

# Przemieszczenia poziome powierzchni terenu wywołane podziemną eksploatacją górnictw – teoria i praktyka

KRZYSZTOF TAJDUŚ, ANTON SROKA, RAFAŁ MISA

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

## Streszczenie

W artykule przedstawiono stan wiedzy na temat obliczania wartości przemieszczeń poziomych wywołanych podziemną eksploatacją górnictw tzw. metodami geometryczno-całkowymi. W ramach artykułu przedstawiono także wyniki pomiarów przemieszczeń poziomych punktów terenu za pomocą techniki GPS na przykładzie eksploatacji ściany zwrotnej.

Słowa kluczowe: przemieszczenia poziome, metoda punktu środka ciężkości, hipoteza Awierszyna

## 1. Teorie przemieszczeń poziomych

Od czasu pierwszych badań nad zagadnieniem wpływu eksploatacji na górotwór oraz powierzchnię terenu wielu badaczy starało się 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. Porównując maksymalne wartości pomierzonych przemieszczeń poziomych  $u_{\max}$  z maksymalnymi wartościami osiadania  $w_{\max}$ , dla niecki pełnej określono, że ich stosunek leży w zakresie wartości:

$$0,3 \leq \frac{u_{\max}}{w_{\max}} \leq 0,6$$

i zależy od szeregu czynników m.in. od budowy geologicznej skał nadległego górotworu, głębokości eksploatacji i ilości wcześniej wyeksploatowanych pokładów.

## 2. Metody wyznaczania przemieszczenia poziomego zakładające przemieszczenie się punktów powierzchni w kierunku środka ciężkości wybranej części pokładu

Keinhorst (1925), jako jeden z pierwszych przedstawił rozważania na temat obliczania wartości poziomych przemieszczeń punktów spowodowanych eksploatacją górnictw złóż pokładowych. Przyjął on następujące założenie:

$$u = \operatorname{tg} \mu \cdot w \quad (1)$$

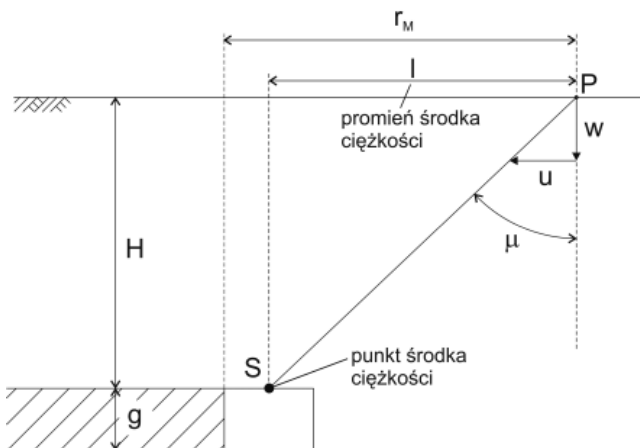
gdzie:

$\mu$  – kąt zawarty pomiędzy prostą pionową przechodzącą przez punkt znajdujący się na powierzchni terenu, a prostą łączącą go ze środkiem tej części eksploatacji, która na ten punkt oddziałuje (rys. 1). Rzut poziomy odcinka łączącego punkt obliczeniowy  $P$  z punktem środka ciężkości  $S$

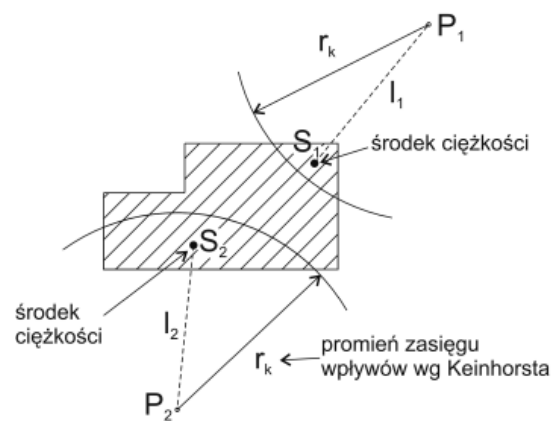
został nazwany „promieniem środka ciężkości”. Użyte na rys. 1 i rys. 2 oznaczenia mają następujące znaczenie:

- $l$  – długość odcinka rzutu poziomego od punktu  $P$  do  $S$  środka ciężkości,
- $H$  – głębokość eksploatacji,
- $g$  – grubość eksploatacji pokładu,
- $r_M$  – promień zasięgu wpływu eksploatacji górniczej zależny od metody obliczeniowej,
- $w$  – osiadanie punktu  $P$ ,
- $u$  – przemieszczenie poziome punktu  $P$ ,
- $S$  – punkt środka ciężkości eksploatacji wpływającej na osiadanie punktu  $P$ .

Z rys. 2 wynika, że w zależności od położenia punktów obliczeniowych zmienia się również „środek ciężkości” eksploatacji oddziałującej na ten punkt.



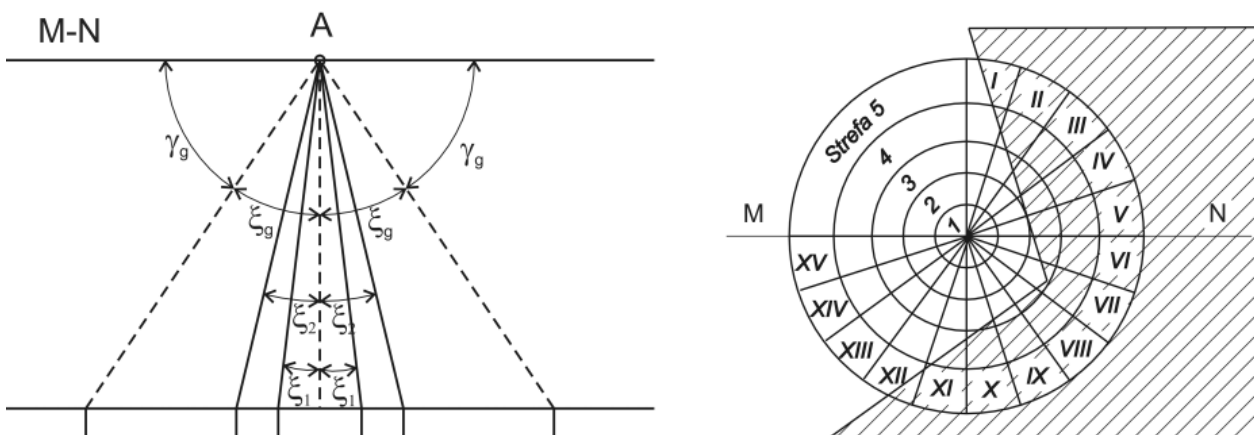
Rys. 1. Przesunięcie poziome punktu  $P$  wg teorii Keinhorsta przy eksploatacji elementarnej



Rys. 2. Rzut poziomy środka ciężkości wg teorii Keinhorsta przy eksploatacji pola o dowolnym kształcie

Z rysunku 2 można także wnioskować, że problemem jest także ocena położenia punktu środka ciężkości wpływów eksploatacji dla poszczególnych punktów obliczeniowych.

Dalszy rozwój metody Keinhorsta związany jest z rozwojem metod obliczania osiadania punktu za pomocą graficznego całkowania na podstawie siatek segmentów. Należy tu wymienić przede wszystkim pierwszą podstawową dla metod geometryczno-całkowych metodę Balsa (rys. 3) oraz późniejsze metody Beyera i Sanna.



