

Przemieszczenia poziome w rejonach eksploatacji górniczej

KRZYSZTOF TAJDUŚ, RAFAŁ MISA, ANTON SROKA

Instytut Mechaniki Górotworu PAN; ul. Reymonta 27, 30-059 Kraków

Streszczenie

Artykuł przedstawia prace nad budową czasoprzestrzennego modelu matematycznego opisującego zagadnienie przemieszczeń poziomych w rejonie prowadzonej podziemnej eksploatacji górniczej. Autorzy bazując na dostępnej literaturze światowej opisali dotychczas stosowane metody obliczania wartości przemieszczeń poziomych, a następnie przeprowadzili modelowanie oparte na metodzie geometryczno-całkowej dla wybranego rejonu kopalni Prosper Haniel. Wyniki obliczeń zostały skonfrontowane z wynikami przeprowadzonych pomiarów geodezyjnych.

Słowa kluczowe: przemieszczenia poziome, deformacje powierzchni, eksploatacja górnicza

1. Wstęp

Podziemna eksploatacja górnicza prowadzi do zaburzeń wewnątrz struktury górotworu. Zaburzenia te są proporcjonalne do wielkości wymiarów eksploatacji, ilości wyeksploatowanych pokładów, techniki prowadzonej eksploatacji, głębokości oraz warunków geologicznych. W górotworze można wyróżnić następujące strefy zaburzeń: strefa zawału (przy eksploatacji zawałowej) (h_z), strefa spękań (h_s), oraz strefa ugięcia (h_u). Analizując eksploatacje prowadzone na dużych głębokościach, gdzie sumaryczna wysokość strefy zawału i spękań jest mniejsza od głębokości eksploatacji, na powierzchni terenu pojawia się jedynie strefa ugięcia zwana niecką obniżen. Nieckę tą charakteryzuje się następującymi wskaźnikami deformacji terenu takimi jak: obniżenie, przemieszczenie poziome, odkształcenie poziome i pionowe, nachylenie, promień krzywizny.

Badaniem zagadnienia wpływu eksploatacji na górotwór oraz powierzchnię terenu zajmowało się wielu badaczy. Pomimo w miarę poprawnego opisu matematycznego obniżen terenu, nie udało się jednak przez lata rozwiązać problem powstających przemieszczeń poziomych w tym prognozy ich wartości maksymalnych oraz ich rozkładu. Ogólnie zaobserwowano, że przemieszczenia poziome przy granicy niecki są bardzo małe i narastają przy zbliżaniu się do rejonu krawędzi pola pokładu, gdzie osiągają największe wartości, po czym ku środkowi niecki ponownie maleją. W środku niecki pełnej i niepełnej są równe zero.

Generalnie teorie opisujące przemieszczenia poziome można podzielić na dwie grupy:

- teorie zakładające przemieszczenie się punktów powierzchni w kierunku środka ciężkości wybranego elementu pokładu, oraz
- teorie przemieszczeń poziomych oparte o zależności między wartościami przemieszczenia pionowego i poziomego punktu.

Do pierwszej grupy można zaliczyć metodę Keinhorsta (1925) związaną z obliczaniem osiadania punktu powierzchni za pomocą graficznego całkowania siatek segmentów otrzymanych z podziału obszaru, w którym prowadzi się eksploatację oddziałującą na wybrany punkt, pod kątem równym zasięgowi wpływów γ_g tak aby wybranie pokładu w każdym z nich powodowało jednakowe obniżenie punktu. Keinhorst uznał, że w zależności od położenia punktów obliczeniowych zmienia się również „środek ciężkości” eksploatacji oddziałującej na ten punkt.

W dalszych pracach wykorzystując założenia punktu środka ciężkości przedstawione przez Keinhorsta, Bals (1931/32) oraz Lehmann et al. (1942) opracowali obliczanie wartości przemieszczenia poziomego dowolnego punktu. Przeglądając dostępną literaturę (Keinhorst, Bals, Beyer, Sann, Ruhrkohle) zauważyć można, że metody wykorzystujące teorię środka ciężkości różnią się jedynie wartościami przyjmowanych kątów zasięgu wpływów eksploatacji, oraz przyjmowanymi funkcjami oddziaływania na punkt elementarnych objętości złoża w obszarze wpływów eksploatacji. Dla tzw. nieskończonej półpłaszczyzny zależność pomiędzy maksymalną wartością przemieszczenia poziomego (u_{\max}), a maksymalną wartością osiadania (w_{\max}) określona jest wzorem:

$$u_{\max} = c_m \cdot w_{\max} \cdot \operatorname{ctg} \gamma_m \quad (1)$$

gdzie:

- c_m – stała zależna od metody obliczeniowej, (tabela 1),
- γ_m – kąt zasięgu wpływów zależny od metody obliczeniowej.

Tab. 1. Wartości współczynników c_m dla niemieckich metod obliczeniowych Keinhorsta, Balsa, Sanna, Beyera i tzw. metody Ruhrkohle dla tzw. punktu środka ciężkości

Metoda	c_m
Keinhorsta	0,152
Balsa	0,138
Beyera	0,148
Sanna	0,106
Ruhrkohle	0,131

Do drugiej grupy zaliczyć można prace oparte na hipotezie Awierszyna (1947), który bazując na obserwacjach niecek obniżen powstałych w wyniku przeprowadzonej podziemnej eksploatacji górniczej doszedł do wniosku, że wielkość przemieszczeń poziomych $u(x)$ jest proporcjonalna do nachylenia profilu $T(x)$ niecki osiadania (wzór 2).

$$u(x) = -B \cdot T(x) = -B \frac{dw(x)}{dx} = B \cdot \frac{w_{\max}}{r} \cdot \exp\left(-\pi \frac{x^2}{r^2}\right) \quad (2)$$

gdzie:

- B – współczynnik przemieszczenia (względnie współczynnik odkształcenia poziomego),
- $T(x)$ – nachylenie niecki elementarnej,
- r – promień zasięgu wpływów głównych.

Bazując na założeniach Awierszyna, Budryk (1953), zakładając nieściśliwość górotworu, wyznaczył teoretyczną wartość współczynnika B , która wynosi $B = 0,564r$.

