



Wpływ postępu frontu ściany na przemieszczenia powierzchni terenu

The influence of wall face advance on the displacements of the land surface

Dr inż. Krzysztof Tajduś*)

Treść: Artykuł przedstawia analizę trajektorii przemieszczeń poziomych i pionowych punktów geodezyjnych wraz z postępującym frontem eksploatacyjnym. Przedstawiono próbę odpowiedzi na pytanie czy zmiany przemieszczeń powierzchni podczas rozwoju eksploatacji na dużych głębokościach i w warunkach zalegania w nadkładzie warstw skalnych o średnich i wyższych parametrach wytrzymałościowych są podobne do przebiegu przedstawionego przez Awierszyna dla eksploatacji płytkich, gdzie nadkład stanowiły skały o średnich lub niskich parametrach wytrzymałościowych. W celu odpowiedzi na pytanie dokonano analizy pomierzonych przemieszczeń powierzchni terenu dla punktów rozproszonych nad prowadzoną eksploatacją dwóch wybranych kopalń głębokich uwzględniając postęp.

Abstract: This paper presents the analysis of trajectory of horizontal and vertical displacements of geodetic positions along with the wall face advance. It was attempted to decide whether the changes in land surface displacements during the advance of exploitation at deep levels and in conditions of deposition in the blanket rocks of medium or high strength parameters are similar to the run presented by Awierszyn for shallow exploitation where the blanket rocks were of medium or low strength parameters. In order to solve this issue, an analysis of measured displacements of the land surface for positions located above the exploitation of two selected deep mines including the advance was performed.

Słowa kluczowe:

przemieszczenia poziome, eksploatacja ścianowa, wpływ eksploatacji podziemnej na powierzchnię

Key words:

horizontal displacements, wall exploitation, influence of underground exploitation on the surface

1. Wprowadzenie

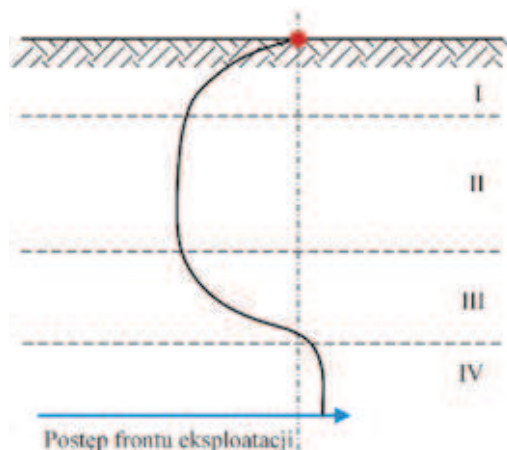
Punkty znajdujące się na powierzchni terenu pod wpływem postępu frontu ścianowego przemieszczają się wzdłuż określonych trajektorii. Zarówno składowa pozioma jak również składowa pionowa zależą od punktu położenia w stosunku do granic wyrobiska ścianowego. Szczególnie składowa pozioma ma wpływ na przebieg trajektorii danego punktu w miarę rozwoju eksploatacji. Ogólnie można stwierdzić, że przemieszczenie poziome punktu ma kierunek zgodny z wybiegiem ściany eksploatacyjnej.

Jakościowy opis tego zjawiska podał Awierszyn [1] na podstawie analiz wyników przemieszczeń w kilku kopalniach dawnego Związku Radzieckiego. W każdym analizowanym przypadku brał on pod uwagę punkt dostatecznie oddalony od miejsca, w którym rozpoczynała się eksploatacja ściany, a następnie badał przemieszczenia tego punktu w miarę jak wyrobisko ścianowe przybliżało się do punktu, przechodziło pod nim i oddalało się na taką odległość, że ustawał wpływ eksploatacji na jego zachowanie się. W wyniku przemieszczeń punkt opisywał pełną trajektorię deformacji. Wiążąc tę

trajektorię z przemieszczającą się ścianą, możemy wyróżnić na niej cztery części: I, II, III, IV (rys. 1 wg. Awierszyna [1]). Część I tworzy się przy przybliżaniu się frontu ściany do punktu, część II – w wyniku przechodzenia ściany pod punktem, część III – w wyniku oddalania się ściany od punktu, część IV – w wyniku obniżenia (osiadania) punktu po oddaleniu się ściany na odległość, przy której wpływ eksploatacji ściany jest znikomy (powyżej promienia zasięgu wpływów głównych). Te cztery części tworzą pełną trajektorię w płaszczyźnie pionowej, zgodną z kierunkiem prowadzenia eksploatacji. Jeżeli punkt nie znalazł się w zasięgu pełnej eksploatacji, to jego przemieszczenie opisane jest tylko przez odpowiednią część trajektorii. Punkty, które położone były w początkowej części wyrobiska i od których czoło przodka się oddalało opisują części III i IV pełnej trajektorii, a punkty, do których czoło przodka się przybliżyło, ale nie przeszło pod nimi, opisują I i II część pełnej trajektorii.

Kształt trajektorii danego punktu zależy od rodzaju nadkładu, jego budowy, parametrów odkształceniowych i wytrzymałościowych warstw skalnych, grubości czwartorzędu, głębokości eksploatacji. Według Awierszyna [1] podczas eksploatacji na stosunkowo małej głębokości, w warunkach słabego piaszczysto-lupkowego nadkładu praktycznie zanika

*) Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie



Rys.1. Zmiana przemieszczeń wybranego punktu powierzchni w miarę postępu frontu eksploatacji [1]

Fig. 1. Surface point displacement along with longwall face run [1]

część II charakterystyki i od razu część I przechodzi w część III, przy czym część I przedłuża się przez pewien czas po tym jak czoło przodka przejdzie pod punktem i zacznie oddalać się od niego. Powrót trajektorii w stronę oddalającego się czoła przodka zachodzi z opóźnieniem.

2. Zmiana przemieszczeń wybranych punktów powierzchni wraz z postępowaniem frontu eksploatacji

W pracy Awierszyna [1] analizowano przemieszczenia wybranych punktów powierzchni wraz z postępowaniem frontu eksploatacji prowadzonej na stosunkowo niedużych głębokościach. Zachodzi pytanie: czy podobne zmiany przemieszczeń powierzchni podczas rozwoju eksploatacji zachodzą, gdy eksploatowany pokład znajduje się na większej głębokości, a w nadkładzie zalegają warstwy skalne o średnich i wyższych wytrzymałościach. W celu analizy tego problemu wybrano dwie kopalnie węgla kamiennego, w których obserwowano, zmiany kierunku i zwrotu wektora przemieszczeń wybranych punktów pomiarowych powierzchni terenu wraz z postępowaniem frontu eksploatacji.

2.1. BW Friedrich Heinrich-Rheinland, pokład Girondelle 5, ściana 537

Pierwszą analizę przeprowadzono dla kopalni Friedrich Heinrich-Rheinland. Kopalnia prowadziła eksploatację w pokładzie Girondelle 5 ścianą 537 leżącą na głębokości 925m i średniej miąższości $g=2,8m$. Długość wyeksploatowanej ściany wynosiła 430m, a wybieg 2003m. Promień

zasięgu wpływów głównych wyniósł $r=646m$. W pokładzie Girondelle 5 w rejonie ściany 537 prowadzono w okresie od 1988 do 1997 eksploatację 8 ścian, zarówno z systemem podsadzkowym, jak i zawałem stropu. Przedstawioną sytuację górnictwem wraz z parametrami przeprowadzonych eksploatacji przedstawia tabela 1.

Po zakończeniu prac w ścianie 537, przeprowadzono w kwietniu 2000 roku eksploatację ściany sąsiedniej 538 ($g=2.6m$, długość 429m i wybieg 943m). Jej bieg zakończono w 2001 roku.

Powyżej eksploatowanego pokładu Girondelle 5 prowadzono w latach wcześniejszych (od 1914 do 1973) eksploatację 10 pokładów, gdzie w pięciu pokładach likwidowano pustkę systemem podsadzkowym, natomiast w pozostałych na zawał. Generalnie pokłady charakteryzowały się małą miąższością, średnio 1.2m. Najniżej położony pokład eksploatowany w latach wcześniejszych (Präsident) znajdował się ok. 450m-550m nad poziomem Girondelle 5, a jego eksploatację zakończono 19 lat przed rozpoczęciem eksploatacji ściany 531.

