

# Pole prędkości w otoczeniu sztucznie wytworzonej przeszkody na spągu chodnika kopalnianego

## Velocity field in the area of artificially generated barrier on the mine drift floor



*Dr hab. inż. Jerzy Krawczyk\**



*Mgr inż. Jakub Janus\**

**Treść:** Jednym ze źródeł zaburzeń warunków przewietrzania chodników kopalnianych są miejsca, gdzie występuje wypiętrzenie spągu. Wpływ ten można badać eksperymentalnie. W chodniku kopalni S ułożono na spągu stos worków z pyłem kamiennym i przykryto go płótnem wentylacyjnym, tworząc przeszkodę o zarysie zbliżonym do wybrzuszenia spągu. W miejscu budowy przeszkody rozmieszczono kilkanaście czujników, które rejestrowały prędkości przepływu powietrza podczas eksperymentu. Dało to możliwość określenia wpływu przeszkody na pole prędkości przekroju jej zabudowy. Symulacja komputerowa, której wyniki przedstawia artykuł pozwala na pokazanie specyficznych warunków przepływu w szerszym otoczeniu miejsca eksperymentu i zmian spowodowanych przez przeszkodę. W odcinku chodnika od strony napływu znajdowały się liczne źródła zaburzeń przepływu, takie jak podwójne odrzwia tamy bezpieczeństwa, palisada stojaków, kaszty oraz przyzma urobku. Obszar obliczeniowy został ukształtowany w taki sposób, by dysponując jedynie wartością strumienia objętości na wlocie i geometrią obiektu, otrzymać możliwie dobrą zgodność wyników z danymi pomiarowymi. W ten sposób zweryfikowano metodykę symulacji, a następnie przeprowadzono analizę obrazu pola prędkości w otoczeniu miejsca pomiarów. Wyniki symulacji przedstawiono w formie sporządzonych dla wybranych przekrojów rozkładów prędkości i pól wektorów prędkości, a także powierzchni stałej prędkości oraz wykresów linii prądu.

**Abstract:** One of the sources of mine ventilation disturbance are places with local floor bulge. This impact can be studied experimentally. In S mine drift coal dust bags have been arranged on the floor and have been covered by ventilation canvas to create a barrier similar to floor bulge. In place of the barrier several sensors have been placed which measured the velocity of airflow during the experiment. This gave the opportunity to determine the effect of floor bulge on the flow field section. Computer simulation shows specific flow conditions in the wider vicinity of measuring points in the experiment. In sidewalk part from the inflow there were numerous sources of flow disturbances such as double doorpost, cribs and props. Calculation area was designed in such a way, that the value of the flow rate at the inlet and geometry of the sidewalk only suffice to receive possible good agreement with measured results. In this way, it was possible to verify the simulation methodology followed by image analysis of the velocity field in the vicinity of the measurement points. Simulation results were presented in a graphical form for the selected velocity distribution cross-sections, velocity vectors fields, velocity isosurface of constant velocity and pathlines.

### **Słowa kluczowe:**

wentylacja kopalń, numeryczna mechanika płynów, wypiętrzenie spągu

### **Key words:**

mine ventilation, numerical fluid mechanics, floor bulge

## **1. Wprowadzenie**

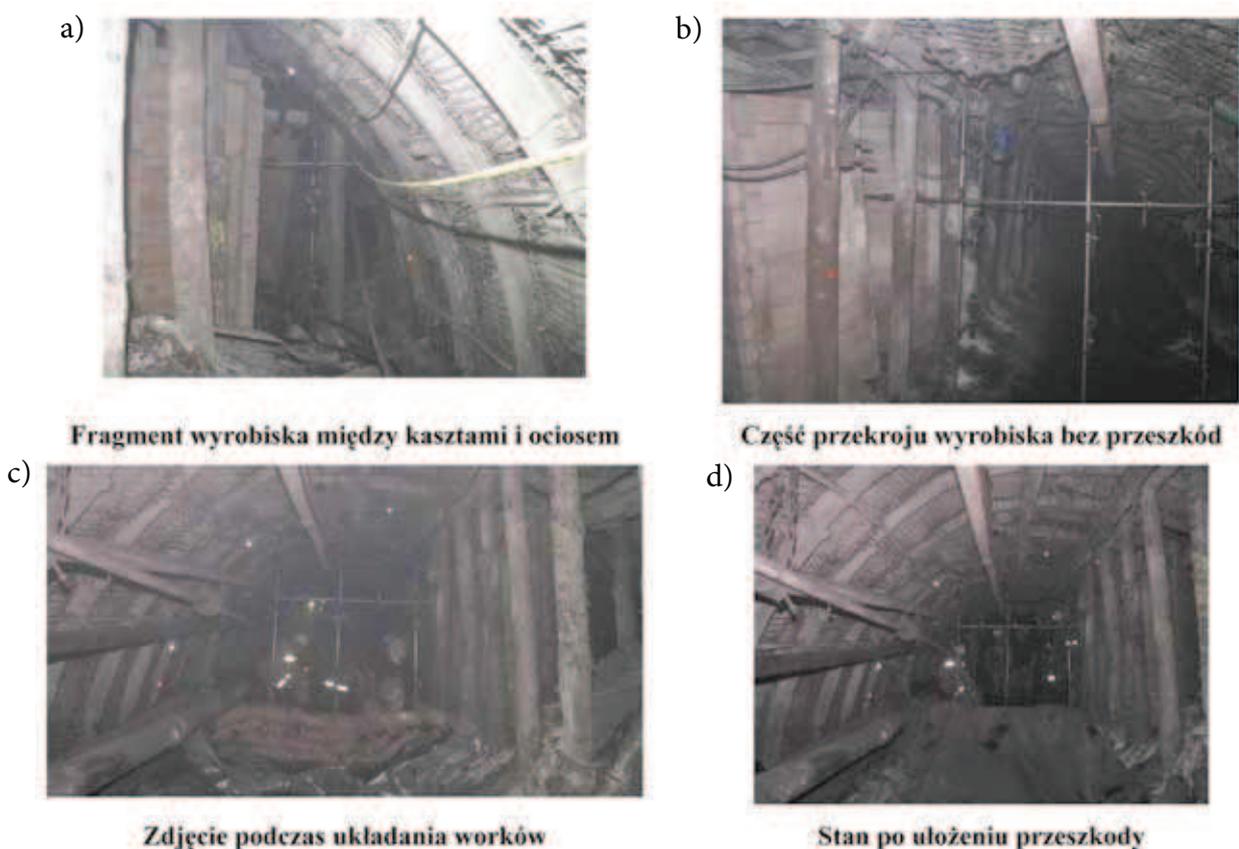
Chodniki kopalniane są zwykle drażone po liniach prostych, a zastosowanie obudowy łukowej powoduje, że w momencie drażenia mają one regularny kształt. Jednak oddziaływanie górotworu powoduje deformację pierwotnego

kształtu ścian chodników w postaci opadnięcia stropu lub wypiętrzenia spągu, [2]. Niejednokrotnie konieczne jest podparcie stropu stojakami lub kasztami. W ten sposób geometria chodników znacznie komplikuje się, a zmiany te są źródłem trudnych do przewidzenia zaburzeń przepływu. Niniejszy artykuł nawiązuje do eksperymentalnego badania jednego z wymienionych źródeł zaburzeń, a mianowicie wypiętrzenia spągu. W chodniku kopalni S ułożono na spągu stos worków z pyłem kamiennym i przykryto go płótnem wentylacyjnym