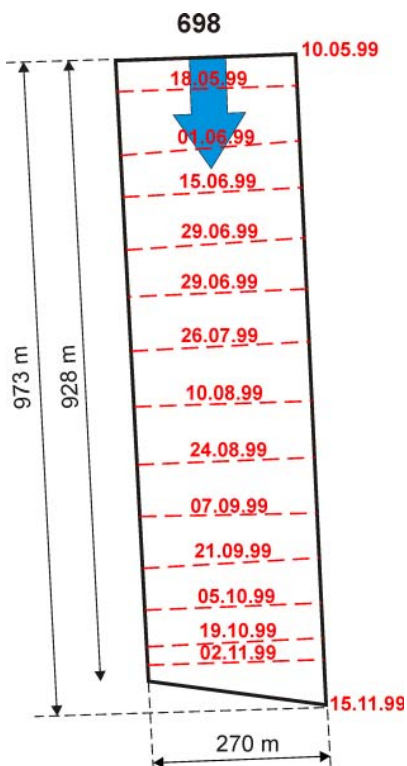
Analiza materiałów pomiarów *in situ* wykazała konieczność korelacji tej wartości. Analizując wartości wskaźników deformacji Budryk (1953) doszedł do wniosku, że maksymalna wartość odkształcenia poziomego z reguły nie przekracza 60% wartości maksymalnego nachylenia. Wychodząc z tej zależności uzyskał wartość $B = 0,40r$.

Reasumując należy stwierdzić, że zarówno teoria punktu środka ciężkości Keinhorsta, jak i hipoteza Awierszyna wskazują na fakt proporcjonalności pomiędzy wektorem przemieszczenia poziomego a wektorem nachylenia profilu niecki osiadania. Problem ten został szczegółowo przedstawiony w publikacji Tajduś, et al. 2010.

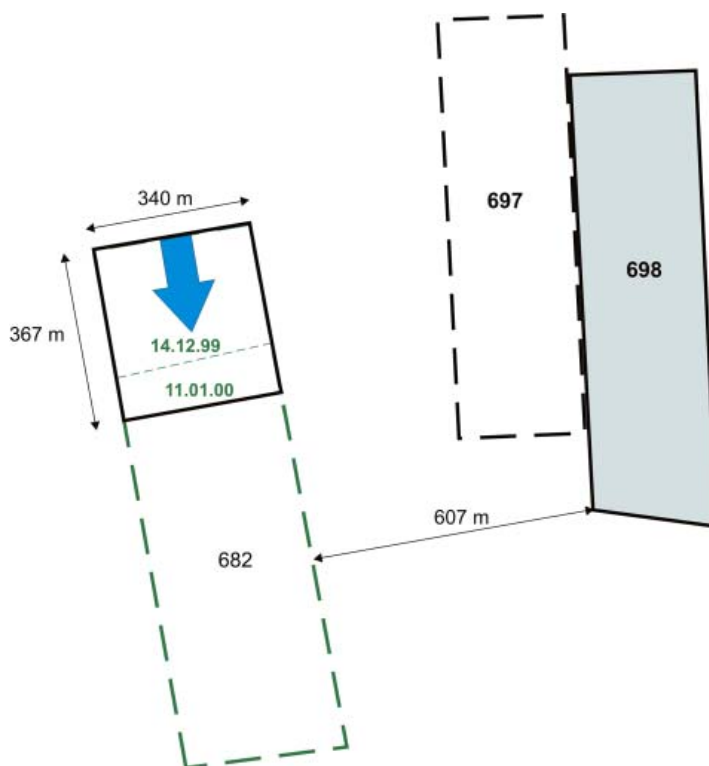
2. Analiza przemieszczeń poziomych dla przykładowej kopalni Prosper Haniel

Analizę przemieszczeń poziomych powierzchni terenu przeprowadzono dla przykładowego rejonu kopalni węgla kamiennego BW Prosper Haniel (Niemcy).

W roku 1999 kopalnia rozpoczęła eksploatację ściany nr 698 w pokładzie O/N leżącym na średniej głębokości 960 m. Długość wyeksploatowanej ściany sięgała 270 m a jej wysokość od 3,6 m do 4,3 m. Rysunek 1 przedstawia ścianę wraz z zaznaczonym postępowaniem frontu odpowiadającym kolejnym etapom pomiarów geodezyjnych. Rozruch ściany nastąpił 10.05.1999 r. a jej zakończenie przypadło na dzień 23.11.1999 r.



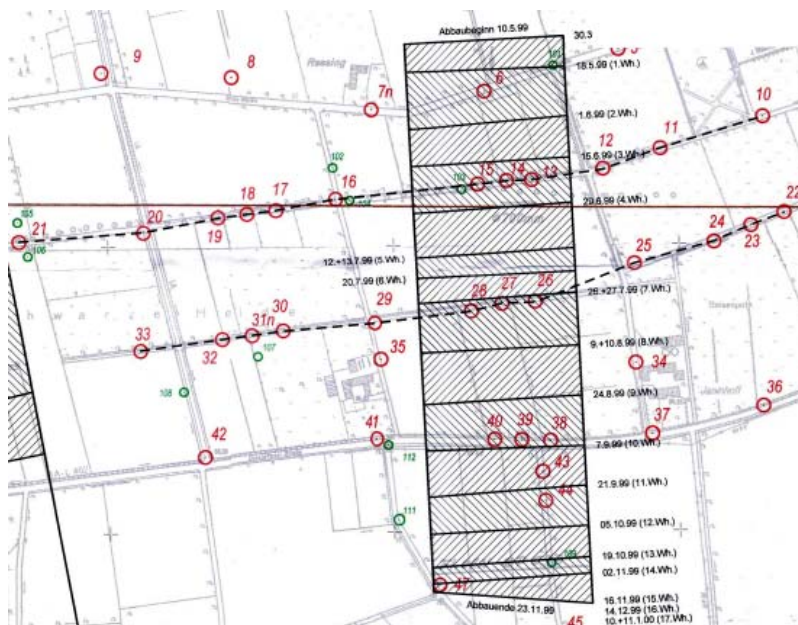
Rys. 1. Schemat ściany nr 698 w pokładzie O/N wraz z zaznaczoną pozycją frontu w dla różnych czasów



Rys. 2. Położenie frontu eksploatacji ściany nr 682 dla dwóch czasów pomiarów deformacji rejestrowanych w punktach pomiarowych