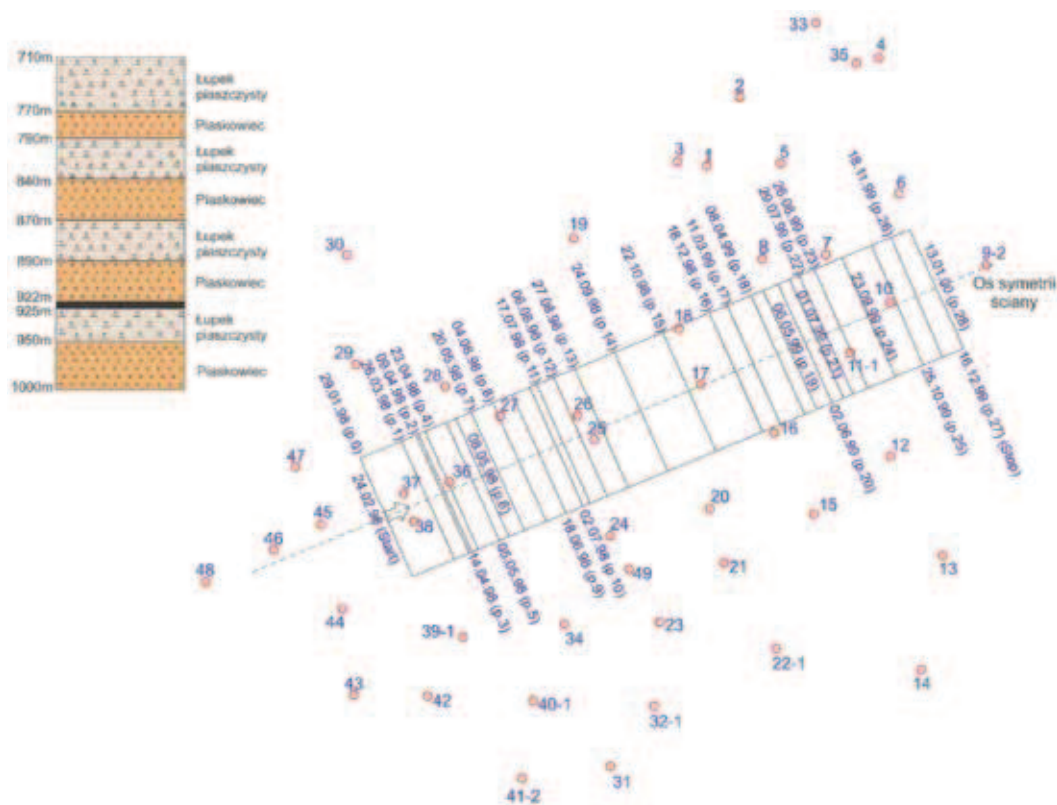
Górotwór w rejonie prowadzonej eksploatacji charakteryzuje się różnorodną budową. Nadkład zbudowany jest w kolejności od powierzchni terenu z następujących warstw: warstwy czwartorzędu o miąższości 20m, poniżej – warstwy trzeciorzędowej do głębokości 180m-200m oraz głębiej – warstwy karbonu. Warstwy czwartorzędu i trzeciorzędowej można zaliczyć do warstw o niskich parametrach wytrzymałościowych. Karbon w nadkładzie zasadniczo zbudowany jest z warstw piaskowca i łupku piaszczystego (w ponad 70%) oraz łupku ilastego z przewarstwieniami węgla (poniżej 30%). Ogólnie warstwy karbonu (Ruhrkarbon) o grubości ponad 700m można zaliczyć do warstw o wysokich parametrach wytrzymałościowych (wg Bräuer'a [2]: wytrzymałość na ściskanie piaskowca mieści się w przedziale od 30 do 250 MPa, a łupka ilastego od 10 do 70MPa).

Na powierzchni terenu kopalnia założyła sieć pomiarową składającą się z rozproszonych punktów geodezyjnych (rys. 2). Pomiary przemieszczeń poziomych i obniżeń prowadzono stosując metodę GPS, która charakteryzuje się dokładnością poniżej 5mm [4]. Pomiar pierwotny przypadł na miesiąc przed uruchomieniem ściany 537, natomiast zakończenie jej biegu nastąpiło po ok. 22 miesiącach. Ostatni pomiar został dokonany niecałe 5 miesięcy po zakończeniu eksploatacji ściany 537. Na rysunku 2 przedstawiono schemat ściany wraz z lokalizacją jej frontu dla kolejnych okresów pomiarowych. W wyniku przeprowadzonych pomiarów otrzymano wartości i rozkład obniżeń (w) i przemieszczeń poziomych (u_x , u_y). W dalszej kolejności wybrano punkty pomiarowe: 48, 46, 45, 37, 36, 25, 17, 10, 9-2 znajdujące się w zasięgu wpływów eksploatowanej ściany i umiejscowione w pobliżu jej osi symetrii (rys. 2). Następnie przeliczono wartości przemieszczeń poziomych na kierunek postępu frontu - $u(\alpha)$.

Tabela 1: Charakterystyka ścian w rejonie eksploatacji [3]

Table 1. Characteristics of longwalls in the exploitation area [3]

Nr ściany	Rok rozpoczęcia eksploatacji	Data zakończenia eksploatacji	Miąższość, m	Prędkość eksploatacji, m/dzień	Długość ściany, m	Wybieg ściany, m	Sposób likwidacji przestrzeni wybranej
531	1988	1989	2.38	3.12	252	755	Podsadzka
532	1989	1991	2.42	3.49	252	1084	Podsadzka
533	1991	1992	2.48	3.90	293	1077	Podsadzka
534	1992	1993	2.62	4.18	237	1087	Podsadzka
553	1993	1995	2.86	3.20	311	1456	Zawał
535	1994	1995	2.81	2.45	287	673	Zawał
536	1995	1996	2.92	6.95	285	2015	Zawał
543	1997	1998	2.72	6.70	313	1440	Zawał



Rys. 2. Schemat postępów ściany 537 wraz z punktami pomiarowymi [5]

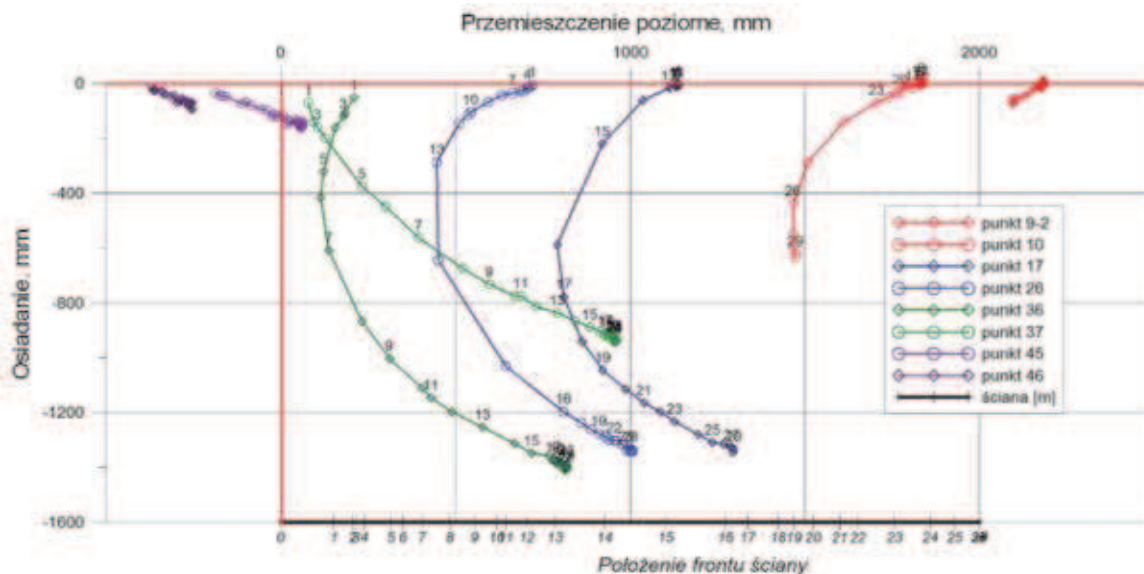
Fig. 2. Longwall panel excavation no. 537 with surface measurement points [5]

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany przemieszczeń poziomych $u(\alpha)$ i obniżeń w wraz z postępem frontu ścianowego.

Jak widać na rysunku, punkty przemieszczały się wraz z postępem frontu eksploatacji. Każdy symbol na krzywych oznacza lokalizację punktu w górotworze dla konkretnego etapu pomiaru. W dolnej części wykresu przedstawiono linię oznaczającą ścianę 537 podaną w skali 1:1000. Symbole na linii ściany 537 oznaczają położenie frontu ściany w chwili pomiaru. Eksploatacja postępowała z zachodu na wschód (rys. 2).

Dla przedstawionego przebiegu zmian $u(\alpha)$ i w , w punktach pomiarowych można przeprowadzić dopasowanie, otrzymując następujące równania zależności przemieszczenia poziomego $u(\alpha)$ i obniżenia w (tabela 2).