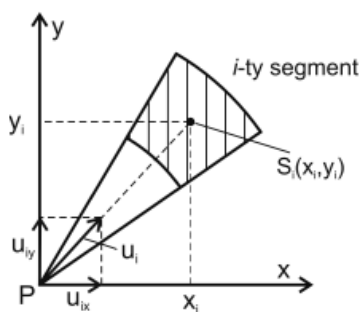
Rys. 3. Siatka segmentów do obliczeń osiadań wg metody Balsa

Siatkę segmentów otrzymuje się dzieląc określony kątem zasięgu wpływów  $\gamma_g$  obszar, w którym prowadzenie eksploatacji oddziałują na punkt  $A$ , na szereg segmentów tak (rys. 3), by wybranie złoża w każdym z nich powodowało jednakowe obniżenie punktu  $A$ .

W przypadku podzielenia obszaru wpływów na 100 segmentów wybranie pokładu w każdym segmencie powoduje obniżenie punktu  $A$ , którego wartość wynosi 1% maksymalnego osiadania  $w_{\max} = a \cdot g$ .

Dalsze prace Balsa (1931/32) oraz Lehmana, Neuberta i Schafsteina (1942), z wykorzystaniem założenia punktu środka ciężkości Keinhorsta, pozwalały na obliczanie wartości przemieszczenia poziomego dowolnego punktu.

Zakładając, że początek układu współrzędnych  $(x,y)$  znajduje się w punkcie obliczeniowym otrzymamy wzory na składowe przesunięcia  $u_{ix}$  oraz  $u_{iy}$  w kierunku osi układu współrzędnych wywołane wybraniem obszaru  $i$ -tego segmentu, którego środek ciężkości  $S_i$  ma współrzędne  $x_i, y_i$  (rys. 4).



Rys. 4. Składowe przesunięcia  $u_{ix}$  oraz  $u_{iy}$  w kierunku osi układu współrzędnych wywołane wybraniem pokładu w obszarze  $i$ -tego segmentu, którego środek ciężkości  $S_i$  ma współrzędne  $x_i, y_i$

$$u_{ix} = \frac{u_i}{l_i} x_i, \quad u_{iy} = \frac{u_i}{l_i} y_i$$

$$l_i = \sqrt{x_i^2 + y_i^2}$$

$$u_i = w_i \frac{l_i}{H}, \quad w_i = \frac{a \cdot g}{N} = \text{const}$$

gdzie:

$l_i$  – promień środka ciężkości  $S_i$  obszaru  $i$ -tego segmentu,

$u_i$  – przesunięcie poziome w kierunku  $S_i$  wywołane wybraniem pojedynczego segmentu pokładu,

$N$  – ilość wszystkich segmentów siatki.

Całkowite przemieszczenia poziome punktu uzyskiwało się poprzez uwzględnienie segmentów, które pokrywają się z powierzchnią wybraną.

Wartości całkowite przemieszczeń poziomych obliczono wg wzorów:

$$u_x = \sum_{i=1}^{i=n} u_{ix}, \quad u_y = \sum_{i=1}^{i=n} u_{iy}$$

gdzie:  $n$  – ilość segmentów eksploatacyjnych.

Wartość maksymalną przesunięcia poziomego uzyskuje się z wzoru:

$$u_{\max} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2}$$

a jego kierunek z wzoru:

$$\phi = \text{arctg} \frac{u_y}{u_x}$$

Jak widać obliczenia te były bardzo żmudne i pracochłonne.

Niemieckie metody obliczania osiadania wg Keinhorsta, Balsa, Sanna, Beyera i tzw. metoda Ruhrkohle 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. Stosując metodę Keinhorsta uzyskano wzory na maksymalną wartość przemieszczenia poziomego dla tzw. nieskończonej półpłaszczyzny o postaci ogólnej:

$$u_{\max} = c_m \cdot a \cdot g \cdot \operatorname{ctg} \gamma_m \quad (3)$$

gdzie:

- $c_m$  – stała zależna od metody obliczeniowej, (wartości współczynników  $c_m$  są podane w tabeli 1),
- $a$  – tzw. współczynnik osiadania,
- $g$  – grubość pokładu,
- $\gamma_m$  – 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

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

Obliczone wg wzoru ogólnego (1) maksymalne wartości przemieszczeń poziomych są jednak wiele mniejsze (ok. 5÷7 razy) od wartości obserwowanych *in situ*. Z tego powodu przyjęto w metodzie Ruhrkohle stosowanej od roku 1961 w Niemczech założenie w postaci podanej przez Budryka (1953).

Zastosowanie teorii środka ciężkości Keinhorsta dla tzw. eksploatacji elementarnej prowadzi dla wersji dwuwymiarowej teorii Knothego do rozwiązania:

$$u(x) = -\frac{1}{2\pi} \operatorname{ctg} \beta \cdot a \cdot g \cdot \exp\left(-\pi \frac{(x+p)^2}{r^2}\right) \quad (4)$$

$$\text{oraz } u_{\max} = 0,159 \operatorname{ctg} \beta \cdot a \cdot g \quad \text{dla } x = -p$$

gdzie:

- $p$  – obrzeże eksploatacyjne,
- $\beta$  – kąt zasięgu wpływów głównych.

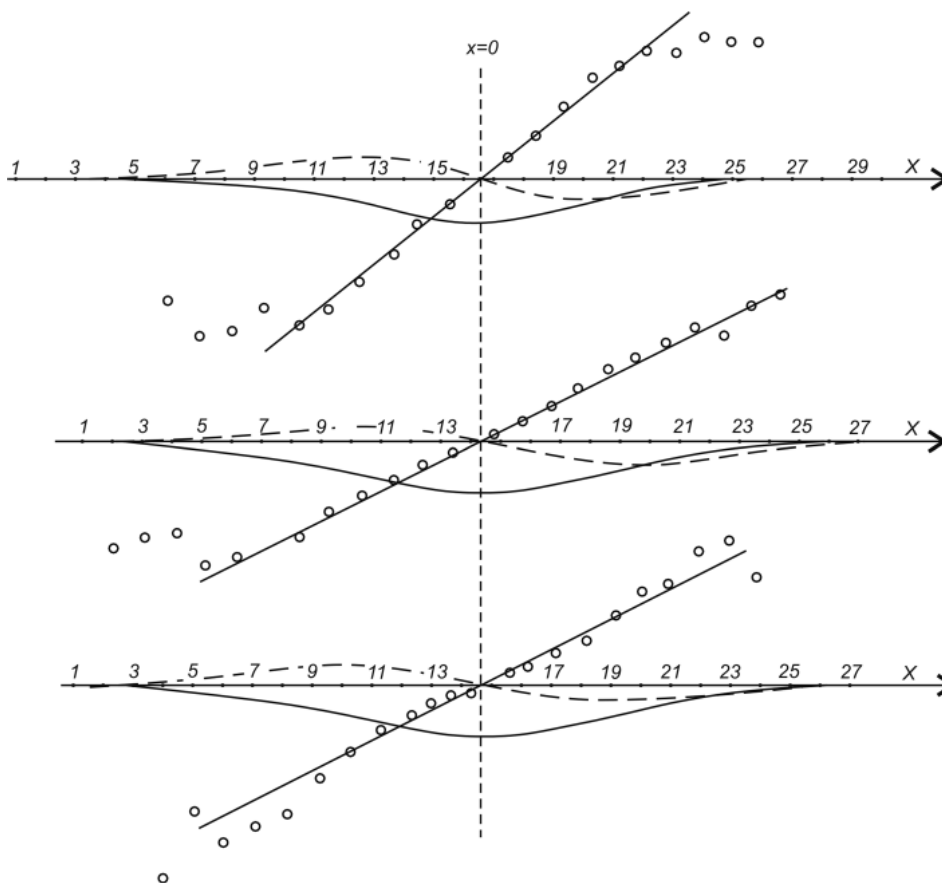
Wynik ten także prowadzi do wartości obliczeniowych znacznie mniejszych (ok. 5-7) od wartości obserwowanych.

