

Przemieszczenia i naprężenia w otoczeniu kopalni Wapno w trakcie eksploatacji i po jej zatopieniu

AGNIESZKA MAJ, GRZEGORZ KORTAS

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

Streszczenie

Badania nad zachowaniem się górotworu pod wpływem działalności górniczej przed, w trakcie i po zatopieniu kopalni w Wapnie przeprowadzono na podstawie geomechanicznych badań modelowych z zastosowaniem metody homogenizacji stref pola eksploatacyjnego. Przetawiono sposób uzyskania wyników symulacji zgodnych z wynikami pomiarów obniżen na powierzchni terenu i na poszczególnych poziomach kopalni. Pokazano pionowe profile przemieszczeń i rozkłady naprężeń w otoczeniu kopalni. Praca jest podstawą do określenia stanu zagrożenia calizn ochronnych kopalni Wapno po katastrofalnym zatopieniu wyrobisk oraz kształtowania przemieszczeń na terenach pogórnich.

Słowa kluczowe: wysad solny, badania modelowe, homogenizacja, naprężenie, przemieszczenie, zatopienie wyrobisk

1. Wstęp

Eksploatację komorowo-filarową soli w wysadzie solnym Wapno prowadzono od 1923 r. na 7 poziomach od głębokości 384 m ppt. W 1977 r. roku wdarcie wody na najwyższy poziom kopalni doprowadziło do katastrofalnego jej zatopienia i zniszczenia zabudowanych terenów w obrębie występowania zapadlisk i znacznych deformacji spowodowanych niekontrolowanym przepływem wód. Obecnie stan zagrożenia terenu pogórnich w Wapnie – po 36 latach od katastrofalnego wdarciu wód – jest kształtowany przez szereg czynników wynikających m. in. ze stanu zatopionych wyrobisk kopalni soli i kopalni gipsu, przypowierzchniowych obwałów i zaciskania utworów w zapadliskach, a także naturalnych procesów krasowych w czapie wysadu solnego. W celu określania stanu zagrożenia potrzebna jest znajomość stanu naprężenia i odkształcenia w otoczeniu wyrobisk: w trakcie eksploatacji, podczas katastrofalnego wdarciu wód do wyrobisk i po zatopieniu kopalni oraz powiązanie ich z wynikami obserwowanego ruchu górotworu.

Do odwzorowywania zachowania się górotworu solnego z wykorzystaniem specjalistycznych programów komputerowych najczęściej wykonywane są modele dwuwymiarowe, wykorzystujące albo płaski stan odkształcenia (wyrobiska chodnikowe) albo symetrię osiową (komory cylindryczne). Rzadko wykonywane są modelowania sytuacji przestrzennej, wymagające uproszczeń geometrycznych (Kortas i in., 2008) lub ograniczenia modelowanej przestrzeni (Cieślak i Pietruszka, 2008; Cieślak i in., 2008). Bardzo rzadko wyniki obliczeń numerycznych konfrontowane są z wynikami pomiarów, na przykład geodezyjnych (Flisiak i in., 1997; Kortas i in., 2004; Majcherczyk i in., 2006; Maj, 2007, 2012).

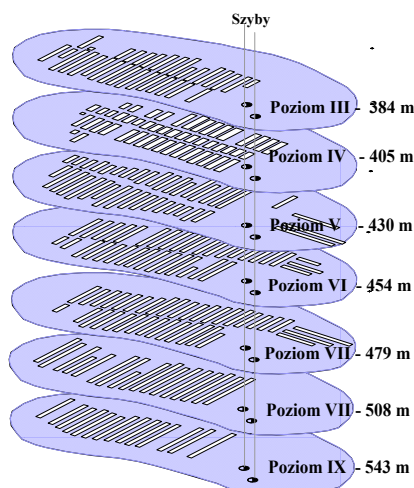
Niniejsza praca została skierowana na określenie wpływu eksploatacji na otoczenie kopalni i powierzchnię terenu przed i po zatopieniu wyrobisk. Nie jest wtedy konieczna znajomość zachowania się poszczególnych filarów czy półek, co pozwala na zastosowanie metody homogenizacji poszczególnych poziomów kopalni, i w konsekwencji upraszcza model obliczeniowy. Stosując homogenizację struktury kopalni z filarami i półkami tworzy się modelowe przestrzenie ciągłe i przypisuje im odpowiednio dobrane właściwości z zachowaniem prawa konstytutywnego stosowanego dla górotworu solnego. Wtedy homogenizowane przestrzenie wykazują odkształcalność objętościową i postaciową, a na ich granicach identyfikować można przemieszczenia i porównywać je z wynikami obserwacji.

Metodę homogenizacji obszaru eksploatacji komorowo-filarowej w ośrodku sprężysto-lepkim zastosowano po raz pierwszy przy modelowaniu zachowania się otoczenia pól górniczych kopalni soli Kłodawa (Kortas i Maj, 2012). Kryterium poprawności modelu była wtedy zgodność konwergencji w otoczeniu pola górniczego. Wielkoskalowym warunkiem homogenizacji mogą być też wyniki obserwacji niecki obniżeń na powierzchni terenu i poszczególnych poziomach kopalni. Stosując homogenizację struktury kopalni z przemieszczeniowym warunkiem, właściwości poszczególnych homogenizowanych obszarów górotworu ustala się poprzez badania modelowe.

W pracy omówiono model geomechaniczny wysadu solnego, w którym prowadzona była górnicza eksploatacja złoża, oraz przedstawiono stan naprężeń w półce stropowej i rozkłady przemieszczeń na powierzchni i w górotworze. Pokazano także, jak kształtować się będą przemieszczenia w następnych latach.