Otrzymane wyniki pomiarów są pod względem jakościowym zgodne z obserwacjami dokonanymi przez Awierszyna (rys.1). Punkty 46, 45 znajdujące się poza obrysem pola eksploatacji w miarę oddalania się od nich czoła ściany przemieszczają się po liniach względnie prostych nachylonych



Rys. 3. Zmiany wektorów przemieszczeń wzdłuż przekroju pionowego dla różnych etapów eksploatacji ściany 537

Fig. 3. Vector displacement path for different longwall panel 537 stages

Tablica 2. Wzory zależności $u(\alpha)$ od w dla punktów pomiarowych.
Table 2. Relationship between $u(\alpha)$ and w for measurement points

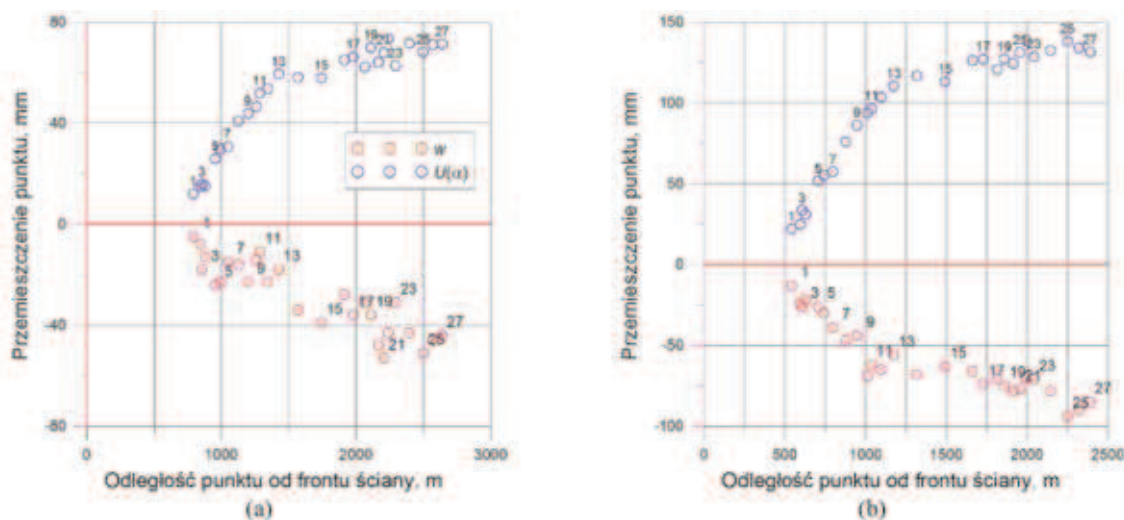
Położenie punktu względem eksploатовanej ściany	Wzór dopasowania
Punkty 46 i 45 poza obrysem parceli eksploатовanej ściany	$u(\alpha) = -1.71w$ dla $R^2 = 0,94$
Punkt 37 wewnątrz obrysu parceli eksploатовanej ściany	$u(\alpha) = 0.001w^2 + 0.017w$ dla $R^2 = 0,99$
Punkty 36, 26, 17 wewnątrz obrysu parceli eksploатовanej ściany	$u(\alpha) = 0.001w^2 + 0.08w$ dla $R^2 = 0,95$
Punkt 10 wewnątrz obrysu parceli eksploатовanej ściany 10	$u(\alpha) = 0.002w^2 + 1.68w$ dla $R^2 = 0,98$
Punkt 9-2 poza obrysem parceli eksploатовanej ściany	$u(\alpha) = 1.24w$ dla $R^2 = 0,90$

w kierunku przestrzeni wybranej, co obrazuje część III na rys.1. Punkty 36, 26, 17 znajdujące się nad eksploатовanym polem ulegają przemieszczeniu po trajektoriach zbliżonych do paraboli (z niedużym odcinkiem prostej) i jakościowo ich zachowanie zgodne jest z opisem podanym przez Awierszyna. Początkowo punkty pomiarowe 36, 26, 17 znajdujące się nad wybraną parcelą przed czołem ściany przemieszczają się przeciwnie do kierunku postępu czoła ściany (część I na rys.1), a następnie, w sytuacji gdy czoło ściany znajduje się bezpośrednio pod danym punktem ulegają stosunkowo niewielkim obniżeniom (część II na rys.1). Po przejściu czoła ściany pod danym punktem on nadal osiada i dopiero gdy czoło ściany znajdzie się w pewnej odległości od rozpatrywanego punktu, ten punkt zaczyna się przemieszczać zgodnie z kierunkiem postępu czoła ściany (część III na rys.1). Ten opis wskazuje, że reakcja punktu na przemieszczające się czoło przodka nie jest natychmiastowa (jak prognozował Awierszyn), lecz przejście do części III trajektorii zachodzi z pewnym opóźnieniem. Dla przykładu, to opóźnienie, czyli przejście do zachowania się według części III trajektorii dla punktu 36 wynosi około 100m (odległość pomiędzy punktem a frontem ściany), dla punktu 25 – ponad 180m, natomiast punktu 17 - blisko 190m. Można domniemywać, że to zachowanie jest spowodowane dużą głębokością eksploatacji oraz właściwościami nadkładu, który w znacznej części zbudowany jest z mocnych i wy-

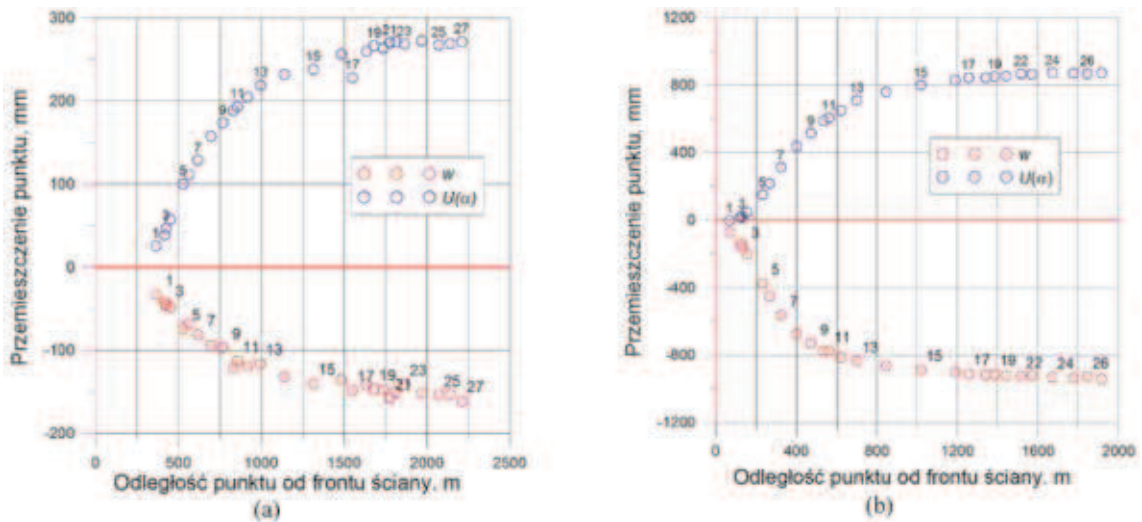
trzymałych skał. Znajdujące się nad wyrobiskiem eksploatacyjnym warstwy skalne o dużej wytrzymałości załamują się w większej odległości od czoła ściany aniżeli warstwy skalne o niskiej wytrzymałości, a dodatkowo załamanie to przebiega sukcesywnie i z pewnym opóźnieniem. W odróżnieniu od prognozy Awierszyna (rys.1) trajektorie punktów 36, 26, 17 (rys.3) praktycznie nie mają części IV. Według Awierszyna w części IV następuje obniżenie punktu po oddaleniu się ściany na odległość, przy której wpływ ściany jest znikomy, czyli bliską promieniowi zasięgu wpływów głównych r lub większą. Tymczasem wszystkie trzy punkty pomiarowe 36, 26, 17, kiedy front ściany dochodził do końca eksploатовanej ściany, znajdowały się w odległości większej (punkt 17) lub znacznie większej od promienia zasięgu wpływów głównych r (punkty 36, 26). Praktyczny brak części IV trajektorii punktów 36, 26, 17 wynika z istnienia nad wyrobiskiem eksploatacyjnym warstw skalnych o dużej wytrzymałości.

Punkt 10 znajduje się blisko końca wybiegu ściany - około 160 m, czyli $0.25r$. Z tego powodu w tym punkcie nie wystąpiły pełne przemieszczenia i trajektoria ruchu tego punktu składa się tylko z części I i II części pełnej trajektorii.

