

Numeryczna analiza metod geotechnicznych minimalizujących wpływ przemieszczeń powierzchni terenu wywołanych eksploatacją podziemną

RAFAŁ MISA, KRZYSZTOF TAJDUŚ, ANTON SROKA

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

Streszczenie

Artykuł opisuje geotechniczne metody ochrony obiektów budowlanych stosowane na świecie w celu ograniczenia wielkości oraz zasięgu deformacji górotworu powstałych wskutek eksploatacji podziemnej. Metody te pomimo swoich niewymiernych walorów są rzadko stosowane w praktyce budowlanej, jako element redukujący szkody górnicze. Autorzy przedstawili w artykule rodzaje stosowanych metod geotechnicznych zabezpieczania obiektów budowlanych wraz z przykładem oraz wyniki modelowania numerycznego przykładowych konstrukcji prewencyjnych minimalizujących wpływy robót górniczych na powierzchnię terenu dla różnych warunków brzegowych. Do obliczeń wykorzystano program Abaqus 6.10-2 oparty na Metodzie Elementów Skończonych.

Słowa kluczowe: metody numeryczne, MES, geotechniczne metody ochrony obiektów budowlanych, przemieszczenia poziome

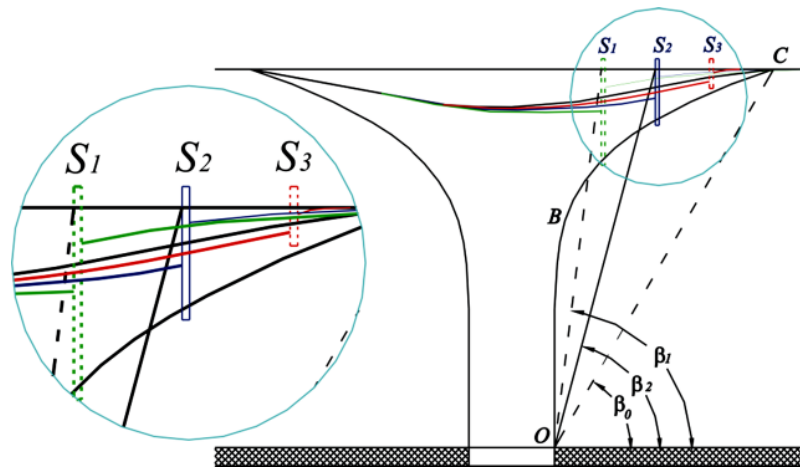
1. Wstęp

Podziemna eksploatacja górnicza wywołuje w górotworze oraz na powierzchni terenu ruchy skał i gruntów, które często są przyczyną powstawania szkód górniczych. W celu niedopuszczenia do ich powstawania lub też ograniczenia ich zasięgu, prowadzi się działania zmierzające do znalezienia rozwiązań technicznych, które pozwalałyby na skuteczną ochronę obiektów budowlanych przed wpływem podziemnej eksploatacji górniczej. W dotychczasowych rozważaniach, autorzy projektów inżynierskich koncentrowali się głównie na opracowywaniu metod konstrukcyjnego zabezpieczania obiektów w celu minimalizacji szkód powstających w wyniku prowadzonych eksploatacji podziemnych. Zagadnienie geotechnicznych metod ochrony obiektów budowlanych przed szkodami górniczymi pozostało w cieniu wspomnianych zainteresowań. Pomimo tego, istnieją na świecie praktyczne przykłady zastosowania metod geotechnicznych ochrony obiektów budowlanych, a uzyskane wyniki redukcji deformacji powierzchni terenu oraz szkód górniczych są więcej niż zadowalające.

2. Opis stosowanych metod geotechnicznych ochrony obiektów budowlanych przed szkodami górniczymi

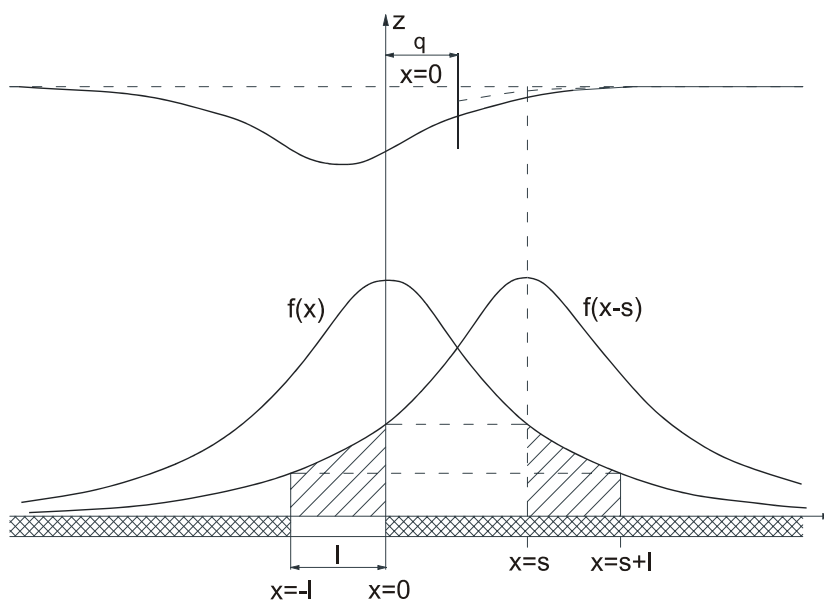
Jedną z podstawowych metod geotechnicznych zabezpieczenia obiektu budowlanego przed szkodami górniczymi jest stosowana *ścianka zaporowa*. Konstrukcja ta jest zagłębianą w gruncie, w pewnej odległości od granicy eksploatacji a także od obiektu chronionego. Jej zastosowanie powoduje ograniczenie ruchów gruntu poza linią jej zagłębienia uzyskując w ten sposób redukcję wartości mierzonych deformacji terenu w stosunku do rozmiarów odkształceń, jakie wystąpiłyby gdyby tej ścianki nie wykonano. Sytuację tą przedstawiono na rysunku 1. Schemat ten prezentuje trzy warianty zastosowania ścianki oporowej S_1 , S_2 i S_3 różniące się między sobą głębokością zagłębienia oraz umiejscowieniem w stosunku do krawędzi eksploata-

cji. W wyniku obserwacji zauważono, że po zabiciu odpowiednio długiej ścianki (rys. 1) część terenu może znaleźć się poza polem wpływów działalności górniczej, dodatkowo na lewo od ścianki przemieszczenia są większe od tych, które występują, gdy ścianki nie ma, a na prawo przemieszczenia terenu ulegają redukcji lub całkowitemu zaniknięciu. Przesuwając ściankę bliżej wyrobiska sprawiamy, że zwiększana jest strefa „bezpieczna” (rys. 1. odcinek S_1C), tym samym zwiększa się kąt zasięgu wpływów głównych osiągając wartość β_1 . Nie wystarczy jednak tylko przesunąć ściankę, aby spełniała ona swoje zadanie, ważne jest również spełnienie warunku odpowiedniej głębokości zabitej ścianki, gdyż za płytka ścianka nie powstrzyma ruchów gruntu czego wynikiem będzie obniżenie terenu poza ścianką (rysunek 1 – odcinek S_3C). Obniżenie to wystąpi w mniejszym stopniu, aniżeli w sytuacji braku ścianki.



