

# Uproszczony sposób symulacji oddziaływania wyrobisk na ich otoczenie o właściwościach sprężysto-lepkich

AGNIESZKA MAJ

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

## Streszczenie

Charakterystyczna dla konwencjonalnych metod eksploatacji złożoność geometrii wyrobisk i zmienność parametrów fizycznych górotworu wymusza daleko idące uproszczenia geomechanicznych modeli kopalń wielopoziomowych. W pracy pokazano wstępne wyniki badań nad zastosowaniem ekwiwalentnych przestrzeni górotworu w obliczeniach numerycznych. Wykazano, że w pewnych warunkach zamiana struktury kopalni na ekwiwalentną przestrzeń górotworu nie zmieni znacząco rozkładu wskaźników deformacyjnych górotworu.

**Słowa kluczowe:** uproszczenie modelu, obliczenia numeryczne, wielopoziomowe kopalnie soli, ośrodek sprężysto-lepki

## 1. Wstęp

Opis fizyczny zachowania się górotworu z wydrążonymi w nim wyrobiskami jest na tyle skomplikowany, że rozwiązywanie konkretnych zagadnień metodami analitycznymi jest niemożliwe. Nawet stosowanie w obliczeniach metod przybliżonych (numerycznych) wymaga uwzględnienia szeregu uproszczeń odwzorowywanej rzeczywistości (Filcek i in., 1994).

W kopalniach wielopoziomowych z wieloma polami eksploatacyjnymi już sama sytuacja górnicza jest na tyle skomplikowana, że dokładne odwzorowanie geometryczne istniejących pustek nie jest możliwe. W ciągu kilkudziesięciu lat badań powstały teorie zachowania się górotworu, obejmujące szereg praw materiałowych, które próbują uwzględnić czynniki odpowiadające za zachodzące w górotworze procesy (Munson, 1997; Ślizowski, 2006). Jednak stosowanie ich w praktyce inżynierskiej jest niemożliwe. W związku z tym poszukiwane są takie sposoby upraszczania rzeczywistej geometrii kopalni i właściwości fizycznych górotworu, aby uzyskać wystarczającą zgodność wyników symulacji numerycznych z pomiarami *in situ*, na przykład z wynikami pomiarów geodezyjnych. Przykład takich uproszczeń zastosowano w pracach z 2014 r. (Kortas i Maj, 2014; Maj i Kortas, 2014), pokazując wpływ kopalni komorowo-filarowej na czapę wysadu solnego i ochronną półkę stropową.

W pracy przedstawiono wyniki pierwszych badań warunków, jakie powinny spełniać uproszczenia struktury kopalni przy zastąpieniu jej ekwiwalentnymi obszarami górotworu. Badania te stanowią część szerszych studiów nad znalezieniem reguł rządzących tego rodzaju uproszczeniami, które można wykorzystać w analizach wpływu kopalni na otoczenie. Jest to szczególnie istotne w podziemnym górnictwie solnym, szczególnie w kopalniach zabytkowych.

## 2. Czynniki wpływające na stan górotworu w otoczeniu wyrobisk górniczych

Górotwór jest obiektem niejednorodnym, a jego budowa jest bardzo złożona. Na warunki naturalne nakładają się czynniki górnicze, jeszcze bardziej komplikując modelowaną rzeczywistość. Wpływające na dokładność modelu czynniki można podzielić na geometryczne i fizyczne.

Czynniki geometryczne wynikają ze zmiennej w czasie lub przestrzeni geometrii wyrobisk i zaliczyć do nich można:

- zróżnicowanie wymiarów wyrobisk w obrębie pola eksploatacyjnego,
- kolejność powstawania sąsiadujących wyrobisk i poszczególnych pól eksploatacyjnych,
- postęp drażenia wyrobisk w czasie.

Do zmieniających się w czasie lub przestrzeni czynników fizycznych należą:

- zróżnicowanie właściwości fizycznych górotworu, wynikające z warunków geologicznych,
- zawały, spękania, lokalne przekroczenia wytrzymałości skał,
- obecność różnych obudów i innych zabezpieczeń,
- obecność mediów wypełniających wyrobiska.

Warunki złożowe wynikają z litologii utworów różniących się właściwościami fizycznymi. Należą do nich w szczególności uwarstwienie górotworu, pofałdowanie, uskoki, obecność naturalnych kawern. Na złożoność warunków geologiczno-górnicznych nakładają się także inne czynniki, na przykład obecność niezidentyfikowanych lub niezinventaryzowanych wyrobisk czy nieudokumentowana geologicznie istotna zmienność litologiczna skał.