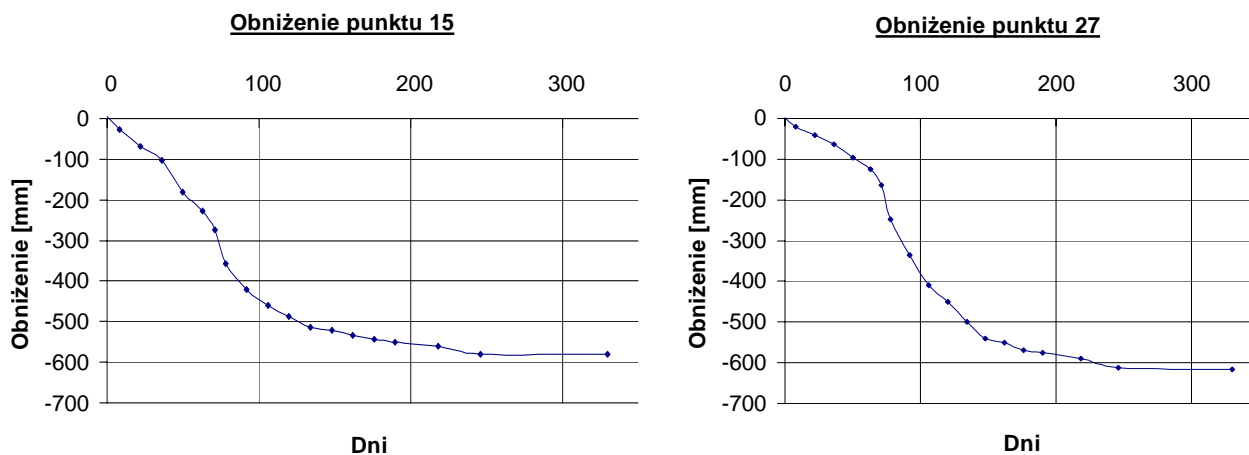
Po zakończeniu eksploatacji ściany nr 698 ale jeszcze w trakcie prowadzenia pomiarów obniżen i przemieszczen poziomych punktów pomiarowych, rozpoczęto eksploatację ściany nr 682 w pokładzie P1. Sytuację tę obrazuje rysunek nr 2.

Na powierzchni terenu kopalnia założyła bazę pomiarową składającą się z rozproszonych punktów geodezyjnych. Pierwszy pomiar został przeprowadzony 1 kwietnia 1999 dla punktów o numerach od 1 do 48. Rozmieszczenie poszczególnych punktów pomiarowych przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Rozmieszczenie punktów pomiarowych w stosunku do ściany nr 698 w pokładzie O/N

Ponieważ po zakończeniu prowadzenia eksploatacji ściany nr 698 w pokładzie O/N nastąpiła przerwa w eksploatacji w tym pokładzie i kolejną ścianę nr 697 rozpoczęto eksploatować dopiero po pół roku (19.06.00), dlatego przeprowadzono analizę obniżenia punktów pomiarowych w okresie od chwili rozpoczęcia eksploatacji do chwili poprzedzającej rozpoczęcie eksploatacji ściany nr 697. Na uwagę zasługuje fakt, że kończąc bieg ściany 698 kopalnia uruchomiła ścianę 682 w pokładzie P1 (rys. 2).



Rys. 4. Przesunięcia w czasie dla przykładowych punktów pomiarowych

Jak wskazują wyniki pomiarów geodezyjnych (rys. 4) prowadzonych od chwili rozpoczęcia eksploatacji ścianą 698 do czasu uruchomienia ściany 697, obniżenia pomierzone osiągnęły stan ustalony dla ściany 698. Eksploatacja ściany 698 z uwagi na jej małe wymiary oraz warunki geologiczne (nad pokładem O/N znajduje się 90 m warstwa mocnego piaskowca) doprowadziła do powstania niecki niepełnej, tzn. maksymalne pomierzone obniżenie wyniosło 610 mm, maksymalne odkształcenie ściskające wyniosło -2,76 mm/m, a maksymalne pomierzone odkształcenie rozciągające 1,27 mm/m.

$$K = \frac{I_{\max}^{\text{pomierzone}}}{I_{\max}^{\text{prognozowane}}} \quad (3)$$

gdzie:

I_{\max} – wartość maksymalna wskaźnika deformacji pomierzonego lub prognozowanego.

Analizując stosunek wyników pomiarów deformacji terenu do prognoz uzyskanych dla projektowanej ściany 698 można zaobserwować, że dokonana eksploatacja wywołała jedynie 50% oczekiwanych wartości odkształceń i przemieszczeń (tabela 2).

Tab. 2. Różnice w wartościach wskaźników deformacji pomierzonych i prognozowanych (Stocks, Sroka 2000)

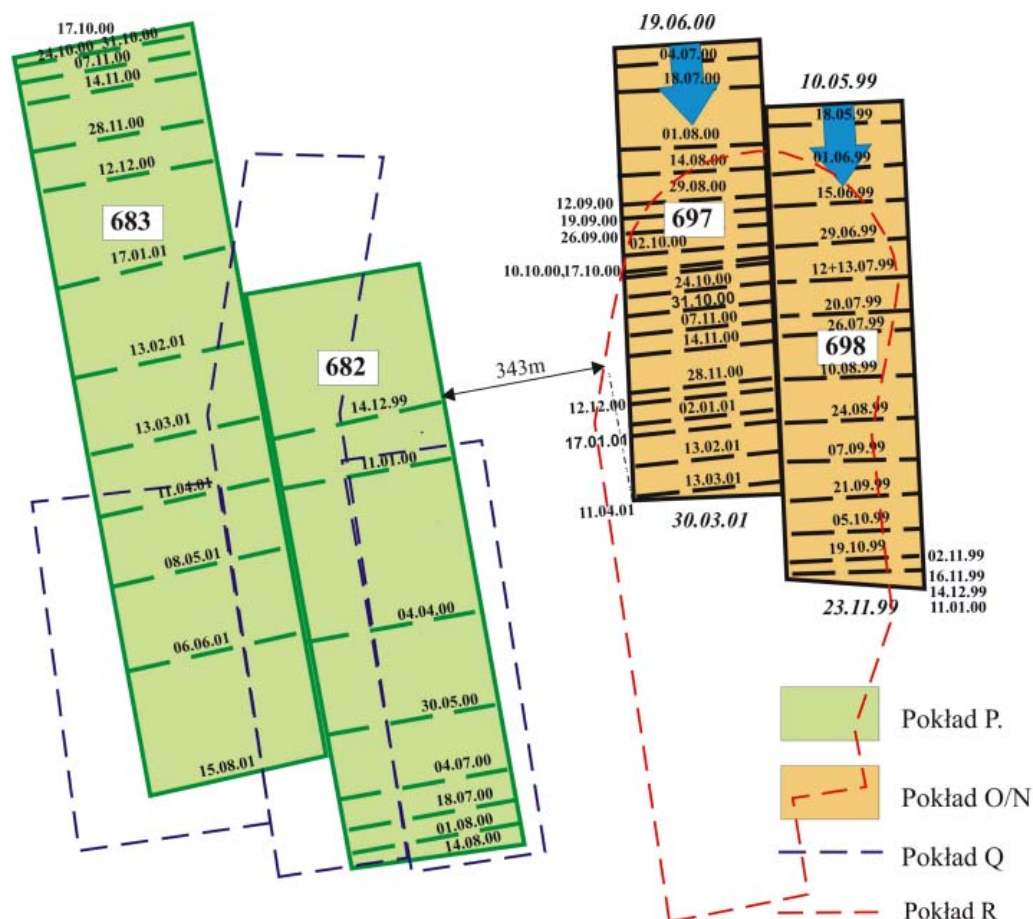
Wskaźnik deformacji	Wartość prognozowana*	Wartość pomierzona	Rejon pomiaru	K
Maksymalna wartość obniżenia w_{\max} [mm]	1 300	610	Punkt 27	0,47
Maksymalna wartość odkształcenia ściskającego ε^- [mm/m]	-5,5	-2,76	Pkt. 27-Pkt. 28	0,50
Maksymalna wartość odkształcenia rozciągającego ε^+ [mm/m]	+2,4	+1,27	Pkt. 31-Pkt. 32	0,53