2. Charakterystyka górnicza kopalni Wapno

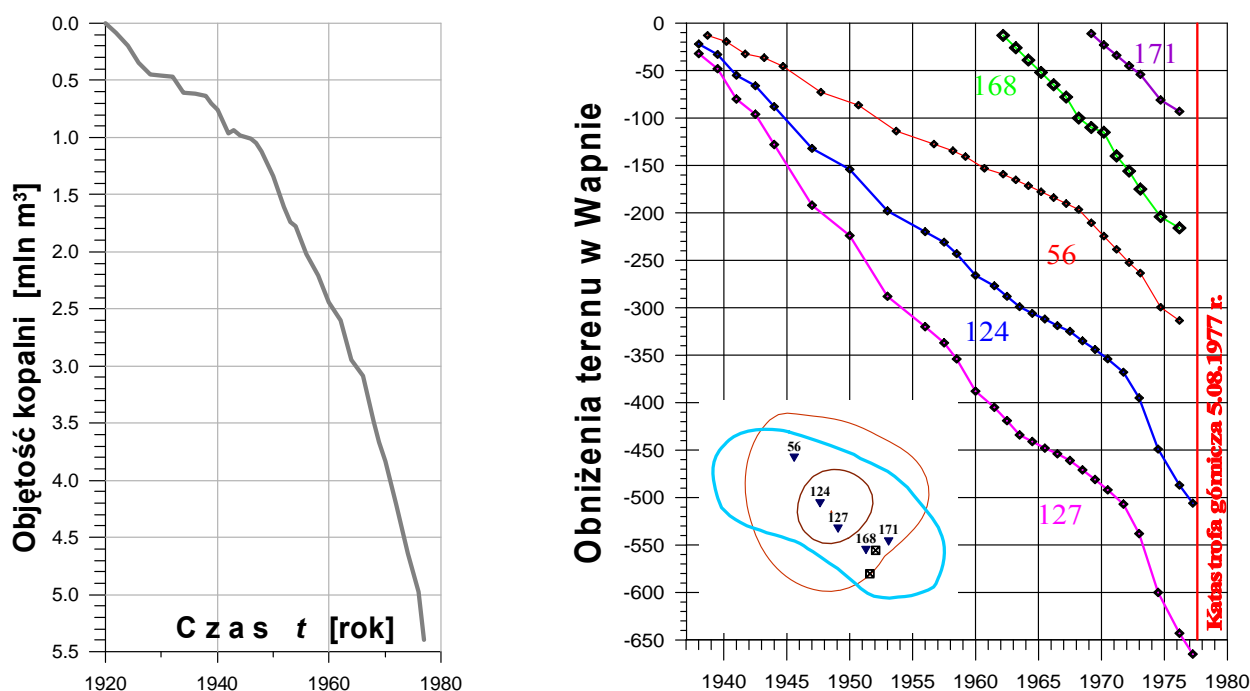
Wysad solny Wapno jest w poziomym przekroju zbliżony do owalu o wymiarach 900 m na 350 m. Zwierciadło soli znajduje się na głębokości ok. 160 m. Bezpośrednio nad złożem soli zalega czapa gipsowa, w części centralnej sięgająca powierzchni terenu. Początkowo w Wapnie eksploatowano czapę gipsową. Dopiero w latach 20. XX w. zaczęto wydobywać sól. Do lat 70. eksploatowano złożo na 7 poziomach. Przy brzegu wysadu pozostawiono 50 m ochronny filar brzeżny, a nad III poziomem 250 m półkę stropową. Wyrobiska komorowe poziomów III-IX przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat rozmieszczenia wyrobisk komorowych na poziomach eksploatacyjnych kopalni III-IX

Złożo w Wapnie eksploatowano systemem komorowo-filarowym. Komory wybierano w kierunku krótszej osi wysadu, między chodnikami transportowym i wentylacyjnym. Ich długość dochodziła do 220 m, a szerokość i wysokość wynosiła 15 m (na poziomie IV 20 m przy wysokości 10 m). Osie filarów na poszczególnych poziomach leżały we wspólnej płaszczyźnie pionowej.

W trakcie działalności kopalni systematycznie zwiększały się przyrosty objętości wyrobisk przy niewielkim wzroście prędkości obniżeń terenu (Rys. 2). Prędkość maksymalnych obniżeń na poziomie III w latach 1961-1976 osiągała wartość -30 mm/rok, a nadległego reperu 127 na powierzchni terenu $-16,2$ mm/rok. W okresie od 1973 do 1976 r. obserwowano na III poziomie regularną nieckę z maksymalną prędkością obniżeń sięgającą -46 mm/rok. Choć maksymalna prędkość obniżeń na powierzchni terenu w latach 70. wzrosła dwukrotnie, do -30 mm/rok, to i tak była znacznie mniejsza niż na III poziomie. Zatem przestrzeń obejmująca półkę solną i czapę wysadu była rozciągana w kierunku pionowym. Wzrastały także rozciągające odkształcenia objętościowe górotworu, na co wskazuje oszacowany spadek stosunku objętości niecki osiadań do objętości wyrobisk w okresach do 1945 r. i do 1977 r., odpowiednio 0,090 i 0,037.



