Szkoła Aerologii Górniczej; 12–14 VI 2024;13; Targanice. Gliwice: Politechnika Śląska.
8. Branny M., Filipek W. Numerical simulation of ventilation of blind drifts with a force–exhaust overlap system in the condition of methane and dust hazards. *Archives of Mining Sciences*. 2008;53(2):221–234.
9. Branny M., Karch M., Wodziak W., Jaszczur M., Nowak R., Szmyd J. Experimental and numerical analysis of the turbulent flow in a T-shaped channel. In: *XX Fluid Mechanics Conference (KKMP 2012)*; 17–20 IX 2012; Świnoujście. Warsaw: IPPT PAN; 2012.
10. Branny M. Modelowanie trójwymiarowych przepływów powietrza w wyrobiskach górniczych. *Archives of Mining Sciences*. 1998;43(4):535–549.
11. Branny M, Nowak B, Ptaszyński B, Kuczera Z, Łuczak R, Życzkowski P. Wpływ profilu prędkości powietrza na parametry przepływu dwufazowego w szybie wentylacyjnym (An influence of air velocity profile on the two-phase flow parameters in the ventilating shaft). *Górnictwo i Geoinżynieria*. 2010;34(1):29-39.
12. BRKIĆ, Dejan. Review of explicit approximations to the Colebrook relation for flow friction. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2011, 77.1:34-48.
13. Budryk W. Wentylacja kopalń. Cz. 1: Przewietrzanie wyrobisk. Katowice: Wydawnictwa Górniczo-Hutnicze; 1961.

14. Bystroń H., Jaroń S., Markefka P., Strumiński A., Wojtyczka A. Przewietrzanie kopalń. Poradnik Górnika, tom III, dział I. Katowice: Wydawnictwo Śląsk; 1975.
15. Bystroń H. Metody manometryczna i barometryczna pomiaru ciśnienia statycznego powietrza wentylacyjnego w wyrobiskach górniczych. Przegląd Górniczy. 2000;56(12):1–7.
16. Bystroń H. Podstawowe pojęcia i związki opisujące quasi-stacjonarny przepływ powietrza wilgotnego wyrobiskiem górniczym w kopalni podziemnej. Przegląd Górniczy. 1982;38(11–12):707–712.
17. Bystroń H. Potencjał aerodynamiczny powietrza wentylacyjnego w kopalni o trudnych warunkach termicznych. Przegląd Górniczy. 2000;56(10):1–11.
18. Bystroń H. Temperatura wirtualna suchego powietrza wentylacyjnego i jej zastosowanie w aerologii górniczej. Przegląd Górniczy. 2000;56(12).
19. Bystroń H. The main and booster natural ventilating energies in the mine ventilation network. Archives of Mining Sciences. 2000;45(2):171–198.
20. Bystroń H. Wpływ depresji naturalnej na pracę wentylatora głównego w podsystemie przewietrzania kopalni. Archiwum Górnictwa. 1983;28(2):221–262.
21. Bystroń H. Wyniki badania sieci przewietrzania kopalni Nowa Ruda — szyb Bolesław. Przegląd Górniczy. 1957;10(717):294–300.
22. Cao P., Gao K., Qi Z. Inversion of mine-ventilation resistance coefficients enhanced by deep reinforcement learning. Process Safety and Environmental Protection. 2024;182:387–404. doi:10.1016/j.psep.2023.12.005.
23. Cao P, Liu J, Wang H, Wang Y, Liu X, Wang D. Uncertainty analysis of digital twin model of mine ventilation system. Scientific Reports. 2024;14:26558. doi:10.1038/s41598-024-77978-3.
24. Cygankiewicz J. O doborze parametrów stabilnej sieci wentylacyjnej. Archiwum Górnictwa. 1998;43(2):229–244.
25. Darcy, Henry. Les fontaines publiques de la ville de Dijon: Exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d'eau: Ouvrage terminé par un appendice relatif aux fournitures d'eau de plusieurs villes, au filtrage des eaux et à la fabrication des tuyaux de fonte, de plomb, de tôle et de bitume. Vol. 2. Victor Dalmont, éditeur, 1856.
26. Deszcz P., Obracaj D. Verification of the analytical modelling of the climatic conditions in the coal-mine heading by computational fluid dynamics. Archives of Mining Sciences. 2012;57(4):983–995.
27. Dong S., Yu F., Wang K. A virtual simulation experiment platform of subway emergency ventilation system and study on its teaching effect. Scientific Reports. 2022;12:10787. doi:10.1038/s41598-022-14968-3.
28. Drenda J., Słota K. Wyznaczanie średniej temperatury promieniowania cieplnego otoczenia z wykorzystaniem programu ZKS MOSTO 2000. Wiadomości Górnicze. 2003;54(1):30–35.