Powyższe czynniki mogą być w modelu uwzględnione, uproszczone lub pominięte w zależności od celu prowadzonych badań.

### 3. Metodyka badań

Badania nad uproszczonym sposobem oddziaływania wyrobisk na ich otoczenie w ośrodku sprężysto-lepkim prowadzono w oparciu o obliczenia numeryczne programem metody elementów skończonych COSMOS/M z modułem *Nonlinear (Structural...*, 2001). W kolejnych zadaniach różnicowano wartości parametrów geometrycznych i fizycznych w celu uzyskania porównywalnych wyników dla modelu z wyrobiskami i modelu z ekwiwalentnymi obszarami górotworu. Badania obejmowały następujące prace:

1. Opracowanie założeń i parametrów wejściowych do modelu;
2. Wyłonienie danych wyjściowych do badań porównawczych;
3. Opracowanie programu do tworzenia zadań wejściowych i przetwarzania danych wyjściowych (nie jest on omawiany w tej pracy);
4. Przeprowadzenie obliczeń wstępnych – testowanie programu;
5. Wybór wskaźnika wyjściowego;
6. Przeprowadzenie obliczeń dla założonych parametrów wejściowych;
7. Opracowanie wyników.

Przygotowany program do tworzenia zadań wejściowych i przetwarzania danych wyjściowych umożliwia przeprowadzenie dalszych badań (pkt. 6 i 7) w oparciu o zastosowanie innego wskaźnika wyjściowego (pkt 5).

#### 3.1. Opracowanie założeń do modelu

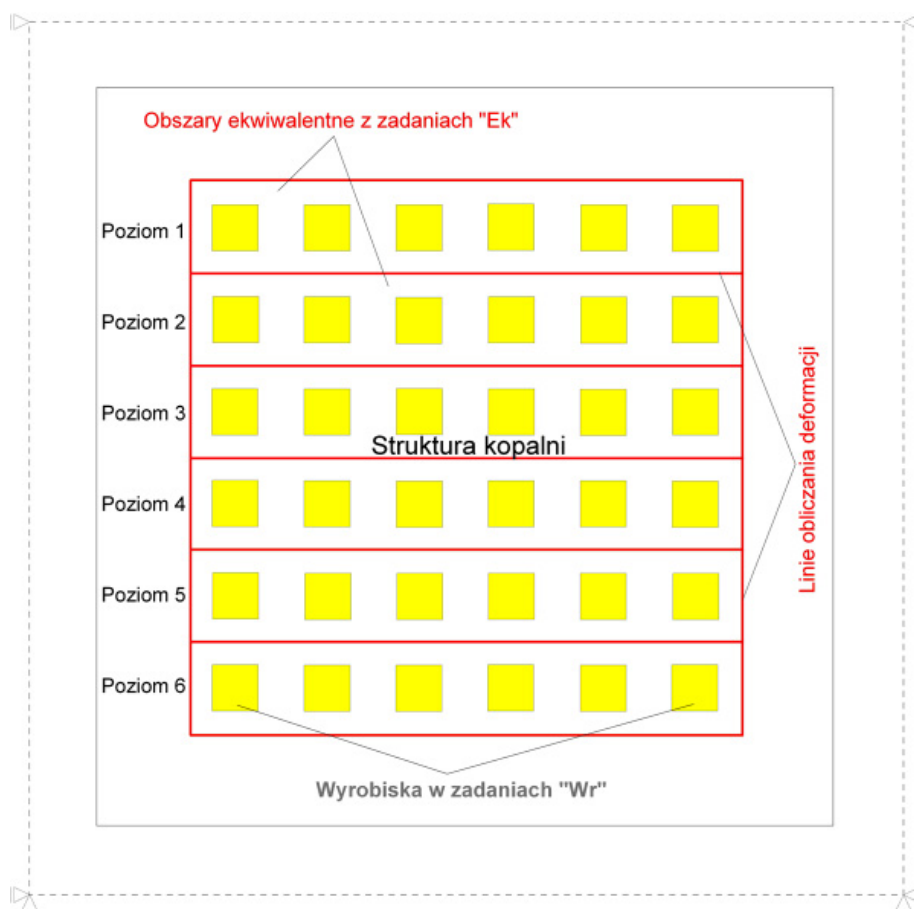
W tej pracy model geometryczny górotworu stanowi tarcza znajdująca się w płaskim stanie odkształcenia (2D+t). W tarczy wydzielono, w zależności od typu zadania (Rys. 1):

- rzędy kwadratów symulujących przekroje wyrobisk na poszczególnych poziomach kopalni (zadania typu „Wr”),
- prostokątne obszary ekwiwalentne obejmujące poszczególne poziomy kopalni (zadania typu „Ek”).