Wypada tu wspomnieć, że założenie o istnieniu punktu działania środka ciężkości przyjął również Sałustowicz (1955) w celu rozwiązania problemu przemieszczenia i odkształcenia górotworu w sąsiedztwie eksploatacji górniczej. Następnie prace nad tym tematem przeprowadzał Kowalczyk (1972), który wprowadził podział na nieckę pełną (jeden punkt o maksymalnym obniżeniu) i nieckę zupełną (wiele punktów o maksymalnym obniżeniu). Metodę opartą na założeniu istnienia punktu środka ciężkości rozwinął w dalszej kolejności Kwinta (2003), gdzie bazując na analizie wektorów przemieszczeń poziomych w stanach niestacjonarnych z uwzględnieniem elipsy błędów stwierdził, że nie istnieje pojedynczy (w sensie otoczeniowym) punkt środka ciężkości dla skończonego pola eksploatacji górniczej (otrzymano zbiór punktów).

### 3. Metody wyznaczania przemieszczeń poziomych oparte o zależności między wartościami przemieszczenia pionowego i poziomego punktu

Wyniki prowadzonych w Instytucie Mechaniki Górotworu PAN w latach 60-tych (Krzysztoń, 1965) badań modelowych w ośrodku sypkim przedstawiono na rys. 5.

Rysunek ten przedstawia pole przemieszczeń charakterystycznych dla tzw. wysypu elementarnego (wysypu szczelinowego).



Rys. 5. Rozkłady osiadania  $w(x)$ , przemieszczenia poziomego  $u(x)$  oraz ich wzajemnego stosunku  $\frac{u(x)}{w(x)}$  dla wysypu elementarnego (Krzysztoń, 1965)

Przyjmując, że stosunek ten jest funkcją liniową:

$$\frac{u(x)}{w(x)} = \alpha \cdot x \quad (5)$$

gdzie  $x$  jest odległością poziomą od wysypu, otrzymamy, że rozkład przemieszczeń poziomych dla wysypu elementarnego można opisać funkcją:

$$u(x) = \alpha \cdot x \cdot w(x) \quad (6)$$

Zakładając, że niecka elementarna opisana jest wzorem 7:

$$w(x) = w_{\max} \cdot \exp\left(-\pi \frac{x^2}{r^2}\right) \quad (7)$$

otrzymamy rozkład przemieszczeń poziomych w niecce elementarnej:

$$u(x) = \alpha \cdot x \cdot w_{\max} \cdot \exp\left(-\pi \frac{x^2}{r^2}\right) \quad (8)$$

gdzie:  $w_{\max}$  – maksymalna wartość osiadania w niecce elementarnej.

Awierszyn (1947) 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 9).

$$u(x) = -B \cdot T(x) = -B \frac{dw(x)}{dx} \quad (9)$$

gdzie:

$B$  – współczynnik przemieszczenia (względnie współczynnik odkształcenia poziomego) zależny od głębokości eksploatacji,

$T(x)$  – nachylenie niecki elementarnej.

Różniczkując równanie (7) otrzymujemy  $T(x)$ :

$$T(x) = \frac{dw(x)}{dx} = 2\pi \frac{x}{r^2} w_{\max} \cdot \exp\left(-\pi \frac{x^2}{r^2}\right) \quad (10)$$

i przyjmując hipotezę Awierszyna (9):

$$u(x) = B \cdot 2\pi \frac{x}{r^2} w_{\max} \cdot \exp\left(-\pi \frac{x^2}{r^2}\right) \quad (11)$$

Porównując wzór (8) wynikający z badań Krzysztoń ze wzorem wynikającym z hipotezy Awierszyna (11) otrzymamy, że zależności te różnią się od siebie zasadniczo przyjętymi współczynnikami. Z porównania otrzymamy:

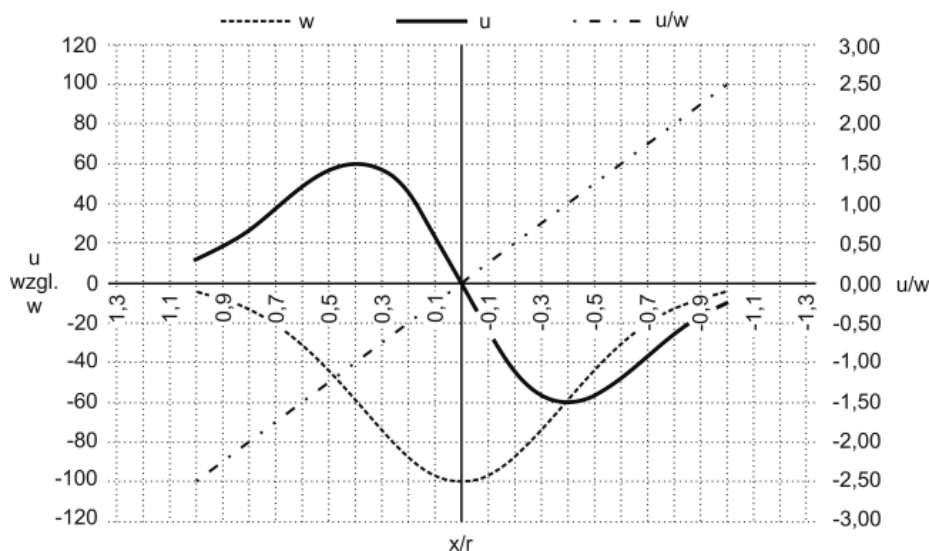
$$\alpha = B \cdot \frac{2\pi}{r^2} \quad (12)$$

oraz

$$B = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot r^2 = \frac{\alpha}{2\pi} \cdot H^2 \cdot \operatorname{ctg}^2 \beta \quad (13)$$

Reasumując należy stwierdzić, że zarówno teoria punktu środka ciężkości Keinhorsta, hipoteza Awierszyna oraz wyniki badań w IMG PAN w Krakowie wskazują na fakt proporcjonalności pomiędzy wektorami przemieszczenia poziomego a wektorami nachylenia profilu niecki osiadania. Różnią się one natomiast wartościami współczynników tej proporcjonalności.

Z porównania przebiegu  $u$ ,  $w$  oraz  $u/w$  dla stosowanego w wzorach teorii Knothego wartości współczynnika proporcjonalności  $B$  wynika, że od pewnej odległości od eksploatacji przemieszczenia poziome zaczynają przyjmować większe wartości jak osiadania (rys. 6). Dla niecki elementarnej jest to charakterystyczne dla odległości  $x/r > 0,4$  od wysypu elementarnego. Wyniki te potwierdzają pomiary wykonywane technologią GPS (patrz tabela 2).



