

Obrzeże eksploatacyjne, jego geneza i uwzględnienie w prognozach deformacji powierzchni w programie „Szkody”

Genesis and application of operating rim in subsidence prediction in “Damage” software



Dr hab. inż. Andrzej Kowalski^{*)}



Dr Eligiusz Jędrzejec^{*)}



Mgr inż. Piotr Polanin^{*)}

Treść: W artykule przedstawiono definicję oraz wzory opisujące obrzeże eksploatacyjne w prognozach deformacji terenu. Uporządkowano dotychczasowe próby opisywania ugięcia stropu zasadniczego w postaci funkcyjnej. W artykule zdefiniowano pojęcia wybiegu i czasu eksploatacji parcel rzeczywistych i efektywnych z uwagi na uwzględnienie obrzeża dla krawędzi startowej, końcowej i krawędzi związanej z frontem eksploatacyjnym, które traktowane są jako dane opisowe parcel definiowanych w programie komputerowym „Szkody”. Uwzględnianie obrzeża eksploatacyjnego w prognozach deformacji powierzchni terenu nie jest zawsze stosowane, pomimo że wyniki pomiarów geodezyjnych skonfrontowane z obliczeniami wskaźników deformacji według teorii Knothe-Budryka, wskazują na potrzebę jego stosowania. Według twórców teorii obrzeże nie jest parametrem teorii. Jest wielkością opisującą geometrię parceli eksploatacyjnej. Z kolei autorzy programów komputerowych stosowanych do prognoz deformacji (m.in. Białek, Drzęzła i Jędrzejec) uwzględniają wielkość obrzeża jako parametr modelu obliczeniowego, przy czym jego stosowanie jest selektywne. Najczęściej jest używane do obliczeń deformacji wpływów dokonanej i projektowanej eksploatacji pojedynczych parcel w prognozach i obliczeniach szczegółowych. W prognozach podstawowych lub przybliżonych obrzeże jest najczęściej pomijane.

Abstract: This paper presents a definition and formulas for an operating rim in prediction of land deformations. Attempts to describe a deflection of principle roof in the form of a function were presented. Definitions of panel length and duration of exploitation were defined for real and effective panels in relation to operating rims (starting, finishing and panel face edges). This information is necessary to define exploitation panels in the software called “Damage”. The operating rim is not always applied in subsidence prediction in spite of comparison results of measured and calculated deformation indexes that indicate the need to employ it. The authors of the Knothe-Budryk theory emphasize that the operating rim is not a theory parameter. It’s a geometry factor of longwall panel. Developepers of the software (i.e. Białek, Drzęzła, Jędrzejec) used for subsidence prediction, employ the operating rim as a parameter of calculation model but its application is limited. It is often applied to calculate deformation indexes for a single longwall panel in prediction and detailed calculations. The operating rim is usually not applied for basic and approximate prediction.

Słowa kluczowe:

eksploatacja górnicza, deformacje powierzchni terenu, prognoza, obrzeże eksploatacyjne

Key words:

mining exploitation, land surface deformations, prediction, operating rim

1. Wprowadzenie

S. Knothe w pracy doktorskiej [7], a także publikacji teorii - opisu niecki obniżeniowej [8] nie uwzględnia tzw. obrzeża eksploatacyjnego¹. Jest to konsekwencja zakładanych

postulatów przy budowie teorii, traktowania górotworu, jako ośrodek jednorodny, a także liniowości zjawisk zachodzących w górotworze. Później, w miarę pozyskiwania wyników pomiarów niecek obniżeniowych na powierzchni, zauważa i wyjaśnia, że dla zwiększenia dokładności prognozy wpływów projektowanej eksploatacji należy uwzględnić przesunięcie punktu przegięcia profilu niecki obniżeniowej w stosunku do granicy eksploatacji o pewną wielkość [9, 10]. Znaczenie obrzeża jest istotne do opisu niecek niepełnych,

^{*)} Główny Instytut Górnictwa w Katowicach

¹⁾ Nazwa „obrzeże eksploatacyjne” powstała prawdopodobnie w środowisku Politechniki Śląskiej w latach 70. ubiegłego stulecia.

a także utrudnia równoczesne wyznaczanie parametrów teorii, współczynnika eksploatacyjnego a i parametru górotworu $\text{tg}\beta$.

W teorii Budryka-Knothego obrzeże eksploatacyjne nie jest parametrem, pomimo że jest wielkością charakteryzującą właściwości górotworu, w szczególności warunki stropowe nad eksploatowanym pokładem.

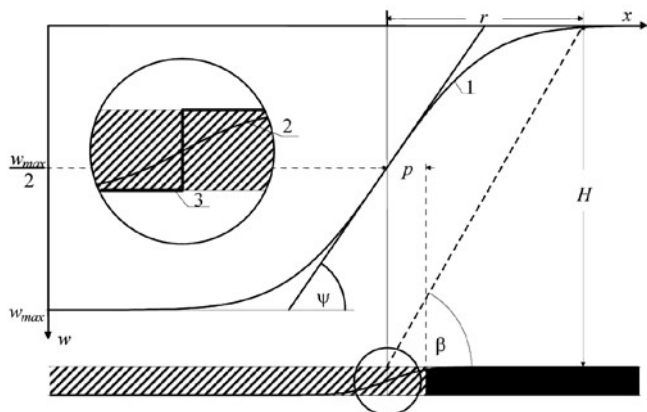
W ujęciu Litwiniszyna [17] teoria ta opisuje nieckę obniżeniową jako rozwiązanie równania dyfuzji, którego warunek graniczny (początkowy) jest obniżeniem stropu pokładu.

Celem artykułu jest przedstawienie studium dotyczącego istoty obrzeża eksploatacyjnego, jego automatycznego uwzględniania w programie komputerowym „Szkody” [6, 13], a także koncepcji opisu niecki stropowej, zastępującej prawdziwy warunek graniczny przez nieckę progową z obrzeżem.

Wprowadzenie obrzeża eksploatacyjnego „deformuje” teorię Budryka-Knothego w pierwotnej wersji Knothego, lecz jest całkowicie zgodne z jej postacią podaną przez Litwiniszyna.

2. Geometryczny opis obrzeża eksploatacyjnego

Teoria Budryka-Knothego w ujęciu Litwiniszyna definiuje tylko transformację ugięcia stropu zasadniczego (tzw. warunek graniczny równania dyfuzji) na wyżej położone poziomy w górotworze, jako rozwiązanie równania dyfuzji. Jako warunek graniczny stosuje ona ugięcie stropu zasadniczego w postaci progowej, tzn. obniżenie maksymalne w obszarze wybieranej parceli, a poza tym obszarem obniżenie zerowe, rys. 1. Gdy obszar ten jest dostatecznie duży (niecka pełna i nadpełna) punkty położone nad krawędziami doznają teoretycznych obniżen równych połowie obniżen maksymalnych występujących w rejonie dna niecki. Porównanie obniżen zmierzonych z teoretycznymi obliczonymi przy warunku progowym opisanym na rzeczywistej parceli, wykazuje istnienie przesunięcia punktów położonych nad krawędziami



Rys. 1. Profil niecki obniżeniowej położonej nad polem eksploatacyjnym o kształcie półpłaszczyzny: $\text{tg}\psi = T_{\text{max}}$, r – promień rozproszenia wpływów, H – głębokość pokładu, p – obrzeże eksploatacyjne, 1 – niecka obniżeniowa na powierzchni, 2 – profil ugięcia niecki w stropie eksploatowanego pokładu, 3 – zastępczy progowy profil niecki w stropie eksploatowanego pokładu [15]

Fig. 1. Profile of subsidence trough over an exploitation panel in a shape of half-plane: $\text{tg}\psi = T_{\text{max}}$, r – radius of influences dispersion, H – seam depth, p – operating rim, 1 – subsidence trough at surface, 2 – deflection profile of subsidence trough in a roof of extracted seam, 3 – substitute threshold profile of subsidence trough in a roof of extracted seam [15]

parceli w kierunku jej wnętrza. Aby uzyskać zgodność teorii i praktyki w tej kwestii, wystarczy do obliczeń przyjąć warunek graniczny w postaci progowej opisany na parceli, której krawędzie przesunięto o odpowiednie wartości w kierunku wnętrza eksploatowanego obszaru, rys. 1.