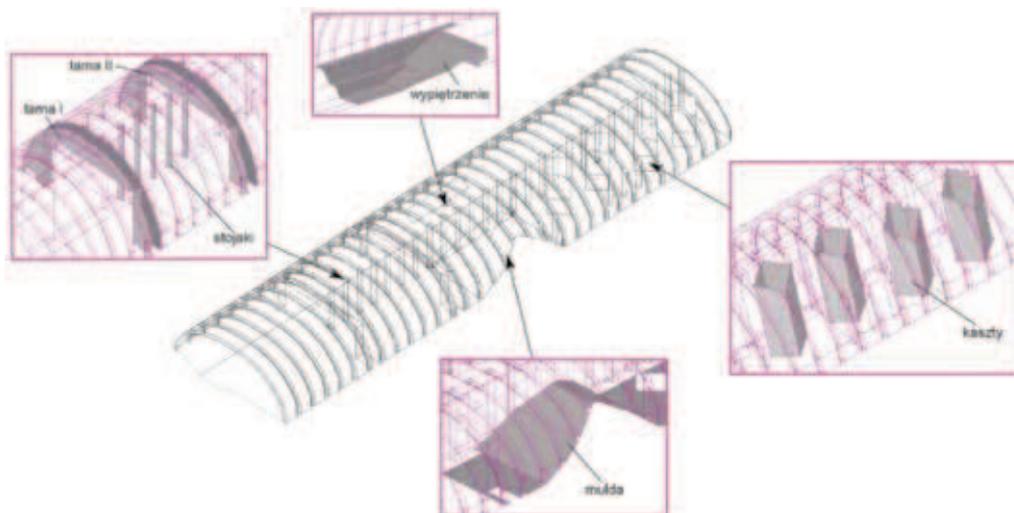
\*<sup>1</sup>) Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie

tworząc przeszkodę o zarysie zbliżonym do wybrzuszenia spagu (rys. 1). W miejscu budowy przeszkody rozmieszczono kilkanaście czujników, które rejestrowały prędkości przepływu powietrza podczas eksperymentu od stanu bez przeszkody po stan po jej zbudowaniu. Dało to możliwość określenia wpływu przeszkody na pole prędkości w miejscu jej zabudowy. Symulacja komputerowa pozwala na pokazanie specyficznych warunków przepływu w szerszym otoczeniu miejsca eksperymentu i zmian spowodowanych przez przeszkodę. W odcinku chodnika od strony napływu znajdowały

się liczne źródła zaburzeń przepływu, takie jak: podwójne odrzwia tamy bezpieczeństwa, palisada stojaków, kaszty oraz przyzma urobku (rys. 2). Obszar obliczeniowy został ukształtowany w taki sposób, by dysponując jedynie wartością strumienia objętości na wlocie i geometrią obiektu, otrzymać możliwie dobrą zgodność wyników z danymi pomiarowymi. W ten sposób zweryfikowano metodykę symulacji, a następnie przeprowadzono analizę obrazu pola prędkości w otoczeniu miejsca pomiarów.



Rys. 1. Zdjęcia miejsca ułożenia przeszkody i jego otoczenia  
 Fig. 1. Photos of barrier placement



Rys. 2. Wybrane fragmenty geometrii obszaru  
 Fig. 2. Selected fragments of the area geometry

## 2. Opis obszaru obliczeniowego i metodyki symulacji

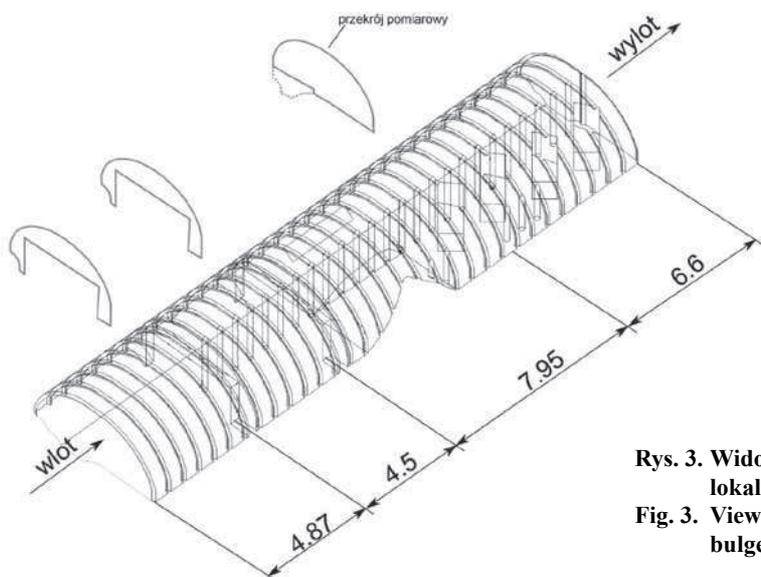
Obszar obliczeniowy, który przedstawiają: rys. 3, rys. 4 i rys. 5 miał łączną długość 24 metry i obejmował:

- Odcinek w obudowie łukowej od wlotu do pierwszych odrzwi, w którym nie uwzględniono obecności stojaków.
- Parę odrzwi tam bezpieczeństwa o rozstawie i wymiarach zgodnych z danymi kopalni, w odcinku tym uwzględniono obecność stojaków.
- Odcinek od drugich odrzwi do wylotu, zawierający przekrój pomiarowy i miejsce budowy przeszkody z worków. W odcinku tym łuki początkowo były podparte stojakami, a po lewej stronie (patrząc w stronę napływu powietrza)

znajdowała się pryzma urobku pozostałego po przebiecie spągu. Dalej, oprócz stojaków stosowano kaszty do podparcia łuków obudowy. W modelu uwzględniono wymiary i nieregularności ich ułożenia.

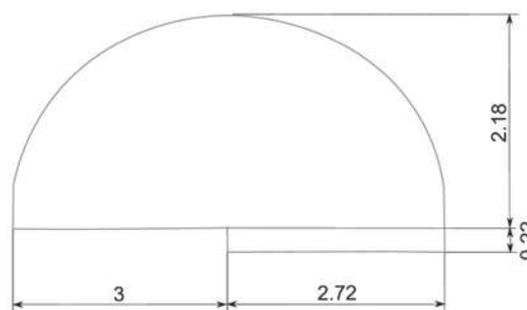
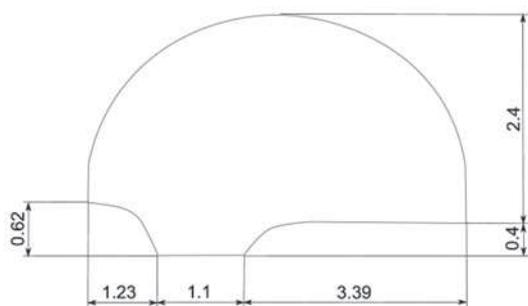
Poza lokalnymi zawężeniami związanymi z obecnością odrzwi i wypiętrzeń spągu przyjęto stały przekrój zgodny z przekrojem pomiarowym, [3]. Geometria modelu zawiera dużą liczbę szczegółowo przedstawionych obiektów. Uznano, że w odcinku przed pierwszymi odrzwiami nie ma konieczności uwzględniania obecności stojaków, gdyż ich wpływ jest mały w porównaniu z innymi przeszkodami w przepływie położonymi bliżej przekroju pomiarowego. Podobnie przy generacji profilu wlotowego nie uwzględniono obecności stojaków.