Rys. 1. Wpływ zabicia ścianki zaporowej. Źródło: Budryk 1954

Knothe (1954) w swoich rozważaniach na temat przybliżonej metody wyznaczania wielkości odkształceń powierzchni poza ścianką zaporową wyznaczył wpływ ścianki przy założeniu, że wybierany jest pas pokładu o ograniczonej szerokości l i ścianka jest umieszczona w odległości q od jednej z krawędzi wybranego pasa (rys. 2).



Rys. 2. Profil niecki, jako krzywa całkowa z krzywej wpływów. Źródło: Knothe 1954

W wyniku tych prac Knothe uzyskał wzór na obniżenie terenu poza ścianką w postaci:

$$w(x)_{\text{dla } x \geq q} = \frac{1}{k} \frac{w_{\max}}{r} \int_x^\infty e^{-\frac{\pi}{r^2} \lambda^2} d\lambda - \frac{1}{k_1} \frac{w_{\max}}{r} \int_{x+l}^\infty e^{-\frac{\pi}{r^2} \lambda^2} d\lambda \quad (1)$$

gdzie:

- w_{\max} – maksymalne obniżenie terenu,
- r – promień zasięgu wpływów głównych,
- k – stosunek objętości niecki V , jaka powstałaby na powierzchni w granicach od q do ∞ , gdyby zapory nie było, do objętości niecki V_z , jaka powstaje na głębokości zagłębienia ścianki h także w granicach od q do ∞ , (wartość współczynników k i k_1 jest różna, gdyż inna jest odległość miejsca zabicia zapory od każdej z granic wyrobiska; odległość zapory od granicy prawostronnej $x = 0$ wynosi q i jest obrazowana członem pierwszym powyższego wzoru, natomiast od granicy lewostronnej $x = -l$, której wpływ obrazuje człon drugi, odległość równa się $q + l$).

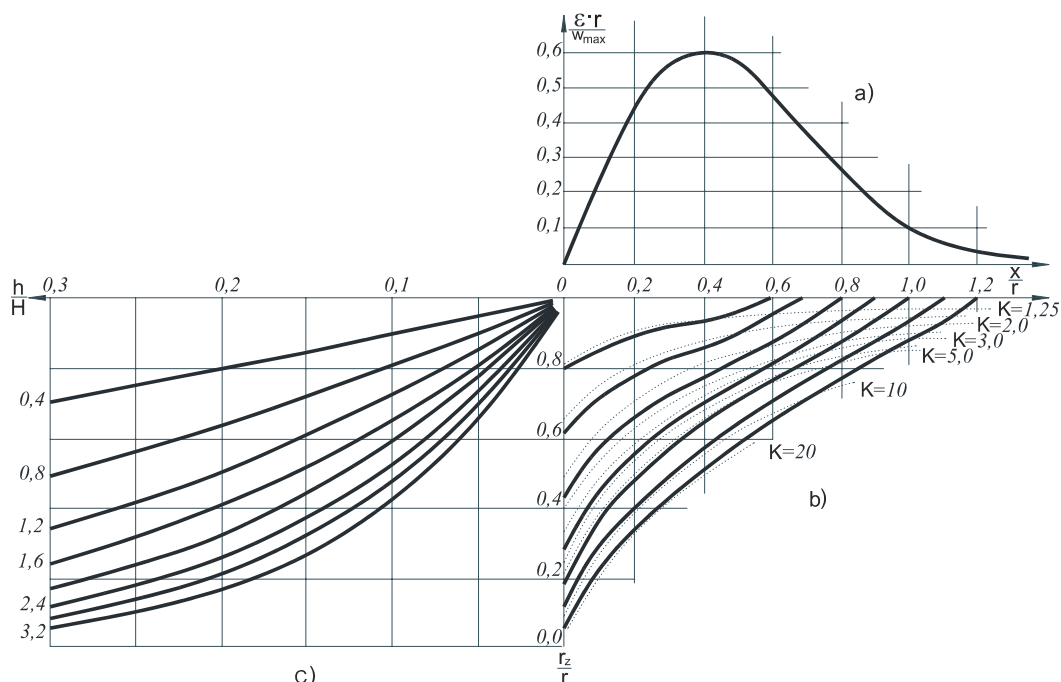
Poprzez różniczkowanie wzoru 1 uzyskuje się dalsze wyrażenia przy pomocy których można określić wartości wskaźników deformacji powierzchni terenu w rejonie ścianki zaporowej. Poniżej przedstawiono kilka podstawowych wzorów na określenie tych wskaźników deformacji:

Nachylenie profilu niecki:
$$T = \frac{w_{\max}}{r} \left[\frac{1}{k} e^{-\frac{\pi}{r^2} x^2} - \frac{1}{k_1} e^{-\frac{\pi}{r^2} (x+l)^2} \right] \quad (2)$$

Krzywizna profilu niecki:
$$K = -\frac{2\pi w_{\max}}{r^3} \left[\frac{1}{k} x e^{-\frac{\pi}{r^2} x^2} - \frac{1}{k_1} (x+l) e^{-\frac{\pi}{r^2} (x+l)^2} \right] \quad (3)$$

Odształcenie poziome:
$$\varepsilon = -\frac{\sqrt{2\pi} w_{\max}}{r^2} \left[\frac{1}{k} x e^{-\frac{\pi}{r^2} x^2} - \frac{1}{k_1} (x+l) e^{-\frac{\pi}{r^2} (x+l)^2} \right] \quad (4)$$

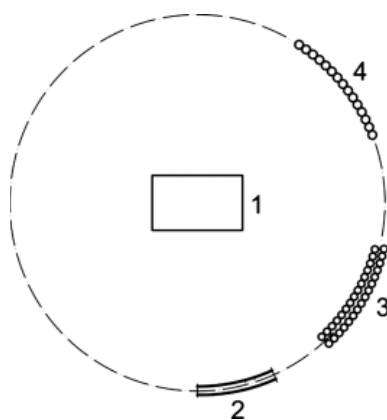
W związku z faktem, że wyznaczenie po zabiciu ścianki parametrów deformacji nawet metodą przybliżoną często jest dość skomplikowane Knothe zaproponował użycie nomogramu (rys. 3).



Rys. 3. Nomogram umożliwiający wyznaczenie miejsca zabicia ścianki i jej głębokości. Źródło: Knothe 1954

Zakładając znajomość: głębokości eksploatacji H ; oraz kąta zasięgu wpływów głównych β ; oraz maksymalnego obniżenia w_{\max} , uzyskujemy związki między położeniem ścianki zaporowej, jej głębokością i wielkościami deformacji poza zaporą.