* Prognoza została przeprowadzona przy założeniu następujących parametrów geometrycznych ściany: $H = 910$ m; $g = 3,9$ m; $d = 270$ m; $l = 990$ m, oraz parametrów teorii Knothe'go: $a = 0,9$; $\gamma = 60$ gon lub $\beta = 59,04^\circ$; $\Delta = 30$ m.

Dlatego w celu przeprowadzenia dokładniejszej analizy wpływu eksploatacji podziemnej na przemieszczenia poziome powierzchni terenu, wykorzystano pomiary do 15 sierpnia 2001 r. Wówczas w analizowanym rejonie kopalni wyeksploatowano następujące ściany 698, 697 w pokładzie O/N oraz ściany

682 i 683 w pokładzie P1 (rys. 5). Jak wskazują wyniki pomiarów, dopiero eksploatacja ścian 698 i 697 doprowadziła do deformacji charakterystycznych dla eksploatacji zawałowej ($a = 0,8$).

Eksploatacja ścian 698 i 697 była prowadzona w rejonie słabo zaburzonym. Sytuację górniczą w rejonie tych ścian przedstawia rysunek 5, gdzie jedynie w pokładzie R znajdującym się ok. 110 m nad pokładem O/N znajdują się stare zroby.



Rys. 5. Zroby w rejonie eksploatacji ściany 698

W dalszej analizie uwzględniono wpływ eksploatacji ścian 682 i 683 znajdujących się w pokładzie P1 na głębokości 920 m. Eksploatacja tych ścian prowadzona była w trakcie prowadzenia pomiarów geodezyjnych dla ścian 698 i 697. Dodatkowo z uwagi na powiększenie się strefy zaburzenia w rejonie eksploatacji ścian 698 i 697 dodano kilka punktów pomiarowych (do nr 53).

W wyniku przeprowadzonych pomiarów geodezyjnych otrzymano wartości wskaźników deformacji, które zostały przedstawione na rysunku 6.

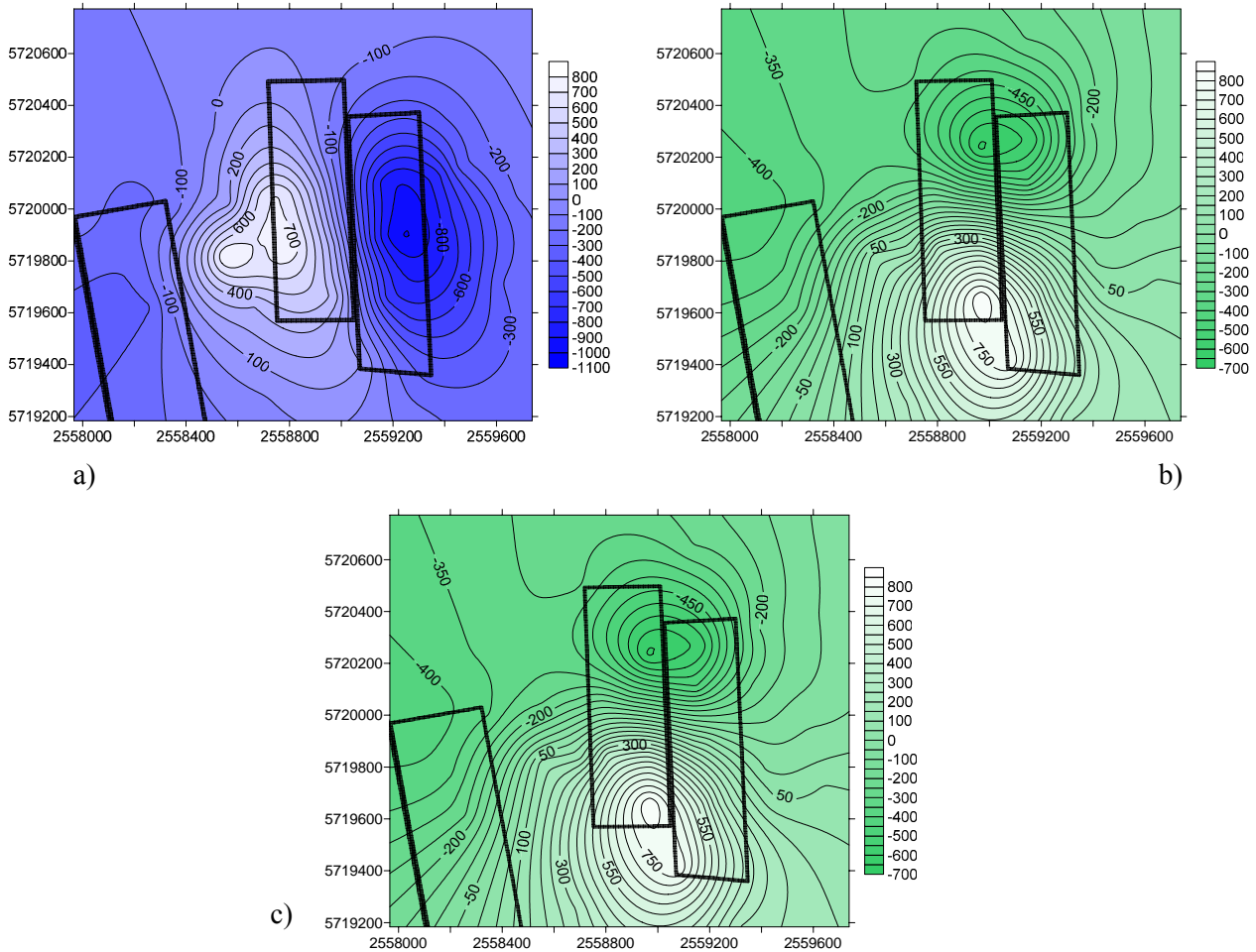
Bazując na teorii Knothego przeprowadzono obliczenia modelowe dla określonych warunków kopalni BW Prosper Haniel.