Zadano na wlocie profil prędkości wygenerowany dla odcinka pomocniczego, [1]. Przy obliczaniu profilu przyjęto początkowo średnią prędkość 1.35 m/s, intensywność turbulencji 10% i średnicę hydrauliczną 3.5 m. Po przeprowadzeniu obliczeń dla trzech odcinków o sumarycznej długości 72 metry, profil uznano za dostatecznie bliski rozwiniętemu. Obecność licznych przeszkód w przepływie na drodze od wlotu do przekroju pomiarowego w docelowym modelu uzasadniała zgrubne oszacowanie profilu.



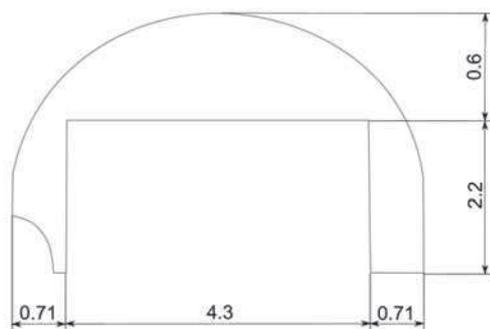
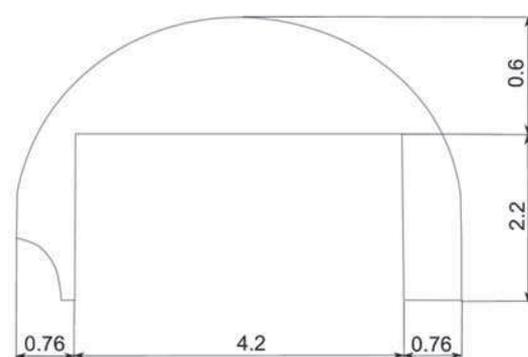
Rys. 3. Widok obszaru obliczeniowego dla zagadnienia wpływu lokalnego wybrzuszenia spągu

Fig. 3. View of the area calculation for the effect issue of local floor bulge



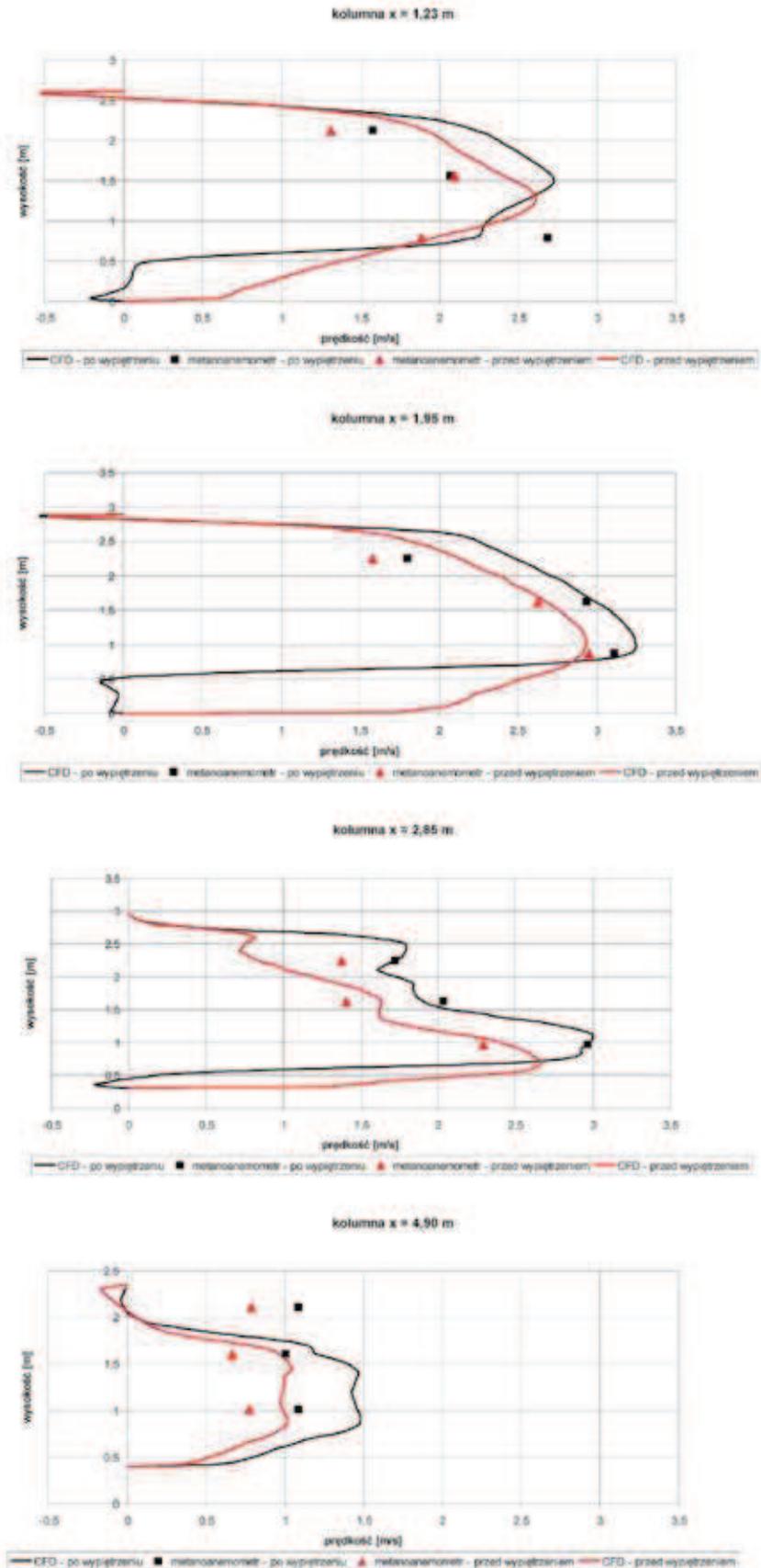
Rys. 4. Wymiary przekroju wlotowego i pomiarowego

Fig. 4. Dimensions of the inlet and the measurement cross-sections



Rys. 5. Wymiary przekrojów w odrzwiach

Fig. 5. Dimensions of doorpost cross-sections



Rys. 6. Porównanie wyników symulacji z punktowymi pomiarami prędkości dla stanów przed i po ułożeniu worków  
 Fig. 6. Comparison of simulation results with velocity measurements in points for the states before and after floor bulge

### 3. Przedstawienie wyników symulacji

Przeprowadzono obliczenia przepływu dla dwóch przypadków:

- przed ułożeniem worków
- po ułożeniu worków.