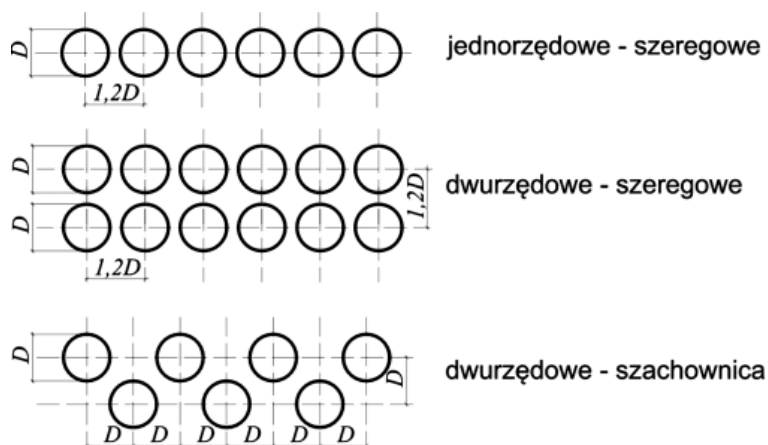
Inną metodą geotechniczną ograniczającą wpływ eksploatacji podziemnej na powierzchnię terenu i obiekty budowlane jest **perforacja**. Wykorzystując liniową lub okrężną perforację podłoża jesteśmy w stanie zabezpieczyć obiekty budowlane przed wpływami eksploatacji górniczej, w szczególności od występujących dużych odkształceń poziomych. Są one w stanie powodować poziome rozluźnienie podłoża, czyli rozpełzanie, a to z kolei może wywołać wystąpienie sił rozciągających w fundamentach budowli (Ledwoń, 1983). Zastosowanie perforacji zabezpiecza obiekt przed odkształceniami poziomymi, gdyż powstała pionowa szczelina w gruncie znajdująca się poza obiektem ułatwia wystąpienie deformacji terenu w miejscu pożądanym chroniąc tym samym sąsiedni teren i równocześnie budynek. Gęsto rozmieszczone pionowe otwory wiertnicze lub głęboki rów wypełniony materiałem podatnym to najbardziej funkcjonalne formy perforacji podłoża. Stosując pionowe odwierty uzyskuje się przecięcie podłoża od strony głównych deformacji (rys. 4).



Rys. 4. Perforacja okrężna – schemat. Oznaczenia: 1 – obiekt chroniony, 2 – przegroda w postaci rowu, 3 – otwory wiertnicze rozmieszczone liniowo w dwóch rzędach, 4 – otwory wiertnicze rozmieszczone na styk. Źródło: Ledwoń, 1983

Przy wykonywaniu otworów wiertniczych dąży się do powstania ciągłej pionowej szczeliny w gruncie, dlatego też stosunkowo ważnym aspektem jest, aby wykonywać te otwory możliwie blisko siebie. Sposób rozmieszczenia otworów w podłożu gruntowym zależy od własności tego podłoża oraz od technologii wykonywania otworów wiertniczych. Schemat przykładowych rozmieszczeń otworów z uwagi na panujące warunki przedstawia rysunek 5.

Strefa nawiercona z uwagi na zmniejszoną wytrzymałość gruntu upodatkowana jest i następnie przejmuje powstałe deformacje terenu chroniąc tym samym obszar między szczeliną a obiektem.

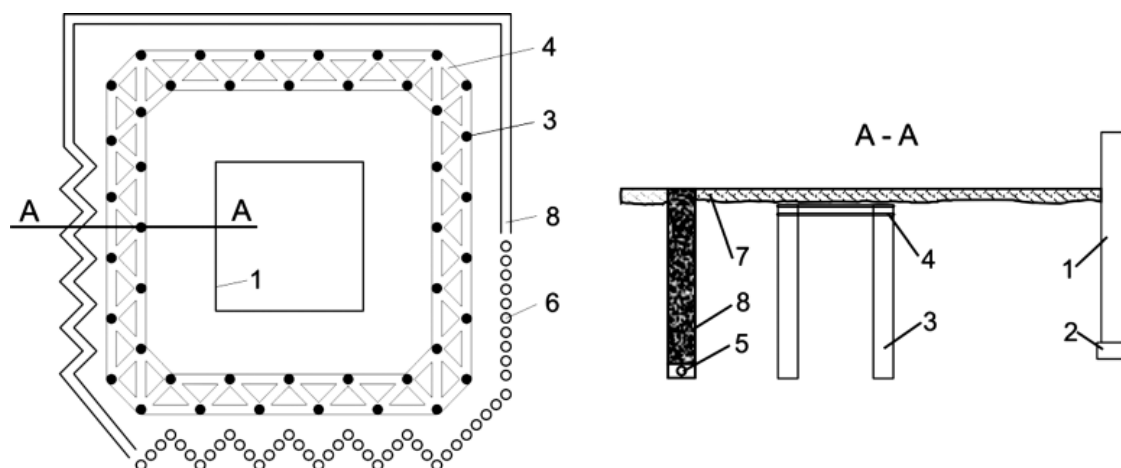


Rys. 5. Schematyczne rozmieszczenie otworów w podłożu. Oznaczenia: D – średnica odwiertu

Projektując przegrody w postaci gęsto rozmieszczonych otworów wiertniczych lub głębokich rowów niezbędne jest uwzględnienie wymiarów rzutu poziomego zabezpieczonego obiektu oraz wyznaczenie odpowiedniej odległości perforacji od ścian fundamentów. Ważne też jest sprawdzenie głębokości posadowienia i rodzaj konstrukcji układu nośnego. Koniecznie po wytyczeniu trasy otworów w terenie należy sprawdzić układ podziemnych sieci uzbrojenia terenu, aby uniknąć potencjalnego ich uszkodzenia podczas wykonywania prac głębokościowych. Należy także mieć na uwadze możliwość wykonania otworów wiertniczych o zróżnicowanym profilu podłużnym – można stosować większą średnicę górą i odpowiednio mniejszą dołem, bowiem przemieszczenia gruntu powinny być mniejsze w dolnym poziomie otworów.

Przegrody w formie rowów i odwiertów wykonuje się mechanicznie (stosując np. pogłębiarki łańcuchowe, wiertnice pionowe) metodą kombinowaną (w górnej części wykopu sposobem mechanicznym, a w dolnej przy użyciu materiałów wybuchowych) (Zych i Baranowski, 1997). Powstałe pustki w gruncie należy wypełniać materiałami odkształcalnymi, takimi jak np.: żużel hutniczy, drobnoziarnisty o dużej ścisłości, trociny impregnowane intertolem lub inne odkształcalne materiały (Ledwoń, 1983), w Niemczech powszechnie stosowany jest torf (Sroka, 2010).

W praktyce w celu ograniczenia szkód górniczych stosuje się również tzw. **transzeje gruntowe wraz z drenażem wgłębnym**. Wykonuje się je jako wykop o szerokości ok. 60 cm i głębokości sięgającej poniżej poziomu posadowienia budynku. Służy ona jako skuteczna metoda ochrony przed spleźaniem podłoża gruntowego. Na dnie wykopu można zastosować rurki drenarskie dla odprowadzania wód opadowych do studni chłonnej lub rowów odwadniających, a sam wykop wypełnić np. żużlem paleniskowym (Niemiec, 2008). Budowla geotechniczna zbudowana w taki sposób tworząc niejako „ekran zabezpieczający” lub „ekran podatny” zasadniczo spełnia dwie funkcje; odwadnia teren i posadowione na nim budynki oraz kompensuje odkształcenia poziome terenu – głównie ściskające. W zależności od szerokości rowu i ścisłości użytego materiału wypełniającego mamy do czynienia ze zmiennym efektem kompensacji. W sytuacji występujących rozpełzań terenu w wyniku obecności odkształceń rozciągających rozwiązaniem minimalizującym deformacje rozciągające może być wykonanie wokół budowli palisady z pali pionowych wzajemnie połączonych ze sobą w górnej, przypowierzchniowej części za pomocą poziomych belek żelbetowych (rys. 6). Najkorzystniejszym rozmieszczeniem tak powstałej palisady jest usytuowanie pali w formie linii łamanej, w taki sposób uzyskuje się lepsze przenoszenie sił poziomych. Najczęściej stosuje się modyfikację transzei składającą się zarówno z palisady żelbetowej i ekranu podatnego, dostosowaną do ograniczania rozpełzania gruntu oraz redukcji naprężeń ściskających występujących w gruncie, zwaną ekranem sztywno-podatnym.