Obszary ekwiwalentne to obszary górotworu, wprowadzone do modelu w miejsce poszczególnych poziomów eksploatacyjnych, o zmienianych właściwościach fizycznych w taki sposób, aby uzyskać na jego granicy deformacje zbliżone do deformacji wyliczonych w modelu z pustkami symulującymi wyrobiska. Granice poziomów eksploatacyjnych w modelu z pustkami („Wr”) i obszarów ekwiwalentnych („Ek”) są identyczne. Dla tych obszarów określano zmiany przemieszczeń spowodowanych reakcją górotworu i określano je deformacją powierzchniową.

Tarcza została podzielona na elementy prostokątne czterowęzłowe. W obrębie konturu wyrobiska i w jego bliskim otoczeniu węzły rozmieszczane były równomiernie. Na dole tarczy przyłożono zerowe

przemieszczenia w kierunku Y a po bokach tarczy w kierunku X. Górna krawędź tarczy, odpowiadająca powierzchni terenu, była nieobciążona i mogła się dowolnie przemieszczać.



Rys. 1. Schemat modelu. Wyrobiska „Wr” i obszary ekwiwalentne „Ek”

W modelu fizycznym zastosowano superpozycję odkształceń sprężystych według prawa Hooke’a ( $H$ ) i lepkich zgodnie z prawem Nortona ( $No$ ):

$$\varepsilon_{ij} = {}^H\varepsilon_{ij} + {}^{No}\varepsilon_{ij} \quad (1)$$

gdzie:

- $\varepsilon_{ij}$  – tensor odkształcenia w układzie szeregowym modeli,
- ${}^H\varepsilon_{ij}$  – tensor odkształcenia w modelu Hooke’a,
- ${}^{No}\varepsilon_{ij}$  – tensor odkształcenia w modelu Nortona.

Równanie stanu dla modelu Hooke’a można przedstawić w formie równań, z których pierwsze opisuje zasadę zmiany postaci a drugie zasadę zmiany objętości (objaśnienia symboli poniżej):

$${}^D\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu^D}{E} \sigma_{ij}; \quad {}^A\varepsilon_m = \frac{1-2\nu^A}{E} \sigma_m \quad (2)$$

a dla modelu Nortona w formie:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{3}{2} m A e^{\left(\frac{-Q}{RT}\right)} \sigma_e^{n-1} {}^D\sigma_{ij} t^{m-1} \quad (3)$$

przy czym założono, że rozpatrywany ośrodek jest izotropowy i odkształca się objętościowo zgodnie z prawem Hooke’a. Przy nieznacznej zmienności temperatury w rozważanym fragmencie górotworu otaczającego

wyrobisko przyjąć można stałą temperaturę górotworu i zastąpić funkcję temperatury  $f(T) = A \exp(-Q/RT)$  stałą materiałową  $B$ .

Objaśnienia do wzorów:

$${}^D\sigma_{ij} - \text{dewiator naprężenia: } {}^D\sigma_{ij} = \sigma_{ij} - A\sigma_m\delta_{ij},$$

$${}^D\varepsilon_{ij} - \text{dewiator odkształcenia: } {}^D\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} - A\varepsilon_m\delta_{ij},$$

$${}^A\sigma_m - \text{naprężenie średnie: } {}^A\sigma_m = \frac{1}{3}(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}),$$

$${}^A\varepsilon_m - \text{odkształcenie średnie: } {}^A\varepsilon_m = \frac{1}{3}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}),$$

$\delta_{ij}$  – symbol Kroneckera,

$E, \nu$  – stałe materiałowe modelu Hooke'a: moduł odkształceń liniowych i współczynnik Poissona,

$A, B, n, m$  – stałe materiałowe modelu opisującego pełzanie ( $0 < m \leq 1$ ),

$t$  – czas,

$Q$  – energia aktywacji dla procesu pełzania,

$R$  – stała gazowa,

$T$  – temperatura,

$$\sigma_e - \text{naprężenie efektywne: } \sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + 6(\sigma_{12}^2 + \sigma_{23}^2 + \sigma_{31}^2)}.$$