Rys. 2. Objętość kopalni Wapno i obniżenia terenu w latach 1937-1977 [mm]

3. Model obliczeniowy 3D+t

Zmienne w czasie zachowanie otoczenia kopalni i powierzchni terenu symulowano przestrzennym modelem geomechanicznym 3D+t. Przyjęty dla potrzeb tej pracy model geometryczny był prostopadłością o wymiarach poziomych $1900\text{ m} \times 1350\text{ m}$ i wysokości 1000 m . W jego wnętrzu prostopadłość o wymiarach $900\text{ m} \times 350\text{ m} \times 1000\text{ m}$ odpowiadał wsadowi solnemu. Prostokąty granic pól eksploatacyjnych na wszystkich poziomach były jednakowe i odpowiadały wymiarom $800\text{ m} \times 250\text{ m}$. Od granic wysadu oddzielał je filar brzeżny o szerokości 50 m . Pole eksploatacyjne obejmowało poziomy od III na głębokości jego spągu -384 m do spągu poziomu IX na głębokości -543 m . Nad III poziomem od głębokości -359 m do -160 m zachowano półkę solną, a nad nią czapę wysadu do głębokości -10 m . Nad nią do powierzchni (0 m) położony był nadkład z utworów czwartorzędu. Za granicami wysadu znajdowały się utwory otoczenia o szerokości 500 m . Odzworowując w modelu pole eksploatacyjne, obejmujące wyrobiska, filary i półki, wyodrębniono w nim 4 strefy: [1] – strefę poziomu III na głębokości spągu -384 m , [2] – strefę poziomu IV na głębokości spągu -405 m , [3] – strefę poziomów V do VI do głębokości -454 m i [4] – strefę poziomów VII do IX do głębokości -543 m . Strefy te były homogenizowane oddzielnie.

Ze względu na konieczne uproszczenia wynikające z czasu obliczeń model geometryczny sprowadzono do $1/4$ przestrzeni z dwiema pionowymi i wzajemnie prostopadłymi płaszczyznami symetrii poprowadzonymi przez podłużną i poprzeczną oś wysadu solnego (Rys. 3). Przyjęto przemieszczeniowe warunki brzegowe.

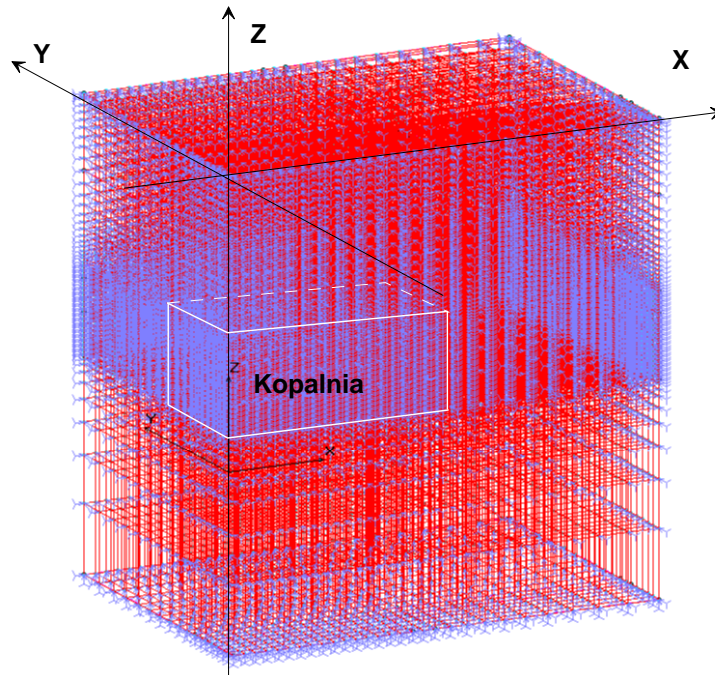
W obliczeniach numerycznych wykorzystano prawo liniowej sprężystości Hooke'a, które można zapisać w postaci dwóch równań tensorowych (1), wiążących naprężenie z odkształceniem, z których pierwsze opisuje zasadę zmiany postaci, a drugie zasadę zmiany objętości:

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

gdzie ${}^D \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij} - {}^A \varepsilon_m \delta_{ij}$ (δ_{ij} – delta Kroneckera) jest dewiatorem odkształcenia, ${}^D \sigma_{ij} = \sigma_{ij} - {}^A \sigma_m \delta_{ij}$ dewiatorem naprężenia, ${}^A \varepsilon_m = 1/3(\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3)$ odkształceniem średnim, a ${}^A \sigma_m = 1/3(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$ naprężeniem średnim.

Dla symulacji zachowań lepkich wykorzystano potęgowe prawo pełzania Nortona-Bailey'a określane zależnością (2):

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



Rys. 3. Model $1/4$ wysadu solnego i strefy wyrobisk

gdzie Q jest energią aktywacji, R stałą gazową, T temperaturą Kelvina, A , m , n stałymi materiałowymi, t czasem rzeczywistym procesu pełzania a naprężenie efektywne Hubera – Misesa – Heke'ego σ_{ef} wyraża wzór:

$$\sigma_{ef} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + (\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + (\sigma_{33} - \sigma_{11})^2} \quad (3)$$

Funkcja stałych materiałowych A , Q , R w (2) w ustalonej temperaturze τ określa podatność materiału na pełzanie (krócej – podatność) B , którą można opisać wzorem:

$$B = A \exp\left(-\frac{Q}{R\tau}\right) \quad (4)$$

W strefach homogenizowanych wprowadzano zmiany parametrów sprężystych i lepkich. Niech wielkość β określa potęgową zmianę wartości właściwości lepkich z 1B na 2B :

$$\beta = \log({}^2B / {}^1B) \quad (5)$$

Wtedy każdy wzrost β o 1,0 odpowiada dziesięciokrotnemu wzrostowi podatności B . Podobnie zdefiniować można wielkość η , jako potęgową zmianę modułu $K = E/[3(1-2\nu)]$. Dla ustalonej wartości współczynnika Poissona ν , ogranicza się to do zmiany modułu Younga E :

$$\eta = \log({}^2K / {}^1K) = \log({}^2E / {}^1E) \quad \text{dla } \nu = \text{const} \quad (6)$$

Proces *odsztynienia* powoduje spadek modułu K i E i odpowiedni wzrost odkształcalności objętościowej ośrodka. *Upodatnienie* polega na zwiększeniu podatności na pełzanie, czyli ${}^2B > {}^1B$ i $\beta > 0$. W takim ujęciu wielkości η i β są parametrami czułości ośrodka na zmiany objętościowe i postaciowe, które mogą być spowodowane na przykład zawilgoceniem lub osuszeniem, spękaniem, perforacją czy degradacją mechaniczną górotworu.