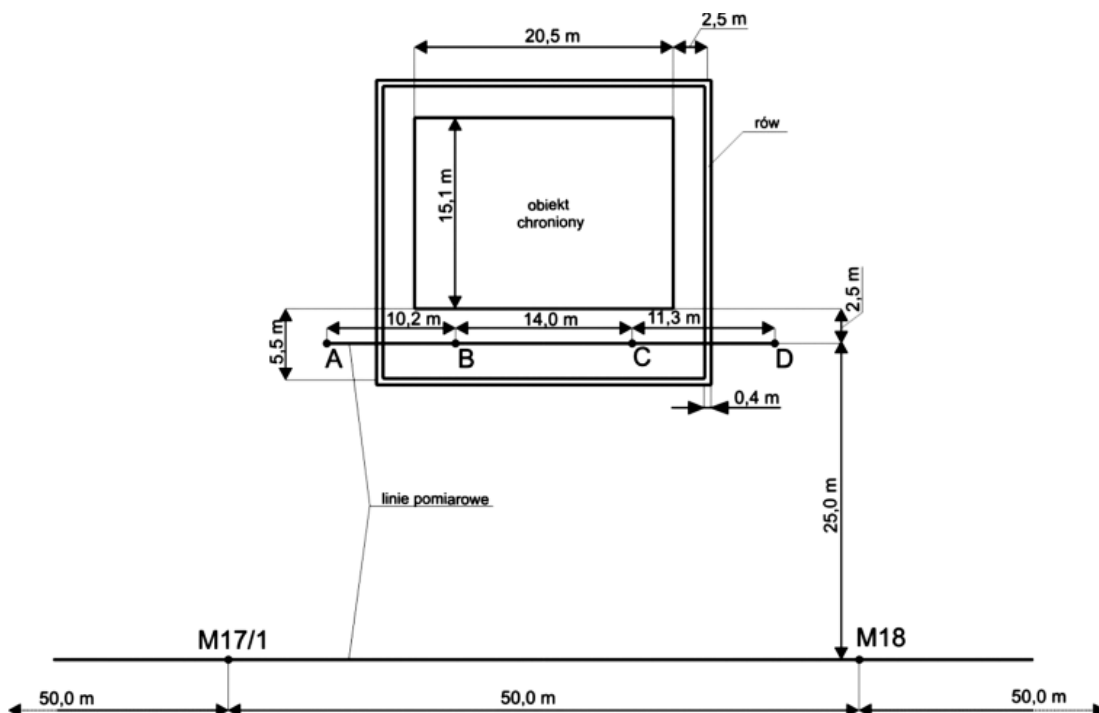


Rys. 6. Schemat ideowy konstrukcji ekranów sztywno – podatnych. Oznaczenia: 1 – fundament obiektu chronionego, 2 – ława fundamentowa, 3 – pól w gruncie, 4 – belka łącząca pale, 5 – drenaż transzei, 6 – transzeja w gruncie (perforacja gruntu otworami), 7 – warstwa nawierzchniowa, 8 – przegroda w postaci rowu. Źródło: Niemiec, 2008

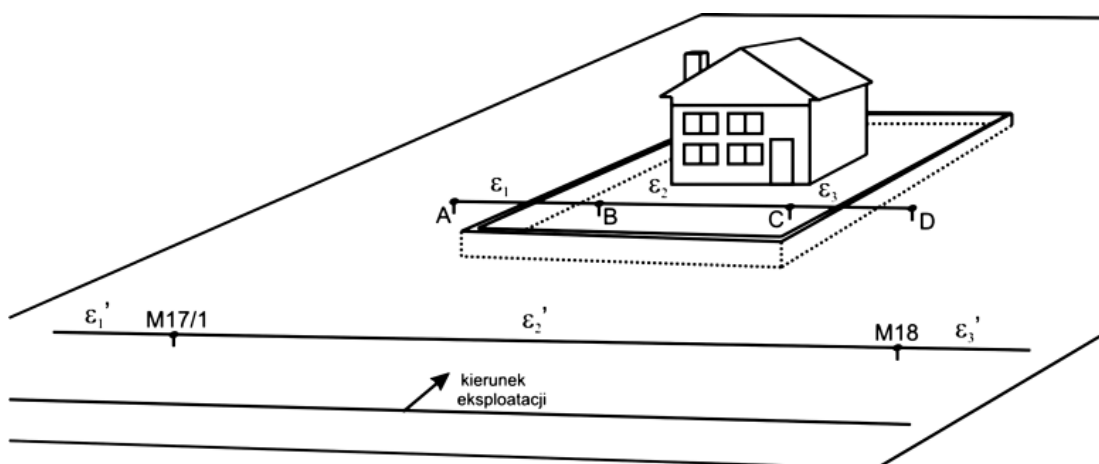
Przedstawiony ekran sztywno-podatny powinien również skutecznie chronić obiekt przed deformacjami nieciągłymi typu liniowego. Tego typu zabezpieczenia to jedna z najczęściej stosowanych metod ochrony obiektów budowlanych w Niemczech (Sroka, 2007).

3. Przykład zastosowanej budowli geotechnicznej chroniącej obiekt budowlany przed szkodami górniczymi

Przedstawione metody ograniczania negatywnych skutków eksploatacji podziemnej w postaci szkód górniczych na obiekty budowlane są stosowne w wielu krajach na świecie m.in. Niemczech, USA, Wielkiej Brytanii, Polsce i ich przykłady zostały szeroko opisane w publikacji: *Przegląd geotechnicznych metod...* (Misa i Tajduś, 2010). Jednym z przykładów jest zabezpieczenie zastosowane na terenie kopalni BW Haus Aden w Niemczech (Sroka, 2010). Wokół chronionego budynku Haus Reck wykonano rów oddalony o 2,5 m o szerokości 40 cm i o głębokości wahającej się od 2,5 m do 2,7 m wypełniając go torfem. Pomiedzy rowem a chronionym obiektem i w odległości 27,5 m od budynku (rys. 7) zastabilizowano punkty geodezyjne, które utworzyły dwie linie pomiarowe i na podstawie wykonanych pomiarów wyznaczono odkształcenia poziome (rys. 8).



Rys. 7. Rzut z góry na linie pomiarowe i rów chroniący budynek. Źródło: Sroka, 2010



Rys. 8. Schemat rozmieszczenia linii pomiarowych i rowu chroniącego budynek. Źródło: Sroka, 2010

W wyniku przeprowadzonych pomiarów odnotowano w trakcie prowadzonych prac górniczych następujące wartości maksymalnych odkształceń: $\varepsilon_1 = -7,98$; $\varepsilon_2 = -1,32$ i $\varepsilon_3 = -7,43$ mm/m odpowiednio dla odcinków A-B, B-C i C-D i $\varepsilon_1' = -5,39$; $\varepsilon_2' = -5,25$ i $\varepsilon_3' = -4,26$ mm/m dla drugiej linii pomiarowej. Można tutaj zauważyć spadek odkształceń występujących wzdłuż linii B-C (ε_2) niemal 4-krotnie (3,98) w stosunku do odpowiedniego odcinka M17/1-M18 (ε_2') znajdującego się na drugiej linii pomiarowej. Natomiast odkształcenia występujące wzdłuż odcinków A-B (ε_1) i C-D (ε_3) wzrosły odpowiednio 1,52 i 1,42 razy w stosunku do wartości ε_2' . Wyniki te ukazują pozytywny wpływ zastosowanych robót geotechnicznych. Dzięki wykonaniu przegród wokół budynku bardzo duży spadek wartości odkształceń obserwujemy w otoczeniu chronionego obiektu, mianowicie odkształcenia występujące wewnątrz rowu ε_2 w stosunku do ε_3 są niemal 6-krotnie (5,63) mniejsze, a w relacji do ε_1 ponad 6-krotnie (6,05) (tab. 1).