Wartość tego przesunięcia krawędzi nazywa się obrzeżem eksploatacyjnym p . Pojęcie obrzeża związane jest zatem z modyfikacją warunku granicznego nadal do postaci progowej.

Potrzebę uwzględnienia w obliczeniach deformacji przesunięcia krawędzi eksploatacyjnej zauważali chronologicznie między innymi: Batkiewicz [1], Kowalczyk [11], Drzęzła [4] (1978) i Szpetkowski [18]. W komputerowych programach obliczeniowych deformacji powierzchni obrzeże eksploatacyjne jest uwzględniane w sposób geometryczny [4, 6, 2]. W nawiązaniu do obrzeża eksploatacyjnego zaznacza się, że podejmowane były próby delinearizacji funkcji wpływów, z których najbardziej znanym rozwiązaniem była próba Zycha [19].

Według Batkiewicza wartość przesunięcia (obrzeża) zależy od warunków stropowych i wynosi około $0,5r_o$, gdzie r_o – parametr teorii Kochmańskiego. Przy czym wyznacza się go wówczas, gdy pole eksploatacyjne jest tzw. dużą figurą nieregularną lub półpłaszczyzną. Wartość przesunięcia będzie tym większa, im bardziej sztywne będą warstwy stropowe.

Kowalczyk wartość przesunięcia określił dla niecki pełnej równą

$$p=0,1 H \text{ ctg } \gamma$$

gdzie:

H – głębokość eksploatacji,
 γ – kąt zanikania wpływów.

Szpetkowski z piętnastu niecek pełnych wyznaczył wartość przesunięć p na powierzchni w górotworze nienaruszonym, wynosi ona

$$p=H^{0,5}$$

Według Szpetkowskiego dla górotworu naruszonego wartości przesunięć p są mniejsze w przybliżeniu o połowę.

Wyznaczona przez Białka i zamieszczona w monografii wartość obrzeża z ośmiu niecek pełnych wynosi [2]:

$$p=0,15 r$$

Kowalski [12] z trzydziestu niecek obniżeniowych, głównie niepełnych, wyznaczył wartość przesunięć p na powierzchni, które wynosi:

$$p=0,1 H$$

Zależność podana przez Kowalskiego jest wartością średnią, wyznaczoną równocześnie z parametrami a i $\text{tg}\beta$. Wartości obrzeża eksploatacyjnego wahały się od 0 do $0,47 H$.

3. Dotychczasowe próby opisywania ugięcia stropu zasadniczego w postaci funkcyjnej

Rozpatrywane były też inne modele niż progowy, które opisywałyby ugięcie stropu zasadniczego (Jędrzejec [5], Białek i Pomykoł [3] i Kwiatek [16]).

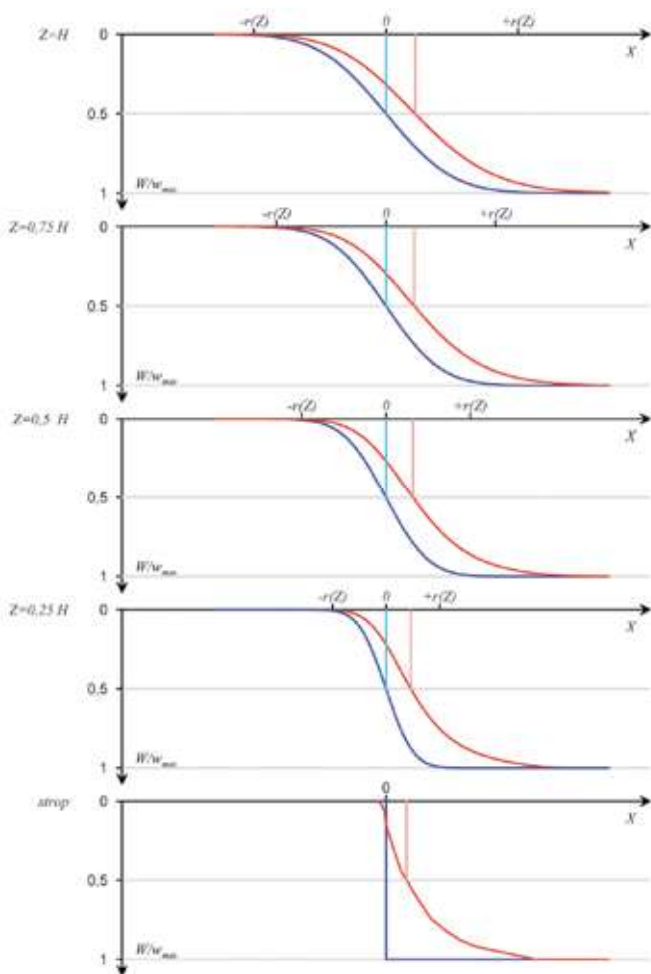
W pracy doktorskiej Jędrzejec [5] zauważa, że stosowanie obrzeża w postaci niecki progowej (...) „generuje niecki symetryczne”. Dlatego analizuje zastosowanie niesymetrycznego warunku granicznego, którym może być na przykład niecka stropowa opisywana przez Bilińskiego, na podstawie dołowych pomiarów ugięcia stropu. Asymetryczny warunek

graniczny został skonstruowany z odcinków prostych, rys. 2. W analizowanym przykładzie został złożony z 11 odcinków prostych o różnym nachyleniu.

Konsekwencje przyjęcia niecki stropowej opisywanej odcinkami prostych dla kształtowania się nachyleń i krzywizn w górotworze przedstawiono na rys. 3 i 4. Zarówno obniżenia (rys.2), jak i nachylenia i krzywizny zostały obliczone dla eksploatacji w kształcie półpłaszczyzny oraz dla parametru $r(z) = r(H) \left(\frac{z}{H}\right)^{0,65}$. Na rys. 2-4 porównano również rozkłady tych wskaźników z obliczonymi dla niecki progowej bez uwzględnienia obrzeża eksploatacyjnego (klasyczna teoria Budryka-Knothea) dla kilku wartości.

Z porównania miejsc występowania ekstremów oraz ich wartości dla niecek przy założeniu progowego warunku granicznego (obrzeża) oraz ugięcia stropu w kształcie linii łamanej (asymetryczny warunek brzegowy) wynika, że:

- na powierzchni ekstremalne wartości zarówno nachyleń i krzywizn dla asymetrycznej niecki stropowej są mniejsze niż dla progowego warunku brzegowego. W praktyce obserwuje się większe wartości tych wskaźników niż by wynikały z obliczeń teoretycznych, nawet przy stosowaniu niecek progowych. Dla nachyleń o kilkanaście procent, a dla krzywizn o około 50% [14].



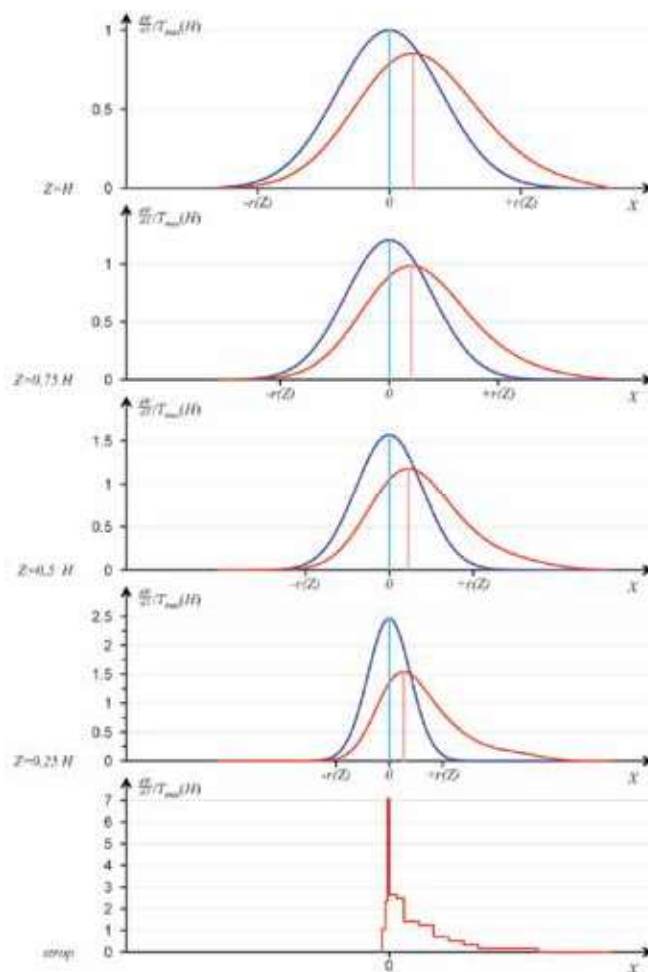
Rys. 2. Rozkład obniżen w górotworze dla progowego (kolor niebieski) i asymetrycznego (kolor czerwony) warunku brzegowego [5]