29. Dylong, A., Knapczyk, J., Musioł, D. (2013). Wizualizacja bieżącego rozplywu powietrza w sieci wentylacyjnej wraz z jej monitoringiem gazowym. *Górnictwo i Geologia*, Tom 8, Zeszyt 4,
30. Dziurzyński W., Krach A., Krawczyk J., Pałka T. Walidacja modelu matematycznego przewietrzania kopalni stosowanego w programie VentMet z wykorzystaniem bazy danych pomiarowych wybranego rejonu wentylacyjnego. *Prace IMG PAN*. 2005;8(1–2):101–115.
31. Dziurzyński W., Krach A., Krawczyk J., Pałka T. Weryfikacja modelu matematycznego wydzielania metanu w rejonie ściany z uwzględnieniem zmian ciśnienia barometrycznego. *Prace IMG PAN*. 2004;6(3–4):131–142.
32. Dziurzyński W. Zasady pomiarów przepływów powietrza w wyrobiskach kopalnianych. Wybrane sposoby kontroli i kalibracji przyrządów pomiarowych. *Prace IMG PAN*. 2017 (10).
33. Dziurzyński W., Krach A., Pałka T. Prognozowanie rozkładu stężenia metanu w sieci wentylacyjnej z uwzględnieniem systemu monitoringu. *Prace IMG PAN*. 2001;3(2):163–182.
34. Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S. Opracowanie narzędzi programowych dla odtworzenia zdarzeń i katastrof oraz ich weryfikacja na podstawie danych „post”. *Prace IMG PAN*. 2011;12(1–4).
35. Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S. Rozwój metody prognozowania stanu atmosfery kopalni z wykorzystaniem symulacji numerycznych oraz danych systemu monitoringu. *Prace IMG PAN*. 2010;12(1–4):115–132.
36. Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S. Walidacja procedur programu VentZroby z wykorzystaniem systemu monitoringu stanu atmosfery kopalni. *Prace IMG PAN*. 2009;11(1–4):79–112.
37. Dziurzyński W., Krach A., Pałka T., Wasilewski S. Walidacja programu komputerowego do prognozowania przewietrzania kopalni z zastosowaniem metod optymalizacji numerycznej. *Prace IMG PAN*. 2012;12(1–4).
38. Dziurzyński W., Pałka T. Algorytmy komputerowej symulacji procesu przewietrzania umożliwiające dostęp i wykorzystanie danych systemu monitoringu sieci wentylacyjnej. *Prace IMG PAN*. 2000;2(1–2):161–176.
39. Fair R., van Laar J.H., Nell K., Nell D., Mathews E.H. Simulating the sensitivity of underground ventilation networks to fluctuating ambient conditions. *South African Journal of Industrial Engineering*. 2021;32(3):42–51. doi:10.7166/32-3-2616.
40. Frączek R. *Aerologia górnicza*. 2003 SWWGiG Politechniki Śl. w Gliwicach.
41. Frączek R. Uwagi dotyczące określenia oporu aerodynamicznego wyrobisk z uwzględnieniem wymiany ciepła. *Przegląd Górniczy*. 1999;55(1):24–29.
42. Gao K., Liu Z. Application of artificial intelligence in mine ventilation – a brief review. *Frontiers in Artificial Intelligence*. 2024;7:1402555. doi:10.3389/frai.2024.1402555.