Ze względu na odrębne właściwości reologiczne soli kamiennych, czapy wysadu i jego otoczenia wprowadzono początkowy okres pełzania, w celu uzyskania hydrostatycznego stanu pierwotnych naprężeń litologicznych w solach kamiennych oraz odrębnego nie hydrostatycznego stanu w czapie wysadu i w jego otoczeniu. Tak uzyskany stan naprężeń pierwotnych tworzył warunki początkowe do obliczeń skutków eksploatacji w górotworze i na powierzchni terenu. Po jego uzyskaniu, przez 50 lat, w odstępach 10-cio letnich, wprowadzano współczynniki *upodatnienia* β (5) i *odsztynienia* η (6) w obszarze wyodrębnionych stref

poła eksploatacyjnego. Wprowadzając powyższe współczynniki kierowano się wartościami wskaźników wykorzystania przestrzeni górniczej i obciążenia (Kortas i Maj, 2013).

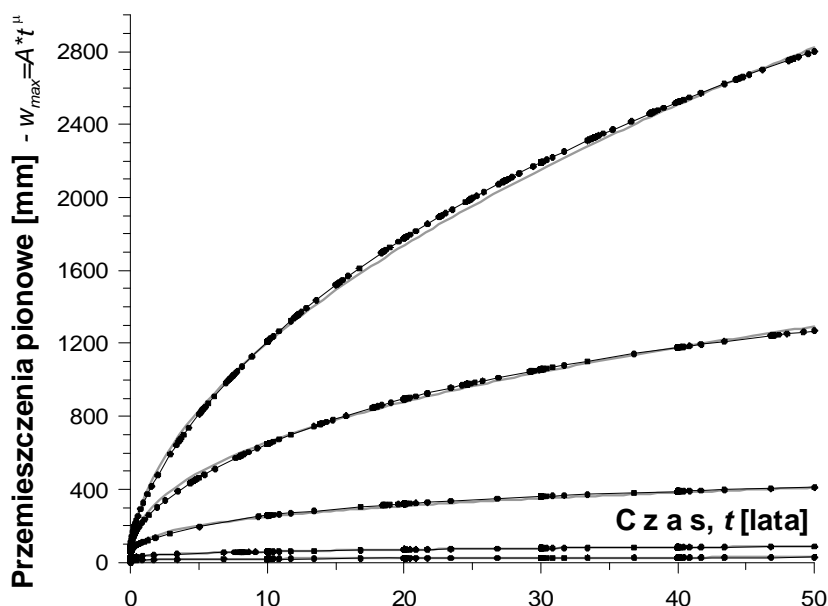
Obliczenia przeprowadzono metodą elementów skończonych przy użyciu programu sterującego, który służył:

- zadawaniu właściwości fizycznych obszarów górotworu, gęstości, właściwości sprężystych, lepkich, granicznych czasów podprocesów, parametrów homogenizacji – *odsztynienia* i *upodatnienia* w poszczególnych obszarach eksploatacji złoża,
- sterowaniu programem MES polegającym na uruchamianiu fazy sprężystej i lepkiej z zadanymi parametrami geometrycznymi i fizycznymi, pozyskaniu wyników w formie zbiorów danych o składowych przemieszczeniach i naprężeniach we wszystkich węzłach siatki obliczeniowej,
- obliczaniu przemieszczeń w charakterystycznych miejscach górotworu i na powierzchni terenu,
- zestawianiu wyników obliczeń.

Wynikiem poszczególnych serii obliczeń przy przyjęciu różnych parametrów homogenizacji były rozkłady przemieszczeń w górotworze i na powierzchni terenu oraz naprężenia w filarach brzeżnych i półce stropowej.

4. Efekty przemieszczeniowe homogenizacji obszarów eksploatacji

Symulacje zachowania się górotworu przeprowadzono w wielu seriach zadań obliczeniowych. Pierwsze z nich skierowane były na uchwycenie wpływów na przemieszczenia $w(t)$ zadawanego parametru *odsztynienia* bez zmiany współczynnika *upodatnienia*. Po uzyskaniu hydrostatycznego stanu naprężeń pierwotnych zmniejszono wartości modułu sprężystości, co powodowało wzrost odkształceń objętościowych w obszarze eksploatacji i w jego otoczeniu. Określono zależności obniżenia maksymalnych w środku pola górniczego w funkcji czasu. Przyjęto najpierw, że jednakowe *odsztynienie* następuje równocześnie w obrębie strefy wszystkich wyrobisk. W pierwszej serii zadań przyjmowano różne wartości parametru $\eta \in [-0,25; 0,50; -1,00; -1,50; -2,00]$, ale jednakowe dla poszczególnych poziomów eksploatacyjnych. W homogenizowanej strukturze wyniki obliczeń maksymalnych obniżenia na powierzchni terenu w funkcji czasu $w_{\max}(t, \eta)$ przedstawiono na rysunku 4.