Proces obliczeniowy polegał na przeprowadzeniu obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych w wielu krokach obliczeniowych. Najpierw przeprowadzono wstępne symulacje procesu pełzania tarczy bez wyrobisk („Wr”) / obszarów ekwiwalentnych („Ek”) pod własnym obciążeniem, w celu uzyskania hydrostatycznego stanu naprężeń pierwotnych  $p_1 = p_2 = p_3$ , charakterystycznego dla górotworu solnego. Wybieranie złoża odwzorowano przez jednoczesne usunięcie wszystkich elementów w obrębie konturu wyrobisk („Wr”) lub zmianie wartości wybranego parametru w obrębie poszczególnych obszarów ekwiwalentnych („Ek”), po czym kontynuowano symulację procesu zaciskania wyrobisk.

W zadaniach wprowadzono następujące parametry geometryczne, które można było uzmienniać:

- liczba wyrobisk w kierunku X (liczba wyrobisk na poszczególnych poziomach kopalni),
- liczba wyrobisk w kierunku Y (liczba poziomów kopalni),
- liczba elementów na krawędzi wyrobisk.

Ponadto dla całej tarczy oraz osobno dla każdego obszaru ekwiwalentnego odwzorowującego poszczególne poziomy kopalni zmieniać można było wartości:

- modułu odkształceń liniowych  $E$ ,
- współczynnika Poissona  $\nu$ ,
- gęstości  $\rho$ ,
- podatności na pełzanie  $B$ ,
- wykładnika naprężenia efektywnego  $n$ ,
- wykładnika czasu  $m$ .

Zakres wartości parametrów fizycznych przyjęto na podstawie dostępnych Autorce wyników badań laboratoryjnych i danych z literatury.

### 3.2. Wyłonienie danych wyjściowych

W wyniku obliczeń otrzymywano pliki tekstowe zawierające dane o przemieszczeniach dla wszystkich węzłów we wszystkich krokach obliczeniowych. Na ich podstawie obliczano:

- przemieszczenia cząstkowe i narastające dla węzłów wzdłuż krawędzi obszarów ekwiwalentnych,
- zaciskanie poszczególnych obszarów ekwiwalentnych,
- krzywe czasowe dla węzłów wzdłuż krawędzi obszarów ekwiwalentnych,
- profile deformacji konturów obszarów ekwiwalentnych,
- krzywe czasowe dla węzłów wzdłuż linii odwzorowującej powierzchnię terenu,
- profile deformacji linii odwzorowującej powierzchnię terenu.

Obliczenia prowadzono dla serii zadań: zadania typu „Wr” stanowiącego wzorzec i dla zadań typu „Ek”, których wyniki porównywano ze wzorcem. Po analizie wyników wstępnych serii zadań do badań porównawczych wybrano średnie zaciskanie poszczególnych obszarów ekwiwalentnych w ciągu 20 lat pelzania górotworu.

Obecność wyrobisk wpływa na odkształcalność całego obszaru górotworu wokół kopalni. Z tego względu parametrem zmienianym w obszarach ekwiwalentnych był moduł odkształcalności objętościowej  $K$ . Zmniejszenie modułu w obrębie obszarów ekwiwalentnych („Ek”) umożliwiłoby uzyskanie podobnych wyników jak w przypadku obecności pustych przestrzeni symulujących wyrobiska („Wr”). W każdej serii zadań obliczano stosunek zastosowanych modułów:

$$\frac{K_{Ek}}{K_{Wr}} = \frac{\frac{E_{Ek}}{3(1-2\nu_{Ek})}}{\frac{E_{Wr}}{3(1-2\nu_{Wr})}} \quad (4)$$

gdzie:  $K$  jest modułem odkształceń objętościowych,  $E$  jest modułem odkształceń liniowych,  $\nu$  jest współczynnikiem Poissona; indeks „Ek” odnosi się do parametrów stosowanych w obszarach ekwiwalentnych (zadania „Ek”), a indeks „Wr” do parametrów w otoczeniu wyrobisk (zadania „Wr”). Dla  $\nu_{Ek} = \nu_{Wr}$  otrzymamy:  $K_{Ek} / K_{Wr} = E_{Ek} / E_{Wr}$ .

Powyższa proporcja (4) określa, w jakim stopniu należy zmienić wartość modułu odkształcalności, aby uzyskać porównywalne wyniki symulacji zadań typu „Wr” i „Ek” i tym samym umożliwić stosowanie w modelowaniu uproszczenia w postaci zastąpienia wyrobisk obszarami ekwiwalentnymi.