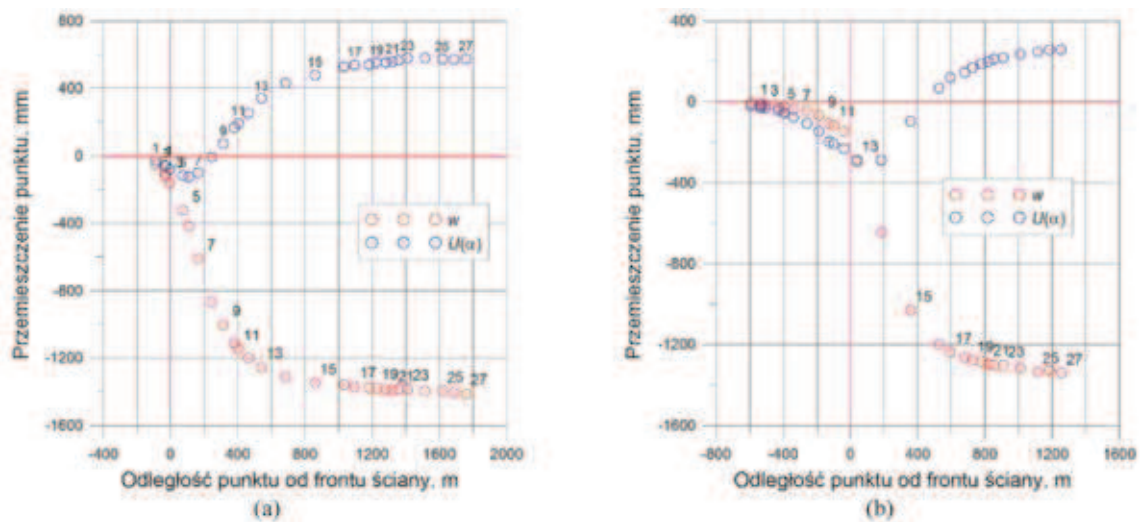
W dalszej kolejności przeprowadzono analizę przemieszczeń poszczególnych punktów pomiarowych w zależności od postępu frontu. Wyniki te przedstawiono na wykresach obniżen i przemieszczeń poziomych (rys. 4-7) oraz w tabeli 3.



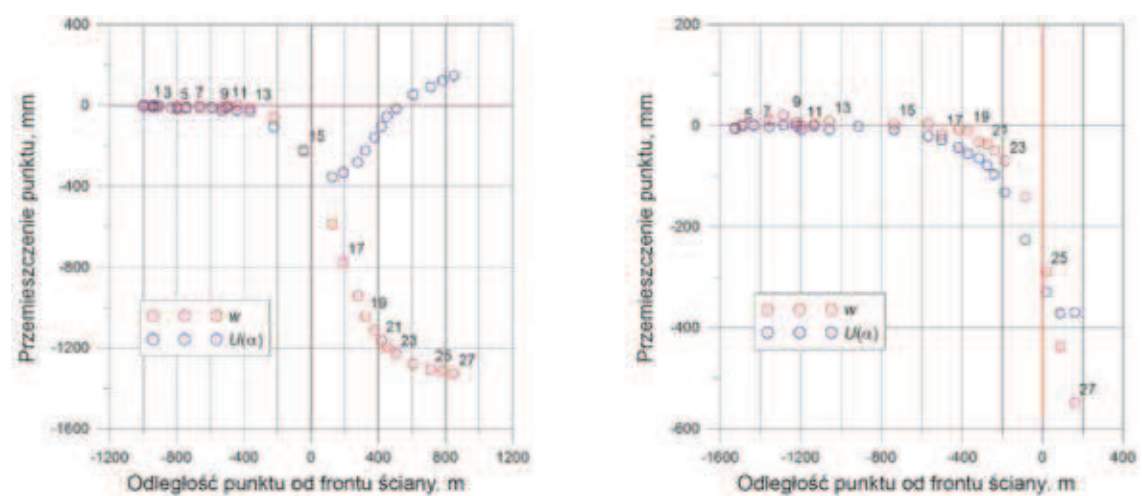
Rys. 4. Zmiany obniżen i przemieszczeń poziomych punktów 48 (a) i 46 (b) znajdujących się poza wybraną parcelą wraz z oddalaniem się frontu ścianowego od tych punktów
Fig. 4. Changes of subsidence and horizontal displacements for points: 48 (a) and 46 (b) located outside longwall panel along with advancing face



Rys. 5. Zmiany obniżenia i przemieszczeń poziomych punktów 45 (a) i 37 (b) wraz z postępem frontu
 Fig. 5. Changes of subsidence and horizontal displacements for points: 45 (a) and 37 (b) along with face run



Rys. 6. Zmiany obniżenia i przemieszczeń poziomych punktów 36 (a) i 25 (b) wraz z postępem frontu
 Fig. 6. Changes of subsidence and horizontal displacements for points: 36 (a) and 25 (b) along with face run



Rys. 7. Zmiany obniżenia i przemieszczeń poziomych punktów 17 (a) i 10 (b) wraz z postępem frontu
 Fig. 7. Changes of subsidence and horizontal displacements for points: 17 (a) and 10 (b) along with face run

Tablica 3. Maksymalne i minimalne wartości obniżenia i przemieszczenia poziomego pomierzone dla wybranych punktów pomiarowych

Table 3. Maximum and minimum subsidence and horizontal displacements for selected points

Punkt pomiarowy	Obniżenie maksymalne w, mm	Przemieszczenie poziome minimalne $u(\alpha)_{\min}$, mm	Lokalizacja wartości minimalnej względem frontu ściany, m	Przemieszczenie poziome maksymalne $u(\alpha)_{\max}$, mm
Pkt. 48	-53	-	-	71
Pkt. 46	-90	-	-	131
Pkt 45	-161	-	-	272
Pkt 37	-941	-4	60	872
Pkt 36	-1410	-125	108	580
Pkt 25	-1341	-294	110	259
Pkt 17	-1328	-354	124	145
Pkt 10	-548	-371	89	0

Z przedstawionych wykresów oraz tabeli 3 wynika, że:

- Przemieszczenia poziome punktów 48, 46, 45 znajdujących się poza obrysem eksploatowanej parceli w miarę oddalania się frontu ścianowego od tych punktów wzrastają do wartości maksymalnej zgodnie z funkcją

$$u = u_{\max} \left[1 - \exp\left(\frac{-x+d}{r} \cdot f\right) \right], \quad (1)$$

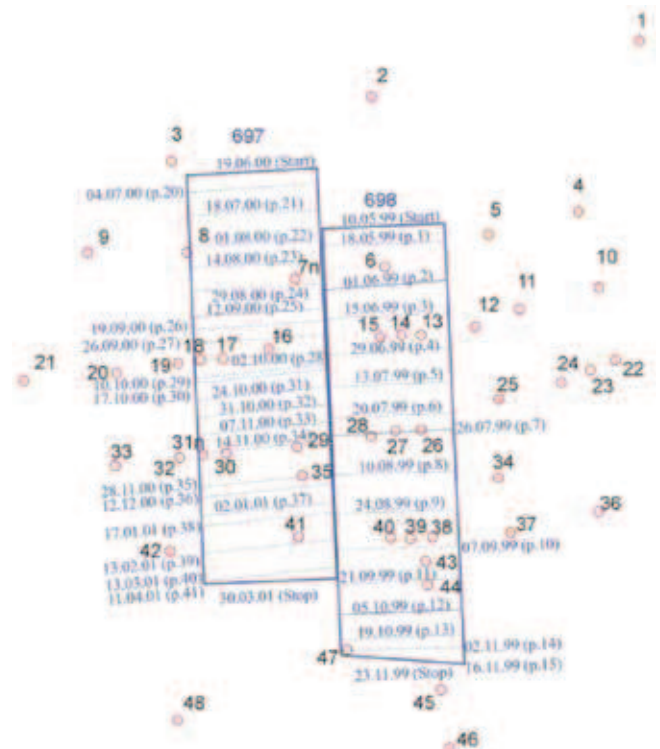
gdzie:

- d – odległość punktu od początkowej krawędzi eksploatowanej parceli (rozcinki ścianowej),
- f – współczynnik, dla przedstawionej kopalni wynosi $f=1.8$.
- Przemieszczenia poziome punktów znajdujących się wewnątrz obrysu parceli eksploatowanej ściany tj. 37, 36, 25, 17, 10 mają wartości minimalne (ujemne) i maksymalne (dodatnie). Wartość minimalna zależy od położenia punktu względem rozcinki ścianowej (d). Wraz ze wzrostem odległości d wzrasta wartość minimalnych przemieszczeń poziomych $u(\alpha)_{\min}$, a maleje wartość maksymalnych przemieszczeń poziomych $u(\alpha)_{\max}$. Minimalne przemieszczenia poziome występują nie na froncie ściany, lecz są przesunięte w kierunku calizny (tabela 3). Z dalszym wzrostem odległości punktu od frontu ściany przemieszczenia poziome rosną i w pewnej odległości punktu pomiarowego od frontu ściany, przechodzą w przemieszczenia poziome dodatnie i przy pełnym wybraniu osiągają wartości maksymalne. Odległość, przy której przemieszczenia poziome mają wartość zero dla rozpatrywanych punktów wynoszą: dla punktu 37 – 82m, dla punktu 36 – 250m, dla punktu 25 – 415m, punktu 17 – 530m.