43. Gao K., Qi Z., Liu Y., Zhang J. Calculation model for ventilation friction resistance coefficient by surrounding rock roughness distribution characteristics of mine tunnel. *Scientific Reports*. 2022;12:3193. doi:10.1038/s41598-022-07115-5.
44. Gou Y., Shi X., Zhou J., Qiu X., Chen X. Characterization and effects of the shock losses in a parallel fan station in the underground mine. *Energies*. 2017;10(6):785. doi:10.3390/en10060785.
45. Halim A, Edelbro C. State of the Art: Underground Ventilation – A Feasibility Study. Final report. Luleå (Sweden): Rock Tech Centre; 2020.
46. Hughes H.W. A Text Book of Coal Mining for the Use of Colliery Managers and Others. London: Charles Griffin & Co.; 1893.
47. Hurtado J.P., Díaz N., Acuña E.I., Fernández J. Shock losses characterization of ventilation circuits for block caving production levels. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014;41:88–94. doi:10.1016/j.tust.2013.12.009.
48. Ihsan A, Widodo NP, Cheng J, Wang E. Ventilation on demand in underground mines using neuro-fuzzy models: Modeling and laboratory-scale experimental validation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024;108048. doi:10.1016/j.engappai.2024.108048.
49. Jeżowiecka Kabsch K., Szewczyk H. *Mechanika płynów*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej; 2001.
50. Jia J., Wang F. Study on emergency escape route planning under fire accidents in the Burtai coal mine. *Scientific Reports*. 2022;12:13074. doi:10.1038/s41598-022-15437-7.
51. Kielbasa J. An absolute measurement of gas velocity by means of an anemometer with a transported thermal signal. *Archives of Mining Sciences*. 1970;15(4):309–318.
52. Knechtel J. Próba określenia wpływu temperatury pierwotnej skał na wielkość strumienia wilgoci wnikałej do powietrza kopalnianego na podstawie wyników pomiarów dołowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria: Górnictwo*. 2004;261:441–450.
53. Knechtel J. Sposób oceny zagrożenia temperaturowego w kopalni głębokiej oparty na analizie schematu temperaturowego kopalnianej sieci wentylacyjnej. *WUG : bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie* 2005;(8):24–36.
54. Krach A. Determining diagonal branches in mine ventilation networks. *Archives of Mining Sciences*. 2014;59(4):1097-1105. doi:10.2478/amsc-2014-0076.
55. Krach A. Measurement uncertainty of static differential pressure measurement in mine ventilation networks using the barometric method. *Archives of Mining Sciences*. 2002;47(3):421–441.
56. Krach A. Źródła niepewności w kopalnianych pomiarach wentylacyjnych. *Archives of Mining Sciences*. 2004;49(Spec. Iss.):151–178.