Przyjęto do obliczeń następujące wartości teorii (bez przyjęcia obrzeża):

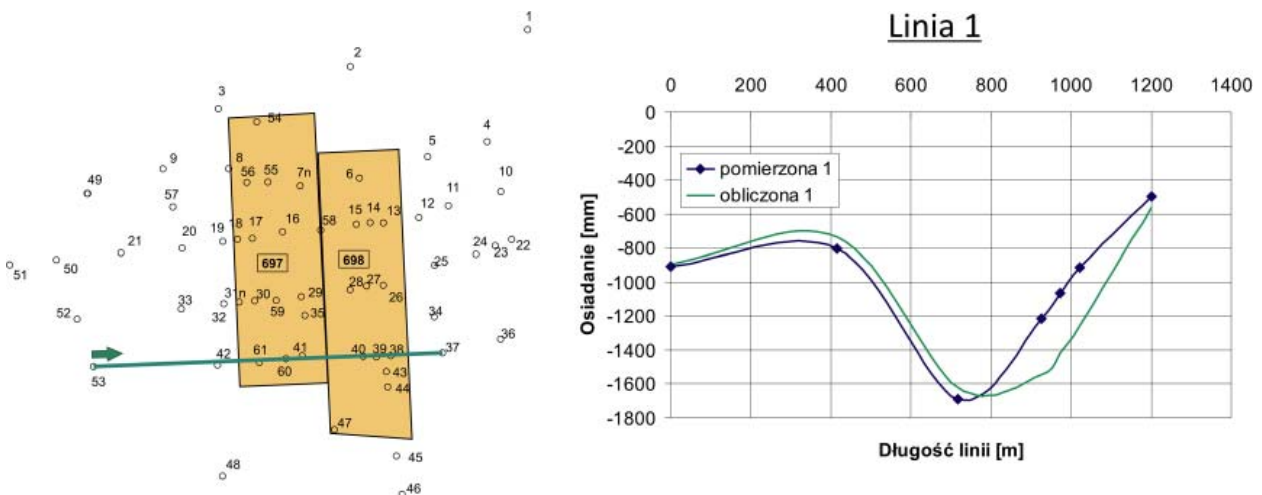
- dla ściany 698: $a = 0,65$; $\operatorname{tg}\beta = 2,2$; $g = 3,8$ m
- dla ściany 697: $a = 0,65$; $\operatorname{tg}\beta = 2,2$; $g = 4,0$ m
- dla ściany 682 i 683: $a = 0,8$; $\operatorname{tg}\beta = 1,7$; $g = 1,6$ m

W celu przeprowadzenia analizy rozkładu oraz wyznaczenia wartości przemieszczeń poziomych powierzchni terenu wykorzystano metodę geometryczno-całkową i przyjęto do obliczeń wartość współczynnika B zgodnie z wytycznymi Budryka (oraz sugerowanymi przez Ruhrkohle) $B = 0.40r$.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń oraz porównanie ich z wynikami obserwacji geodezyjnych przedstawiono na rysunkach od 7 do 14.

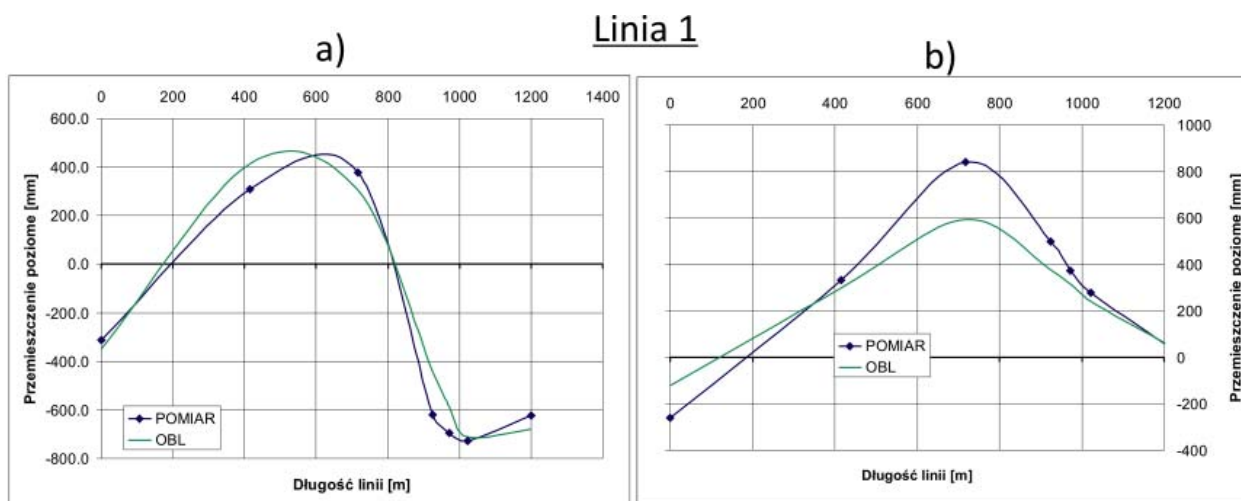


Rys. 6. Mapy wyników pomiarów geodezyjnych¹:
 a) przemieszczeń poziomych w kierunku x [mm], b) przemieszczeń poziomych w kierunku y [mm], c) obniżeń [mm]