2.2. BW Prosper Haniel, pokład O/N, ściany 698 i 697

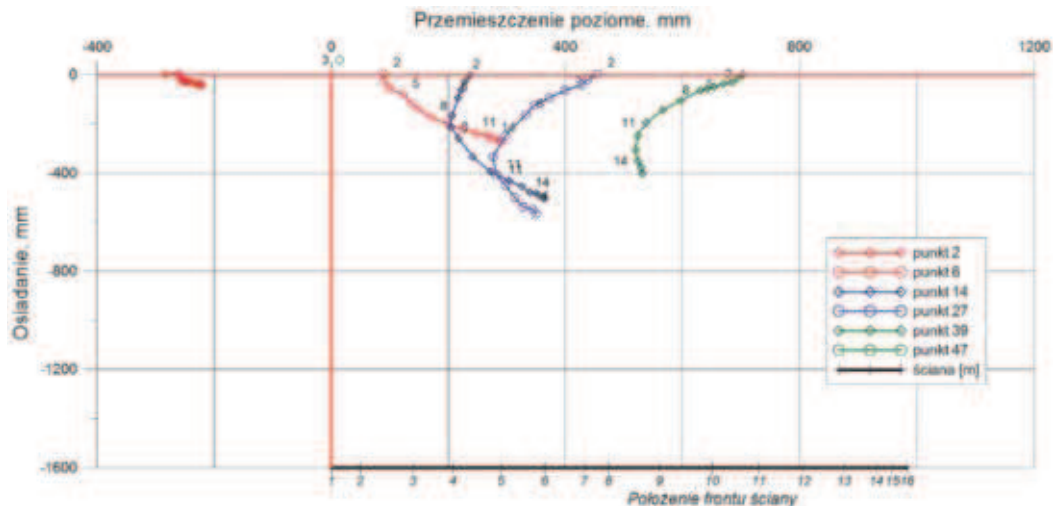
Kolejnym analizowanym przykładem jest kopalnia Prosper Haniel. Kopalnia w roku 1999 przeprowadziła eksploatację ściany nr 698 w pokładzie O/N, leżącym na średniej głębokości 960m. Długość wyeksploatowanej ściany wynosiła 270m, wybieg 970m, a jej wysokość zmieniała się od 3,6m do 4,3m. Rejon ten był słabo zaburzony poprzednimi eksploatacjami, jedynie w pokładzie R znajdującym się ok. 110m nad pokładem O/N znajdują się stare zroby, natomiast w ich bezpośrednim sąsiedztwie wyeksploatowano dwie ściany 682 i 683 w pokładzie P1, co pokazano szczegółowo w pracy [6]. Nadkład zbudowany jest w kolejności od powierzchni terenu z warstw czwartorzędu o miąższości 60m, następnie warstw kredowych sięgających do głębokości 350m. Poniżej znajdują się warstwy karbonu zbudowane głównie z grubych i mocnych

warstw piaskowca z przewarstwieniami łupka piaszczystego. Warstwy piaskowca i łupka piaszczystego można zaliczyć do warstw o wysokich parametrach wytrzymałościowych, co spowodowało, że eksploatacja ściany 698 wywołała zaledwie 50% prognozowanych przemieszczeń terenu. Nad pokładem O/N znajduje się 90-metrowa warstwa mocnego piaskowca, który najprawdopodobniej nie uległ znacznemu zniszczeniu przy eksploatacji ściany 698. Na powierzchni kopalnia przeprowadziła pomiary przemieszczeń poziomych oraz obniżeń w punktach rozproszonych (rys. 8).



Rys. 8. Schemat postępów ścian 698 i 697 wraz z punktami pomiarowymi [6]
Fig. 8. Longwall panels excavation no. 698 and 697 with surface measurement points [6]

W pierwszej części pracy przeprowadzono analizę zmian wartości przemieszczeń poziomych $u(\alpha)$ i obniżenia w jedynie nad postępującym frontem ściany 698. Do tego celu wybrano następujące punkty: 2, 6, 14, 27, 39. Znajdują się one w bliskiej odległości od osi ściany 698. Dodatkowo uwzględniono w analizie punkt 47 z uwagi na jego położenie. Na rysunku 9 przedstawiono zmiany przemieszczeń poziomych $u(\alpha)$ i obniżeń w wraz z postępem frontu ścianowego.



Rys. 9. Zmiany wektorów przemieszczeń wzdłuż przekroju pionowego dla różnych etapów eksploatacji ściany 698

Fig. 9. Vector displacement path for different longwall panel no. 698 stages

Rysunek 9 pokazuje przemieszczenia punktów pomiarowych wraz z postępem frontu eksploatacji. Każdy symbol na krzywych oznacza lokalizację punktu w górotworze dla konkretnego etapu pomiaru. W dolnej części wykresu przedstawiono linię oznaczającą ścianę 698 podaną w skali 1:1000, a symbole na linii ściany 698 oznaczają pozycję frontu ściany w chwili pomiaru. Eksploatacja postępowała z północy na południe.

Dla przedstawionego przebiegu zmian $u(\alpha)$ i w , w punktach pomiarowych przeprowadzono dopasowanie, otrzymując następujące równania zależności przemieszczenia poziomego $u(\alpha)$ i obniżenia w (tabela 4).

Otrzymane wyniki pomiarów są pod względem jakościowym zgodne z obserwacjami dokonanyymi przez Awierszyna (rys. 1). Punkt 2 znajdujący się poza obrysem pola eksploatacji w miarę oddalania się od nich czoła ściany przemieszcza się po linii względnie prostej nachylonej w kierunku przestrzeni wybranej, co obrazuje część III na rys.1. Punkty 6, 14, 27, 39 znajdujące się nad eksploatowanym polem ulegają przemieszczeniu po trajektoriach zbliżonych do parabol i jakościowo ich zachowanie zgodne jest z opisem podanym przez Awierszyna. W pierwszej fazie punkty pomiarowe 6, 14, 27, 39 znajdujące się nad wybieraną parcelą przed czołem ściany przemieszczają się przeciwnie do kierunku postępu czoła

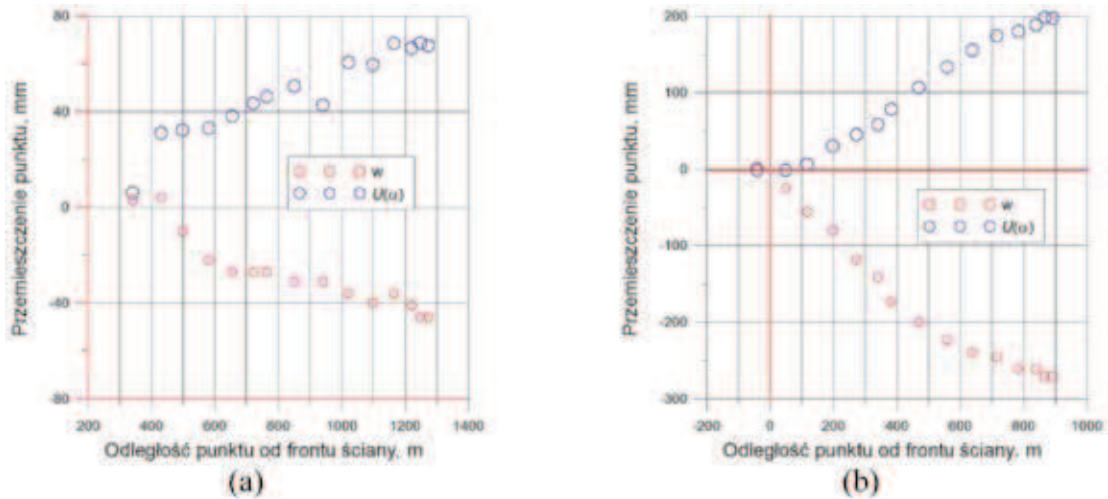
ściany (część I na rys.1). Gdy czoło ściany przechodzi pod danym punktem pomiarowym i zaczyna się od niego oddalać na trajektorii przemieszczeń punktów pomiarowych 6 i 14, nie można wyznaczyć części II (rys.1) i od razu ujawnia się część III trajektorii. Punkt 27 ma trajektorię składającą się z trzech części I, II i III, natomiast punkt pomiarowy 39 tylko z dwóch części I i II (rys.1). Na trajektorii żadnego z analizowanych punktów pomiarowych znajdujących się wewnątrz obrysu eksploatowanej ściany (tj. 6, 14, 27, 39) nie można wyznaczyć części IV. Takie przebiegi trajektorii tych punktów są najprawdopodobniej spowodowane budową geologiczną nadkładu, który składa się z mocnych i wytrzymałych warstw skalnych, dużą głębokością eksploatacji oraz faktem, że nad pokładem O/N znajduje się 90-metrowa warstwa mocnego piaskowca. Ponadto trzeba zwrócić uwagę, że w wybranym rejonie kopalni Prospel-Haniel r wynosi 580m. Natomiast odległość od końcowego położenia frontu ściany dla poszczególnych punktów wynosi: dla punktu 6 - $1,52r$, dla punktu 14 - $1,26r$, dla punktu 27 - $0,85r$, natomiast dla punktu 39 - $0,46r$.