Fig. 2. Distribution of subsidence in rock mass for threshold (blue line) and asymmetric (red line) boundary condition [5]

- w rejonie krawędzi eksploatacyjnej wartość nachylenia dla progowej niecki stropowej przyjmuje wartość nieskończoną, dla niecki asymetrycznej wartość skończoną, ale bardzo dużą, rys. 3. Jednak zakładając proporcjonalność przemieszczeń poziomych do nachyleń w górotworze, którą przyjmuje się dla wskaźników deformacji na powierzchni, to dla niecki progowej, przemieszczenie poziome przyjmuje w stropie wartość nieskończoną, co fizycznie nie jest do przyjęcia. Zagadnienie to powinno być przedmiotem badań.

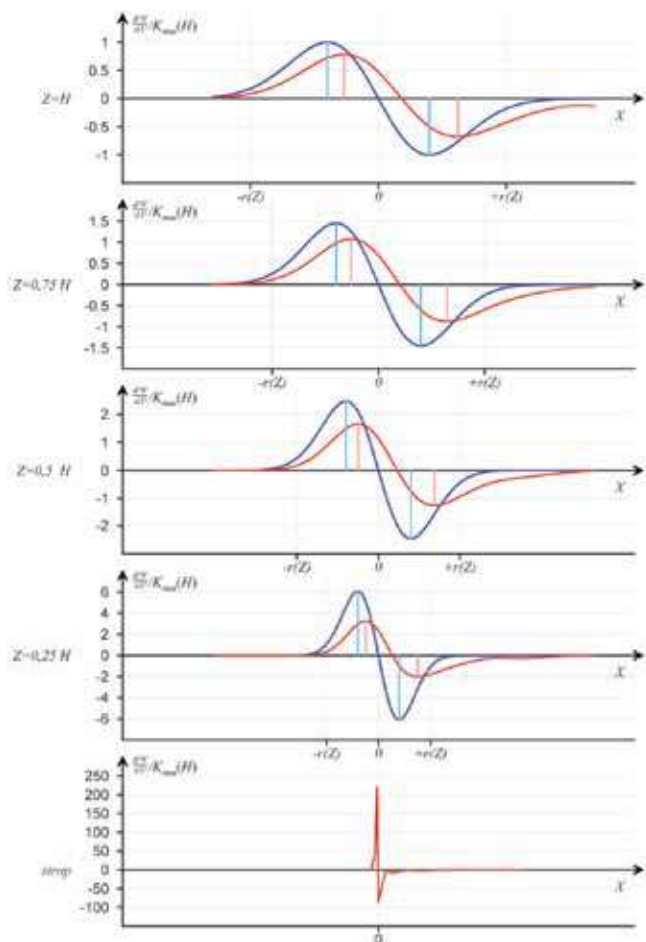
Białek i Pomykoł [3] do poprawy prognoz deformacji powierzchni proponują zastąpienie kształtu linii ugięcia stropu w postaci obrzeża funkcją liniową, rys. 5. Nowym parametrem w tym modelu jest l_s długość linii ugięcia stropu. Według autorów tego rozwiązania „(...) profile niecek uzyskane dla półpłaszczyzny z uwzględnieniem skorygowanej wartości parametru r są bardzo podobne do profilu niecek obliczonych z uwzględnieniem obrzeża eksploatacyjnego, zapewniając jednocześnie zasadniczą poprawę opisu niepełnych niecek obniżeniowych.”

Proponowaną liniową funkcję ugięcia stropu pokładu na odcinku obrzeża można wygenerować w obliczeniach (prognozach) deformacji powierzchni przez podział pokładu (na odcinku obrzeża) na kilka warstw o zmiennej długości od 0 do g (grubości wybieranego pokładu lub warstwy). Dla tego typu zabiegu kształt niecki obniżeniowej praktycznie nie odbiega



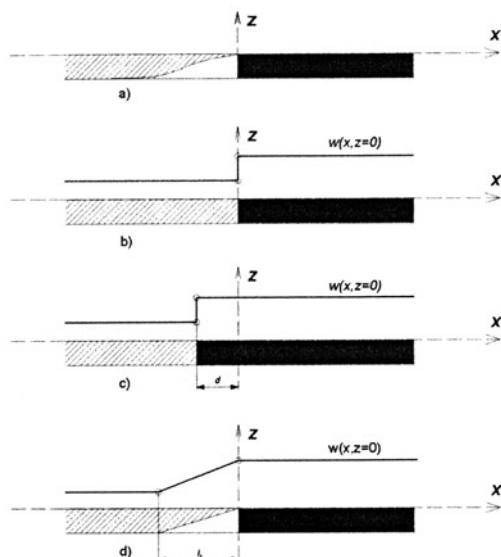
Rys. 3. Rozkład nachyleń w górotworze dla progowego (kolor niebieski) i asymetrycznego (kolor czerwony) warunku brzegowego [5]

Fig. 3. Distribution of tilts in rock mass for threshold (blue line) and asymmetric (red line) boundary condition [5]



Rys. 4. Rozkład krzywizn w górotworze dla progowego (kolor niebieski) i asymetrycznego (kolor czerwony) warunku brzegowego [5]

Fig. 4. Distribution of curvatures in rock mass for threshold (blue line) and asymmetric (red line) boundary condition [5]



Rys. 5. Warunek brzegowy przyjmowany do obliczeń: a – rzeczywisty kształt, b – funkcja Heaviside’a, c – funkcja Heaviside’a z obrzeżem, d – proponowana funkcja liniowa wg Białka i Pomykoła [3]

Fig. 5. Boundary condition for calculations: a – real shape, b – Heaviside function, c – Heaviside function with operating rim, d – linear function proposed by Białka and Pomykoła [3]

od kształtu uzyskanego przy przyjęciu obrzeża eksploatacyjnego równemu połowie długości linii ugięcia stropu l_x .

Zaproponowany sposób uwzględnienia w obliczeniach deformacji obrzeża eksploatacyjnego nie jest spójny z założeniami teorii Budryka-Knotheho. Przez co nie może być traktowany jako parametr teorii, a tylko jako parametr eksploatacji, analogicznie jak głębokość, grubość i pole powierzchni eksploatawanej parceli. Albo, jako parametr modelu Budryka-Knotheho z obrzeżem lub Białka i Pomykoła [3].

Kwiątek [16] rozważał uwzględnienie ugięcia stropu pokładu w opisie deformacji powierzchni przez modyfikację funkcji wpływów, przesunięcia jej o pewną wartość p , wyznaczoną na podstawie geodezyjnych pomiarów obniżeń powierzchni. Zabieg ten miał na celu zachowanie założeń teorii Budryka-Knotheho. Jego wyniki są zbliżone do stosowania obrzeża jako parametru eksploatacji, albo modelu z obrzeżem eksploatacyjnym. Rozwiązanie to nie zostało zastosowane w praktyce.

Żaden z proponowanych opisów funkcji ugięcia stropu zasadniczego (liniowy, bądź krzywą łamaną – z odcinków linii prostej) nie znalazł zastosowania w komputerowych programach do obliczeń wskaźników deformacji powierzchni terenu. Dlatego postać progowa tej funkcji z uwzględnieniem obrzeża jest dotychczas stosowana dla obliczeń deformacji, która w praktyce wykazuje dużą zgodność z pomiarami.

4. Automatyczne uwzględnianie obrzeża w algorytmie i programie komputerowym „Szkody”

4.1. Parcela rzeczywista i efektywna

W każdej parceli eksploatacyjnej określającej kształt rzeczywistości wybranego pola parceli, można wyróżnić cztery krawędzie, których definicje związane są z kierunkiem frontu eksploatacyjnego. Są to:

- krawędź startowa,
- krawędź prawa,
- krawędź końcowa,
- krawędź lewa.