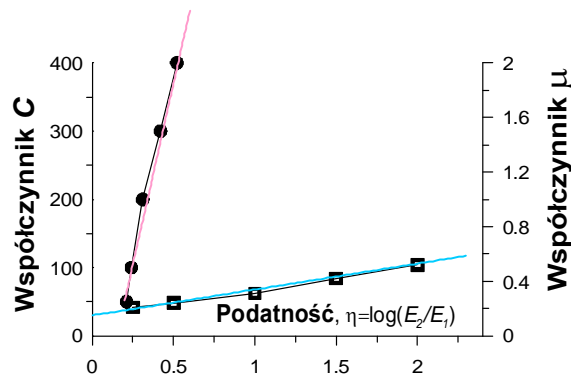


Rys. 4. Zależności obniżenia maksymalnych od czasu $w(t)$ przy zadawanych wartościach parametru η

Otrzymane związki obniżenia z parametrem *odsztynienia* η są funkcjami potęgowymi czasu. Wykładnik funkcji potęgowej μ jest w przybliżeniu funkcją liniową η :

$$w_{\max} = C(\eta)[t / t_j]^{\mu(\eta)}, \quad C(\eta) = c_1\eta, \quad \mu(\eta) = c_2 + c_3\eta, \quad \text{gdzie } t_j = 1 \text{ rok} \quad (7)$$

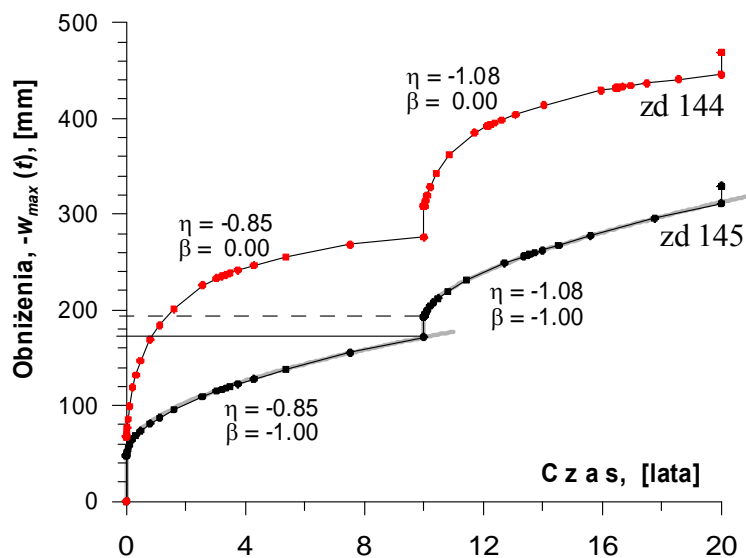
Współczynnik C i wykładnik μ zależą prawie liniowo od parametru *odszywnienia* η (Rys. 5). Stałe mają następujące wartości: $c_1 = 1060$ m, $c_2 = 0,15$, $c_3 = 0,19$.



Rys. 5. Zależność współczynników funkcji potęgowej od parametru homogenizacji

Badania modelowe ujawniają narastanie przemieszczeń pionowych w potęgowej funkcji czasu, przy czym narastanie to przebiega z malejącą prędkością. Taki związek przemieszczeń z czasem obserwowany jest w kopalniach soli. I tak np. w kopalni soli w Sieroszowicach spadek prędkości pełzania jest zauważalny w czasie kilku miesięcy, natomiast w kopalni soli w Kłodawie dopiero w okresie kilku lat, a w Wieliczce kilkudziesięciu lat. Za zróżnicowanie pełzania w eksploatowanych złożach odpowiadają obciążenia wynikające z głębokości oraz wskaźników koncentracji wyrobisk i obciążenia (Kortas i Maj, 2013), a także podatność na pełzanie, której wzrost powoduje zwiększenie odkształceń postaciowych.

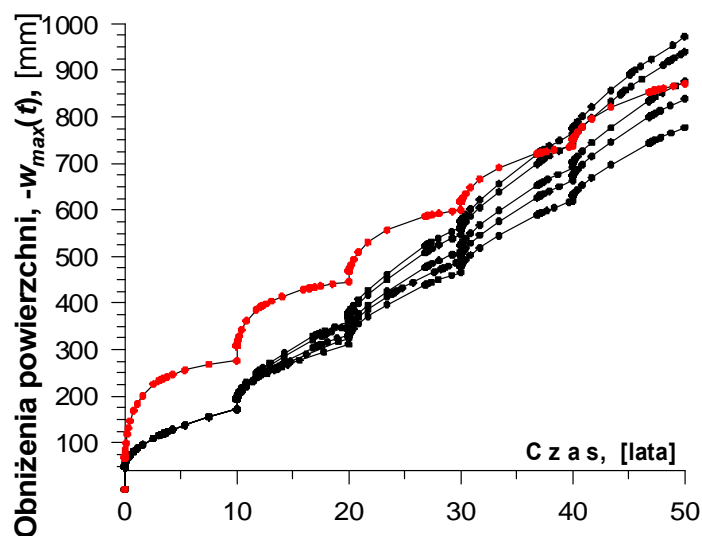
W następnej serii zadań przyjęto jednakowe dla wszystkich poziomów wartości parametru η , które rosły w odstępach 10 letnich, zgodnie z ciągiem wartości $\eta(t) \in [-0.85, -1.08, -1.23, -1.34, 1,43]$. Równocześnie wprowadzono zmianę podatności β . Przykład efektów przemieszczeniowych *odszywnienia* i *upodatnienia* ilustruje rysunek 6.