57. Krawczyk J., Janus J. Numerical simulation of a sudden inflow of methane into the end segment of a longwall with Y type ventilation system. *Archives of Mining Sciences*. 2014;59(4):941–957. doi:10.2478/amsc.2014.0065.
58. Kruszyński M. Pewien przykład przepływu nieustalonego w kopalnianej sieci wentylacyjnej. *Archiwum Górnictwa*. 1970;15(1).
59. Kurnia J.C., Sasmito A.P., Mujumdar A.S. Simulation of a novel intermittent ventilation system for underground mines. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 2014;42:206–215. doi:10.1016/j.tust.2013.12.010.
60. Li J., Gao K., Liu T., Zhang D., Zhou P. Correlating variability of the leakage characteristics with the hydraulic performance of an auxiliary ventilation system. *Process Safety and Environmental Protection*. 2022;162:143–154. doi:10.1016/j.psep.2022.03.034.
61. Li S. Simulation study of mine reversal ventilation test based on Ventsim. *Journal of Scientific and Engineering Research*. 2025;12(4):27–36
62. Ligęza P., Poleszczyk E., Skotniczny P. Measurements of velocity profile in headings with the use of integrated hot-wire anemometric system. *Archives of Mining Sciences*. 2008;53(1):87–96.
63. Maleki S., Sotoudeh F., Sereshki F. Application of VENTSIM 3D and mathematical programming to optimize underground mine ventilation network: a case study. *Journal of Mining & Environment*. 2018;9(4):867–880.
64. Malet J., Radosavljevic M., Mbaye M., Costa D., Wiese J., Gehin E. Flow characterization of various singularities in a real scale ventilation network with rectangular ducts. *Building and Environment*. 2022;109223. doi:10.1016/j.buildenv.2022.109223.
65. McGrattan KB, Baum HR, Rehm RG, Hamins A, Forney GP. *Fire Dynamics Simulator – Technical Reference Guide*. NISTIR 6467. Gaithersburg (MD): National Institute of Standards and Technology; 2000. doi:10.6028/NIST.IR.6467.
66. McPherson M.J. *Subsurface Ventilation and Environmental Engineering*. 2nd ed. Dordrecht: Springer; 2012.
67. Mikołajczyk W. Analiza skuteczności środków wentylacyjnych i klimatyzacyjnych dla poprawy komfortu pracy w warunkach kopalń LGOM-U. [rozprawa doktorska]. Kraków: Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Instytut Górnictwa Podziemnego; 1974.
68. Niubó M, de Felipe JJ, Bascompta M, Pérez-Ràfols F, Vives-Costa J, Sanmiquel L, López JA. Assessing mine ventilation optimization and friction factor determination for underground mines. *Arabian Journal of Geosciences*. 2025;18:72. doi:10.1007/s12517-025-12205-5.
69. Nowak B, Filek K. Temperatura i wilgotność chłodzonego powietrza w podziemnych wyrobiskach górniczych przewietrzanych wentylacją opływową (Temperature and humidity of cooling air in underground mining excavations ventilating circular flowing air). Kraków:

- Wydawnictwa AGH; 1996. 88 s. (Rozprawy i Monografie / Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie; nr 48)
70. Nowak B, Filek K, Ptaszyński B. Wpływ źródeł ciepła i wilgoci na stan zamglonego powietrza w podziemnych górniczych wyrobiskach korytarzowych (Influence of heat and moisture sources on haze condition of air in the underground dog headings). *Górnictwo i Geoinżynieria*. 2008;32(3):45-55.
  71. Obracaj D., Korzec M., Deszcz P. Study on methane distribution in the face zone of the fully mechanized roadway with overlap auxiliary ventilation system. *Energies*. 2021;14(19):6379. doi:10.3390/en14196379.
  72. Obracaj D., Korzec M., Dreger M. Comparison of gravimetric determination of methane sorption capacities of coals for using their results in assessing outbursts in mines. *Energies*. 2024;17(17):4372. doi:10.3390/en17174372.
  73. Olajossy A. Badanie pewnych parametrów w zagadnieniu przepływów powietrza z uwzględnieniem efektu wymiany masy. *Archiwum Górnictwa*. 1973;18(4).
  74. Pach G. Metody obliczeń wymuszonego rozplywu powietrza w projektowanych kopalnianych sieciach wentylacyjnych zawierających zużyte prądy zależne między podsieciami wentylatorów głównych [doktorska rozprawa]. Gliwice: Politechnika Śląska; 2008. Dostęp online: <https://delibra.bg.polsl.pl/publication/412>
  75. Pach G. Optimization of forced air flow by the comparison of positive and negative regulations in mine ventilation network. *Archives of Mining Sciences*. 2018;63(4):853–870. doi:10.24425/ams.2018.124980.
  76. Pach G., Sułkowski J., Różański Z., Wrona P. Redukcja kosztów pracy wentylatorów głównego przewietrzania przy zachowaniu bezpiecznej wentylacji – studium przypadków. *Prace Naukowe IG PWroc*. 2018;(167):89–102.
  77. Panigrahi D.C. The analysis and simulation of heat flow in longwall coal faces. *Archives of Mining Sciences*. 2002;47(4):539–558.
  78. Parra M.T., Villafruela J.M., Castro F., Méndez C. Numerical and experimental analysis of different ventilation systems in deep mines. *Building and Environment*. 2006;41(2):87–93. doi:10.1016/j.buildenv.2005.01.002.
  79. Pawiński J., Roszkowski J., Roszczyniański W. Zagadnienia bilansu powietrza w przewodach rozdzielczych. *Archiwum Górnictwa*. 1973;18(4).
  80. Pawiński J., Roszkowski J. Ruch powietrza w przewodach rozdzielczych ze szczególnym uwzględnieniem strat. *Archiwum Górnictwa*. 1965;10(4).
  81. Pawiński J., Roszkowski J., Strzemiński J. Przewietrzanie kopalń. 1995 Śląskie wydawnictwo techniczne.
  82. Pawiński J., Roszkowski J. Wpływ parametrów stanu i składu powietrza na opory przepływu w przewodach rozdzielczych. *Archiwum Górnictwa*. 1982;27(4):437–452.