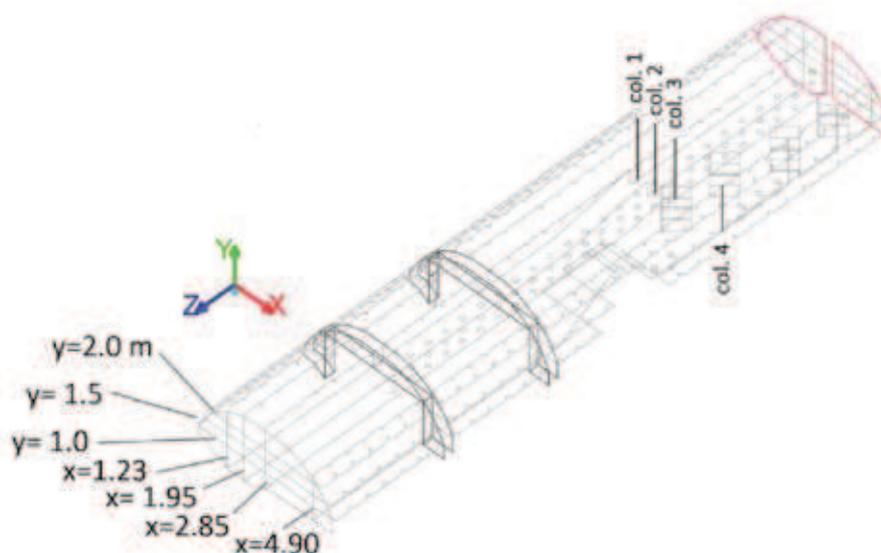
Osiągnięto zadowalającą zgodność wyników symulacji i pomiarów. Ilustrują to profile prędkości dla pionowych linii w miejscach rozstawienia kolumn porównane ze średnimi prędkościami rejestrowanymi przez czujniki prędkości (rys. 6).

Obliczenia dla przypadku bez przeszkody ułożonej z worków mogą również być wykorzystane do oceny wpływu asymetrycznej formy wypiętrzenia spągu, oznaczonej jako „mulda” (rys. 2).

Analizując wyniki symulacji przepływu w odcinku chodnika w otoczeniu miejsca eksperymentu, można dostrzec zarówno skutki przyjętych założeń odnośnie opisu numerycznego, jak i cechy, które można uważać za zbliżone do obrazu rzeczywistego przepływu. Analizę ilustrują linie prądu dochodzące do płaszczyzny wylotu (rys. 8), kontury (rys. 9, rys. 11)

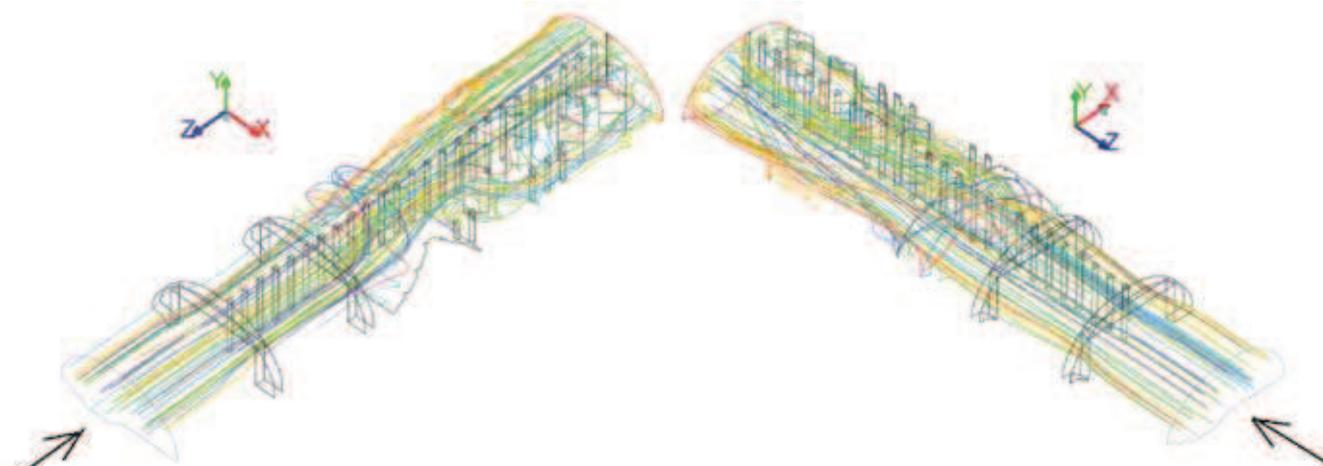
i izopowierzchnie prędkości (rys. 15, rys. 16) oraz rozkłady wektorów prędkości dla pionowych i poziomych płaszczyzn przekroju (rys. 10, rys. 12). W szczególności są to płaszczyzny kolumn, na których zawieszono czujniki prędkości.

Na wlocie odcinka zadano rozwinięty profil prędkości i turbulencji. Pominięto w nim obecność stojaków w osi wyrobiska z racji przewidywanego wpływu podwójnych odrzwia tam bezpieczeństwa. Odrzwia te stanowią zawężenie przepływu i kształtują prostokątną strugę, widoczną na izopowierzchniach prędkości 1 m/s (rys. 15). Palisada stojaków stanowi przeszkodę dla przepływu, co skutkuje spadkiem prędkości w ich otoczeniu. Na stojakach są też generowane struktury wirowe, m.in. ścieżka wirów Karmana, [4]. W obszarach za pierwszymi i drugimi odrzwiami przy obu ociosach oraz pod stropem powstaje recyrkulacja przepływu (rys. 10 i rys. 12). Wyniki obliczeń potwierdzają zasadność przyjętego uproszczenia profilu wlotowego, bo odrzwia i palisada w osi znacznie zmieniają strugę płynącą w chodniku.



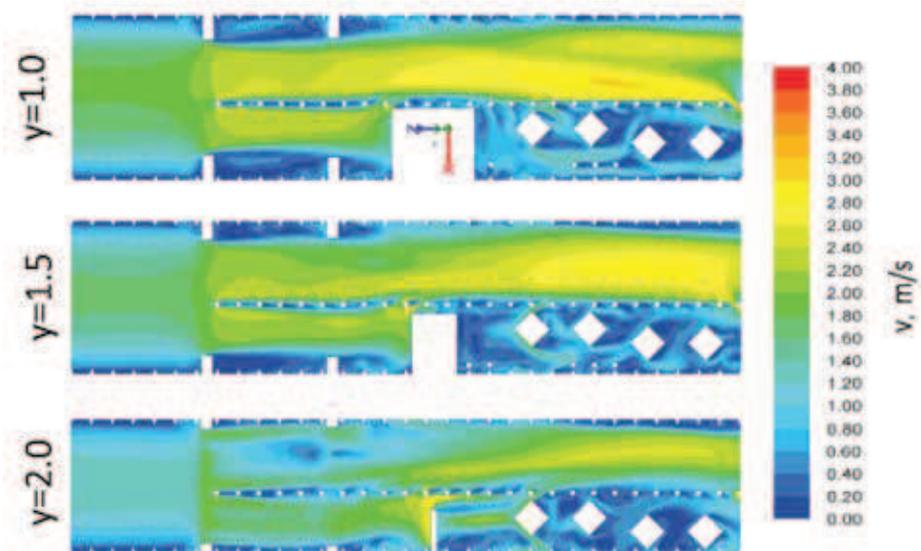
Rys. 7. Położenie powierzchni kontrolnych i linii pomiarowych w obszarze obliczeniowym