#### 4. Opracowanie wyników obliczeń

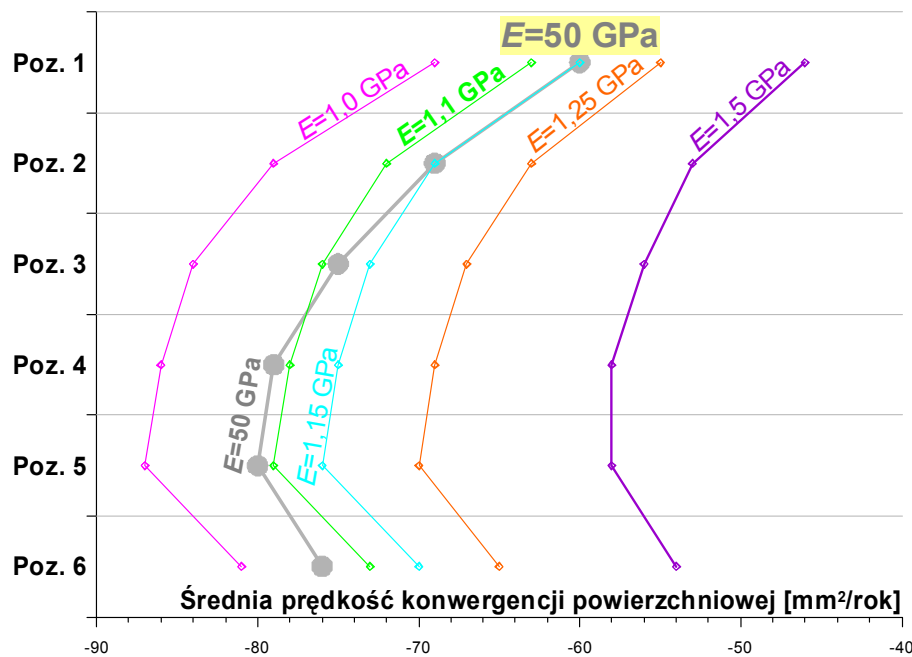
Do obliczeń zastosowano następujące wartości parametrów: liczba wyrobisk na poszczególnych poziomach kopalni  $iKx = 6$ , liczba poziomów kopalni  $iKy = 6$ , liczba elementów na krawędzi wyrobisk  $ie = 4$ , współczynnik Poissona  $\nu = 0,3$ , gęstość  $\rho = 2200000 \text{ kg/m}^3$ , podatność na pelzanie  $B = 2,4 * 10^{-24} \text{ Pa}^{-2}\text{s}^{-1}$ , wykładnik naprężenia efektywnego  $n = 2$ , wykładnik czasu  $m = 1$ . Badania polegały za porównaniu wartości średniej rocznej – w okresie 20-letniego pelzania górotworu – konwergencji powierzchniowej (Maj, 2012) liczonej wokół wyrobisk („Wr”) z wartościami liczonymi wzdłuż obszarów ekwiwalentnych („Ek”). Konwergencję powierzchniową obliczano jako ubytek powierzchni wokół poszczególnych poziomów kopalni („Wr”) lub ubytek powierzchni każdego z obszarów ekwiwalentnych („Ek”).

W pierwszej serii zadań moduł odkształceń liniowych wynosił  $E_{Wr} = 50 \text{ GPa}$  ( $K_{Wr} \approx 41,7 \text{ GPa}$ ). W pierwszej kolejności przeprowadzono symulację dla zadania wzorcowego „Wr” i obliczono średnią konwergencję powierzchniową obszarów wokół poszczególnych poziomów kopalni. Następnie, w zadaniach „Ek” zmieniano wartość modułu  $E_{Ek}$  w obszarach ekwiwalentnych i otrzymywane wartości wskaźnika zaciskania porównywano z zadaniem wzorcowym „Wr”. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Wyniki obliczeń dla  $E_{Wr} = 50 \text{ GPa}$