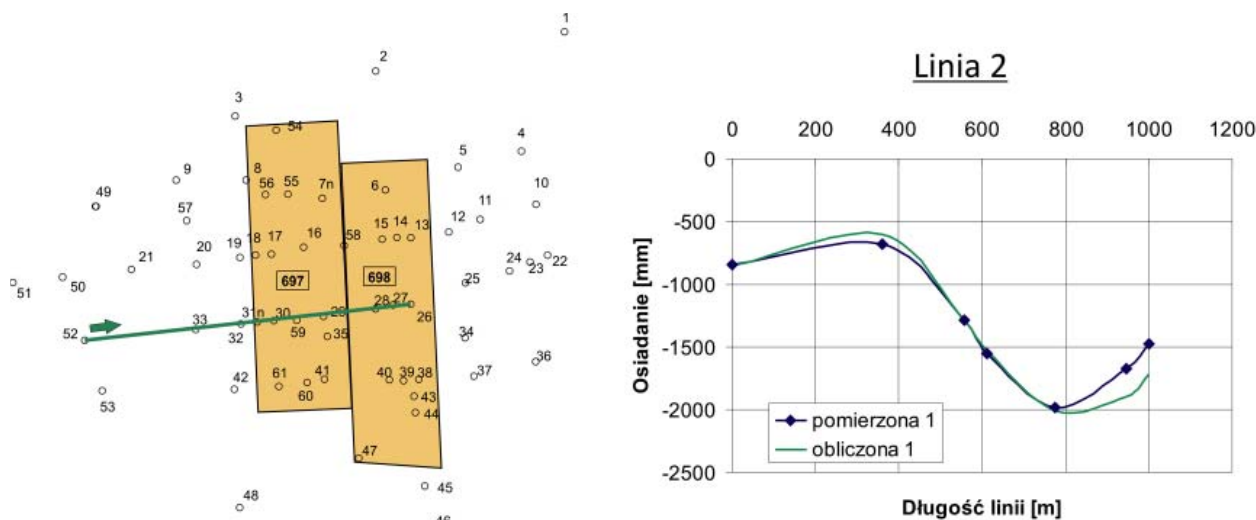


Rys. 7. Porównanie wartości obniżeń (w) pomierzonych z obliczonymi wg teorii Knothe'go dla przyjętej linii nr 1

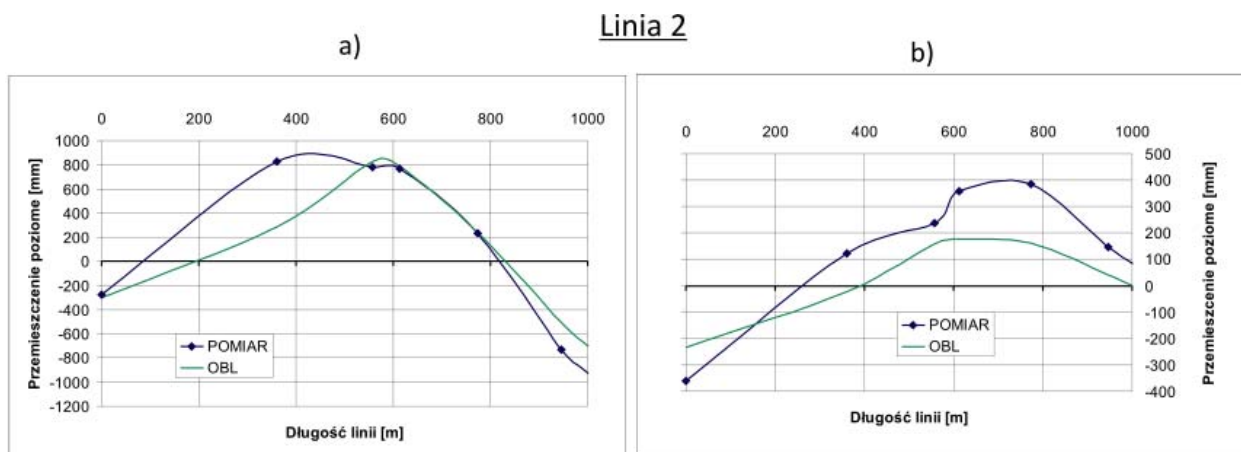
¹ Dopasowanie przeprowadzono metodą Kriging czyli metodą która znajdującym się wewnątrz obszaru estymacji (obszaru wyszukiwania próbek) przydziela odpowiednie wagi zwane współczynnikami (wagami) krigingu w taki sposób, aby zminimalizować średniokwadratowy błąd estymacji (wariancję krigingu).



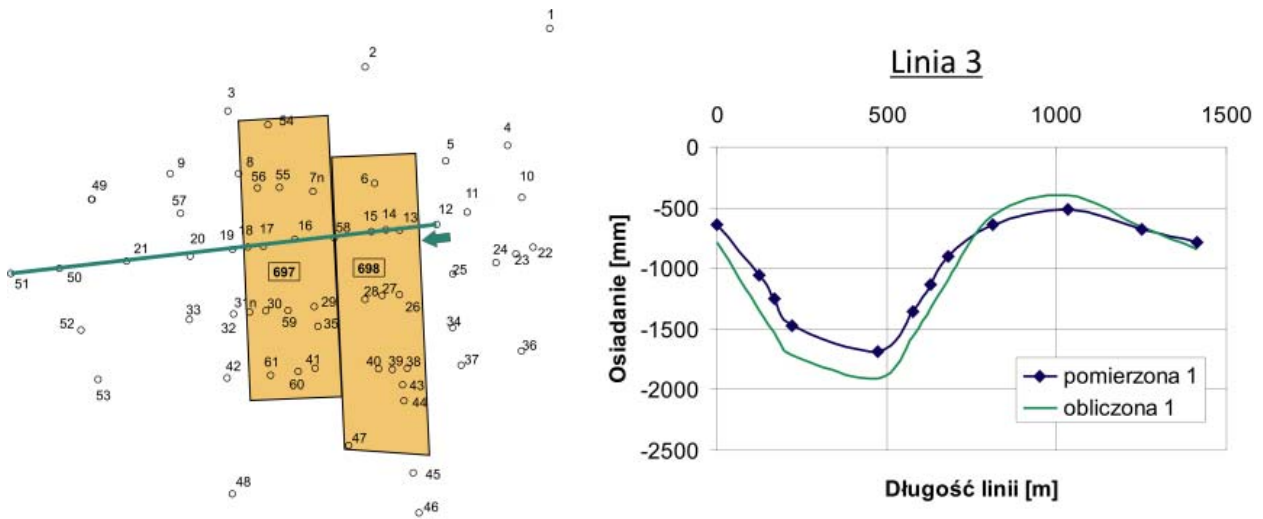
Rys. 8. Porównanie wartości przemieszczeń poziomych pomierzonych z obliczonymi wg teorii Knothego dla przyjętej linii nr 1 a) przemieszczenia poziome na kierunku x (u_x), b) przemieszczenia poziome na kierunku y (u_y)