Każdej krawędzi można przyporządkować pewne obrzeże. Obrzeże dodatnie odmierzone jest w kierunku wnętrza parceli, natomiast obrzeże ujemne (tzw. antyobrzeże) odmierzone jest w kierunku jej zewnątrz.

Parcela, która powstaje w wyniku uwzględnienia obrzeży będzie dalej nazywana *parcelą efektywną*. Wskaźniki deformacji będą liczone jako całki powierzchniowe brane po obszarze efektywnej parceli.

Obrzeża w krawędziach bocznych mają wpływ tylko na rozmiary parceli efektywnej, podczas gdy pozostałe mogą mieć wpływ również na okres czasu wybierania parceli.

4.2. Wpływ obrzeży na momenty rozpoczęcia i zakończenia eksploatacji parceli efektywnej

Założenia przyjmowane przy standardowych obliczeniach wskaźników deformacji są następujące.

Eksploatacyjny *front rzeczywisty* (w parceli oryginalnej) o maksymalnym wybiegu L i *front pozorny* (w parceli efektywnej) o maksymalnym wybiegu L_e poruszają się z tą samą prędkością v .

Eksploatacja parceli rzeczywistej rozpoczyna się w momencie ze stałą prędkością v i kończy się w chwili:

$$t_k = t_p + \frac{L}{v} \quad (1)$$

Eksploatacja w parceli efektywnej rozpoczyna się w momencie t_{pe} i kończy się w chwili t_{ke} .

Niech p_s będzie obrzeżem (startowym) związanym ze statyczną krawędzią początkową parceli rzeczywistej, p_f - zawsze dodatnim obrzeżem związanym z frontem eksploatacyjnym i poruszającym się wraz z nim, a p_k - obrzeżem związanym ze statyczną krawędzią końcową parceli rzeczywistej².

Niech ponadto p'_s, p'_f, p'_k oznaczają wartości dodatnich obrzeży charakterystyczne dla eksploatacji parceli w caliznie pokładu, które należy wyróżnić od nazw obrzeży p_s, p_f, p_k formalnie związanych z projektowaną eksploatacją przedmiotowej parceli, która może sąsiadować ze zrobami. Należy sądzić, że wartości p'_s i p'_k są jednakowe w przypadku poziomego uwarstwienia górotworu w okolicy parceli lub zróżnicowane przy nachylonych warstwach (od strony upadu wartość obrzeża powinna być mniejsza). Natomiast wartość p'_f jest prawdopodobnie nieco większa od nich³.

Gdy krawędź początkowa i końcowa graniczy z calizną pokładu, strop zasadniczy, wspierając się na niej, powoduje powstanie dodatnich obrzeży p_s, p_f, p_k .

Wynika z tego, że zawsze $p_f = p'_f$ i gdy brak sąsiedztwa starych zrobów także $p_s = p'_s, p_k = p'_k$.

Gdy w najbliższym sąsiedztwie którejś z nich znajdują się stare zrobry, wtedy krawędź ta graniczy z pewną pustką⁴, nad którą zawisa strop zasadniczy wsparty na zaciśniętych zrobach i caliznie pokładu. W takim przypadku mówi się o ujemnym obrzeżu p'_s lub p'_k , którego bezwzględna wartość określa rozmiar pustki w kierunku normalnym do krawędzi parceli. Ponieważ pustka ta powstała w wyniku eksploatacji pewnej parceli graniczącej wówczas z calizną pokładu, to jej rozmiar jest określony przez odpowiednie dodatnie obrzeże lub charakterystyczne dla lokalnych własności górotworu w warunkach tejże eksploatacji. Ponieważ obie eksploatacje dotyczą tego samego rejonu górotworu, to można założyć, że ich odpowiednie obrzeża są jednakowe⁵:

$$\begin{aligned} (p'_s)_{z1} &= p'_s = (p'_s)_{z2} \\ (p'_f)_{z1} &= p'_f = (p'_f)_{z2} \\ (p'_k)_{z1} &= p'_k = (p'_k)_{z2} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie $z1$ oznacza zrobry graniczące z krawędzią startową, a $z2$ - z krawędzią końcową.

Gdy krawędź początkowa przylega do starych zrobów i $p_s < 0$ to $p'_s = -(p'_s)_{z1}$, gdyż można uważać⁶, że rozpoczęcie wybierania jest jakby kontynuacją wcześniejszej eksploatacji obejmującej stare zrobry.

Gdy krawędź końcowa przylega do starych zrobów i $p_k < 0$ to $p'_k = -(p'_k)_{z2}$, gdyż można uważać stare zrobry za

„kontynuację” eksploatacji obejmującej parcelę rzeczywistą.

Jak będzie to pokazane, ten ostatni przypadek, powodując gwałtowny skok wybiegu parceli efektywnej⁷, może prowadzić do nadmiernych deformacji. Dlatego w praktyce nie dochodzi się ściśle do starych zrobów, lecz pozostawia filar oporowy calizny pokładu rozdzielający strefy starych i nowych zrobów o rozmiarach gwarantujących ich separację⁸.

Dalej można w przybliżeniu założyć, że

$$p_f = p'_f \cong p'_k \quad (3)$$

Aby umożliwić przybliżone obliczenia wskaźników deformacji bez uwzględniania obrzeży, do obrzeży dodatnich dołączono dalej ich wartość zerową.

Zależnie od znaków p_s i p_k przyjąć trzeba, wynikające z geometrii eksploatacji oraz (3), wartości obrzeży według tablicy 1, którą trzeba interpretować w ten sposób, że jeśli znane są wartości p_s i p_k , to pozostałe obrzeża dane są podanymi w niej zależnościami.

Gdy $p_s < 0$, wartość p'_f nie jest określona w tablicy 1 (kolumny 2 i 3), bo z relacji geometrycznych oraz (3) nie jest to możliwe. Z tych samych powodów wartość p'_k nie jest określona w kolumnach 3 i 4 tej tablicy, gdy $p_k < 0$.

O ile w przypadku $p_s < 0, p_k \geq 0$ do określenia t_{pe} nie jest potrzebna wartość p'_s , o tyle w przypadku $p_s < 0, p_k < 0$ jest ona potrzebna (wzór 12), lecz na poziomie założen tablicy 1 nie jest do określenia. W przypadkach $p_s < 0, p_k < 0$ oraz $p_s \geq 0, p_k < 0$ nieokreślona wartość p'_k uniemożliwia wyznaczenie t_{pe} ze wzorów (12) i (16). Jak widać, nieokreśloność potrzebnych parametrów p'_s, p'_k do obliczeń t_{pe} we wzorach (12) i (16), dotyczy wyłącznie przypadków, gdy $p_k < 0$. A te przypadki, z uwagi na bezpieczeństwo, są w praktyce niezalecane.

Aby uczynić wzory (12) i (16) użytecznymi w przypadku gdy $p_k < 0$, należałoby poczynić dodatkowe założenia, choćby postaci:

$$\text{dla } p_s < 0, p_k < 0: \quad p'_k \cong p'_s = -p_s \quad (4)$$

$$\text{dla } p_s \geq 0, p_k < 0: \quad p'_k \cong p'_s = p_s \quad (5)$$

Założenia (4) i (5) są słabsze od założen (2). Wartości obrzeży wynikające z geometrii eksploatacji oraz założen (3), (4), (5) przedstawiono w tablicy 2.

Jeśli do tablicy 1 zastosuje się założenia upraszczające (2), to wartości obrzeży przyjmą postać z tablicy 3.

Tablica 1. Wartości obrzeży wynikające z geometrii eksploatacji oraz założenia (3)
Table 1. Values of operating rims related to geometry of exploitation panel and the assumption (3)

	$p_s \geq 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k < 0$	$p_s \geq 0, p_k < 0$
	1	2	3	4
1	$p'_s = p_s$	$(p'_k)_{z1} = -p_s$	$(p'_k)_{z1} = -p_s$	$p'_s = p_s$
2	$p'_k = p_k$	$p'_k = p_k$	$(p'_s)_{z2} = -p_k$	$(p'_s)_{z2} = -p_k$
3	$p'_f \cong p_k$	$p'_f \cong p_k$	$p'_f \cong p'_k$	$p'_f \cong p'_k$

² Po wybraniu całej parceli, krawędź ruchoma staje się krawędzią statyczną.
³ Na skutek opóźnionej reakcji stropu zasadniczego na ruch frontu.
⁴ Pustka ta w rzeczywistości może nie stanowić pustej przestrzeni, lecz być strefą rozluźnienia górotworu, a w przypadku bardzo starych zrobów może w wyniku zaciśnięcia praktycznie nie istnieć.
⁵ Pomijając możliwą zmianę parametrów górotworu na skutek eksploatacji w rejonie starych zrobów.