Rys. 6. Teoretyczne rozkłady wartości osiadania i przemieszczenia poziomego punktów oraz ich stosunku  $u/w$  dla wysypu elementarnego wg teorii Knothego (Sroka, 1995)

We wzorach na obliczanie wartości przemieszczenia poziomego występuje współczynnik  $B$ . Wartość tego współczynnika  $B$  była przedmiotem wielu analiz. Awierszyn podał, że współczynnik  $B$  mieści się w przedziale  $B = (0,15 \div 0,18)H$ , natomiast Akimow (Praca Zbiorowa 1980) stwierdził, że  $B$  zależy od miąższości luźnego nadkładu (trzecio- i czwartorzędowego). Przedziały wartości współczynnika  $B$  podali również dla warunków chińskich Xueyi Yu i Niedbalski (1998), uzyskując  $B = (0,20 \div 0,40)r$ , oraz Sroka dla warunków Zagłębia Ruhry  $B = (0,15 \div 0,70)r$ .

Budryk w swojej pracy z 1953 roku przyjmuje za Litwiniszynem, że wartość  $B$  może być opisana następującym wzorem:

$$B = \frac{c}{\operatorname{tg}^2 \beta} \cdot H \quad (14)$$

gdzie:

- $c$  – stała,
- $H$  – głębokość eksploatacji,
- $\beta$  – kąt zasięgu wpływów głównych.

Dla pokładów poziomych wartość stałej  $c$  według Litwiniszyna wynosi w przybliżeniu  $c = 1,0$ .

Zakładając proporcjonalności pomiędzy wartością maksymalnego nachylenia profilu niecki osiadania  $T_{\max}$ , a wartością maksymalnego odkształcenia poziomego  $\varepsilon_{\max}$  równą  $\varepsilon_{\max} = 0,6 \cdot T_{\max}$  Budryk podał wzór ogólny na wartość współczynnika przemieszczenia poziomego o postaci:

$$B = \frac{r}{\sqrt{2\pi}} = 0,40 \cdot r \quad (15)$$

W późniejszym czasie podstawowe badania z zakresu kształtowania się wartości współczynnika  $B$  prowadzili Popiołek i Ostrowski (m.in. 1978).

Praca ta jest szczególnie ważna, ponieważ zawarte w niej wyniki stanowią do dziś podstawę obliczeń prognostycznych w górnictwie polskim.

Uzyskana na drodze analizy wyników pomiarów *in situ* zależność regresyjna jest następująca:

$$B = 0,156 \cdot H + 53,7 u_{\max} - 17,1 w_{\max} \quad (16)$$

Ponieważ jednak zachodzi zależność:

$$u_{\max} = B \cdot T_{\max}$$

wzór ten można przekształcić do postaci:

$$B = \frac{0,156 \cdot H - 17,1 w_{\max}}{1 - 53,7 \cdot T_{\max}} \quad (17)$$

Z powyższego wynika, że wartość współczynnika proporcjonalności  $B$  jest zależna od głębokości zalegania pokładu  $H$ , maksymalnej wartości osiadania ( $w_{\max} = a \cdot g$ ) oraz proporcjonalna do maksymalnej wartości nachylenia profilu niecki osiadania  $T_{\max}$ .

W literaturze preferowana jest ogólna postać zależności pomiędzy współczynnikiem  $B$ , a promieniem zasięgu wpływów głównych  $r$  postaci

$$B = k \cdot r \quad (18)$$

gdzie:  $k$  – pewny współczynnik.

Wartość współczynnika  $k$  jest zależna od stosunku głębokości do wartości osiadania maksymalnego ( $\lambda$ ) oraz od wartości kąta zasięgu wpływów głównych  $\beta$  (Knothe, Sroka 2010).

Popiołek i Ostrowski (1981) zaproponowali uproszczenie otrzymanego przez siebie wzoru regresyjnego do postaci (19)

$$B = 0,16H \quad (19)$$

i przyjmując, że średnia wartość  $\operatorname{tg}\beta$  dla rejonu Śląska wynosi 2, otrzymali wzór (20)

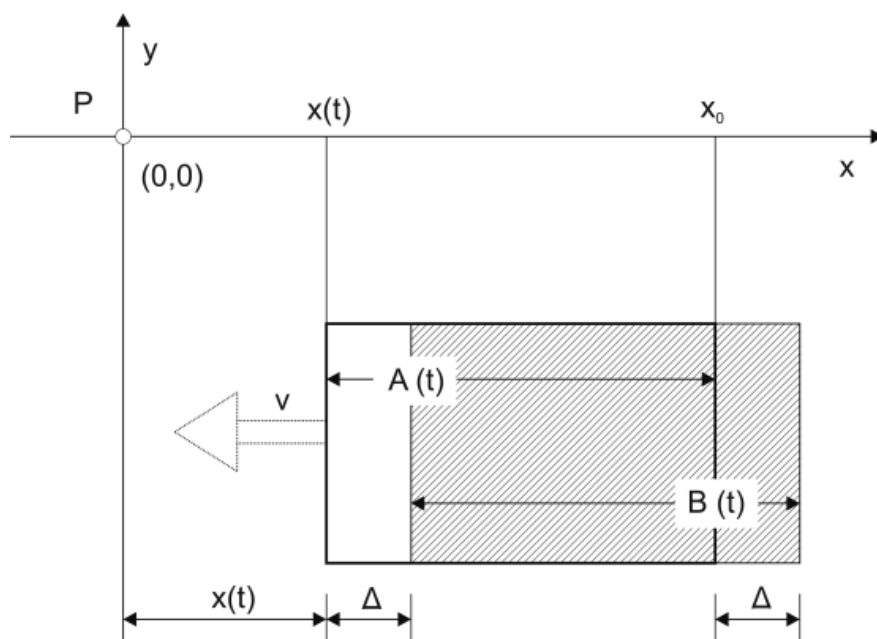
$$B = 0,32r \quad (20)$$

który jest podstawą prowadzonych aktualnie obliczeń prognostycznych w górnictwie polskim.

Niemiec i Radoła (1981) zaproponowali przyjęcie wartości współczynnika  $B$  dla stanów asymptotycznych równe  $B = 0,37r$ , natomiast Szpetkowski (1995) podał zależność  $B = 0,8 \cdot H \cdot \operatorname{ctg}^2\beta$ .

Inne podejście do problemu określania współczynnika  $B$  podał Niedojadało (1984), stwierdzając że wartość współczynnika proporcjonalności  $B$  jest zależna od położenia danego punktu w stosunku do pola eksploatacji i sposobu prowadzenia eksploatacji górniczej.