83. Pawiński J., Roszkowski J. Ruch powietrza z uwzględnieniem strat. *Archiwum Górnictwa*. 1965;10(4):431-439.
84. Pawiński J. Ruch powietrza w przewodach rozdzielczych. *Archiwum Górnictwa*. 1973;18(3)
85. Pęczek D, Rosiek F, Sikora M, Urbański J. Rozwój wentylacji kopalń na przestrzeni dziejów (Development of ventilation systems throughout mining history). *Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały*. 2006;117(32):257-266.
86. Ptaszyński B, Kuczera Z. The minimum pressure drop caused by the condensation of water vapor in the cooled air flowing in the inclined conduit. *Inżynieria Mineralna*. 2019;21(1):17-24.
87. Ptaszyński B., Łuczak R., Kuczera Z., Życzkowski P., Zwolińska Gładys K., Borowski M. Pressure change in a duct with a homogeneous gas flow in the presence of a point sink. *Energies*. 2024;17(20):5216. doi:10.3390/en17205216.
88. Ptaszyński B, Łuczak R, Życzkowski P, Kuczera Z. Thermodynamic processes of the air flowing through a ventilation shaft in underground mines. *Archives of Mining Sciences*. 2018;63(1):149-163. doi:10.24425/118892.
89. Qi Z., Gao K., Obracaj D., Liu Y., Yuan K. Forecasting the friction factor of a mine airway using an improvement stacking ensemble learning approach. *IEEE Access*. 2024;12:24813-24830. doi:10.1109/ACCESS.2024.3365496.
90. Rosiek F., Sikora M., Urbański J., Augustyn W. Zintegrowany model sieci wentylacyjnych kopalń KGHM „Polska Miedź” SA. *Napędy i Sterowanie*. 2012;14(7/8):60-63.
91. Rosiek F., Sikora M., Urbański J., Wach J. Graphical representation and modelling of airflow in ventilation network. In: *Mining Science and Technology '99*. Balkema, Rotterdam 1999.
92. Rosiek F, Sikora M, Urbański J, Wach J. Komputerowe modelowanie rozplywu powietrza, odwzorowanie graficzne i analiza bezpieczeństwa sieci wentylacyjnych. *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*. 1999;(7):34-40.
93. Roszczyniański W., Trutwin W., Waclawik J. *Kopalniane pomiary wentylacyjne*. Katowice: Wydawnictwo Śląsk; 1992.
94. Roszczyniański W, Wciśło A. Application of redundant safety and reliability structures to underground mine ventilation systems. In: Wasilewski S, editor. *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress; 2001 Jun 17-22; Cracow*. Katowice: EMAG, Research & Development Center for Electrical Engineering and Automation in Mining; 2001. p. 637-646.
95. Semin M., Levin L. Mathematical modelling of air distribution in mines considering different ventilation modes. *Mathematics*. 2023;11(4):989. doi:10.3390/math11040989.
96. Semin M.A., Levin L.Y., Maltsev S.V. Development of automated mine ventilation control systems for Belarusian potash mines. *Archives of Mining Sciences*. 2020;65(4):747-762. doi:10.24425/ams.2020.135170.