Fig. 7. Control surface and measuring lines in the computing area

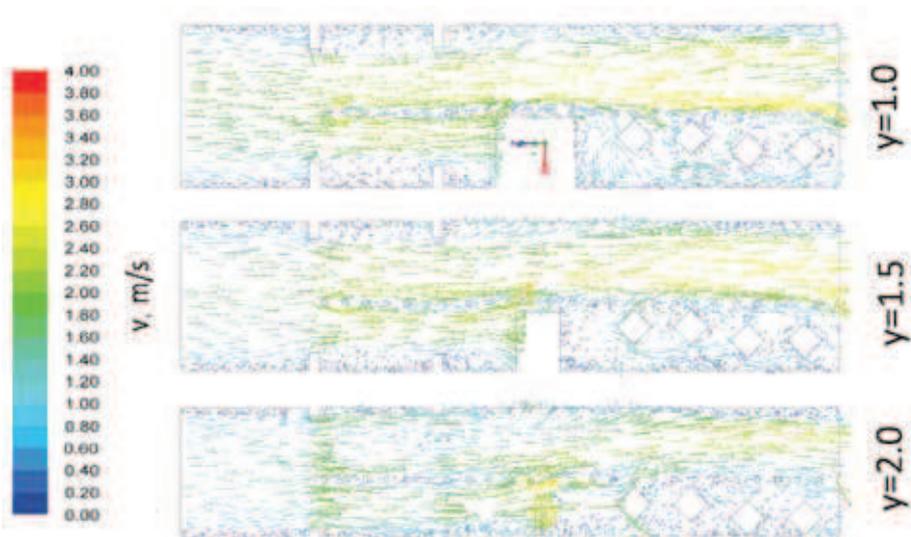


Rys. 8. Widok linii prądu dochodzących do przekroju wylotowego

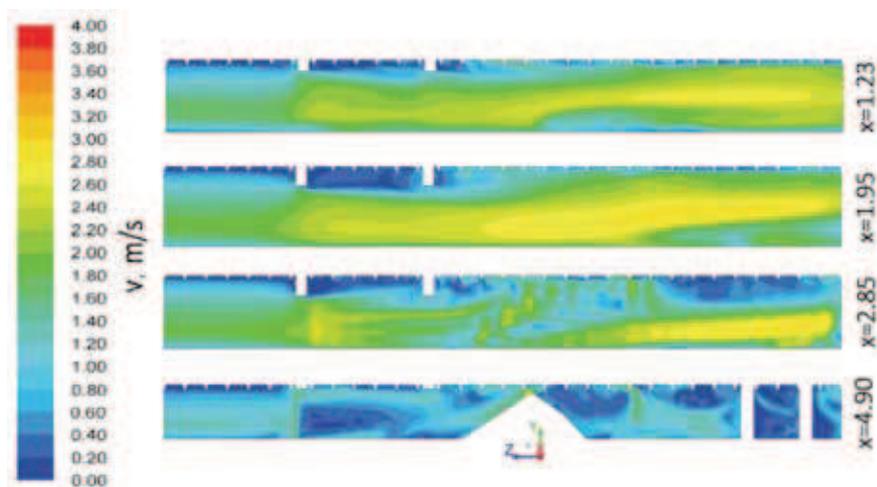
Fig. 8. View of velocity pathlines reaching the outlet section



Rys. 9. Rozkłady prędkości na wysokościach 1, 1.5 i 2 m nad spągiem  
 Fig. 9. Velocity distributions on 1, 1.5 and 2 m height under the floor



Rys. 10. Wektory prędkości na wysokościach 1, 1.5 i 2 m nad spągiem  
 Fig. 10. Velocity vectors on 1, 1.5 and 2 m height under the floor

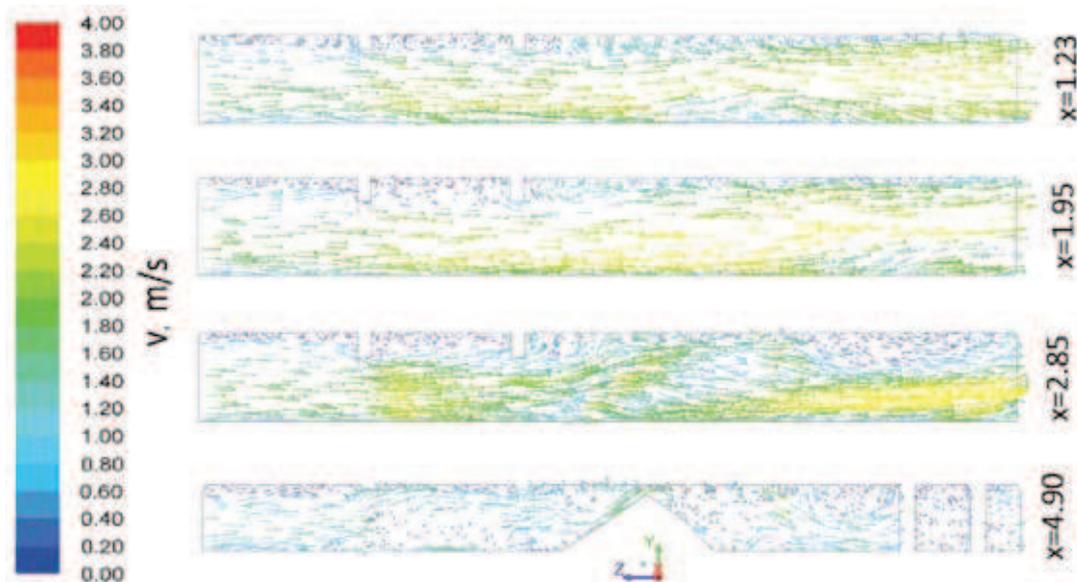


Rys. 11. Rozkłady prędkości w pionowych płaszczyznach równoległych do osi wyrobiska zawierających kolumny czujników monitorujących prędkość  
 Fig. 11. Velocity distributions in vertical cross-sections parallel to the axis of mine drift containing velocity measurement points

Za drugimi odrzwiami po prawej stronie, patrząc od wlotu, jest pryzma urobku, która kieruje główną część strugi powietrza w lewą stronę. Wąska przestrzeń ponad pryzmą pozwala na przepływ. Po zawietrznej stronie pryzmy powstaje kolejna strefa recyrkulacji przepływu.

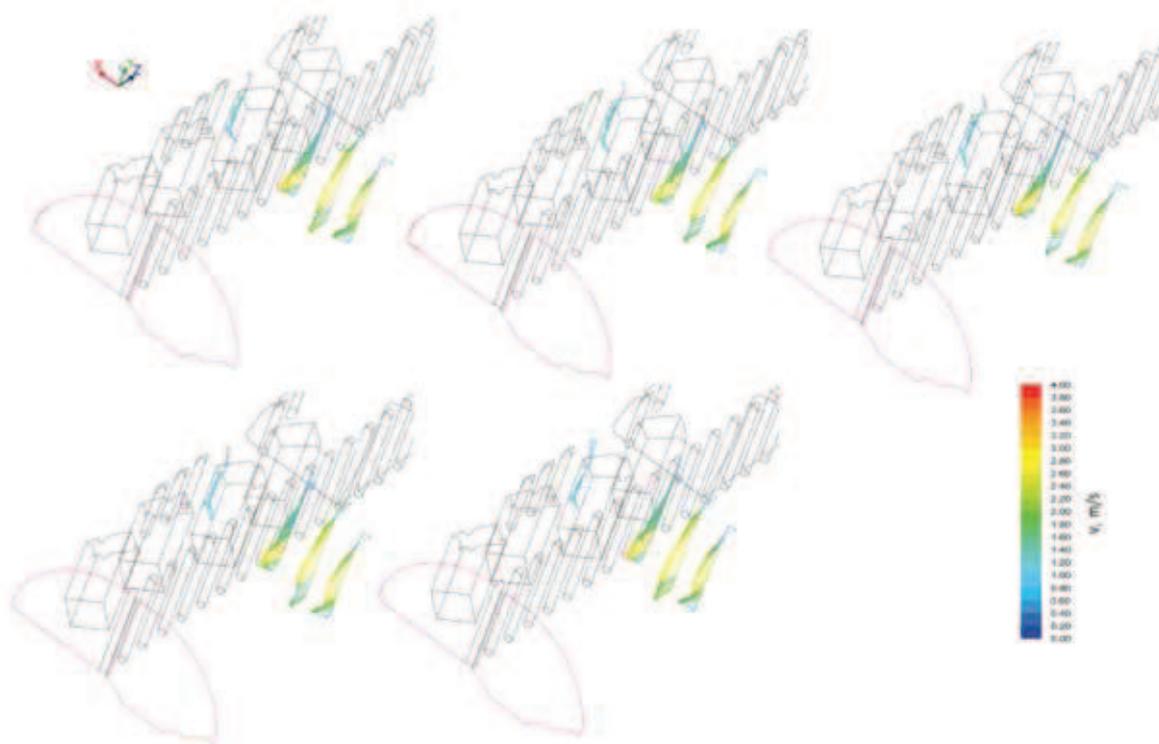
Za pryzmą zaczynają się kolejne przeszkody - druga palisada stojaków przy prawym odciosie i rząd kasztów, [5]. Kaszty te są rozmieszczone dość nieregularnie, co dodatkowo komplikuje obraz przepływu. Zakres zmienności prędkości