W dalszej kolejności przeprowadzono analizę przemieszczeń poszczególnych punktów pomiarowych w zależności od postępu frontu. Wyniki te przedstawiono na wykresach obniżeń i przemieszczeń poziomych (rys. 10-12) (wartości zgodne z postępowaniem frontu ściany przyjęto jako dodatnie).

Tablica 4. Wzory zależności $u(\alpha)$ od w dla punktów pomiarowych

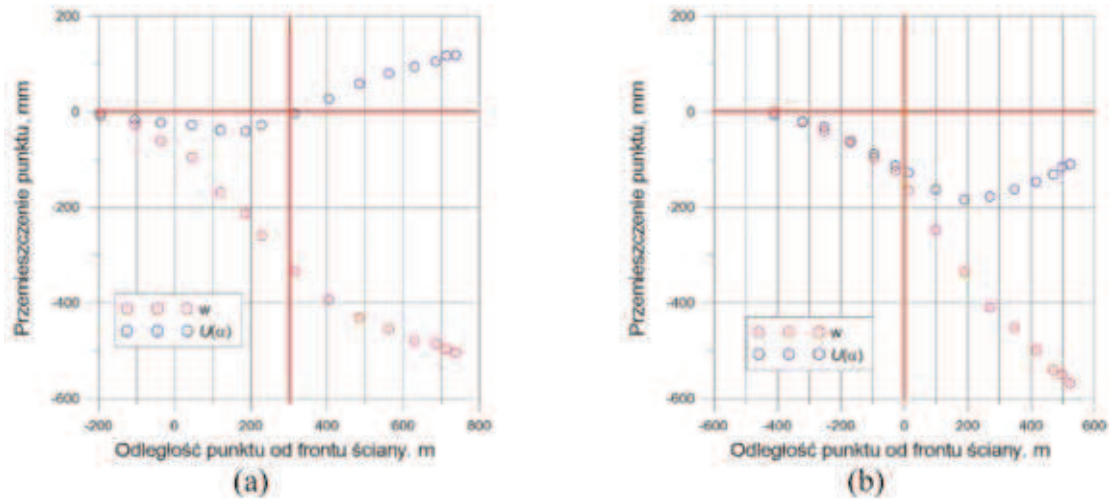
Table 4. Relationship between $u(\alpha)$ and w for measurement points

Położenie punktu względem eksploatowanej ściany	Wzór dopasowania
2 poza obrysem parceli eksploatowanej ściany	$u(\alpha) = 0.56w$ dla $R^2 = 0,40$ (słaba korelacja)
6 wewnątrz obrysu parceli eksploatowanej ściany	$u(\alpha) = -0.0014 \cdot w^2 - 0.030w$ dla $R^2 = 0,99$
14 wewnątrz obrysu parceli eksploatowanej ściany	$u(\alpha) = -0.0007 \cdot w^2 - 0.092w$ dla $R^2 = 0,99$
27 wewnątrz obrysu parceli eksploatowanej ściany	$u(\alpha) = -0.0007w^2 - 0.38w$ dla $R^2 = 0,99$
39 wewnątrz obrysu parceli eksploatowanej ściany	$u(\alpha) = -0.0009 \cdot w^2 - 0.430w$ dla $R^2 = 0,97$
47 na obrysie parceli, w narożu eksploatowanej ściany	$u(\alpha) = -0.62w$ dla $R^2 = 0,99$



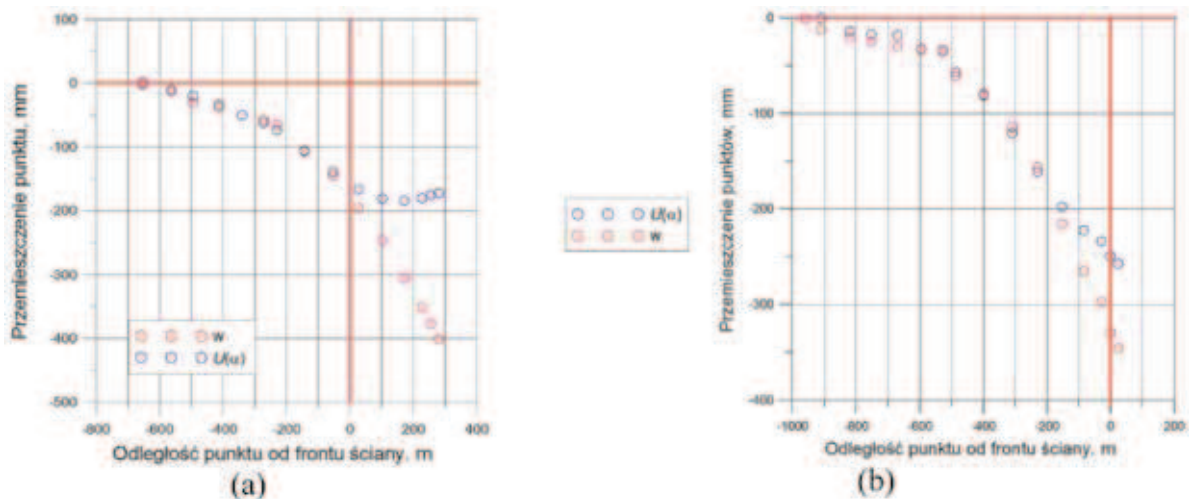
Rys. 10. Zmiany obniżeń i przemieszczeń poziomych punktu 2 (a) i 6 (b) przy postępującej eksploatacji ściany 698

Fig. 10. Changes of subsidence and horizontal displacements for points: 2 (a) and 6 (b) along with face run no. 698



Rys. 11. Zmiany obniżeń i przemieszczeń poziomych punktu 14 (a) i 27 (b) przy postępującej eksploatacji ściany 698

Fig. 11. Changes of subsidence and horizontal displacements for points: 14 (a) and 27 (b) along with face run no. 698



Rys. 12. Zmiany obniżeń i przemieszczeń poziomych punktu 39 (a) i 47 (b) przy postępującej eksploatacji ściany 698

Fig. 12. Changes of subsidence and horizontal displacements for points: 39 (a) and 47 (b) along with face run no. 698

Tablica 5. Maksymalne i minimalne wartości obniżenia i przemieszczenia poziomego pomierzone dla wybranych punktów pomiarowych

Table 5. Maximum and minimum subsidence and horizontal displacements for selected points

Punkt pomiarowy	Obniżenie maksymalne w, mm	Przemieszczenie poziome minimalne $u(\alpha)_{\min}$, mm	Lokalizacja wartości minimalnej względem frontu ściany, m	Przemieszczenie poziome maksymalne $u(\alpha)_{\max}$, mm
Pkt. 2	-46	-	-	25
Pkt. 6	-271	- 8	10	94
Pkt 14	-504	- 10	25	138
Pkt 27	-568	-48	100	22
Pkt 39	-402	-49	103	-

Z przedstawionych wykresów oraz tabeli 5 wynika, że:

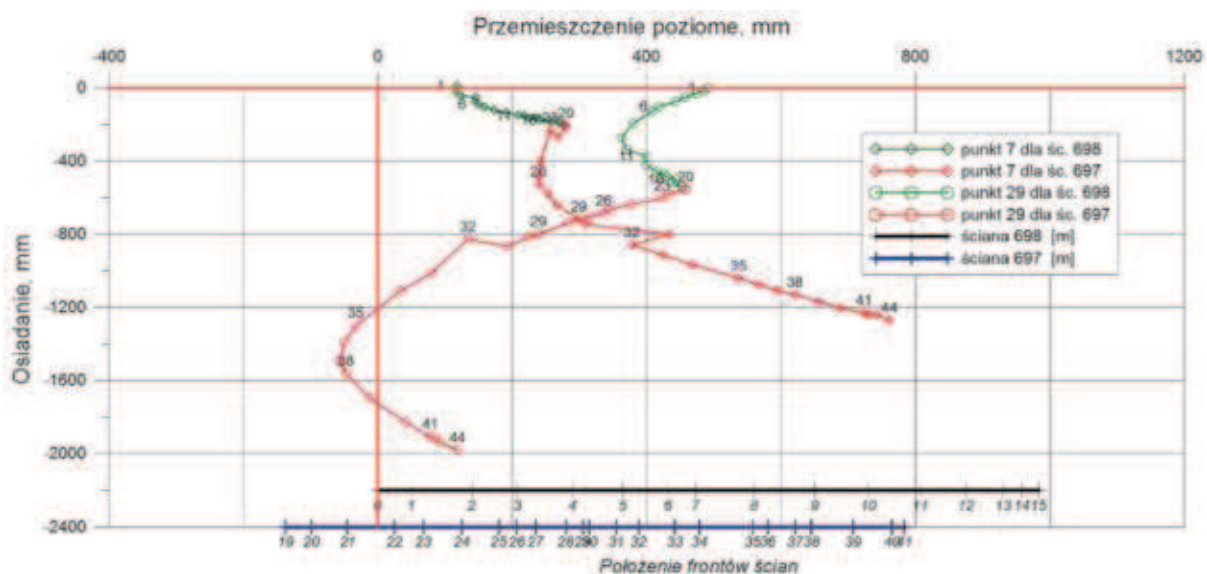
- Przemieszczenia poziome punktu 2 znajdującego się poza obrysem eksploatowanej parceli w miarę oddalania się frontu ścianowego od tego punktu wzrastają nieliniowo do wartości maksymalnej 65mm.
- Przemieszczenia poziome punktów znajdujących się wewnątrz obrysu parceli eksploatowanej ściany tj. 6, 14, 27, 39 posiadają wartości minimalne (ujemne) i maksymalne (dodatnie). Wartość minimalna zależy od położenia punktu względem początku parceli eksploatacyjnej d . Wraz ze wzrostem odległości d wzrasta wartość minimalnych przemieszczeń poziomych $u(\alpha)_{\min}$. Minimalne przemieszczenia poziome występują nie na linii frontu ściany, lecz są przesunięte w kierunku calizny (tabela 4). Z dalszym wzrostem odległości punktu od frontu ściany przemieszczenia poziome rosną i w pewnej odległości punktu pomiarowego od frontu ściany, przechodzą one w przemieszczenia poziome dodatnie i przy pełnym wybraniu osiągają wartości maksymalne.
- Przemieszczenie poziome punktu narożnego 47 jest inne niż opisywanych powyżej punktów pomiarowych. W miarę postępu frontu eksploatacyjnego przemieszczenia poziome nieliniowo maleją aż do osiągnięcia wartości minimalnej wynoszącej $u(\alpha)_{\min} = -215\text{mm}$.

W kolejnym etapie przeprowadzono analizę zachowania się punktów pomiarowych w sytuacji wyeksploatowania dwóch ścian 698 i 697 w pokładzie O/N (rys. 13). Ściana 697 charakteryzuje się długością 260m, wybiegiem 950m

i wysokością od 3,8m do 4,0m. Na rysunku 13 przedstawiono zmiany przemieszczeń poziomych $u(\alpha)$ i obniżień w wraz z postępowaniem frontu ścian 698 i 697 dla wybranych dwóch punktów pomiarowych 7n i 29. Punkty te wybrano z uwagi na bliskie położenie w stosunku do wspólnej krawędzi ścian 698 i 697. Przedstawiona analiza daje możliwość obserwacji zachowania się wybranych punktów przy eksploatacji dwóch równoległych ścian i analizy wpływu zruszenia górotworu na wartości przemieszczeń punktów.

Na rysunku 13, symbole na krzywych oznaczają lokalizację punktu w górotworze dla konkretnego etapu pomiaru, natomiast w dolnej części wykresu przedstawiono schematycznie linie oznaczające ściany 698 (pomiar od 0 do 15) i 697 (pomiar od 19 do 41) podane w skali 1:1000. Eksploatacja ściany 697 postępowała również z północy na południe. Dla przebiegu poszczególnych punktów pomiarowych (rys. 13) przeprowadzono dopasowanie, otrzymując zależności przemieszczenia poziomego $u(\alpha)$ i obniżenia w (tabela 6).

Przedstawione wyniki (rys. 14) wykazały znaczny wzrost wskaźników deformacji powierzchni terenu (przemieszczeń poziomych i obniżień) dla eksploatacji ściany 697 w porównaniu do pomierzonych wcześniej przemieszczeń wywołanych jedynie eksploatacją 698. Różnica ta jest spowodowana zwiększeniem wielkości powierzchni wyeksploatowanej, co spowodowało wzrost stanu naprężenia i odkształcenia w stropie pokładu O/N, a w konsekwencji doprowadziło do przekroczenia wytrzymałości mocnych pakietów skał stropowych i ich zniszczenia.



Rys. 13. Zmiany wektorów przemieszczeń wzdłuż przekroju pionowego dla różnych etapów eksploatacji ścian 698 i 697

Fig. 13. Vector displacement path for different longwall panels no. 698 and 697 stages

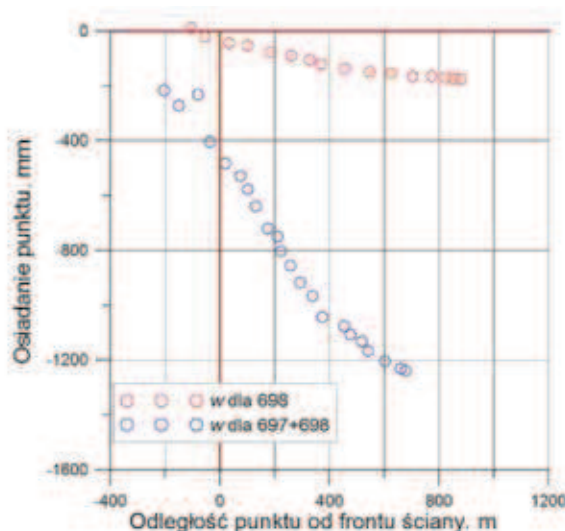
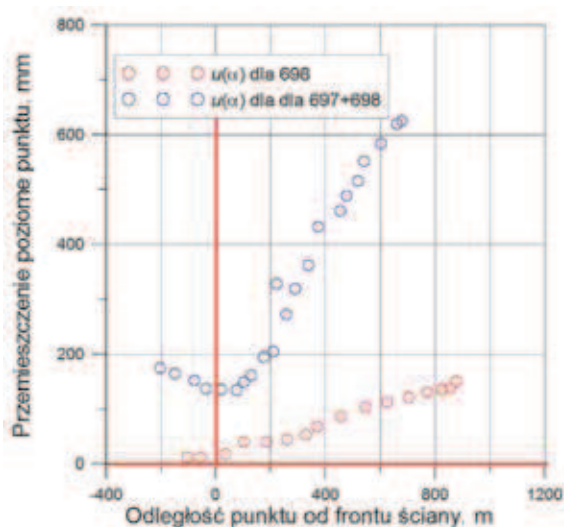
Tablica 6. Wzory zależności $u(\alpha)$ od w dla punktów pomiarowych
Table 6. Relationship between $u(\alpha)$ and w for measurement points

Położenie punktu względem eksploatowanej ściany	Dla eksploatacji ścianą 698	Dla eksploatacji ścianą 697
7 wewnątrz obrysu parceli eksploatowanej ściany	$u(\alpha) = -0.002w^2 - 0,46w$ dla $R^2 = 0.75$	$u(\alpha) = -0.0004w^2 - 0,14w$ dla $R^2 = 0.99$
29 wewnątrz obrysu parceli eksploatowanej ściany	$u(\alpha) = -0,54w$ dla $R^2 = 0.96$	$u(\alpha) = -0.0003w^2 - 0,69w$ dla $R^2 = 0.83$

Zmiany wartości przemieszczeń poziomych i obniżeń w zależności od postępu frontu dla punktów: 7 i 29 wywołanych eksploatacją ściany 698, następnie 697 oraz sumarycznych przedstawiono na rysunkach 13, 14, 15.