POZ	Zd. „Wr” 50 GPa	Zd. „Ek” 1,50 GPa	Zd. „Ek” 0,50 GPa	Zd. „Ek” 1,25 GPa	Zd. „Ek” 1,00 GPa	Zd. „Ek” 1,10 GPa	Zd. „Ek” 1,15 GPa
1	-60	-46	-131	-55	-69	-63	-60
2	-69	-53	-152	-63	-79	-72	-69
3	-75	-56	-160	-67	-84	-76	-73
4	-79	-58	-165	-69	-86	-78	-75
5	-79	-58	-166	-70	-87	-79	-76
6	-76	-54	-153	-65	-81	-73	-70
Średni roczny ubytek powierzchni wszystkich poziomów [mm <sup>2</sup> ]	-438	-325	-927	-389	-486	-441	-423
Różnica względem zadania wzorcowego „Wr” [mm <sup>2</sup> ]	0	113	-489	49	-48	-3	15

Najbardziej zbliżone wyniki otrzymano dla wartości modułu odkształceń w obszarach ekwiwalentnych  $E_{Ek} = 1,1$  GPa. Również różnica średniego ubytku powierzchni wszystkich obszarów ekwiwalentnych względem zadania wzorcowego „Wr” była najmniejsza. W tej serii zadań  $K_{Ek} / K_{Wr} \approx 0,022$ . Dla zobrazowania procesu dopasowywania wskaźnika zaciskania wyniki obliczeń przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Wyniki dopasowania obszarów ekwiwalentnych dla  $E_{Wr} = 50$  GPa

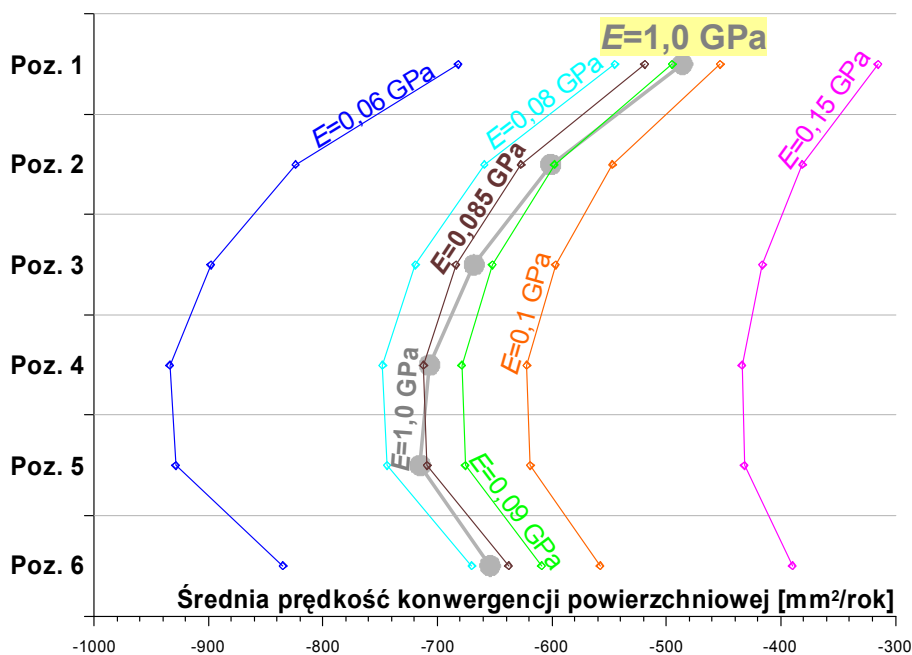
W drugiej serii zadań obliczenia przeprowadzono dla modułu odkształceń liniowych  $E_{Wr} = 1$  GPa ( $K_{Wr} \approx 0,83$  GPa). Proces dopasowywania wskaźnika zaciskania przebiegał analogicznie do pierwszej serii zadań, a wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2 i na rysunku 3. W tej serii zadań przybliżoną zgodność otrzymano dla  $E_{Ek} = 0,085$  GPa, czyli  $K_{Ek} / K_{Wr} \approx 0,085$ .

Tab. 2. Wyniki obliczeń dla  $E_{Wr} = 1$  GPa

POZ	Zd. „Wr” 1,0 GPa	Zd. „Ek” 0,03 GPa	Zd. „Ek” 0,06 GPa	Zd. „Ek” 0,10 GPa	Zd. „Ek” 0,15 GPa	Zd. „Ek” 0,09 GPa	Zd. „Ek” 0,08 GPa	Zd. „Ek” 0,085 GPa
1	-486	-1084	-682	-453	-315	-495	-545	-519
2	-601	-1315	-824	-547	-381	-598	-659	-627
3	-668	-1430	-898	-597	-416	-652	-719	-684
4	-707	-1484	-934	-622	-434	-679	-748	-712
5	-715	-1476	-929	-619	-432	-676	-744	-709
6	-654	-1326	-835	-558	-390	-609	-670	-638
Średni roczny ubytek powierzchni wszystkich pozio- mów [mm <sup>2</sup> ]	-3831	-8115	-5102	-3396	-2368	-3709	-4085	-3889
Różnica względem zadania wzorcowe- go „Wr” [mm <sup>2</sup> ]	0	-4284	-1271	435	1463	122	-254	-58