w przekroju pomiarowym można ocenić obserwując wektory prędkości na liniach zabudowy kolumn systemu wielopunktowego pomiaru prędkości. Kolejne rysunki przedstawiają wektory w odstępach dwusekundowych. Największe zmiany widać na kolumnie zabudowanej w przestrzeni za kasztami. Również pewne zmiany widać dla kolumny zabudowanej przy palisadzie stojaków. Wspomniane zmiany są bardziej widoczne na animacjach, które nie mogą być zamieszczone w drukowanej formie raportu.



Rys. 12. Wektory prędkości w pionowych płaszczyznach równoległych do osi wyrobiska zawierających kolumny czujników monitorujących prędkość

Fig. 12. Velocity vectors in vertical cross-sections parallel to the axis of mine drift containing velocity measurement points

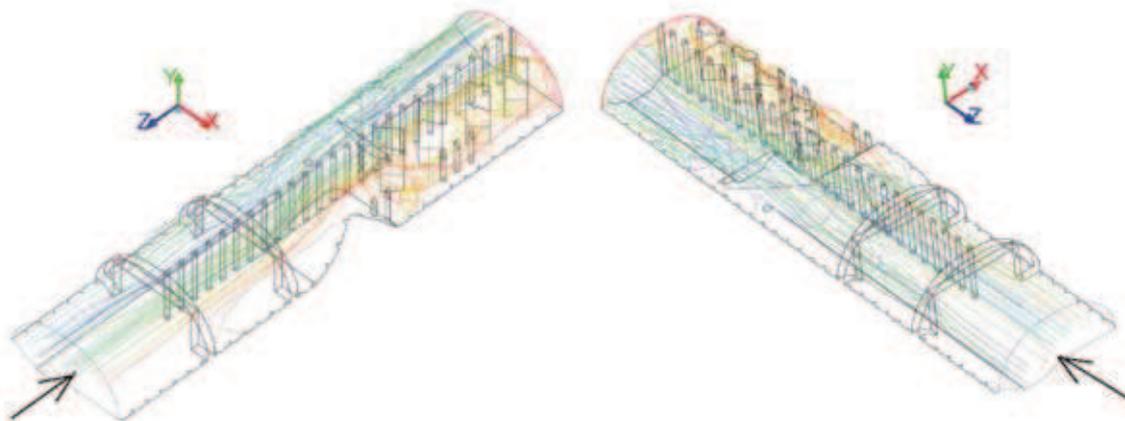


Rys. 13. Wektory prędkości na liniach zabudowy czujników anemometrycznych (Rys. 1) – obrazy co 2 sekundy symulacji

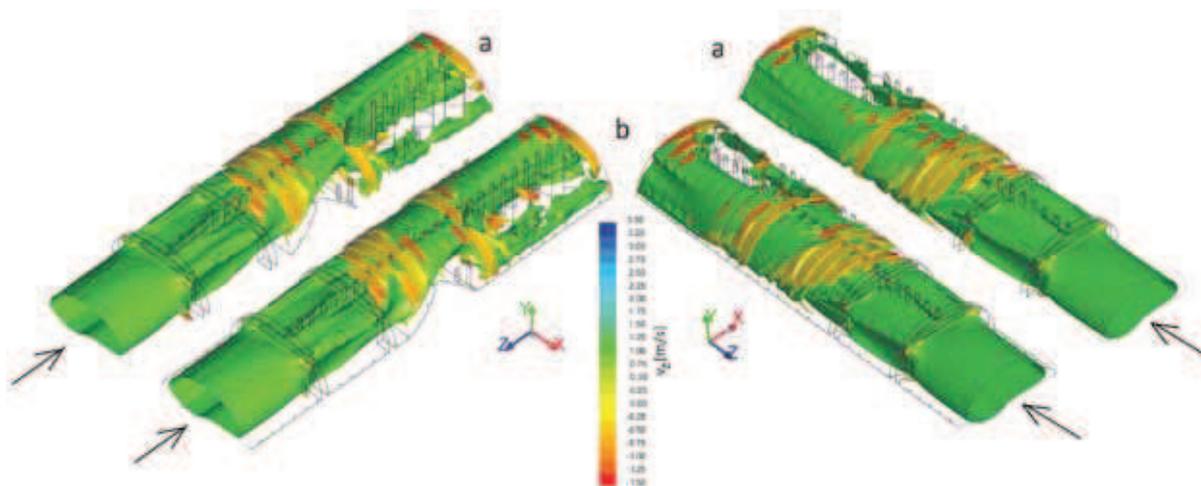
Fig. 13. Velocity vectors on anemometer lines (fig. 1.) - images of every two seconds of the simulation

W miejscu o tak skomplikowanym przepływie konieczne było monitorowanie prędkości przepływu powietrza przy pomocy anemometru stacjonarnego i była możliwość przeprowadzenia eksperymentu częściowego przegrodzenia wyrobiska przez stos worków przykrytych płótnem wentylacyjnym (rys. 1). Wpływ sztucznego wypiętrzenia spągu można ocenić porównując zarówno wskazania czujników