Dla tzw. modelu eksploatacji ścianowej, przy założeniu stałej prędkości postępu frontu eksploatacyjnego opracowano na bazie teorii Knothego wzory na obliczenie rozkładu osiadania i przemieszczenia poziomego w czasie. Dla uproszczenia przyjęto, że punkt obliczeniowy znajduje się w początku układu współrzędnych (rys. 7)



Rys. 7. Schemat obliczania deformacji powierzchni dla eksploatacji ścianowej przy założeniu stałej prędkości postępu frontu w czasie (Sroka, 1978)

Dla założenia:

$$\dot{w}(t) = \frac{\partial w(t)}{\partial t} = c[w_k(t) - w(t)] \quad (21)$$

gdzie:

$\dot{w}(t)$  – prędkość osiadania punktu w momencie  $t$ ,

$c$  – tzw. współczynnik czasu, (współczynnik własności górotworu opóźniających przebieg obniżień w czasie),

$w_k(t)$  – osiadanie końcowe charakterystyczne dla eksploatacji dokonanej do momentu  $t$ ,

$w(t)$  – osiadanie rzeczywiste w momencie  $t$ , oraz

przyjmując, że wielkość  $w_k(t)$  opisana jest za pomocą teorii Knothego, uzyskano następujące rozwiązanie opisujące przebieg osiadania punktu w czasie:

– dla czasu eksploatacji  $0 < t \leq T_c$ :

$$w(t) = w_k(A(t)) - \exp\left(\frac{u^2}{4\pi}\right) \exp\left(u \frac{x(t)}{r}\right) w_k(B(t)) \quad (22)$$



– dla czasu po zakończeniu eksploatacji górnictw  $t > T$ :

$$w(\Delta t) = w(T_c) + [w_k(T_c) - w(T_c)][1 - \exp(-c \cdot \Delta t)] \quad (23)$$

gdzie:

$$u = \frac{cr}{v}; \quad \Delta = \frac{ru}{2\pi}; \quad \Delta t = t - T$$

$T_c$  – moment zakończenia eksploatacji.

Dla wskaźnika przemieszczenia poziomego uzyskamy:

– dla  $0 < t \leq T_c$ :

$$u_x(t) = -B \left[ T_{x,k}(A(t)) - f\left(\frac{x(t)}{r}, u\right) \cdot T_{x,k}(B(t)) - f'_x\left(\frac{x(t)}{r}, u\right) \cdot w_k(B(t)) \right] \quad (24)$$

gdzie:

$A(t)$  – pole dokonanej rzeczywistej eksploatacji do czasu  $t$

$B(t)$  – pole pozorne powstałe przez przesunięcie pola  $A(t)$  o wartość  $\Delta$

$$f(x) = \exp\left(\frac{u^2}{4\pi}\right) \exp\left(u \frac{x(t)}{r}\right) = f\left(\frac{x(t)}{r}, u\right)$$

$$f'_x = \frac{df(x)}{dx}$$

$$u_y(t) = -B \left[ T_{y,k}(A(t)) - f\left(\frac{x(t)}{r}, u\right) \cdot T_{y,k}(B(t)) \right] \quad (25)$$

– dla  $t > T$ :

$$u_x(\Delta t) = u_x(T) + [u_{x,k}(T) - u_x(T)] \cdot [1 - \exp(-c \cdot \Delta t)] \quad (26)$$

$$u_y(\Delta t) = u_y(T) + [u_{y,k}(T) - u_y(T)] \cdot [1 - \exp(-c \cdot \Delta t)] \quad (27)$$

gdzie:

$$u_{x,k}(T) = -B \cdot T_{x,k}(T)$$

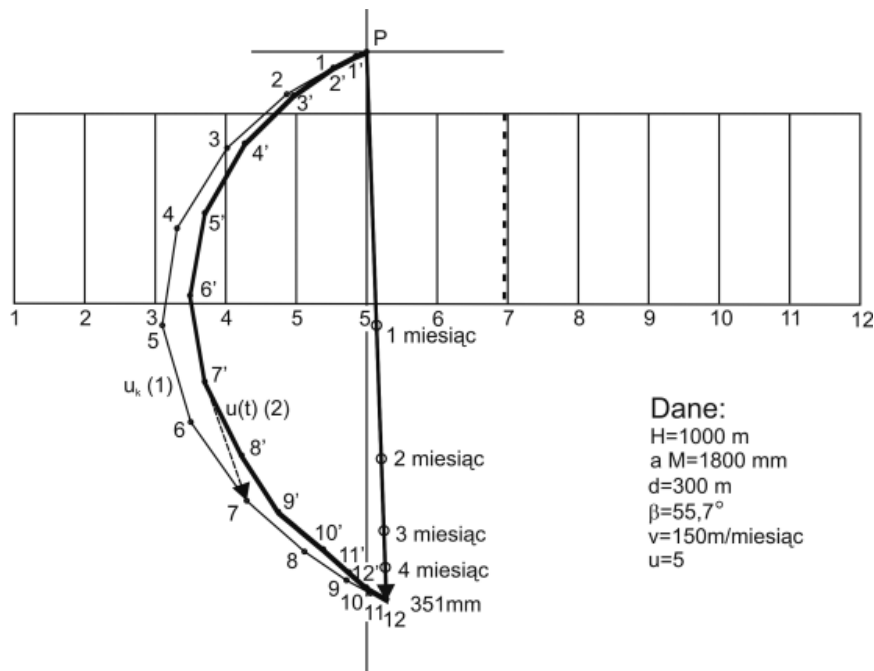
$$u_{y,k}(T) = -B \cdot T_{y,k}(T)$$

Dla rozwiązania dotyczącego przykładu przemieszczeń poziomych przedstawionego powyżej, wykonano obliczenia symulacyjne a ich wyniki ukazane są na rys. 8. Schemat przedstawia dwa przebiegi, gdzie przebieg 1-12 jest przebiegiem wartości końcowych przemieszczenia poziomego dla poszczególnych stanów eksploatacji górnictw, tzn. przy przyjęciu, że górotwór nie posiada żadnych właściwości opóźniających ( $c = \infty$ ), natomiast przebieg 1'-12' uwzględnia opóźniające własności górotworu ( $u = 5$ , więc  $c = 5 \frac{v}{r}$ ). I tak, kończąc przykładowo eksploatację po 7 miesiącach, punkt obliczeniowy  $P$  przemieściłby się z pozycji 7' do pozycji 7.

Dla założenia, że pole eksploatacyjne zostało wybrane w jednej chwili otrzymalibyśmy, jako wektor przemieszczenia poziomego wektor łączący punkt  $P$  z punktem 12, przy czym na rysunku 8 pokazano wartości przemieszczeń po 1, 2, 3 i 4 miesiącach po zakończeniu eksploatacji górnictw oraz długość końcową wektora przemieszczeń poziomych.

Z innych teorii opisujących deformacje powierzchni wywołanych podziemną eksploatacją górnictw na uwagę zasługuje teoria Kochmańskiego. W teorii tej niezależnie opisano przemieszczenia pionowe i poziome, poprzez zastosowanie tzw. funkcji szczelinowości. Metoda ta sprowadza się do hipotezy Awierszyna, podobnie jak hipoteza Dymka (1978) bazująca na rozwiązaniu stanu naprężenia i przemieszczenia w półpłaszczyźnie sprężystej.

Do opracowania wiarygodnego modelu przemieszczeń poziomych konieczna jest możliwość porównania wyników teoretycznych z wynikami pomiarów terenowych. Dotychczasowe ograniczenia takich



Rys. 8. Teoretyczne przemieszczenie poziome opracowane na bazie teorii Knothe'go dla eksploatacji ścianowej przy założeniu stałej prędkości postępu frontu w czasie

możliwość zmniejsza stosowanie technik pomiarów satelitarnych zwiększając ich dokładność i wyraźnie zmniejszając ich pracochłonność. Przykładem mogą być pomiary przeprowadzone na kopalni BW Niederberg w Niemczech.