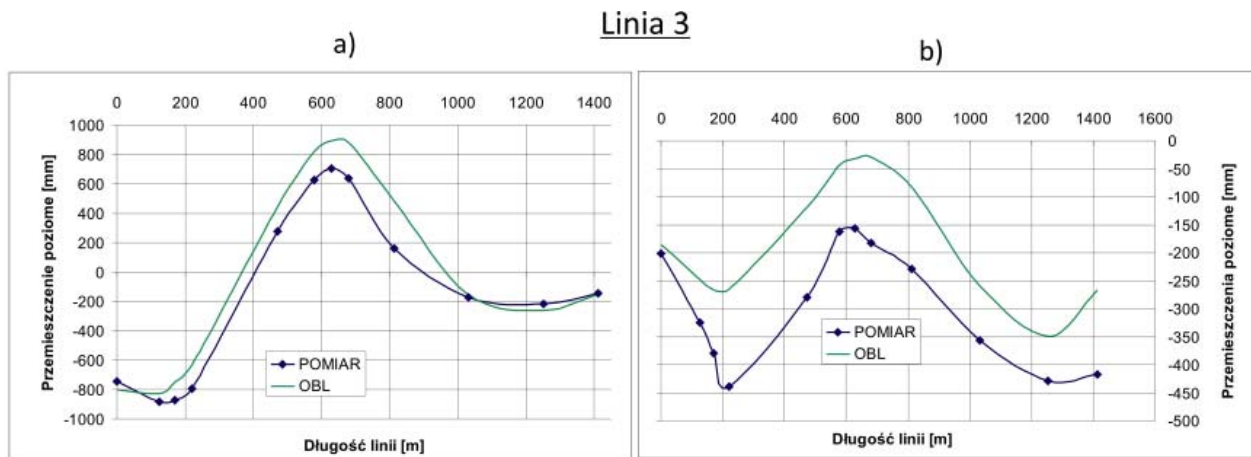
Rys. 9. Porównanie wartości obniżenia (w) pomierzonych z obliczonymi wg teorii Knothego dla przyjętej linii nr 2



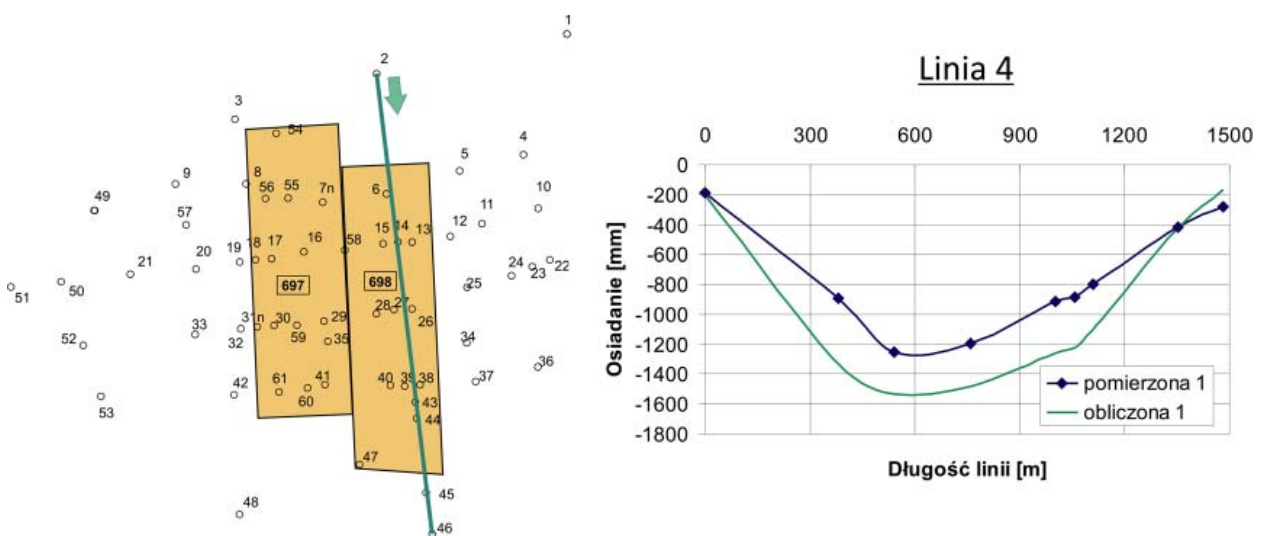
Rys. 10. Porównanie wartości przemieszczeń poziomych pomierzonych z obliczonymi wg teorii Knothego dla przyjętej linii nr 2 a) przemieszczenia poziome na kierunku x (u_x), b) przemieszczenia poziome na kierunku y (u_y)