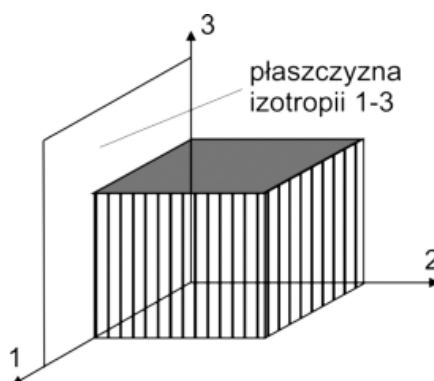
Tab. 1. Odkształcenia poziome i ich wzajemne relacje. Źródło: Sroka 2010

	1	2	3	Wzajemne relacje odkształceń				
ε [mm/m]	-7,98	-1,32	-7,43	$\varepsilon_1/\varepsilon_2'$	$\varepsilon_2'/\varepsilon_2$	$\varepsilon_3/\varepsilon_2'$	$\varepsilon_1/\varepsilon_2$	$\varepsilon_3/\varepsilon_2$
ε' [mm/m]	-5,39	-5,25	-4,26	1,52	3,98	1,42	6,05	5,63

4. Modelowanie numeryczne

Celem przeprowadzonych obliczeń numerycznych była analiza wpływu przykładowej transzei wykonanej w gruncie na wyniki modelowanych deformacji powierzchni terenu. W tym celu przeprowadzono obliczenia numeryczne dla kilkudziesięciu sytuacji różniących się parametrami geometrycznymi i właściwościami mechanicznymi przyjętego ośrodka skalnego. Zamieszczono zbiorcze rezultaty części symulacji dotyczącej przemieszczeń poziomych, które cechowały się najbardziej interesującymi wynikami. Wszystkie obliczenia dla potrzeb niniejszego opracowania przeprowadzono z zastosowaniem programu Abaqus 6.10-2 opartego na Metodzie Elementów Skończonych (Simulia, 2010).

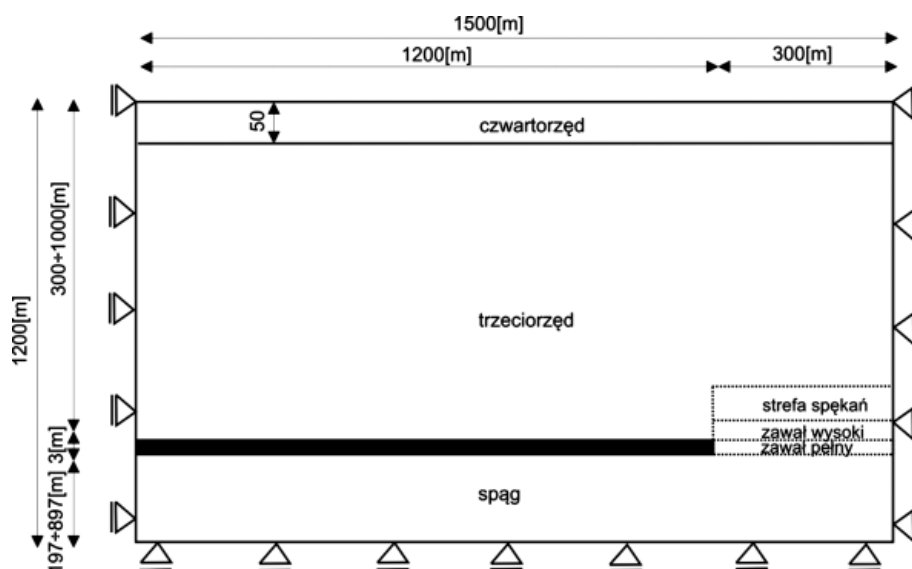
Do obliczeń przyjęto model anizotropowy o pięciu stałych sprężystych (Tajduś, 2009) zwany modelem anizotropowym osiowosymetrycznym (model transwersalnie izotropowy) (rys. 9).



Rys. 9. Schemat modelu transwersalnie izotropowego wykorzystywanego do opisu zachowania się górotworu w rejonie eksploatacji. Źródło: Tajduś 2008

Model numeryczny stanowiła tarcza w płaskim stanie odkształcenia (rys. 10) utwierdzona na dole i po bokach (zastosowano podpory przesuwne). Dla ograniczenia ilości elementów i przyspieszenia czasu obliczeń wykorzystano symetrię przy budowie modelu.

Rozpatrywano ośrodek uwarstwiony zachowujący się zgodnie z modelem sprężystym transwersalnie izotropowym (dla czwartorzędu, trzeciorzędu, pokładu węgla i spągu) oraz zgodnie z modelem sprężystym (dla stref spękań i stref zawału). W pierwszej fazie obliczeń modelowano pierwotny stan naprężenia, aby w kolejnym kroku usunąć elementy odpowiadające obszarom zawału pełnego (w miejscu wybrania węgla), zawału wysokiego (w strefie stropu bezpośrednio nad wybranym węglem) i spękań (w rejonie stropu zasadniczego), następnie przypisano wartości parametrów sprężystych symulujące strefy osłabienia.



Rys. 10. Schemat ogólny modelu obliczeniowego

Rozpatrywana sytuacja (rys. 10) uwzględniała 2 ściany o sumarycznej długości 600 m (ze względu na symetrię zamodelowano 300 m). Wymiary modelu numerycznego to 1500 m × 1200 m i składał się on z około 450000 elementów czterowzłowych, izotropowych o wymiarach 2 × 2 m. Zamodelowana eksploatacja dwóch pokładów węgla o grubości 3 m wywołała wystąpienie strefy zawału o miąższości 15 m i strefy spękań o grubości 30 m (dla uproszczenia obliczeń przyjęto te strefy jako stałe niezależnie od głębokości eksploatacji dla jakiej w danym momencie był przeliczany model).

Na rys. 10 liniami przerywanymi pokazano umiejscowienie stref zawału i spękań nad wybraną parcelą. Wyniki obliczeń przedstawiono w postaci tabel i wykresów przemieszczeń poziomych.