#### 4. Eksploatacja kopalni BW Niederberg, pokład Finefrau, ściana nr 236

Kopalnia BW Niederberg rozpoczęła eksploatację węgla kamiennego na głębokości  $H = 850$  m w pokładzie w ścianie 236 w listopadzie 1996 r. Ze względu na powierzchnię terenu oraz znajdujące się tam skrzyżowanie autostrady ograniczono średnią miąższość eksploatacji do wartości  $g = 1,0$  m. Zastosowano nietypowy system eksploatacji ścianą zwrotną.

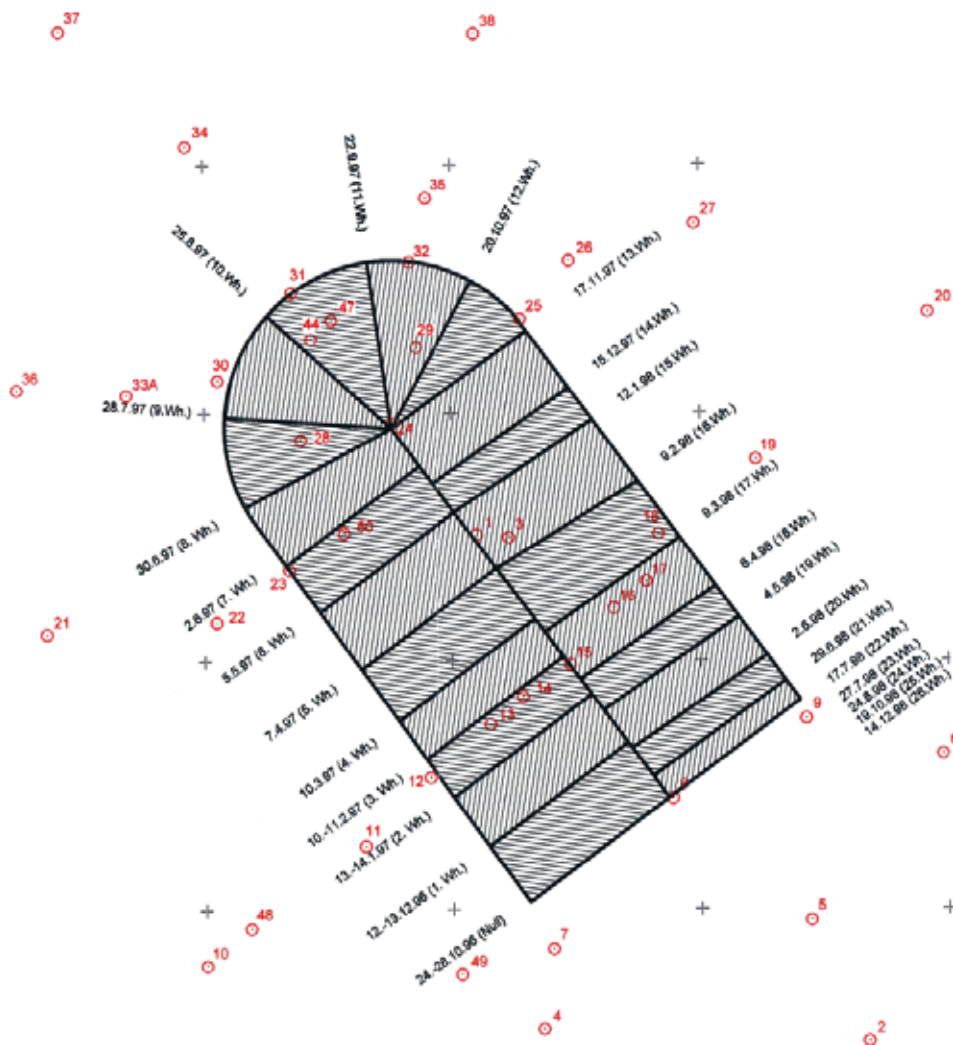
Na powierzchni terenu przeprowadzono pomiary przemieszczeń poziomych oraz obniżen za pomocą systemu GPS dla 50 punktów rozproszonych.

Pomiary prowadzono w określonych przedziałach czasowych ustalonych dla różnych położen ściany w pokładzie. Przeprowadzono 26 cykli pomiarowych. Wyniki uzyskane dla przemieszczeń pionowych i poziomych przedstawiono na poszczególnych kartach pomiarowych. W artykule przedstawiono przemieszczenia poziome i obniżenia dla przykładowych czterech punktów pomiarowych nr 8, 23, 24 i 31.

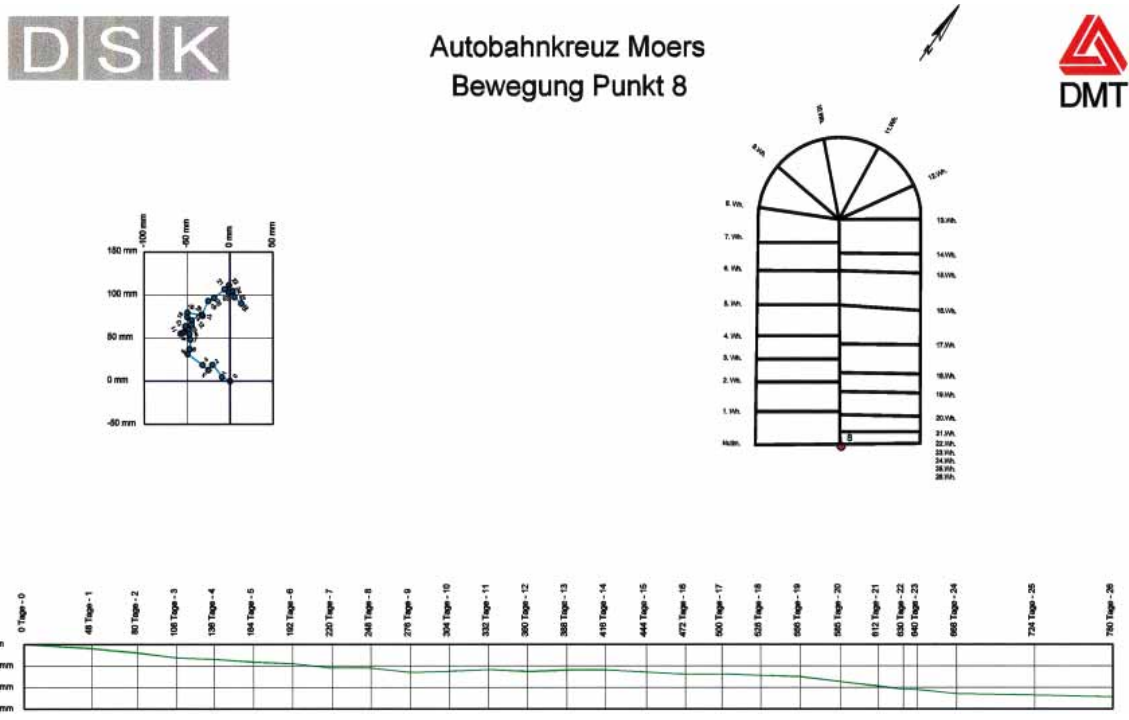
Położenia przykładowych punktów pomiarowych w stosunku do eksploatacji przedstawiają rysunki 10, 11, 12, 13 natomiast wartości końcowych deformacji przedstawia tabela nr 2.