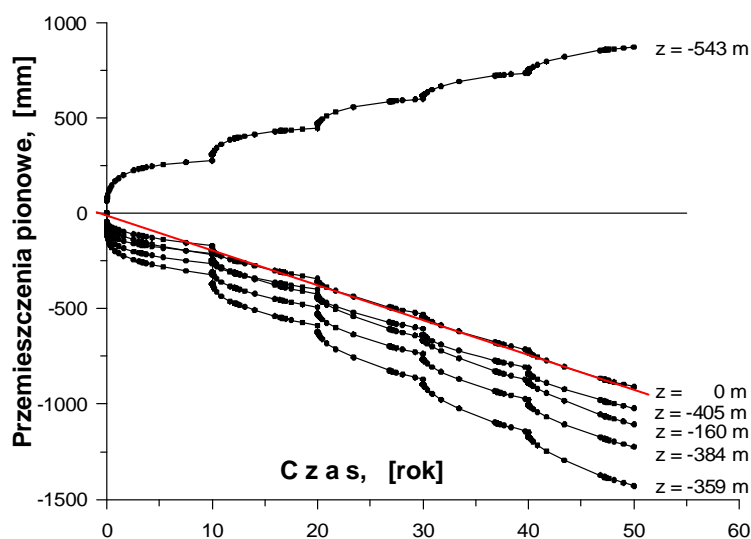
Rys. 6. Wpływ parametrów *odszywnienia* (η) i *upodatnienia* (β) na funkcję $w(t)$

Na wykresach (Rys. 6) kolorem czerwonym pokazano reakcję przemieszczeniową na *odszywnienie* bez *upodatnienia*, a kolorem szarym – dodatkowo z równoczesnym *upodatnieniem*. Zmiana podatności nie powoduje zmiany wartości współczynnika c_1 (7) – reakcji na *odszywnianie*, ale zmieniają się wartości współczynników funkcji potęgowej c_2 i c_3 , odpowiadające za reakcję na zmiany postaciowe. Wpływ ciągu zmian sztywności bez zmiany podatności (punkty czerwone) oraz z jednoczesnymi zmianami podatności w strefie wyrobisk górniczych (punkty czarne) na zależność maksymalnych obniżeń powierzchni terenu

od czasu przedstawiono na rysunku 7. Przemieszczenia we wnętrzu górotworu na kilku poziomach kopalni (-543 , -405 , -384 m), w spągu i stropie półki solnej (-359 i -160 m) oraz na powierzchni terenu ($Z = 0$ m) wykazują podobną zależność od *odszywnienia* i *upodatnienia*, ilustrują to wykresy na rysunku 8. Linia czerwoną aproksymowano stałą prędkość obniżen.



Rys. 7. Wpływ *upodatnienia* w homogenizowanym obszarze na obniżenia terenu (seria zadań dla różnych wartości parametrów, zmienianych co 10 lat)

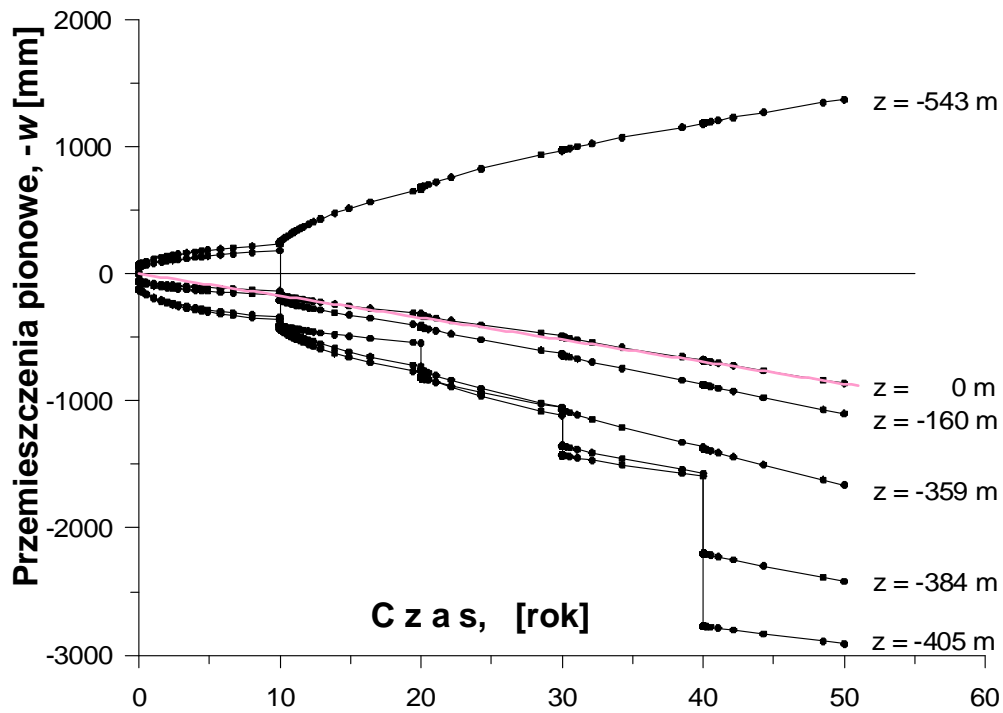


Rys. 8. Obniżenia na powierzchni i we wnętrzu górotworu przy równoczesnej homogenizacji na wszystkich poziomach

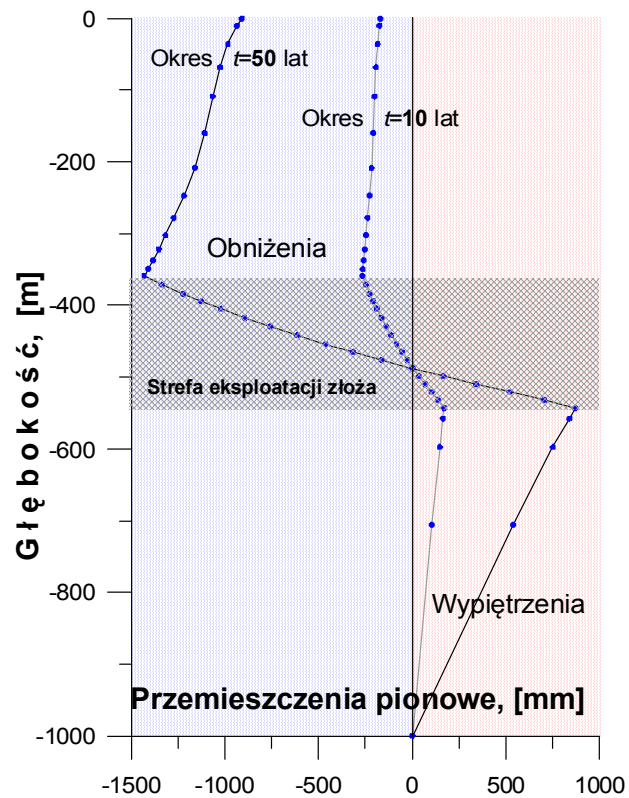
W kolejnej serii testów badano wpływ zróżnicowania zadawanych wartości parametrów homogenizacji. Po kilku seriach próbnych uzyskano wyniki przemieszczeń powierzchni w funkcji czasu, zbliżone do obserwowanych w pomiarach obniżen terenu (Kortas i Maj, 2013). Wykresy funkcji maksymalnych obniżen przedstawiono na rysunku 9.