97. Sharma S.K., Kalamkar V.R. Computational fluid dynamics approach in thermo hydraulic analysis of flow in ducts with rib roughened walls – a review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*. 2016;55:756 788. doi:10.1016/j.rser.2015.10.160.
98. Shen Z, Wang Q. Fault diagnosis of the mine ventilation system based on OCKIELM. *AIP Advances*. 2025;15:025038. doi:10.1063/5.0251808.
99. Skotniczny P., Ostrogórski P. Three dimensional air velocity distributions in the vicinity of a mine heading's side wall. *Archives of Mining Sciences*. 2018;63(2):335 352. doi:10.24425/122451.
100. Skotniczny P. Symulacja przepływu powietrza w wyrobiskach górniczych. *Przegląd Górniczy*. 2005;61(7 8):54 62.
101. Słota K. Wyznaczanie wskaźników mikroklimatu. Komputerowe wspomaganie obliczeń za pomocą programu Z.K.S MOTEZ 2000. *Wiadomości Górnicze*. 2004(4):186-193.
102. Słota K. Zastosowanie programu Z.K.S MOC 2000 do obliczeń mocy cieplnej powietrza wilgotnego, uzyskanej podczas procesu jego chłodzenia lub nagrzewania. *Wiadomości górnicze*. 2002(1):20-25.
103. Słowik A. Sposób poprawy rozplywu powietrza w podsięciach wentylacyjnych kopalni w prądach powietrza zużytego. Rozprawa doktorska.
104. Strumiński A., Strumińska B. Praktyczny sposób wyznaczania oporów aerodynamicznych bocznic aktywnych sieci wentylacyjnych. *Prace Naukowe IG PWroc*. 2000;87(28):103 115.
105. Szlązak J., Szlązak N., Obracaj D., Borowski M. Waste heat utilisation in the associated energy cooling system. *Quarterly "Mining"*. 2001;25(2):121 127.
106. Szlązak N., Borowski M., Obracaj D., Swolkień J., Korzec M., Piergies K. *Current Ventilation Problems in Hard Coal Mines*. Kraków: Wydawnictwa AGH; 2017. ISBN 978 83 7464 894 3.
107. Szlązak N., Obracaj D., Borowski M. Methods for controlling temperature hazard in Polish coal mines. *Archives of Mining Sciences*. 2008;53(4):497-510.
108. Szlązak N., Obracaj D., Borowski M. Optymalny dobór parametrów wentylacji lutniowej dla drażonych wyrobisk korytarzowych. *Wiadomości Górnicze*. 2001;(6):236–243.
109. Szlązak N., Obracaj D., Korzec M. Analysis of connecting a forcing fan to a multiple fan ventilation network of a real life mine. *Process Safety and Environmental Protection*. 2017;107:468 479. doi:10.1016/j.psep.2017.03.022.
110. Szlązak N., Obracaj D., Piergies K. Wydajność górniczych chłodnic powietrza w warunkach rzeczywistych. *Chłodnictwo i Klimatyzacja*. 2018/2019;12/1:56 60.
111. Szlązak N., Swolkień J. *Wentylacja kopalń*. 2023. Wydawnictwa AGH.
112. Szlązak N., Szlązak J. Wentylacja wyrobisk ścianowych w kopalniach węgla kamiennego w warunkach zagrożeń metanowego i pożarowego. *Górnictwo i Geologia*. 2013;8(2):115 131.
113. Trenczek S. *Przewietrzanie wyrobisk kopalnianych powietrzem sprowadzanym na upad*. WUG: bezpieczeństwo pracy i ochrona środowiska w górnictwie. 2005;12-20.