Przeanalizowano wiele modeli różniących się głębokością eksploatacji:

- pokład węgla na głębokości 1000 m,
- pokład węgla na głębokości 900 m,
- pokład węgla na głębokości 800 m,
- pokład węgla na głębokości 700 m,
- pokład węgla na głębokości 600 m,

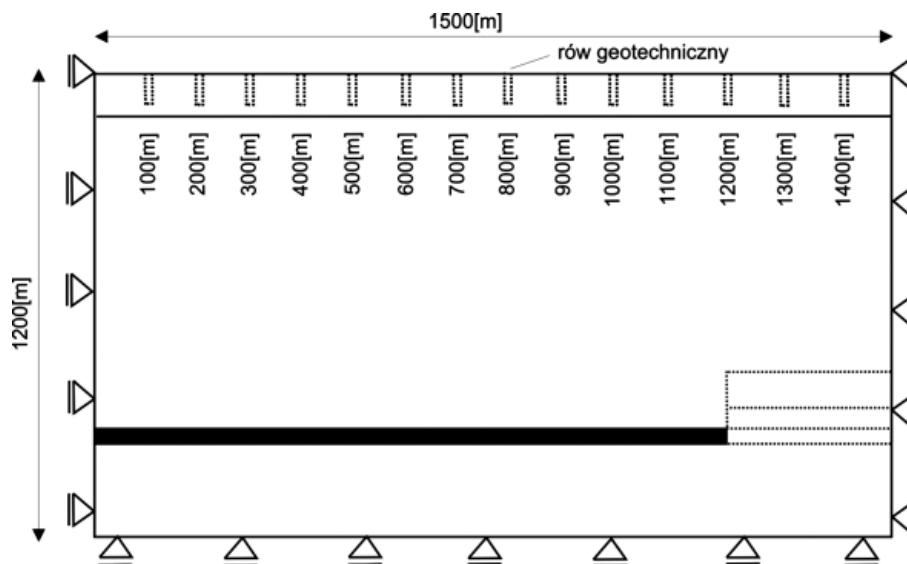
Dla każdego z ww. wariantów modelowano przerwy (rów o szerokości 2 m) w gruncie przy powierzchni terenu o zróżnicowanych głębokościach:

- rów o głębokości 2 m,
- rów o głębokości 4 m,
- rów o głębokości 6 m,
- rów o głębokości 8 m,
- rów o głębokości 10 m.

Dodatkowo przerwy w gruncie były modelowane w odstępach co 100 m (rys. 11).

W celu dopasowania otrzymanych niecek osiadań do teorii Knothego zmieniano parametry odkształceniowe górotworu. W wyniku tzw. back analysis uzyskano parametry skał górotworu przyjęte przy modelowaniu numerycznym (tab. 2-6) stosując następujące oznaczenia:

- E_1, E_2, E_3 – moduły Younga (moduły sprężystości podłużnej), [GPa],
- G_{12}, G_{13} – moduły Kirchhoffa (moduły sprężystości poprzecznej), [GPa],
- $\nu_{12} = \nu_{21}$ – współczynniki Poissona (stosunki odkształcenia poprzecznego do odkształcenia podłużnego), [-],
- ρ – gęstość objętościowa [kg/m³].



Rys. 11. Poglądowe rozmieszczenie rowów geotechnicznych

Tab. 2. Parametry modelu transwersalnie izotropowego warstw skalnych przyjęte w obliczeniach dla 1000 m głębokości eksploatacji

Material budujący górotwór	$E_1 = E_2$ [GPa]	E_3 [GPa]	$\nu_{12} = \nu_{21}$	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	ρ [kg/m ³]
czwartorzęd i trzeciorzęd	0,175	2,5	0,2	0,119	0,073	2000
węgiel	0,048	0,8		0,044	0,020	1200
spąg	0,144	2,4		0,060	0,133	2500
strefa spękań	0,850			-		2000
strefa zawału	0,137			-		2000

Tab. 3. Parametry modelu transwersalnie izotropowego warstw skalnych przyjęte w obliczeniach dla 900 m głębokości eksploatacji

Material budujący górotwór	$E_1 = E_2$ [GPa]	E_3 [GPa]	$\nu_{12} = \nu_{21}$	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	ρ [kg/m ³]
czwartorzęd i trzeciorzęd	0,150	2,5	0,2	0,103	0,063	2000
węgiel	0,048	0,8		0,044	0,020	1200
spąg	0,144	2,4		0,060	0,133	2500
strefa spękań	0,800			-		2000
strefa zawału	0,124			-		2000

Tab. 4. Parametry modelu transwersalnie izotropowego warstw skalnych przyjęte w obliczeniach dla 800 m głębokości eksploatacji

Material budujący górotwór	$E_1 = E_2$ [GPa]	E_3 [GPa]	$\nu_{12} = \nu_{21}$	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	ρ [kg/m ³]
czwartorzęd i trzeciorzęd	0,125	2,5	0,2	0,086	0,052	2000
węgiel	0,048	0,8		0,044	0,020	1200
spąg	0,144	2,4		0,060	0,133	2500
strefa spękań	0,750			-		2000
strefa zawału	0,113			-		2000

Tab. 5. Parametry modelu transwersalnie izotropowego warstw skalnych przyjęte w obliczeniach dla 700 m głębokości eksploatacji

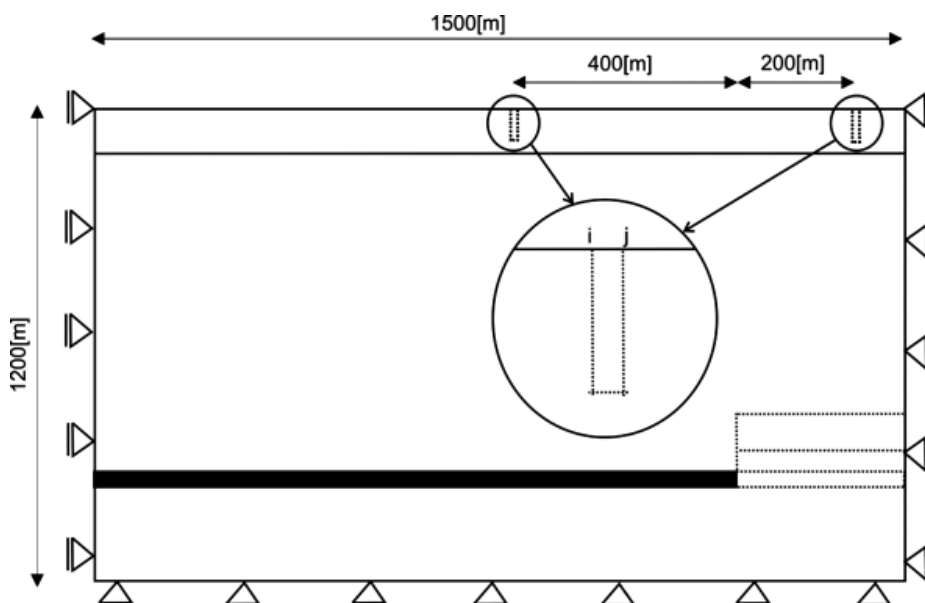
Materiał budujący górotwór	$E_1 = E_2$ [GPa]	E_3 [GPa]	$\nu_{12} = \nu_{21}$	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	ρ [kg/m ³]
czwartorzęd i trzeciorzęd	0,125	2,5	0,2	0,086	0,052	2000
węgiel	0,048	0,8		0,044	0,020	1200
spąg	0,144	2,4		0,060	0,133	2500
strefa spękań	0,660			-		2000
strefa zawalu	0,096			-		2000

Tab. 6. Parametry modelu transwersalnie izotropowego warstw skalnych przyjęte w obliczeniach dla 600 m głębokości eksploatacji.