Tab. 2. Wartości końcowego obniżenia i przemieszczenia poziomego dla wybranych punktów powierzchni terenu

Nr punktu pomiarowego	Wartość końcowego obniżenia w [mm]	Wartość końcowego przemieszczenia poziomego u [mm]
8	240	91
23	286	391
2	827	138
25	257	415



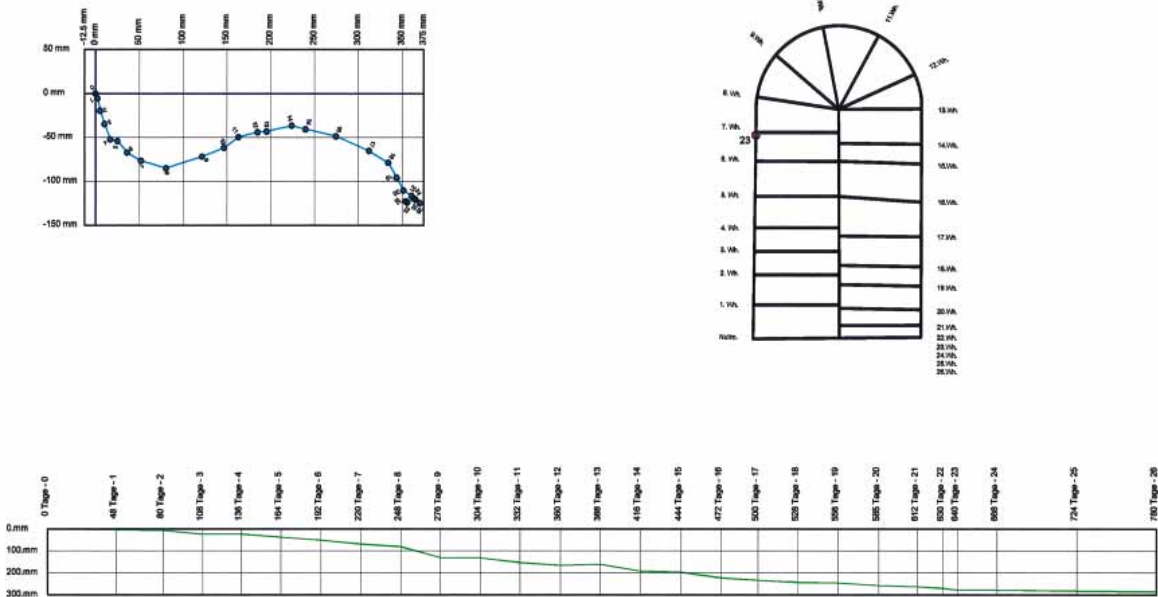
Rys. 9. Eksploatowana ściana 236 wraz z punktami pomiarowymi GPS powierzchni terenu



Rys. 10. Wykres przemieszczeń poziomych oraz obniżeń dla punktu pomiarowego nr 8, w poszczególnych fazach eksploatacji



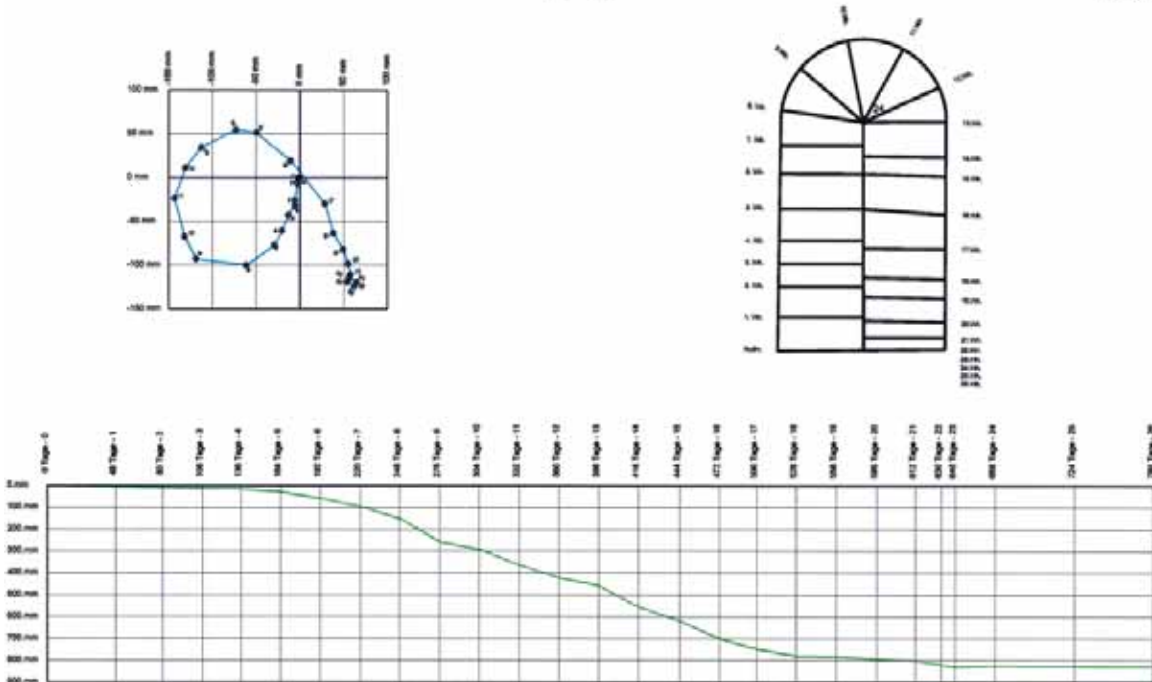
Autobahnkreuz Moers  
Bewegung Punkt 23



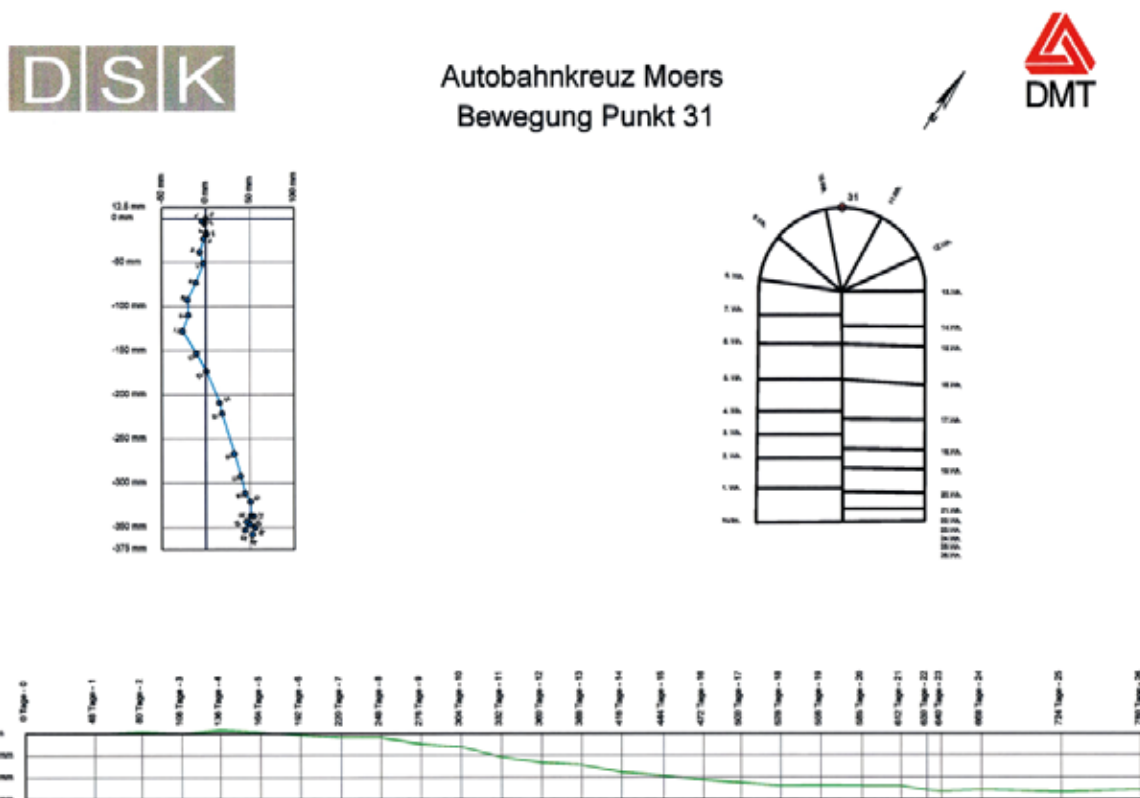
Rys. 11. Wykres przemieszczeń poziomych oraz obniżeń dla punktu pomiarowego nr 23, w poszczególnych fazach eksploatacji