114. Trybała P, Rigon S, Remondino F, Banasiewicz A, Wróblewski A, Macek A, Kujawa P, Romańczukiewicz K, Redondo C, Espada F. Optimizing Mining Ventilation Using 3D Technologies. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives)*. 2024;XLVIII-2-2024:427–434. doi:10.5194/isprs-archives-XLVIII-2-2024-427-2024.
115. Turkiewicz W., Waclawik J. The heat balance study of a mining panel in a copper mine. *Archives of Mining Sciences*. 2004;49(2):285 306.
116. Unwin I.D. *The Measurement of Air Flow in British Coal Mines: A Historical Review*. Nottingham: Mine Ventilation Society; 1998.
117. Waclawik J., Branny M. Numerical modelling of heat exchange between a human body and the environment. *Archives of Mining Sciences*. 2004;49(2):223 251.
118. Waclawik J. *Wentylacja kopalń. Tom 1 i 2*. Kraków: Wydawnictwa AGH; 2010.
119. Wang Y, Liu J, Wang D, Liu X, Cao P, Hua K. Noise reduction method for mine wind speed sensor data based on CEEMDAN–wavelet threshold. *Scientific Reports*. 2024;14(1):24869. doi:10.1038/s41598-024-75288-2.
120. Widzyk Capehart E., Fawcett C. Life of mine ventilation requirements for Bronzewing Mine using VentSim. In: *Proceedings of the 7th International Mine Ventilation Congress*; 2004; Kraków.
121. Wu D., Li J., Zhou P. Assessing mine ventilation optimisation and friction factor methods. *Environmental Earth Sciences*. 2025;84:12205. doi:10.1007/s12517 025 12205 5.
122. Yu J, Li Z, Yang D, Liu Y, Fang S. Experimental study on dynamic evolutions of airflow in the ventilation network under the effect of mine gas outburst disasters. *Scientific Reports*. 2025;15(1):10651. doi:10.1038/s41598-025-95472-2.
123. Yuan L., Smith A.C., Brune J.F. *Computational fluid dynamics study on the ventilation flow paths in longwall gobs*. Pittsburgh (PA): NIOSH; 2006.
124. Zapletal P., Hudeček V., Trofimov V. Effect of natural pressure drop in mine main ventilation network. *Archives of Mining Sciences*. 2014;59(2):501 508. doi:10.2478/amsc 2014 0036.
125. Zhang M, Li Z. Simulation of gas migration in mines during reversal ventilation: A case study. *Fire*. 2025;8(4):158. doi:10.3390/fire8040158.
126. Zhou K, Lu X, Yang C, Chen Z, Liu W, Yan H. Architecture and Application of Mine Ventilation System Safety Knowledge Graph Based on Neo4j. *Sustainability*. 2025;17(7):3209. doi:10.3390/su17073209
127. Zmrhal V., Boháč J. Pressure loss of flexible ventilation ducts for residential ventilation: absolute roughness and compression effect. *Journal of Building Engineering*. 2021;44:103320. doi:10.1016/j.jobe.2021.103320.

### **Akty prawa**

- 128. Ustawa z dnia 9 czerwca 2011 r. – Prawo geologiczne i górnicze.
- 129. Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 29 stycznia 2013 r. w sprawie zagrożeń naturalnych w zakładach górniczych.
- 130. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych.
- 131. Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 16 marca 2017 r. w sprawie ratownictwa górniczego.

### **Normy**

- 132. BN-75 0422-02 Wyrobiska korytarzowe w obudowie odrzwiami z łuków korytarzowych.
- 133. Tymczasowe wytyczne ustalenia współczynników oporów i oporów 100m odcinków wyrobisk górniczych w kopalniach węgla. MGIEDG.

### **Strony internetowe**

- 134. <https://imgpan.pl/oferta/pakiet-ventgraph/>; Instytut Mechaniki Górotworu Polskiej Akademii Nauk.
- 135. <https://www.vuma3d.com/>; VUMA Software ADCO (Pty) Ltd, Republika Południowej Afryki.
- 136. <https://ventsim.com/pl/>; Howden Ventsim, Australia.

### **Instrukcje, DTR**

- 137. Instrukcja obsługi programu VentSim.
- 138. DTR czujników typu CSPA-2, CSPA-4 firmy HASO S.C.
- 139. DTR barometru ręcznego BAR-TH firmy JMD.
- 140. DTR anemometru wirnikowego RAW firmy JMD.
- 141. DTR miernika ciśnienia MC-10/100-2/Ex firmy LAT.