Zmiana parametrów homogenizacji w obrębie poszczególnych poziomów kopalni wpływa znacząco na przemieszczenia w górotworze. Ilustruje to porównanie zależności obniżen i wypiętrzeń od głębokości dla dwóch okresów obliczeń (Rys. 10 i 11).

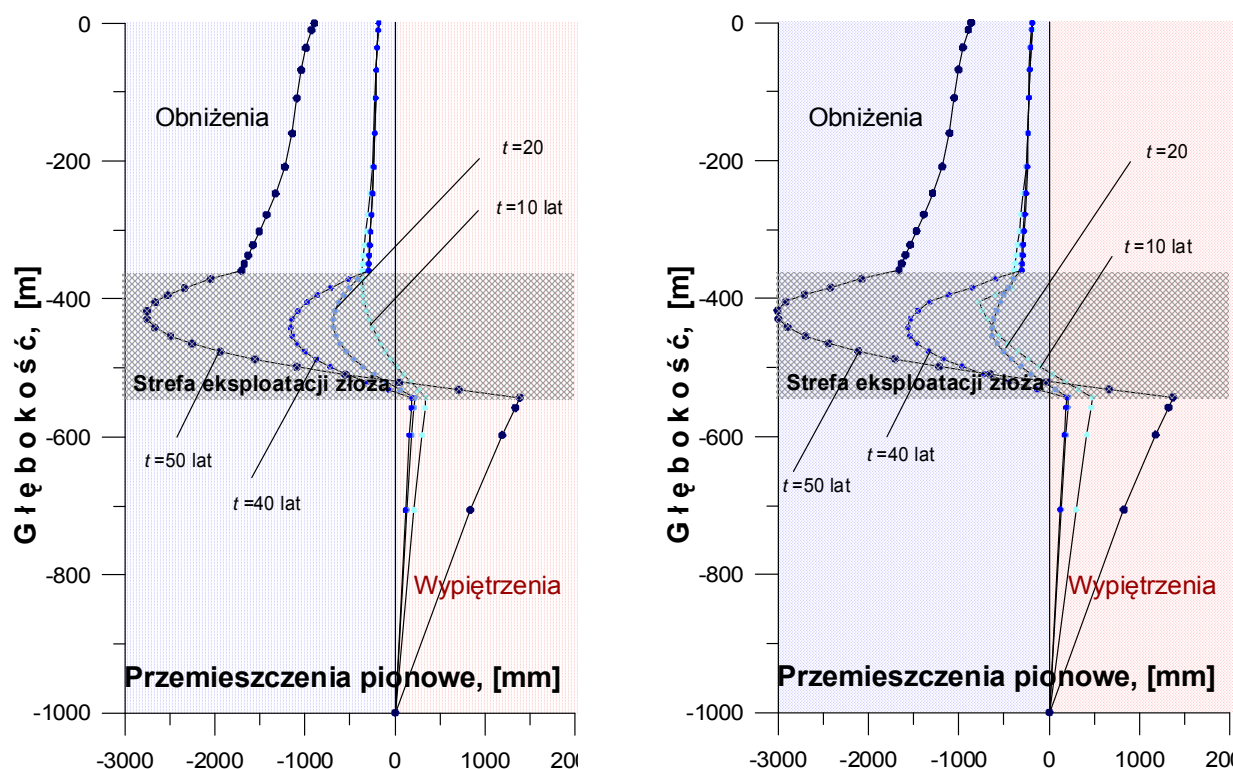
Nad strefą eksploatacji pojawiają się maksymalne obniżenia zwiększające się w czasie (od 10 do 50 lat), a pod nią – wypiętrzenia. Największe obniżenia modelowe pojawiają się w strefie III i IV poziomu kopalni, a wypiętrzenia w strefie IX i VIII poziomu.



Rys. 9. Obniżenia na powierzchni i we wnętrzu górotworu przy nierównoczesnej homogenizacji na poziomach kopalni



Rys. 10. Zależność maksymalnych przemieszczeń pionowych od głębokości dla *odszywnienia bez upodatnienia*



Rys. 11. Zależność przemieszczeń pionowych od głębokości ze stałym (rys. lewy) i zmiennym (rys. prawy) odsztywnieniem i upodatnieniem

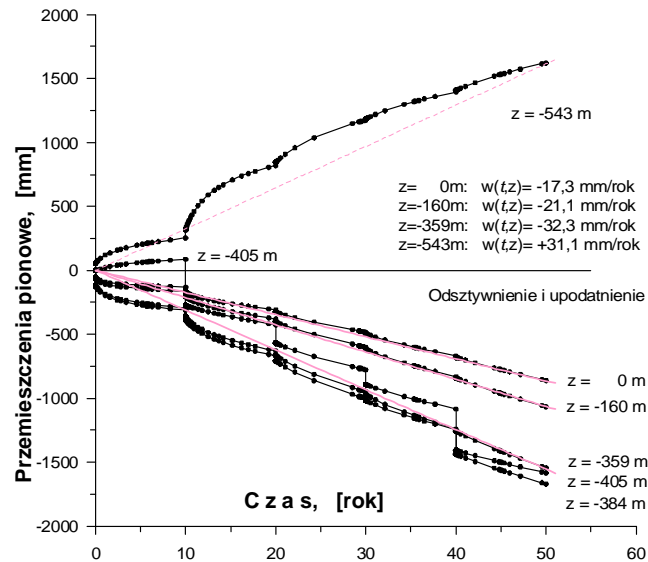
5. Model z homogenizacją zmienną w czasie i w strefach struktury