⁶ Pomijając niewielki filar oporowy, który zostaje zaciśnięty.
⁷ Likwidacja podparcia stropu zasadniczego na caliznie pokładu nagle odsłania strefę obrzeży p_f i p_k .
⁸ Filar ten może z biegiem czasu być rozgnieciony, powiększając stopniowo rozmiary parceli efektywnej.

Tablica 2. Wartości obrzeży wynikające z geometrii eksploatacji oraz założeń (3), (4) i (5)

Table 2. Values of operating rims related to geometry of exploitation panel and the assumptions (3), (4) and (5)

	$p_s \geq 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k < 0$	$p_s \geq 0, p_k < 0$
	1	2	3	4
1	$p'_s = p_s$	$(p'_k)_{z1} = -p_s$	$p'_s = p'_k = (p'_k)_{z1} = -p_s$	$p'_s = p'_k = p_s$
2	$p'_k = p_k$	$p'_k = p_k$	$(p'_s)_{z2} = -p_k$	$(p'_s)_{z2} = -p_k$
3	$p'_f \cong p_k$	$p'_f \cong p_k$	$p'_f \cong p'_k$	$p'_f \cong p'_k$

Tablica 3. Wartości obrzeży według tablicy 1 po zastosowaniu założeń upraszczających (2)

Table 3. Values of operating rims from table 1 after application of simplifying assumptions (2)

	$p_s \geq 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k < 0$	$p_s \geq 0, p_k < 0$
	1	2	3	4
1	$p'_s = p_s$	-	$p'_s = -p_k$	$p'_s = p_s = -p_k$
2	$p'_k = p_k$	$p'_k = p_k = -p_s$	$p'_k = -p_s$	-
3	$p'_f = p_k$	$p'_f = p_k$	$p'_f = p'_k = -p_s$	-

Wyjaśnienia szczegółów tablicy 3:

Kolumna 2, wiersz 2:

W założeniach (2) podano, że $(p'_k)_{z1} = p'_k$, czyli z kol. 2, wiersza 1 tablicy 1 wynika $p'_k = -p_s$.

W tablicy 1 kol. 2, wiersz 2 podano, że $p'_k = p_k$, zatem $p_k = -p_s$, czyli $p'_k = p_k = -p_s$.

Wartości p'_s nie da się określić.

Kolumna 3, wiersz 1 i 2:

W założeniach (2) podano, że $p'_s = (p'_s)_{z2}$, czyli z kol. 3 wiersza 2 tablicy 1 wynika $p'_s = -p_k$.

W założeniach (2) podano, że $(p'_k)_{z1} = p'_k$, czyli z kol. 3 wiersza 1 tablicy 1 wynika $p'_k = -p_s$.

Kolumna 4, wiersz 1:

W założeniach (2) podano, że $p'_s = (p'_s)_{z2}$, czyli z kol. 4 wiersza 2 tablicy 1 wynika $p'_s = -p_k$.

W tablicy 1 kol.4, wiersz 1 podano, że $p'_s = -p_s$, zatem $p_k = -p_s$, czyli $p'_s = -p_k = p_s$.

Wartości p'_k a zatem również p'_f nie da się określić.

Pierwsza kolumna w obu tablicach jest jednakowa i nie zależy od założeń upraszczających (2).

Jak widać założenia (2) nie prowadzą do określenia wartości p'_s gdy $p_s < 0, p_k \geq 0$ oraz wartości p'_k i p'_f gdy $p_s \geq 0, p_k < 0$.

Lepszy wynik uzyskuje się przy założeniach (4), (5) zamiast (2) (por. tablica 2).

4.3. Okres eksploatacji efektywnej dla obrzeży nieujemnych według założeń z tablicy 1

Do rozwinięcia frontu rzeczywistego do wartości wybiegu $p_0 + p_f$ (rys. 6a) przyjmuje się, że strop zasadniczy nie ugina się, ponieważ wspiera się na caliznie pokładu. Od tego momentu (początek wybierania paneli efektywnej) odsłonięcie stropu zaczyna skutkować ugięciem stropu zasadniczego.

$$t_{pe} = t_p + \frac{p_s + p_f}{v} \cong t_p + \frac{p_s + p_k}{v} \quad (6)$$

Ze względu na podparcie, jakie daje calizna, występują tu dodatnie obrzeża p_s i p_f i dlatego też parcela efektywna zaczyna się za linią obrzeża startowego, które zawiera pustkę obrzeża (rys. 6b).

Maksymalny wybieg frontu pozornego (w paneli efektywnej) wynosi (rys. 6c)

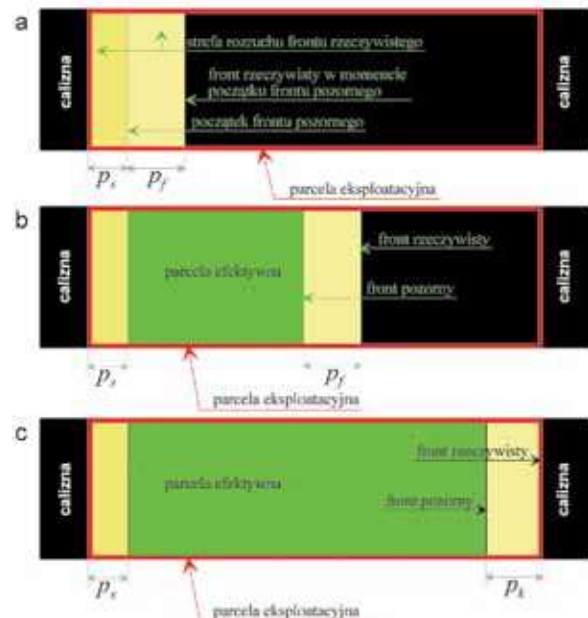
$$L_e = L - (p_s + p_k) \quad (7)$$

Inaczej

$$(t_{ke} - t_{pe})v = L - (p_s + p_k) = (t_k - t_p)v - (p_s + p_k)$$

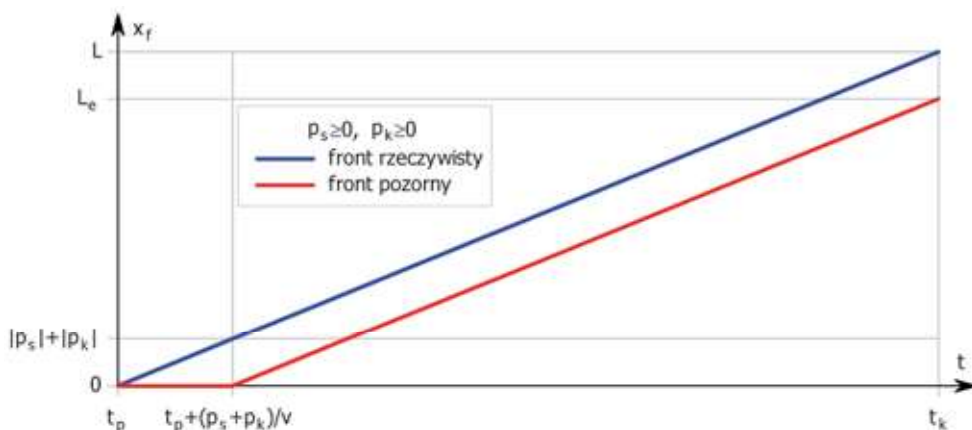
Moment końca wybierania w paneli efektywnej wynosi więc

$$t_{ke} = t_p + \frac{p_s + p_f}{v} + t_k - t_p - \frac{p_s + p_k}{v} = t_k + \frac{p_f - p_k}{v} \cong t_k \quad (8)$$



Rys. 6. Ilustracja wybierania paneli efektywnej w górotworze nienaruszonym: a) wyznaczenie początku wybierania (parcele efektywnej), b) położenie paneli efektywnej w trakcie rozwoju frontu rzeczywistego, c) pełna parcela efektywna

Fig. 6. Illustration of effective panel extraction in undisturbed rock mass: a) indication of first stage of exploitation (non effective panel), b) location of effective panel during advance of longwall face, c) final effective panel



Rys. 7. Postęp frontu rzeczywistego i pozornego w zależności od czasu dla eksploatacji w caliznie pokładu

Fig. 7. Advance of real and effective longwall face in relation to duration of exploitation for extracted seam

Wykresy postępu frontu rzeczywistego i pozornego w zależności od czasu, dla eksploatacji w caliznie pokładu pokazano na rys. 7.