Zastosowanie w poprzednich seriach zadań moduły odkształceń obejmowały maksymalne i minimalne wartości stosowane dla górotworu solnego. W trzeciej serii zadań obliczenia przeprowadzono dla  $E_{Wr} = 10$  GPa ( $K_{Wr} \approx 8,3$  GPa). Po wstępnym obliczeniach otrzymano w przybliżeniu zgodne wyniki wskaźników zaciskania dla  $E_{Ek} = 0,3$  GPa, czyli  $K_{Ek} / K_{Wr} \approx 0,03$ .

Dodatkowo przeprowadzono obliczenia dla uzmiennionych wartości moduły odkształceń w poszczególnych obszarach ekwiwalentnych. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3 i na rysunku 4.

Rys. 3. Wyniki dopasowania obszarów ekwiwalentnych dla  $E_{Wr} = 1$  GPaTab. 3. Wyniki obliczeń dla  $E_{Wr} = 10$  GPa

Poziom	Moduł odkształceń liniowych $E$ [GPa]								
	Zd. „Wr”	Zd. „Ek” 1	Zd. „Ek” 2	Zd. „Ek” 3	Zd. „Ek” 4	Zd. „Ek” 5	Zd. „Ek” 6	Zd. „Ek” 7	Zd. „Ek” 8
Poz. 1	10	0,30	0,35	0,30	0,25	0,30	0,35	0,30	0,35
Poz. 2	10	0,30	0,34	0,31	0,26	0,29	0,32	0,28	0,33
Poz. 3	10	0,30	0,33	0,32	0,27	0,28	0,29	0,26	0,31
Poz. 4	10	0,30	0,32	0,33	0,28	0,27	0,26	0,24	0,29
Poz. 5	10	0,30	0,31	0,34	0,29	0,26	0,23	0,22	0,27
Poz. 6	10	0,30	0,30	0,35	0,30	0,25	0,20	0,20	0,25
Średni roczny ubytek powierzchni wszystkich poziomów [mm <sup>2</sup> ]	-1508	-1487	-1401	-1390	-1603	-1427	-1666	-1781	-1515
Różnica względem zadania wzorcowego „Wr” [mm <sup>2</sup> ]	0	21	107	118	-95	81	-158	-273	-7

Uzmiennianie wartości modułu  $E_{Ek}$  dla poszczególnych obszarów ekwiwalentnych zmienia charakter krzywej średnich prędkości konwergencji powierzchniowej na kolejnych poziomach kopalni.