Autobahnkreuz Moers  
Bewegung Punkt 24



Rys. 12. Wykres przemieszczeń poziomych oraz obniżeń dla punktu pomiarowego nr 24, w poszczególnych fazach eksploatacji



Rys. 13. Wykres przemieszczeń poziomych oraz obniżeń dla punktu pomiarowego nr 31, w poszczególnych fazach eksploatacji

## 5. Wnioski

W artykule przedstawiono historyczny rozwój i stosowane obecnie metody określane wartościami przemieszczeń poziomych punktów powierzchni terenu na skutek dokonanej eksploatacji górnictwa złóż pokładowych. W kontekście metody punktu środka ciężkości, hipotezy Awierszyna i wyników badań modelowych IMG PAN w Krakowie stwierdzono, że wskazują one na proporcjonalność pomiędzy wektorami przemieszczenia poziomego a wektorem nachylenia powierzchni terenu. Różnice dotyczą w zasadzie wartości współczynnika proporcjonalności  $B$ , którego wartości w ramach prowadzonych aktualnie prac projektowych dla przemysłu górnictwa leżą w granicach od  $0,28r$  do  $0,40r$ .

Przeprowadzone obliczenia symulacyjne wykazują duże podobieństwo do uzyskanych za pomocą techniki GPS wyników obserwacyjnych i stanowią nadzieję na pozytywne wyniki prowadzonych obecnie badań na przykładzie kilku obiektów.

Zasadnym wydaje się model wirtualnego punktu środka ciężkości, który na podstawie prowadzonych badań leży na linii pionowej łączącej element eksploatacji z powierzchnią terenu.

Praca została wykonana w roku 2010 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

## Literatura

1. Awierszyn S.G. 1947: *Sdwiżenije gornych porod pri podziemnych razrobotkach*. Ugletiechizdat, Moskwa.
2. Bals R. 1931/32: *Beitrag zur Frage der Vorausberechnung bergbaulicher Senkungen*. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen, Jg. 42/43, s. 98-111.
3. Budryk W. 1953: *Wyznaczenie wielkości poziomych odkształceń terenu*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. I. z. 1, PWN, Warszawa.
4. Dymek F. 1978: *O pewnym związku pomiędzy teoriami statystyczno-calkowymi wpływu podziemnej eksploatacji górnictwa na powierzchnię terenu a rozwiązaniami sprężystymi*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, Warszawa

5. Hegemann M. 2003: *Ein Beitrag zur Vorausberechnung horizontaler Bodenbewegungen im Steinkohlenbergbau*. Dissertation 20.12.2002. Schriftenreihe des Institutes für Markscheidewesen und Geodäsie an der Technischen Universität Bergakademie Freiberg. Heft 2003-2. VGE Verlag Glückauf GmbH Essen.
6. Keinhorst H. 1925: *Die Berechnung der Bodensenkungen im Emschergebiet*. 25 Jahre der Emschergerossenschaft 1900-1925, Essen
7. Knothe S. 1984: *Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice
8. Knothe S., Sroka A. 2010: *Stochastyczna ocena wpływu eksploatacji na obiekty budowlane w procesie planowania eksploatacji górniczej*. Materiały III Konferencji Naukowo-Szkoleniowej nt. „Bezpieczeństwo i Ochrona Obiektów Budowlanych na Terenach Górniczych”, Ustroń.
9. Kowalczyk Z. 1972: *Określenie wpływów eksploatacji górniczej metodą przekrojów pionowych*. Wyd. „Śląsk”, Katowice.
10. Krzyszoń D. 1965: *Parametr zasięgu niecek osiadania w ośrodku sypkim*. Archiwum Górnictwa, t. 10, z. 1, Warszawa.
11. Kwinta A. 2003: *Weryfikacja modeli niestacjonarnego pola poziomych przemieszczeń górniczych*. Rozprawa doktorska, AGH, Kraków.
12. Lehmann K., Neubert K., Schafstein K. 1942: *Berechnung und Darstellung von Bodenbewegungen über Abbauen*. Mitteilungen aus dem Markscheidewesen.
13. Niedojadło Z. 1984: *Model funkcjonalny przemieszczania punktów nad eksploatacją górniczą*. Praca doktorska (niepublikowana), Kraków.
14. Niemiec T., Radoła W. 1981: *Zależność między współczynnikami osiadania i przesunięcia poziomego w teorii Budryk-Knothe w profilu ostatecznie wykształconej niecki deformacji*. Ochrona Terenów Górniczych nr 57, Katowice.
15. Popiołek E., Ostrowski J. 1978: *Zależność pomiędzy nachyleniami a przemieszczeniami poziomymi terenu w ostatecznie wykształconych nieckach osiadania*. Ochrona Terenów Górniczych, nr 46, Katowice.
16. Praca zbiorowa 1980: *Ochrona powierzchni przed szkodami górniczymi*. Praca zbiorowa, Wydawnictwo Śląsk, Katowice.
17. Sałustowicz A. 1955: *Przemieszczenia i odkształcenia górotworu w sąsiedztwie eksploatacji górniczej*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t.3, z.2, Warszawa.
18. Sroka A. 1978: *Teoria S. Knothe'go w ujęciu czasoprzestrzennym*. Prace Komisji Górniczo-Geodezyjnej PAN. Geodezja, z. 24, Kraków.
19. 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).
20. Sroka A. 2000: *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.
21. Szpetkowski S. 1995: *Prognozowanie wpływów eksploatacji złóż pokładowych na górotwór i powierzchnię terenu*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
22. Xueyi Yu, Niedbalski Z. 1998: *Parametry funkcji wpływów do wyznaczania deformacji powierzchni stosowane w kopalniach chińskich*. Materiały XXI Zimowej Szkoły Mechaniki Górotworu, Kraków.

## **Surface displacements due to underground mining operations – theoretical and practical considerations**

### **Abstract**

The study recapitulates the current status of calculations of horizontal displacements due to underground mining activities by geometric- integral methods. The study summarises the measured displacement of selected points in the area obtained by the GPS method during the retreat longwall mining.

**Keywords:** horizontal displacements, surface deformations, underground mining