4.4. Okres eksploatacji efektywnej dla obrzeży ujemnych i o różnych znakach według założeń z tablicy 1

4.4.1. Obrzeże

Gdy $p_s < 0$, strop zasadniczy początkowo wspiera się nad pustką strefy tego obrzeża na zaciśniętych zrobach i na caliznie pokładu. W miarę rozwoju frontu rzeczywistego, który jest jakby kontynuacją poprzedniej eksploatacji (w starych zrobach), obszar ujemnego obrzeża należy doliczyć do przestrzeni nowo wybranej: do momentu odsłonięcia przestrzeni o wybiegu p'_f łącznie ze strefą obrzeża ujemnego p_s , należy uznać, że nic się nie dzieje (rys. 8a). Zatem moment osiągnięcia tego wybiegu przez front rzeczywisty jest momentem początku wybierania parceli efektywnej, który wynosi:

$$t_{pe} = t_p + \frac{p_f + p_s}{v}$$

Po podstawieniu z tablicy 1 $p_f \cong p_k$ otrzymuje się

$$t_{pe} = t_p + \frac{p_s + p_k}{v} \tag{9}$$

Początkiem parceli efektywnej jest tu granica starych zrobów (rys. 8b), gdyż jest ona ich kontynuacją.

Z rys. 8c oraz (3) można wnioskować, że

$$L_e = L - (p_s + p_k) \tag{10}$$

Maksymalny wybieg frontu pozornego wynosi po podstawieniu (1)

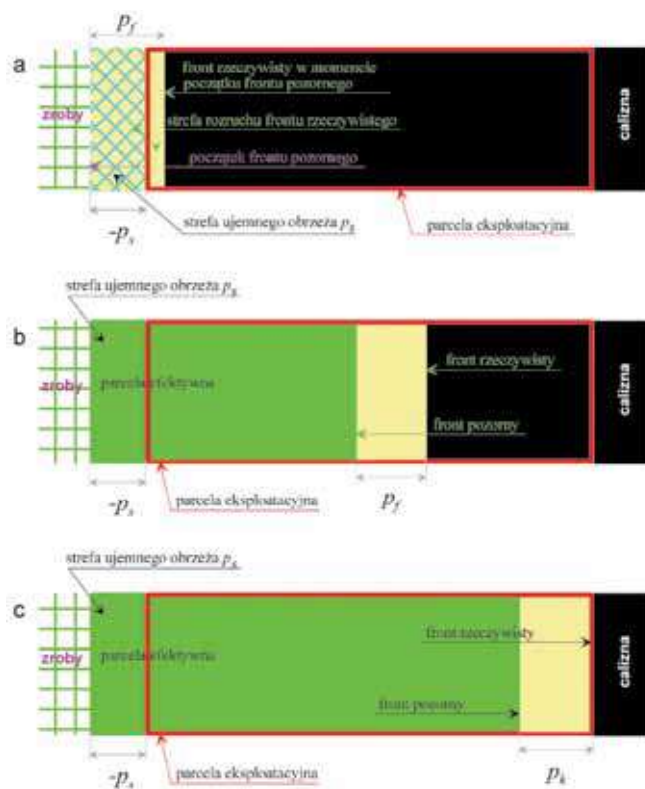
$$(t_{ke} - t_{pe})v = (t_k - t_p)v - (p_s + p_k)$$

Zatem po podstawieniu (9)

$$t_{ke} = t_k + t_{pe} - t_p - \frac{p_s + p_k}{v} = t_k + t_p + \frac{p_s + p_k}{v} - t_p - \frac{p_s + p_k}{v}$$

I ostatecznie

$$t_{ke} = t_k$$



Rys. 8. Ilustracja wybierania parceli efektywnej przy ujemnym obrzeżu p_s i dodatnim obrzeżu p_k : a) wyznaczenie początku wybierania (parcelsa efektywna pusta), b) położenie parceli efektywnej w trakcie rozwoju frontu rzeczywistego, c) pełna parcelsa efektywna

Fig. 8. Illustration of effective panel extraction for negative p_s and positive p_k operating rim: a) indication of first stage of exploitation (non effective panel), b) location of effective panel during advance of longwall face, c) final effective panel

Postęp frontu rzeczywistego i pozornego w zależności od czasu dla obrzeży mieszanych przy $p_s < 0, p_k \geq 0$ ma przebieg analogiczny jak na rys. 7, z tą różnicą, że w tym przypadku odcinek pomiędzy t_p a t_{pe} jest inny z uwagi na $p_s < 0$.

4.4.2. Obrzeża ujemne

Sytuację początku eksploatacji pokazano na rys. 9a. Moment początkowy wybierania parceli efektywnej dany jest zatem wzorem:

$$t_{pe} = t_p + \frac{p_s + p'_k}{v} \tag{12}$$

gdzie podstawiono $p'_f \cong p'_k$.

Do chwili t_k zakończenia wybierania parceli rzeczywistej, co odpowiada chwili t_{ke} wybierania parceli efektywnej, przed gwałtownym skokiem jej wybiegu spowodowanego odsłonięciem starych zrobów, wybieg parceli efektywnej wynosi (rys. 9c)

$$L_e = L - p_s - p'_k \tag{13}$$

Zatem, podstawiając (1)

$$(t_{ke} - t_{pe})v = (t_k - t_p)v - p_s - p'_k$$

A stąd, po uwzględnieniu (12)

$$t_{ke} = t_p + \frac{p_s + p'_k}{v} + t_k - t_p - \frac{p_s + p'_k}{v}$$

I ostatecznie

$$t_{ke} = t_k \tag{14}$$

W przypadku przeskoku parceli efektywnej do pełnych wymiarów, po odsłonięciu obrzeża p'_f oraz obrzeża od strony starych zrobów (rys. 9d) pełny jej wybieg wynosi

$$L'_e = L - p_s - p_k \tag{15}$$

Obrzeże $p_s \geq 0, p_k < 0$

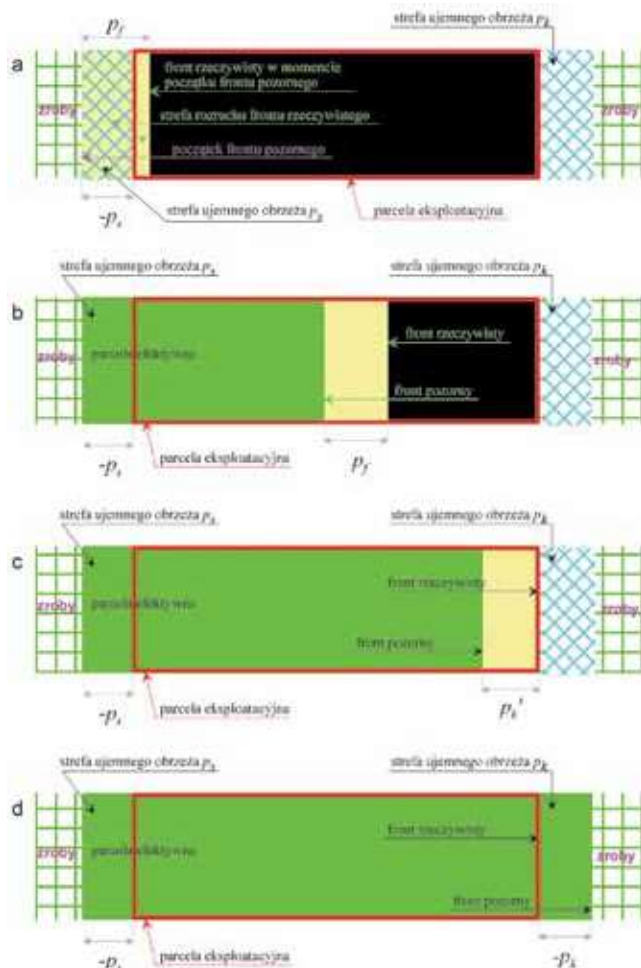
Jak wynika z rys. 11a, początek wybierania parceli rzeczywistej jest identyczny z sytuacją z rys. 5a, zatem początek wybierania parceli efektywnej dany jest wzorem:

$$t_{pe} = t_p + \frac{p'_s + p'_f}{v}$$

który po uwzględnieniu z (3) $p'_f \cong p'_k$ oraz z tablicy 1 $p'_s = p_s$ daje:

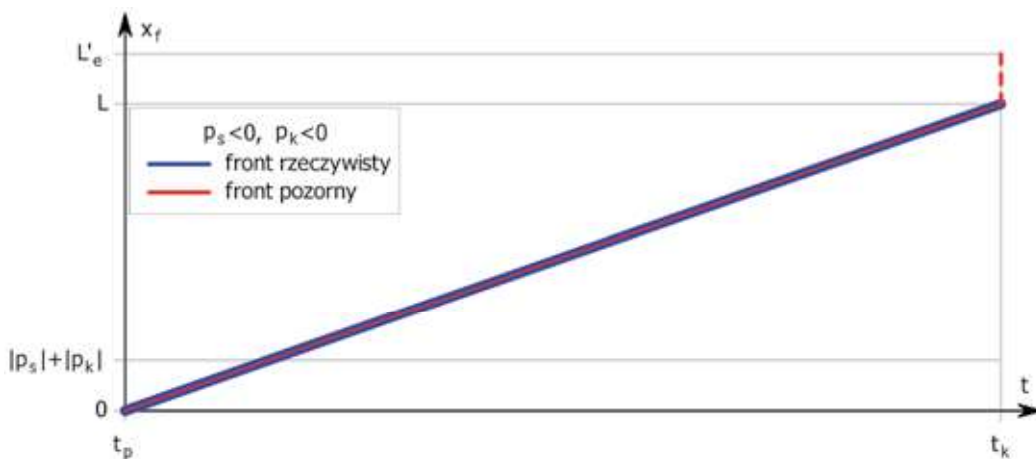
$$t_{pe} = t_p + \frac{p_s + p'_k}{v} \tag{16}$$

Z rys. 11c wynika, że wybieg parceli efektywnej do chwili t_{ke} jej wybierania (co odpowiada chwili t_k zakończenia wybierania parceli rzeczywistej) wynosi:



Rys. 9. Ilustracja wybierania parceli efektywnej z uwzględnieniem ujemnych obrzeży p_s, p'_k : a) wyznaczenie początku wybierania (parcela efektywna pusta), b) położenie parceli efektywnej w trakcie rozwoju frontu rzeczywistego, c) front rzeczywisty osiągnął swój kres - szybki przeskok frontu pozornego do pełnego rozmiaru, d) pełna parcela efektywna

Fig. 9. Illustration of effective panel extraction for negative operating rims p_s, p'_k : a) indication of first stage of exploitation (non effective panel), b) location of effective panel during advance of longwall face, c) final stage of real longwall face – rapid move of virtual longwall face to full longwall length, d) final effective panel



Rys. 10. Postęp frontu rzeczywistego i pozornego w zależności od czasu dla obrzeży ujemnych przy założeniu (4)

Fig. 10. Advance of real and virtual longwall face in relation to duration of exploitation for negative operating rims applying assumption (4)

$$L_e = L - p'_s - p'_f$$

Po uwzględnieniu z (3) $p'_f \cong p'_k$ oraz z tablicy 1 $p'_s = p_s$

$$L_e = L - p_s - p'_k \quad (17)$$

Po podstawieniu (1)

$$(t_{ke} - t_{pe})v = (t_k - t_p)v - p_s - p'_k$$

A stąd, po uwzględnieniu (16)

$$t_{ke} = t_p + \frac{p_s + p'_k}{v} + t_k - t_p - \frac{p_s + p'_k}{v}$$

I ostatecznie

$$t_{ke} = t_k \quad (18)$$

W przypadku przeskoku parceli efektywnej do pełnych wymiarów, po odsłonięciu obrzeża p'_f oraz obrzeża od strony starych zrobów (rys. 11d) pełny jej wybieg wynosi:

$$L'_e = L - p_s - p_k \quad (19)$$

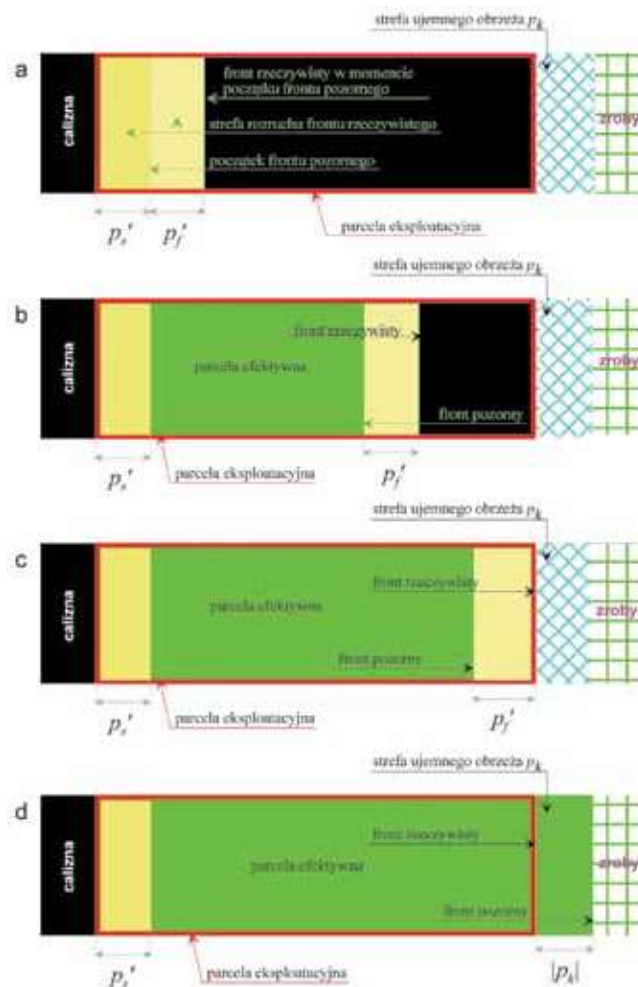
Wykresy postępu frontu rzeczywistego i pozornego w zależności od czasu dla $p_s \geq 0, p_k < 0$ pokazano na rys. 12.

W podsumowaniu rozdziału w tablicach 4 i 5 przedstawiono odpowiednio czasy rozpoczęcia i zakończenia eksploatacji oraz wybiegi eksploatacji efektywnej odpowiednio dla założeń eksploatacji z tablic 1 i 2.

Podsumowanie

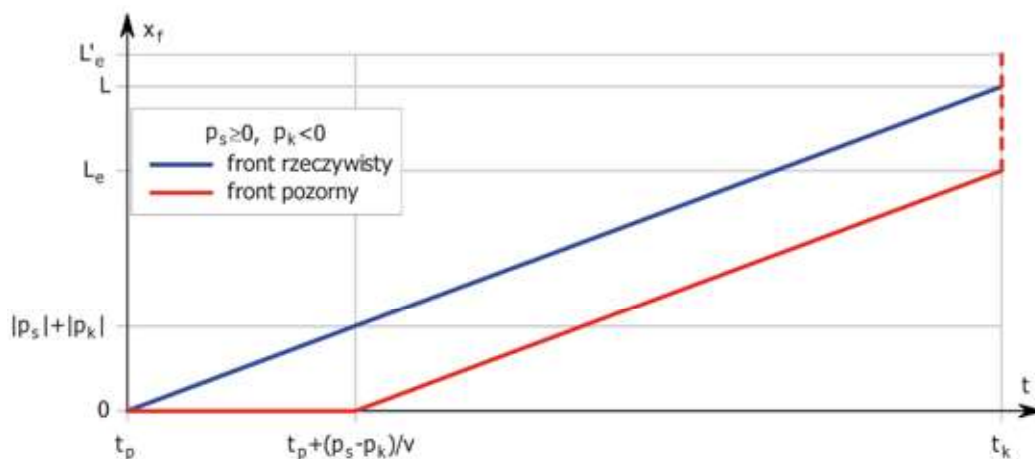
Uwzględnianie obrzeża eksploatacyjnego w prognozach deformacji powierzchni terenu nie jest zawsze stosowane, pomimo że wyniki pomiarów geodezyjnych skonfrontowane z obliczeniami wskaźników deformacji według teorii Knothe'go-Budryka, wskazują na potrzebę jego stosowania.