Materiał budujący górotwór	$E_1 = E_2$ [GPa]	E_3 [GPa]	$\nu_{12} = \nu_{21}$	G_{12} [GPa]	G_{13} [GPa]	ρ [kg/m ³]
czwartorzęd i trzeciorzęd	0,125	2,5	0,2	0,086	0,052	2000
węgiel	0,048	0,8		0,044	0,020	1200
spąg	0,144	2,4		0,060	0,133	2500
strefa spękań	0,550			-		2000
strefa zawalu	0,083			-		2000

Uzyskane wyniki obliczeń numerycznych potwierdzają obserwowaną w rzeczywistości naturę zachowania się gruntu w sąsiedztwie przerw pionowych (uskoki, transzeje, rowy). Charakter otrzymanych wyników w różnych wariantach jest podobny, stąd prezentowane są tylko wybiórczo zbiorcze tabele i wybrane wykresy. Na rysunku 12 zaprezentowano rozmieszczenie rowów dla dwóch poniżej przedstawionych przypadków:

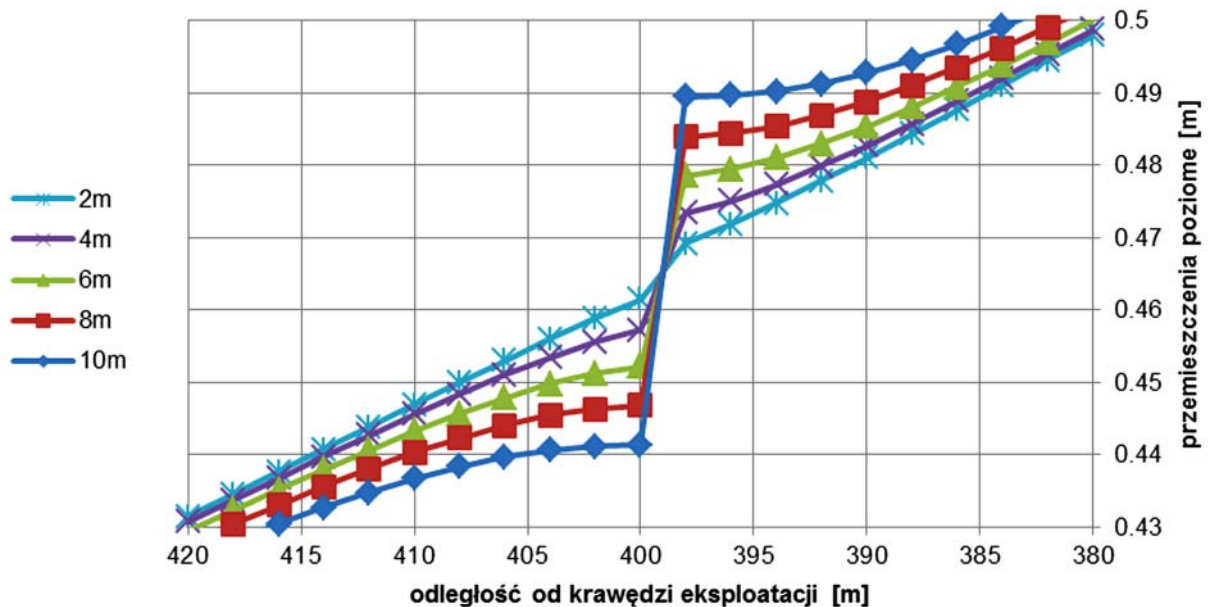
- rów w odległości 400 m od granicy eksploatacji – w strefie występujących na powierzchni naprężeń rozciągających,
- rów w odległości 200 m od granicy eksploatacji – nad eksploatacją, w strefie występujących na powierzchni naprężeń ściskających.



Rys. 12. Usytuowanie dwóch poniżej omówionych przypadków rozmieszczenia rowów, wraz ze schematycznym oznaczeniem numeracji węzłów przy krawędziach rowów

Pokazano oznaczenie węzłów, odpowiednio z lewej i prawej strony rowu, jako „i” i „j”. W tabeli 7 i 8 przedstawiono wartości przemieszczeń poziomych występujących we wspomnianych węzłach (i, j).

Z przedstawionych wyników (np. rys. 13) wynika jednoznacznie, że strefa zamodelowanej przerwy w gruncie (rowu) prowadzi do znacznego zwiększenia wartości przemieszczeń poziomych przed tą strefą, natomiast za strefą obserwowane deformacje są znacznie mniejsze, różnice dochodzą nawet do kilkudziesięciu procent (zwłaszcza w strefie gdzie obiekty budowlane narażone są na ściskania (rys. 14).

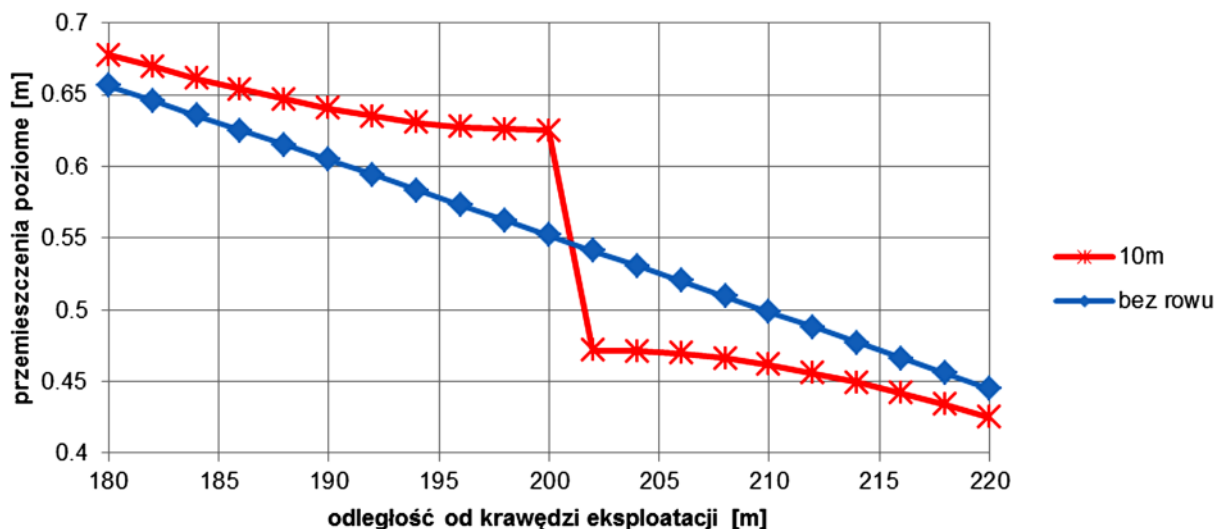


Rys. 13. Przemieszczenia poziome wywołane eksploatacją górniczą na głębokości 800 m przy usytuowaniu rowu w odległości 400 m od krawędzi eksploatacji dla różnych głębokości rowów (od 2 do 10 m)

Wielkość tzw. strefy redukującej wpływy eksploatacji powstającej w sąsiedztwie modelowanego rowu (jak wykazuje rys. 13) zależna jest od głębokości wykonanej przerwy w gruncie. Zjawisko to zostało potwierdzone pomiarami geodezyjnymi. Dla przerw głębszych uzyskuje się większą zmianę procentową wartości przemieszczeń w stosunku do przerw płytszych, gdzie zmiany procentowe są nieznaczne. Analizując wiele różnych wariantów w obliczanych modelach uzyskano wartości zmian procentowych przemieszczeń poziomych w strefie rozciągań dochodzące do kilkunastu procent (dla najgłębszych konstrukcji). Przykładowe wyniki pokazane są w tabeli 7 dla eksploatacji prowadzonej na głębokości 800 m i przy lokalizacji rowu w odległości 400 m od krawędzi eksploatacji. Dla rowu o głębokości 10 m zmiana wartości przemieszczeń dochodzi niemal do 10%, dla rowu o głębokości 8 m jest to niespełna 8%, dla 6-cio metrowej przerwy wartość to 5,5%, dla 4 m to 3,4%, a dla 2 m zmiana wynosi niewiele ponad 1,5%. Charakter zmian procentowych wartości przemieszczeń poziomych w sąsiedztwie modelowanych przerw można opisać w sposób satysfakcjonujący funkcją liniową (R^2 w okolicach 0,9988), wraz z wzrostem głębokości rowu w sposób proporcjonalny wzrasta zmiana procentowa obserwowanych przemieszczeń.