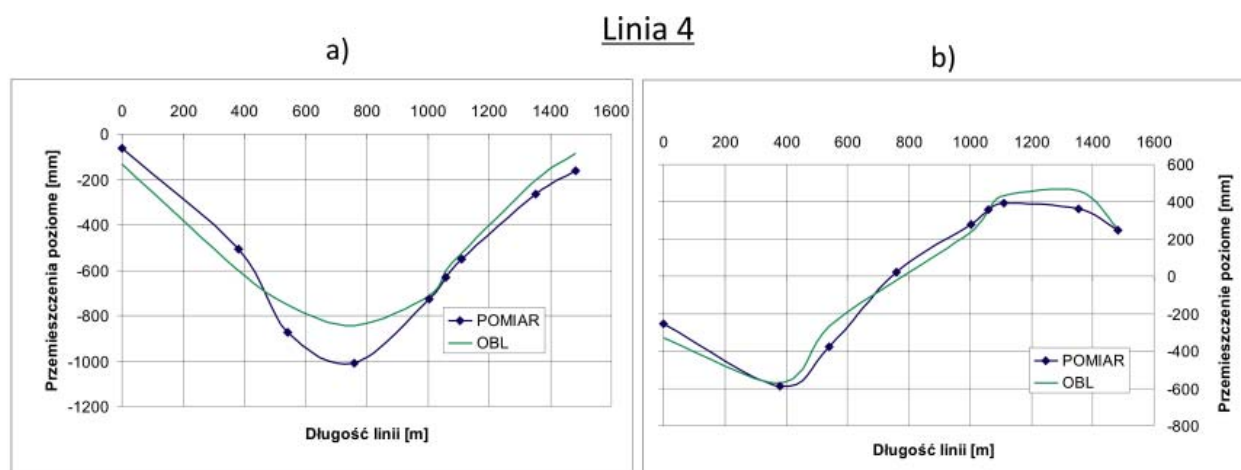
Rys. 11. Porównanie wartości obniżenia (w) pomierzonych z obliczonymi wg teorii Knothego dla przyjętej linii nr 3



Rys. 12. Porównanie wartości przemieszczeń poziomych pomierzonych z obliczonymi wg teorii Knothego dla przyjętej linii nr 3
a) przemieszczenia poziome na kierunku x (u_x), b) przemieszczenia poziome na kierunku y (u_y)



Rys. 13. Porównanie wartości obniżenia (w) pomierzonych z obliczonymi wg teorii Knothego dla przyjętej linii nr 4



Rys. 14. Porównanie wartości przemieszczeń poziomych pomierzonych z obliczonymi wg teorii Knothego dla przyjętej linii nr 3
a) przemieszczenia poziome na kierunku x (u_x), b) przemieszczenia poziome na kierunku y (u_y)

Obliczenia przeprowadzone metodą geometryczno-całkową dla wymienionych wartości parametrów teorii Knothego dobrze wpasowały się w rezultaty pomierzonych obniżeń terenu. Wyjątek stanowi linia nr 4 przebiegająca bezpośrednio nad ścianą 698 równoległe do jej wybiegu.

Analizując wyniki obliczonych wartości przemieszczeń poziomych można zauważyć, że przemieszczenia poziome na kierunku x (u_x) wykazują lepsze dopasowanie dla linii 1, 2 i 3 niż obliczone wartości dla przemieszczeń poziomych na kierunku y (u_y). Czyli obliczenia przemieszczeń poziomych dla linii pomiarowych zlokalizowanych prostopadłe do postępu frontu eksploatacji wykazują większą poprawność dla wartości u_x , natomiast linie zlokalizowane równoległe do postępu frontu wykazują większą dokładność dla obliczonych wartości dla u_y .

3. Wnioski

W artykule przedstawiono dwa przeglądy, a mianowicie metodę punktu środka ciężkości oraz metodę opartą na hipotezie Awierszyna, dotyczące przemieszczeń poziomych punktów powierzchni terenu na skutek dokonanej eksploatacji górniczej złóż pokładowych. Metody te zakładają proporcjonalność pomiędzy wektorem przemieszczenia poziomego a wektorem nachylenia powierzchni terenu. Różnice dotyczą w zasadzie przyjętych wartości współczynnika proporcjonalności B .

Autorzy przeprowadzili obliczenia oparte na metodzie geometryczno-całkowej (teorii Knothego) dla wybranego rejonu kopalni węgla kamiennego Prosper Haniel, gdzie dla określonych wartości parametrów teorii Knothego oraz ustalonej wartości współczynnika $B = 0.40r$, otrzymano zadowalające wyniki obliczeń.

Praca została wykonana w roku 2012 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

4. Literatura

- Awierszyn S.G., 1947: *Sdwiżenije gornych porod pri podziemnych razrobotkach*. Ugletiechizdat, Moskwa
- Bals R., 1931/32: *Beitrag zur Frage der Vorausberechnung bergbaulicher Senkungen*. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, Jg. 42/43, s. 98-111
- Budryk W., 1953: *Wyznaczenie wielkości poziomych odkształceń terenu*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, Kwartalnik, Tom I. Zeszyt 1, PWN, Warszawa
- Deutsche Montan Technologie GmbH. BW Prosper Haniel. Beobachtungspunkte Schwarze Heide.
- Keinhorst H., 1925: *Die Berechnung der Bodensenkungen im Emschergebiet*. 25 Jahre der Emschergenossenschaft 1900-1925, Essen
- Knothe S., 1984: *Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice

- Lehmann K., Neubert K., Schafstein K., 1942: *Berechnung und Darstellung von Bodenbewegungen über Abbauen*. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen
- Sroka A., 1978: *Teoria S. Knothego w ujęciu czasoprzestrzennym*. Prace Komisji Górnictwo-Geodezyjnej PAN. Geodezja z. 24, Kraków
- Sroka A., 1995: *Über die Abhängigkeit der Senkung und der horizontalen Verschiebung in Raum und Zeit*. Institut für Markscheidewesen, Bergschadenkunde und Geophysik im Bergbau, RWTH Aachen 12.12.1995, referat w ramach Seminarium Naukowego (niepublikowany)
- Sroka A., 2000: *Pomiary przemieszczeń punktów powierzchni z zastosowaniem techniki satelitarnej GPS przy eksploatacji ściany zwrotnej*. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2000, IGSMiE PAN Kraków, str. 361-370, 21-22 lutego 2010, Szczyrk
- Stocks S., Sroka A., 2000: *Bergschadensmindernde Abbauplanung und Analysen beim Abbau im Bereich einer Pipeline*. 11th International Congress of the ISM. Kraków.
- Tajduś K., Sroka A., Misa R., 2010: *Przemieszczenia poziome powierzchni terenu wywołane podziemną eksploatacją górnictw – teoria i praktyka*. Prace Instytutu Mechaniki Górniczej PAN, tom 12, nr 1-4, str. 79-92

Horizontal displacements in the mining areas

Abstract

The paper summarises the research work on the time-space mathematical model governing the horizontal displacements of the grounds in the areas affected by underground mining. Basing on reports available in the literature on the subject, the authors briefly presented the currently used methods of computing the horizontal displacements, and applied the modelling procedure underpinned by the geometrical-integral method to the study of a selected area in the mine Prosper Haniel. Calculation data are contrasted with the results of ground surveying.

Keywords: horizontal displacements, ground deformation, mining