Według twórców teorii obrzeże nie jest parametrem teorii. Jest wielkością opisującą geometrię parceli eksploatacyjnej. Z kolei autorzy programów komputerowych stosowanych do prognoz deformacji (m.in. Białek, Drzęzła i Jędrzejec) uwzględniają wielkość obrzeża jako parametr modelu obliczeniowego, przy czym jego stosowanie jest selektywne. Najczęściej jest używane do obliczeń deformacji wpływów dokonanej i projektowanej eksploatacji pojedynczych parceli w prognozach i obliczeniach szczegółowych. W prognozach podstawowych lub przybliżonych obrzeże jest najczęściej pomijane.



Rys. 11. Ilustracja wybierania parceli efektywnej przy dodatnim obrzeżu p_s i ujemnym obrzeżu p_k : a) wyznaczenie początku wybierania (parceta efektywna pusta), b) położenie parceli efektywnej w trakcie rozwoju frontu rzeczywistego, c) front rzeczywisty osiągnął swój kres - szybki przeskok frontu pozornego do pełnego rozmiaru, d) pełna parceta efektywna

Fig. 11. Illustration of effective panel extraction for positive p_s and negative p_k operating rim: a) indication of first stage of exploitation (non effective panel), b) location of effective panel during advance of longwall face, c) final stage of real longwall face – rapid move of virtual longwall face to full longwall length, d) final effective panel



Rys. 12. Postęp frontu rzeczywistego i pozornego w zależności od czasu dla obrzeży mieszanych przy założeniu (5)

Fig. 12. Advance of real and virtual longwall face in relation to duration of exploitation for mixed operating rims applying assumption (5)

Tablica 4. Czasy t_{pe} , t_{ke} oraz wybiegi eksploatacji efektywnej wynikające z tablicy 1

Table 4. Duration of exploitation t_{pe} , t_{ke} and longwall lengths for effective exploitation in relation to data from table 1

table 1.

	$p_s \geq 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k < 0$	$p_s \geq 0, p_k < 0$
t_{pe}	$t_p + \frac{p_s + p_k}{v}$	$t_p + \frac{p_s + p_k}{v}$	$t_p + \frac{p_s + p'_k}{v}$	$t_p + \frac{p_s + p'_k}{v}$
t_{ke}	t_k	t_k	t_k	t_k
L_e	$L - (p_s + p_k)$	$L - (p_s + p_k)$	$L - (p_s + p'_k)$	$L - (p_s + p'_k)$
L'_e	–	–	$L - (p_s + p_k)$	$L - (p_s + p_k)$

Tablica 5. Czasy t_{pe} , t_{ke} oraz wybiegi eksploatacji efektywnej wynikające z tablicy 2.

Table 5. Duration of exploitation t_{pe} , t_{ke} and longwall lengths for effective exploitation in relation to data from table 2

table 2.

	$p_s \geq 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k \geq 0$	$p_s < 0, p_k < 0$	$p_s \geq 0, p_k < 0$
t_{pe}	$t_p + \frac{p_s + p_k}{v}$	$t_p + \frac{p_s + p_k}{v}$	t_p	$t_p + \frac{2p_s}{v}$
t_{ke}	t_k	t_k	t_k	t_k
L_e	$L - (p_s + p_k)$	$L - (p_s + p_k)$	L	$L - 2p_s$
L'_e	–	–	$L - (p_s + p_k)$	$L - (p_s + p_k)$

W artykule przedstawiono definicję oraz wzory opisujące obrzeże eksploatacyjne w prognozach deformacji terenu. Uporządkowano dotychczasowe próby opisywania ugięcia stropu zasadniczego w postaci funkcyjnej. W artykule zdefiniowano pojęcia wybiegu i czasu eksploatacji parcel rzeczywistych i efektywnych z uwagi na uwzględnienie obrzeża dla krawędzi startowej, końcowej i krawędzi związanej z frontem eksploatacyjnym, które traktowane są jako dane opisowe parcel zdefiniowanych w programie komputerowym „Szkoły”.

Literatura

- Batkiewicz W.: Obliczanie wskaźników poeksploatacyjnych deformacji terenu. Wydawnictwo Śląsk. Katowice 1968.
- Bialek J.: Algorytmy i programy komputerowe do prognozowania deformacji terenu górniczego. Monografia. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2003.
- Bialek J., Pomykoł M.: Wpływ kształtu linii ugięcia stropu na deformacje powierzchni. Materiały V Konferencji Ochrona Środowiska Na Terenach Górniczych. Z.G. SITG. Szczyrk 2004, s. 33-42.
- Drzęzła B.: Rozwiązanie pewnego przestrzennego zadania liniowej teorii sprężystości w zastosowaniu do prognozowania deformacji górotworu pod wpływem eksploatacji górniczej wraz z oprogramowaniem. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. „Górnictwo” 1978, z. 91.
- Jędrzejec E.: Poeksploatacyjne przemieszczenia górotworu poziomo uwarstwionego. GIG (Praca doktorska). Katowice 1991.
- Jędrzejec E.: Komputerowy system prognozowania wpływu podziemnej eksploatacji górniczej na górotwór. Materiały z konferencji II Dni Miernictwa Górniczego i Ochrony Terenów Górniczych. Wydawnictwo GIG, Katowice 1993, s. 69-82.
- Knothe S.: Praca doktorska (1953a). W. Silva Rerum Profesora Stanisława Knothe. Wydawnictwa AGH. Kraków 2013.
- Knothe S.: Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa t. 1, z. 1, 1953b.
- Knothe S.: Prognozowanie wpływów eksploatacji górniczej. Wydaw. Śląsk, Katowice 1984.
- Knothe S.: Teoria Budryka-Knothe po latach. Szkoła Eksploatacji Podziemnej '93, t. 2. CPPGSMiE PAN, Kraków 1993.
- Kowalczyk Z.: Określenie wpływów eksploatacji górniczej metodą przekrojów pionowych. Wydawnictwo Śląsk. Katowice 1972.
- Kowalski A.: Nieustalone górnicze deformacje powierzchni w aspekcie dokładności prognoz. Studia - Rozprawy - Monografie Nr 871. Wydawnictwo Głównego Instytutu Górnictwa. Katowice 2007.
- Kowalski A., Jędrzejec E.: Ochrona terenów górniczych i pogórnicznych. W: W. Konopko (red.): Bezpieczeństwo pracy w kopalniach węgla kamiennego. T.1. Wydawnictwo GIG. Katowice 2013, s. 353-377.
- Kowalski A.: Prognozy deformacji powierzchni w świetle deformacji określanych pomiarowo metodami geodezyjnymi. XXI Konferencja Zarządu Oddziału SITG w Rybniku. Ochrona środowiska na terenach górniczych i pogórnicznych kopalń w Subregionie Zachodnim Województwa Śląskiego. Rybnik 2014, s. 113-126.
- Kwiatkiewicz J. i inni: Ochrona obiektów budowlanych na terenach górniczych. Wyd. GIG. Katowice 1997.
- Kwiatkiewicz J.: Wpływ ugięcia stropu na obniżenia powierzchni. „Przeegląd Górniczy” 2004, nr 11, s. 4-8.
- Litwiniusz J.: Równanie różniczkowe przemieszczeń górotworu. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, t. 1, z. 1. Kraków 1953.
- Szpetkowski S.: Prognozowanie wpływów eksploatacji złóż pokładowych na górotwór i powierzchnię terenu. Śląskie Wydawnictwo Techniczne. Katowice 1995.
- Zych J.: Metoda prognozowania wpływów eksploatacji górniczej na powierzchnię terenu uwzględniająca asymetryczny przebieg procesu deformacji. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 1987, z. 164.