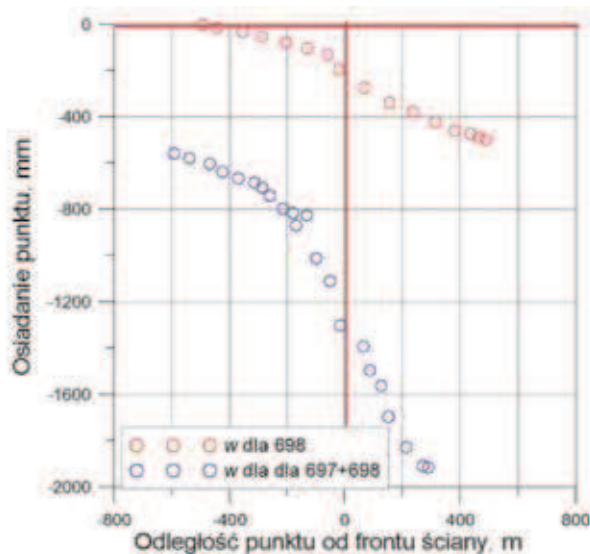
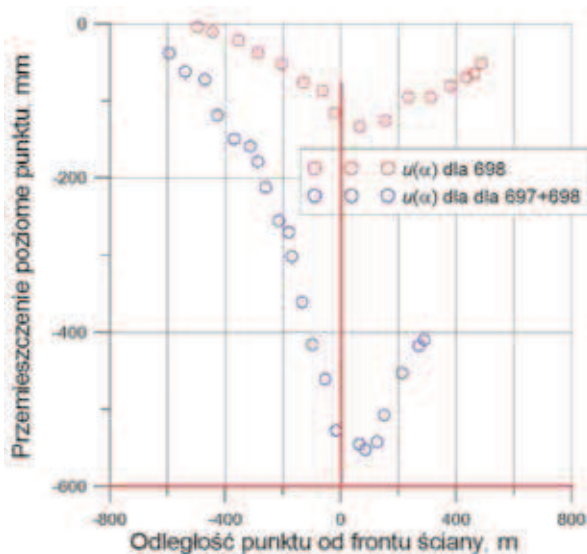
Różnice w pomierzonych wartościach przemieszczeń poziomych oraz obniżeń dla różnych etapów eksploatacji ściany 698, a następnie 697 są znaczne. Maksymalne wartości

przemieszczenia poziomego (moduł tej wartości) dla punktu 7 przy eksploatacji jedynie ściany 698 wynosi zaledwie 11% wartości maksymalnej przy eksploatacji sumarycznej 698 i 697. Natomiast obniżenia wynoszą 13%. Dla punktu 29 zmiany te są następujące: dla przemieszczeń poziomych wywołanych ścianą 698 wynoszą one 24% wartości końcowych przy eksploatacji ścian 698 i 697, natomiast obniżenia wy-



Rys. 14. Zmiany obniżeń i przemieszczeń poziomych punktu 7 przy postępującej eksploatacji ściany 698, 697 i sumarycznej eksploatacji 698+697

Fig. 14. Changes of subsidence and horizontal displacements for point 7 along with faces run no. 698 and 697



Rys. 15. Zmiany obniżeń i przemieszczeń poziomych punktu 29 przy postępującej eksploatacji ściany 698, 697 i sumarycznej eksploatacji 698+697

Fig. 15. Changes of subsidence and horizontal displacements for point 29 along with faces run no. 698 and 697

noszą 25%. Dla eksploatacji jedynie ściany 698 maksymalna pomierzona wartość przemieszczenia w punkcie 29 występuje, gdy ściana oddali się od punktu na odległość 110m.

3. Podsumowanie

Awierszyn [1] analizował przemieszczenia wybranych punktów powierzchni wraz z postępem frontu eksploatacji, prowadzonej na stosunkowo niedużych głębokościach przy nadkładzie nad eksploatowanym pokładem charakteryzującym się niskimi i średnimi parametrami wytrzymałościowymi. W wyniku tych prac uzyskał typową trajektorię przemieszczeń punktu pomiarowego nad wybraną ścianą w postaci przedstawionej na rys. 1. W pracy postawiono pytanie: czy podobne zmiany przemieszczeń powierzchni podczas rozwoju eksploatacji zachodzą, gdy eksploatowany pokład znajduje się w większej głębokości, a w nadkładzie zalegają warstwy skalne o średnich i wyższych parametrach wytrzymałościowych. W celu odpowiedzi na pytanie dokonano analizy przemieszczeń w wybranych dwóch głębokich kopalniach podczas prowadzenia eksploatacji ścianowej. Z przeprowadzonej analizy wynikają następujące wnioski ogólne:

- Punkty powierzchni terenu znajdujące się poza obrysem eksploatacji i gdy od nich front ścianowy się oddala, przemieszczają się w kierunku przestrzeni wybranej, zgodnie z przebiegiem części III trajektorii pokazanej na na rys. 1. Przemieszczenia poziome punktów znajdujących się poza obrysem eksploatowanej parceli w miarę oddalania się frontu ścianowego od tych punktów nieliniowo wzrastają od zera do wartości maksymalnej.
- Punkty powierzchni terenu znajdujące się poza obrysem eksploatacji i gdy do nich front ścianowy się przybliża, przemieszczają się w kierunku przestrzeni wybranej, zgodnie z przebiegiem części I trajektorii pokazanej na rys. 1.
- Punkty powierzchni terenu znajdujące się nad eksploatowanym polem ulegają przemieszczeniu po trajektoriach zbliżonych do paraboli (z niedużym odcinkiem prostej) i jakościowo ich zachowanie zgodne jest z opisem podanym przez Awierszyna dotyczącym części I, II, III. Natomiast w odróżnieniu od prognozy Awierszyna (rys. 1) trajektorie tych punktów praktycznie nie mają części IV. Punkty powierzchni terenu znajdujące się nad wybraną parcelą przed czołem ściany w pierwszym okresie przemieszczają się przeciwnie do kierunku postępu czoła ściany (część I na rys. 1), a następnie, gdy czoło ściany znajduje się bezpośrednio pod danym punktem, ulegają obniżeniom (część II na rys. 1). Po przejściu czoła ściany pod danym punktem on nadal osiada i dopiero gdy czoło ściany znajdzie się w pewnej odległości od rozpatry-

wanego punktu, ten punkt zaczyna się przemieszczać zgodnie z kierunkiem postępu czoła ściany (część III na rys. 1). Zatem reakcja punktu na przemieszczające się czoło przodka nie jest natychmiastowa, jak przewidywał Awierszyn, lecz przejście do części III trajektorii zachodzi z pewnym opóźnieniem, wynoszącym od kilku metrów nawet do 200m. To zachowanie jest spowodowane dużą głębokością eksploatacji oraz budową nadkładu, który w znacznej części składa się z mocnych i wytrzymałych skał.

- Przemieszczenia poziome punktów znajdujących się wewnątrz obrysu parceli nad eksploatowaną ścianą posiadają wartości minimalne (ujemne) i maksymalne (dodatnie). Wartość minimalna zależy od położenia punktu względem początku parceli eksploatacyjnej d . Wraz ze wzrostem odległości d wzrasta wartość minimalnych przemieszczeń poziomych $u(\alpha)_{\min}$. Minimalne przemieszczenia poziome występują nie na froncie ściany, lecz są przesunięte w kierunku calizny. To przesunięcie może wynosić od kilkudziesięciu, nawet do ponad 100m. Z dalszym wzrostem odległości punktu od frontu ściany przemieszczenia poziome rosną i w pewnej odległości punktu pomiarowego od frontu ściany, przechodzą w przemieszczenia poziome dodatnie i przy pełnym wybraniu osiągają wartości maksymalne.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji Nr. DEC – 2011/01/D/ST8/07280

Literatura

1. *Awierszyn S.G.*: Sdwiżeniye gornych parod pri podziemnykh razrabotkach, Ugletiechizdat, Moskwa 1948.
2. *Bräuner G.*: Gebirgsdruck und Gebirgsschläge. Verlag Glückauf, Essen 1981.
3. *Hegemann M.*: Ein Betrag zur Vorasuberechnung horizontaler Bodenbewegungen im Steinkohlenbergbau. Dissertation Heft 2003-2. Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bdergakademie Freiberg. Verlag Glückauf GmbH Essen 2003.
4. *Sroka A.*: Pomiary przemieszczeń punktów powierzchni z zastosowaniem techniki satelitarnej GPS przy eksploatacji ściany zwrotnej. Materiały Szkoły Eksploatacji Podziemnej 2000, IGSMiE PAN Kraków, s. 361-370, 21-22 lutego 2010, Szczyrk 2000.
5. *Tajduś K.*: Analysis of horizontal displacements measured over the mining operations in longwall No. 537 at the Girondelle 5 seam of the BW Friedrich Heinrich-Rheinland coal mine. Archives of Mining Sciences (*przyjęty do druku*).
6. *Tajduś K.*: Mining-induced surface horizontal displacement: The case of BW Prosper Haniel mine. Archives of Mining Sciences, 2013, ISSN 0860-7001, Volume 58, nr. 4, pp. 1037-1055.