Tab. 7. Zestawienie wartości przemieszczeń poziomych i ich zmian procentowych dla eksploatacji na głębokości 800 m i przy lokalizacji rowu w odległości 400 m od krawędzi eksploatacji przy różnych głębokościach rowu

Głębokość rowu [m]	Wartość przemieszczeń poziomych w węźle i	Wartość przemieszczeń poziomych w węźle j	Zmiana procentowa [%]
	u_i [m]	u_j [m]	$(u_i - u_j)/u_i \cdot 100$
10	0,4414	0,4895	9,8
8	0,4468	0,4840	7,7
6	0,4522	0,4785	5,5
4	0,4573	0,4734	3,4
2	0,4615	0,4692	1,6



Rys. 14. Przemieszczenia poziome wywołane eksploatacją na głębokości 800 m przy usytuowaniu rowu nad zrobami w odległości 200 m od krawędzi eksploatacji dla rowu o głębokości 10 m i w sytuacji bez zabezpieczeń

W strefie gdzie obiekty narażone są na ściskania (bezpośrednio nad eksploatacją) obserwowany jest bardziej znaczący wpływ przerw w gruncie. Dla eksploatacji prowadzonej na głębokości 800 m i przy lokalizacji rowu w odległości 200 m na prawo od krawędzi eksploatacji uzyskano niemal 27% zmniejszenie wartości przemieszczeń poziomych.

Analizując otrzymane wyniki stwierdzono niewielki wpływ głębokości prowadzonej eksploatacji na procentowe zmiany wartości przemieszczeń przed i za modelowaną przerwą. Różnice maksymalne zmian procentowych wartości przemieszczeń poziomych w żadnym z modeli nie przekroczyły 2%. W tabeli 8 zestawiono wartości przemieszczeń poziomych i ich zmian procentowych dla dziesięciometrowego rowu usytuowanego w odległości 300 m na lewo od krawędzi eksploatacji prowadzonych na głębokościach od 600 do 1000 m.

Tab. 8. Zestawienie wartości przemieszczeń poziomych i ich zmian procentowych dla rowów o głębokości 10 m przy eksploatacji na głębokości od 600 do 1000 m i przy lokalizacji rowu w odległości 300 m od krawędzi eksploatacji

Głębokość eksploatacji [m]	Wartość przemieszczeń poziomych w węźle i	Wartość przemieszczeń poziomych w węźle j	Zmiana procentowa [%]
	u_i [m]	u_j [m]	$(u_i - u_j)/u_i \cdot 100$
1000	0,760	0,694	8,6
900	0,743	0,675	9,1
800	0,690	0,626	9,2
700	0,651	0,587	9,9
600	0,580	0,517	10,8

6. Uwagi końcowe

Stosowanie metod geotechnicznych w celu zabezpieczenia obiektów budowlanych przed wpływem podziemnej eksploatacji górniczej jest technicznie całkowicie uzasadnione. Jednak warto nadal poszukiwać różnych rozwiązań geotechnicznych redukujących szkody górnicze, takich jak: ścianki zaporowe; ekrany sztywno-podatne; perforacje okrężne lub podłużne; bariery geotechniczne.

Słuszność stosowania tych metod została potwierdzona modelami numerycznymi przedstawionymi w niniejszym artykule. Wyniki modelowania numerycznego wskazują, że zamodelowana przerwa dylatacyjna (transzeja, rów) w gruncie wpływa w istotny sposób na uzyskane wyniki przemieszczeń poziomych. Wartości tych przemieszczeń są mniejsze w rejonie ochronnym (czyli za zamodelowanym rowem), a wykazują większe wartości przed rowem. Jest to potwierdzeniem doświadczeń budowlanych.

Pomimo satysfakcjonujących jakościowo rezultatów Autorzy są świadomi faktu, że przeprowadzona analiza jest tylko przybliżeniem zjawiska rzeczywistego. Stąd zasadne wydają się dalsze prace nad doskonaleniem modeli numerycznych w celu jak najbardziej wiarygodnego opisu zjawisk rzeczywistych.

Praca została wykonana w roku 2011 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Budryk W., 1954: *Wpływ niektórych konstrukcji budowlanych na przemieszczenia i odkształcenia powierzchni*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, 1954, T. II, z. 4, s. 423-445.
- Knothe S., 1954: *Przybliżona metoda wyznaczania wielkości odkształceń powierzchni poza ścianką zaporową*. Archiwum Górnictwa i Hutnictwa, 1954, T. II, z. 4, s. 473-487.
- Ledwoń J.A., 1983: *Budownictwo na terenach górniczych*. Warszawa, Wydawnictwo Arkady.
- Misa R., Tajduś K., 2010: *Przegląd geotechnicznych metod ochrony obiektów budowlanych przed wpływem podziemnej eksploatacji górniczej*. Kwartalnik wydawany przez Główny Instytut Górnictwa: Prace Naukowe GIG Górnictwo i Środowisko, Nr 4/1/2010, s. 266-281.
- Niemiec T., 2008: *Ekran sztywno-podatny jako sposób ochrony obiektów budowlanych na terenach górniczych*. Katowice, Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko 2008 Nr VI/2008.
- Simulia 2010: *Abaqus/CAE User's Manual*.
- Sroka A., 2010: *Materiały własne*.
- Sroka A., 2007: *Problemy wynikające ze zmian technologii eksploatacji we współczesnym górnictwie węgla kamiennego na przykładzie deformacji nieciągłych typu liniowego*. Katowice, Prace Naukowe GIG, Górnictwo i Środowisko, Nr V/2007.
- Tajduś K., 2008: *Określenie wartości parametrów odkształceniowych górotworu uwarstwionego w rejonie wpływu eksploatacji górniczej*. Praca doktorska. AGH w Krakowie.
- Tajduś K., 2009: *New method for determining the elastic parameters of rock mass layers in the region of underground mining influence*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Science, Vol. 46, No. 8, p. 1296-1305.
- Zych J., Baranowski Z., 1997: *Doświadczenia z wykonywania szczelin w gruncie za pomocą materiałów wybuchowych*. Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie 1997 nr 8.

Numerical analysis of geotechnical methods reducing the impact of terrain surface displacement caused by underground mining activity

Abstract

The article describes geotechnical methods of building protection, used all over the world for the purpose of reducing the scale and range of strata deformation resulting from underground mining activity. The methods in question, in spite of their immeasurable values, are seldom used in construction industry as a means of reducing mining damage. The Authors presented types of geotechnical methods available for securing buildings, together with an example, as well as the results of numerical modelling of sample preventive constructions reducing the impact of mining activity on the terrain surface, under various boundary conditions. The calculations were performed with the Abaqus 6.10-2 program, based on the The Finite Element Method.

Keywords: numerical methods, FEM (Finite Element Method), geotechnical methods of building protection, horizontal displacement