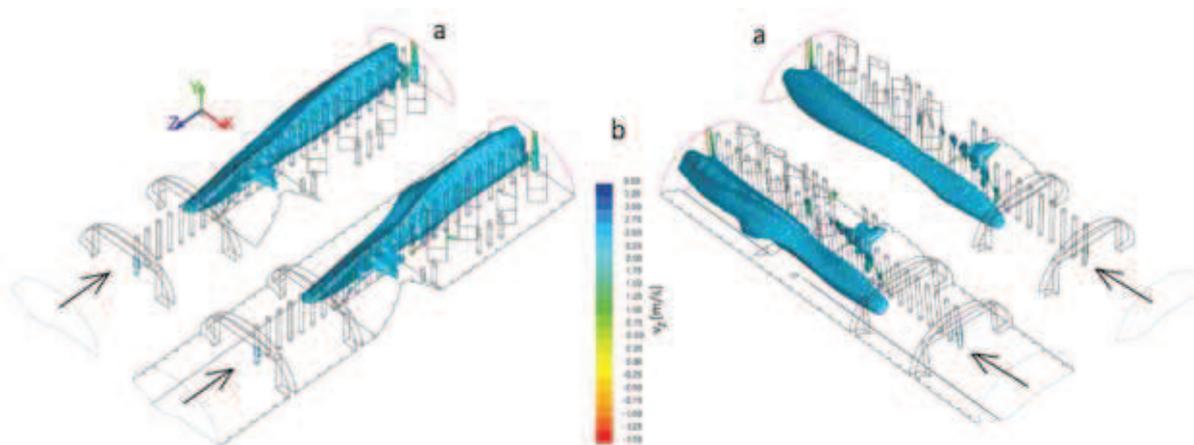
prędkości, jak i obrazy przepływu otrzymane na drodze symulacji numerycznej. Złożoność obszaru nie sprzyja dokładności rozwiązania, jednak możliwie wierna reprezentacja geometrii obszaru, użycie adekwatnych metod numerycznych oraz stopień zgodności pomiarów i obliczeń przemawiają za użytecznością takiej analizy.



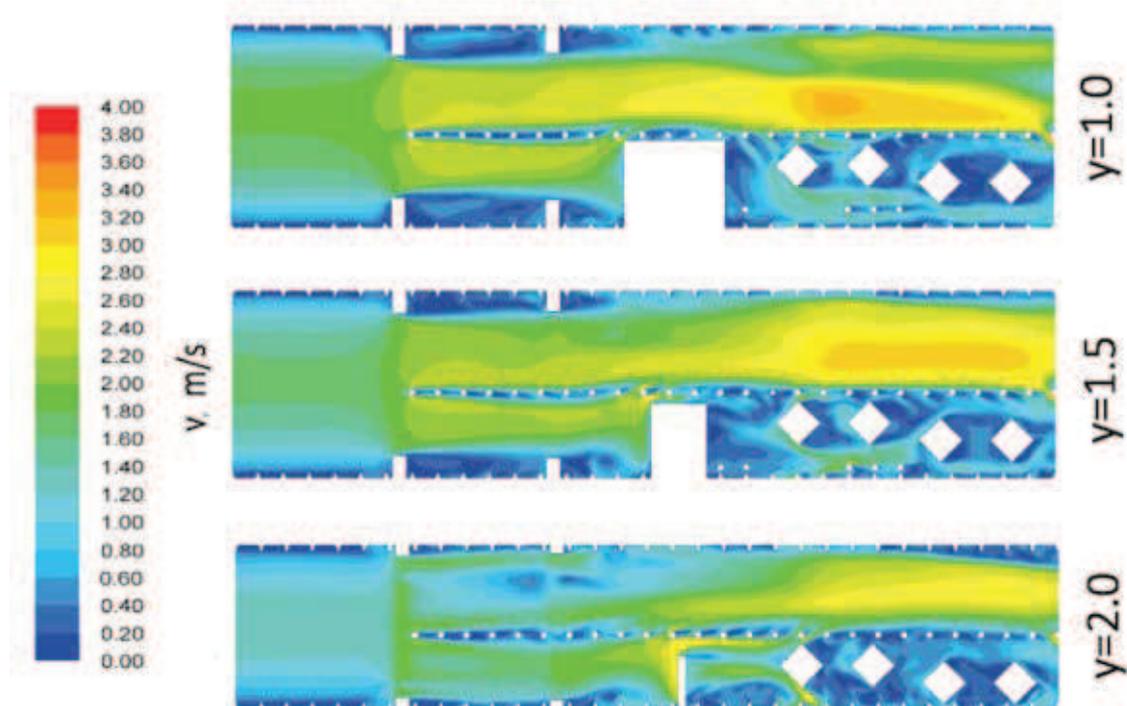
Rys. 14. Widok linii prądu dochodzących do przekroju wylotowego dla wariantu po ułożeniu przeszkody na spągu  
 Fig. 14. View of velocity pathlines reaching the outlet section for the states after floor bulge



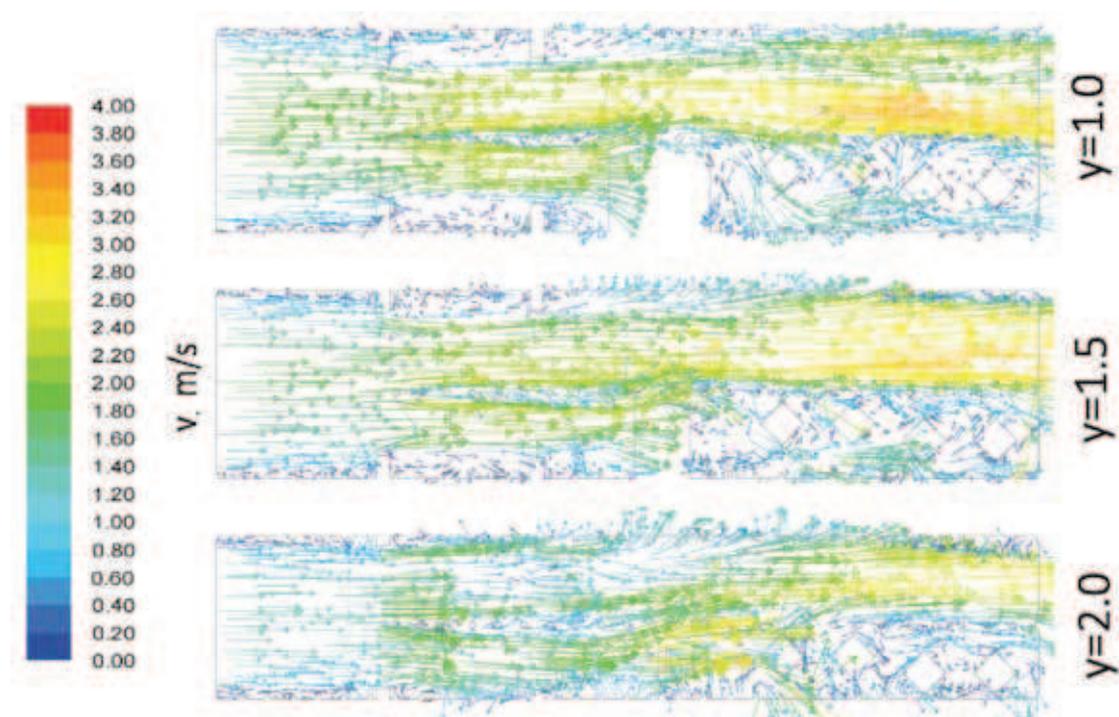
Rys. 15. Porównanie izopowierzchni prędkości 1.0 m/s, a - stan pierwotny, b - po ułożeniu przeszkody na spągu  
 Fig. 15. Comparison of isosurface for 1.0 m/s velocity, a - state before, b - state after floor bulge



Rys. 16. Porównanie izopowierzchni prędkości 2.5 m/s, a - stan pierwotny, b - po ułożeniu przeszkody na spągu  
 Fig. 16. Comparison of isosurface for 2.5 m/s velocity, a - state before, b - state after floor bulge



Rys. 17. Rozkłady prędkości na wysokościach 1, 1.5 i 2 m nad spągciem  
 Fig. 17. Velocity distributions on 1, 1.5 and 2 m height under the floor