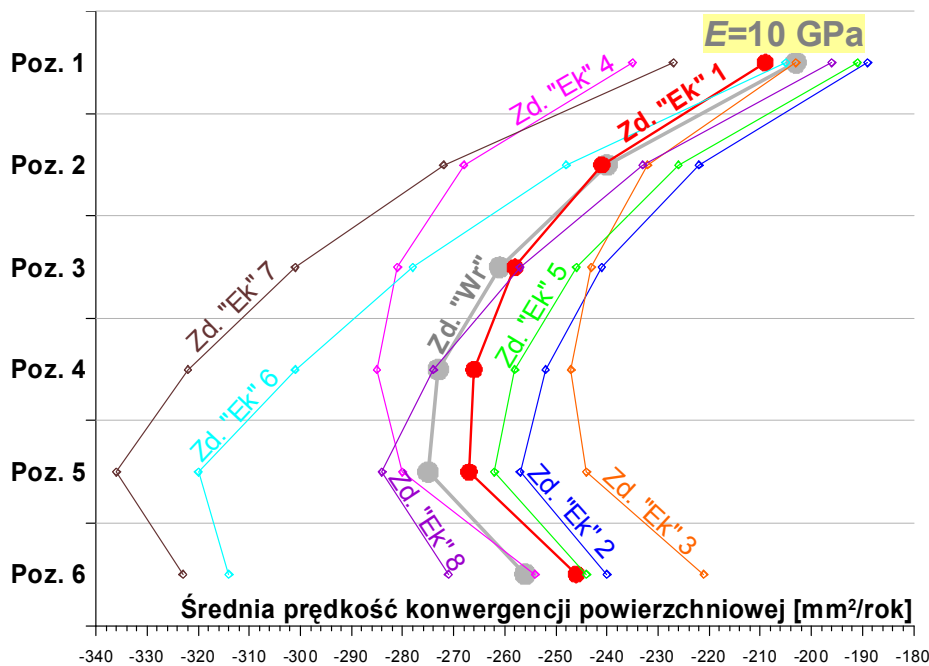
## 5. Podsumowanie

Uproszczony sposób symulacji oddziaływania wyrobisk na ich otoczenie, polegający na zastąpieniu struktury kopalni obszarami ekwiwalentnymi, jest nowym podejściem do modelowania zachowania się górotworu o właściwościach sprężysto-lepkich.

Pierwsze badania nad znalezieniem reguł stosowania takiego uproszczenia w ośrodku sprężysto-lepkim miały na celu oszacowanie zmian parametrów, które można zastosować w obszarach ekwiwalentnych, aby uzyskać zgodność wyników obliczeń modelowych z wynikami pomiarów przemieszczeń *in situ* lub wynikami obliczeń wykonanych dla modelu wzorcowego („Wr”).

Badania te objęły opracowanie założeń i parametrów modelu, wyłonienie danych wyjściowych do analiz porównawczych, opracowanie programu do tworzenia zadań wejściowych i przetwarzania danych wyjściowych oraz jego testowanie.

Do badań wybrano moduł odkształceń  $E$  w obszarach ekwiwalentnych, jako parametr uzmienniany oraz średnią roczną konwergencję powierzchniową, jako wskaźnik porównawczy.



Rys. 4. Wyniki dopasowania obszarów ekwiwalentnych dla  $E_{Wr} = 10$  GPa

W poszczególnych seriach zadań uzyskano inne wartości  $E_{Ek} / E_{Wr}$ : dla  $E_{Wr} = 50,0$  GPa  $E_{Ek} / E_{Wr} \approx 0,022$ , dla  $E_{Wr} = 10,0$  GPa  $E_{Ek} / E_{Wr} \approx 0,030$ , dla  $E_{Wr} = 1,00$  GPa  $E_{Ek} / E_{Wr} \approx 0,085$ . Zmniejszenie modułu odkształceń  $E_{Wr}$  z 50 do 1 GPa (pięćdziesięciokrotne) powoduje zwiększenie proporcji  $E_{Ek} / E_{Wr}$  z 0,022 do 0,085 (niepełna czterokrotne).

#### Literatura

- Kortas G., Maj A., 2014: *Deformations of the protection shelf in the "Wapno" salt mine, based on model studies*. Archives of Mining Sciences, Vol. 59, Iss. 4, p. 869-886.
- Maj A., 2012: *Convergence of gallery workings in underground salt mines*. Archives of Mining Sciences, Monograph, No. 14, Kraków.
- Maj A., Kortas G., 2014: *Przemieszczenia i naprężenia w otoczeniu kopalni Wapno w trakcie eksploatacji*. Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, Tom 16, Nr 1-2, p. 61-76.
- Structural Research and Analysis Corp., 2001: *COSMOS Design Star Product – Nonlinear Stress Analysis, User's Guide and Tutorial*. Los Angeles.
- Filcek H., Walaszczyk J., Tajduś A., 1994: *Metody komputerowe w geomechanice górniczej*. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice.
- Munson D. E., 1997: *Constitutive Model of Creep in Rock Salt Applied to Underground Room Closure*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics, Vol. 34, Iss. 2, p. 233-247.
- Ślizowski J., 2006: *Geomechaniczne podstawy projektowania komór magazynowych gazów ziemnego w złożach soli kamiennej*. Studia. Rozprawy. Monografie Nr 137. Wyd. IGSMiE PAN, Kraków.

### A simplified way of modeling of the impact of the excavation on their elastic-viscous surroundings

#### Abstract

Conventional methods of mining create excavations of complex geometry. The physical parameters of the adjacent strata may have a high variability. Those factors force far-reaching simplification of the geomechanical models of multi-level mines. The paper shows the preliminary results of studies on the use of equivalent rock space in the numerical calculations. It has been shown that under certain conditions, replacement of the structure of the mine with the equivalent rock space will not change significantly the distribution of the rock mass deformation indices.

**Keywords:** simplification of the model, numerical calculations, multilevel salt mines, visco-elastic media