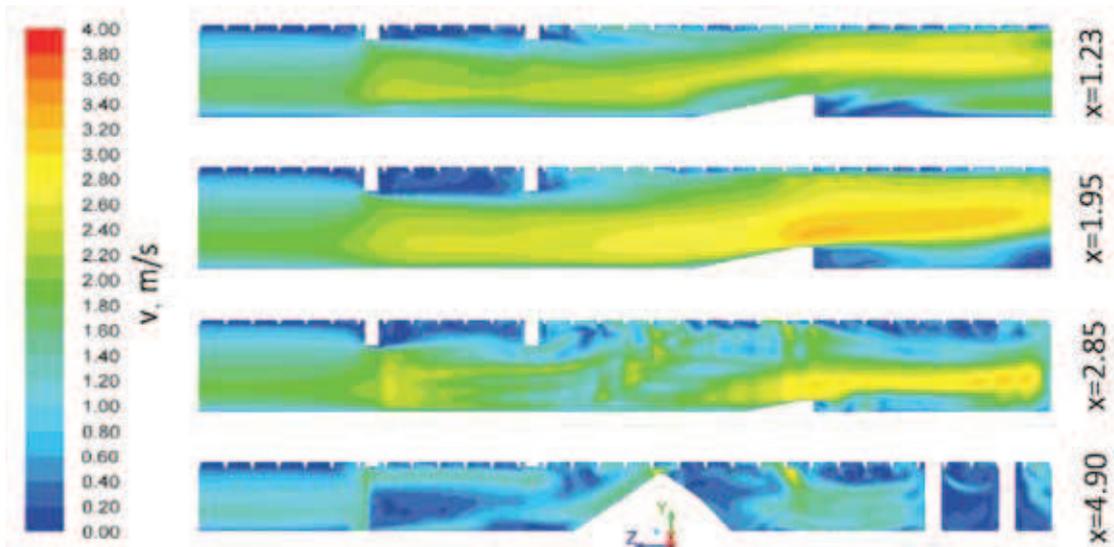
Rys. 18. Wektory prędkości na wysokościach 1, 1.5 i 2 m nad spągciem  
 Fig. 18. Velocity vectors on 1, 1.5 and 2 m height under the floor

Zgodnie z oczekiwaniami zawężenie spowodowało wzrost prędkości w strudze po lewej stronie, a także skierowało większą ilość powietrza na prawą stronę pomiędzy kaszty i stojaki, [6].

Za przekrojem pomiarowym wypiętrzenie kończy się pionowym uskokiem, za którym struga przy spągu odrywa się, a pod nią powstaje kolejny obszar recyrkulacji. Uskok ten znajduje się dostatecznie daleko za czujnikami prędkości i nie ma istotnego wpływu na warunki w nim panujące.

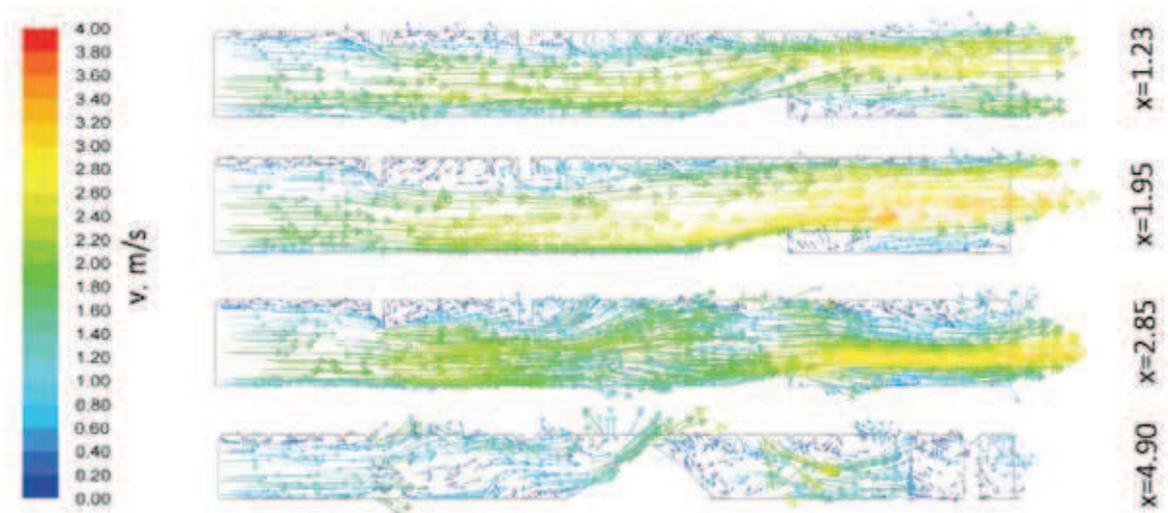
#### 4. Podsumowanie

Pomimo ograniczonej liczby danych odnośnie geometrii i warunków brzegowych dla analizowanego przepływu w odcinku chodnika kopalnianego osiągnięto zadowalającą zgodność wyników symulacji i pomiarów. Otrzymane wyniki wskazują na możliwość stosowania metody objętości skończonej do badania warunków przewietrzania w obszarach o skomplikowanej geometrii, co może być przydatne dla



Rys. 19. Rozkłady prędkości w pionowych płaszczyznach równoległych do osi wyrobiska zawierających kolumny czujników monitorujących prędkość

Fig. 19. Velocity distributions in vertical cross-sections parallel to the axis of mine drift containing velocity measurement points



Rys. 20. Wektory prędkości w pionowych płaszczyznach równoległych do osi wyrobiska zawierających kolumny czujników monitorujących prędkość

Fig. 20. Velocity vectors in vertical cross-sections parallel to the axis of mine drift containing velocity measurement points

poprawy bezpieczeństwa i efektywności prac górniczych, a także ustalania przyczyn niektórych katastrof.

*Publikacja została opracowana w ramach realizacji Zadania nr 9 Projektu strategicznego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). Numer umowy SP/K/9/208300/13*

**Literatura**

1. ANSYS Fluent User Manual, Ansys Inc, 2013.
2. Dziurzyński W, Krawczyk J., Skotniczny P., Janus J., Ostrogórski P.: Badania eksperymentalne rozszerzonego systemu wraz z weryfikacją metodami symulacji komputerowych, w tym z wykorzystaniem modeli 3D. Raport z realizacji Etapu 8 - części strategicznego projektu badawczego PS 8 pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”, IMG-PAN, 2014.
3. Krawczyk J., Skotniczny P., Janus J.: Badania modelowe i eksperymentalne zakresu zmian prędkości powietrza rejestrowanych przez czujnik w zależności od jego umieszczenia oraz profilu prędkości powietrza w przekroju jego zabudowy, Raport końcowy z realizacji Zadania badawczego nr 1 Zadania nr 9 Projektu strategicznego pt. „Poprawa bezpieczeństwa pracy w kopalniach”, SP/K/9/208300/13, wyd. IMG-PAN 2015, str. 173.
4. Menter F.: Turbulence Modeling for Engineering Flows, ANSYS 2012 Inc. [www.ansys.com](http://www.ansys.com)
5. Rove M.: Measurement and computations of flow in pipe bends, J. Fluid Mech. 1970, Vol 43, part 4, pp 771-783.
6. Sudo, K., Sumida M., Yamanae R.: Secondary motion of fully developed oscillatory flow in a curved pipe, J. Fluid Mech 237, 1992, pp 189-208.