W następnej fazie badań współczynniki homogenizacji zmieniano w czasie symulując rozwój przestrzenny kopalni w okresie 50 lat. W tabeli 1 przedstawiono zestaw zadawanych parametrów. Odrębnie homogenizowano następujące strefy: [1] – III poziom, [2] – IV poziom, [3] – V i VI poziom, [4] – VII, VIII i IX poziom kopalni. Wykres otrzymanych przemieszczeń w poszczególnych przestrzeniach homogenizowanego górotworu ze zmienną w czasie homogenizacją pokazano na rysunku 12.

Tab. 1. Parametry homogenizacji

Homogenizacja [strefa]	Czas w latach	0	10	20	30	40	50
Odsztywnienie η [1]		0,00	0,00	-1,58	-1,86	-2,07	-2,31
Odsztywnienie η [2]		0,00	-1,23	-1,61	-2,05	-2,13	-2,34
Odsztywnienie η [3]		0,00	-1,83	-1,83	-2,07	-2,14	-2,46
Odsztywnienie η [4]		0,00	0,00	0,00	0,00	-1,92	-2,37
Upodatnienie β [1]		0,50	0,00	0,74	0,88	0,99	1,13
Upodatnienie β [2]		0,50	0,33	0,72	0,72	1,00	1,13
Upodatnienie β [3]		0,50	0,89	0,80	0,93	0,99	1,21
Upodatnienie β [4]		0,50	0,00	0,00	0,00	1,01	1,15

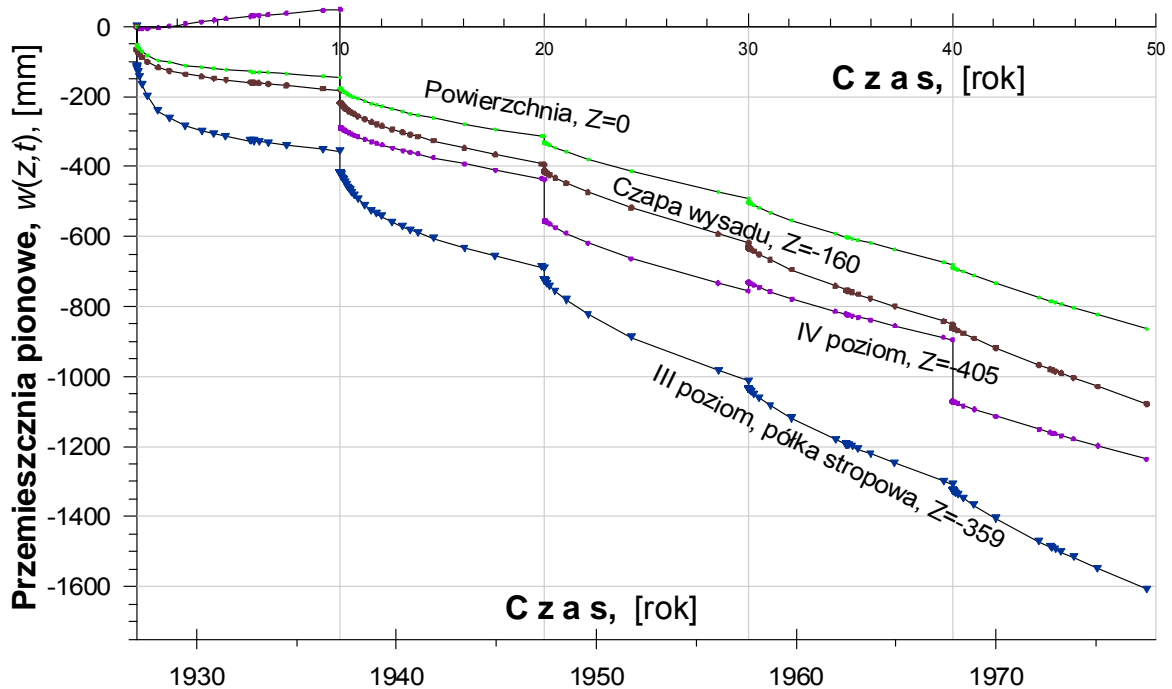
Dalsze badania polegały na tarowaniu parametrów w celu lepszego dopasowania modelu do obserwacji we wnętrzu wysadu, głównie na III poziomie kopalni. Uwzględniono również zmiany spowodowane zatopieniem kopalni. Zestawienie parametrów modelu przyjętego do analiz w następnym rozdziale podano w tabeli 2, a otrzymane dla tych założeń przemieszczenia zaprezentowano na rysunku 13.



Rys. 12. Przeszczenia górotworu i powierzchni w czasie

Tab. 2. Parametry homogenizacji w zadaniu końcowym

Homogenizacja [strefa]	Czas w latach	0	10	20	30	40	50	51	85	100
Odszczywnienie η [1]		0,00	0,00	-1,50	-1,75	-1,85	-2,05	-1,50	-1,50	-1,50
Odszczywnienie η [2]		0,00	-1,23	-1,50	-1,85	-1,95	-2,10	-1,50	-1,50	-1,50
Odszczywnienie η [3]		0,00	-1,83	-1,83	-2,05	-2,25	-2,45	-1,50	-1,50	-1,50
Odszczywnienie η [4]		0,00	0,00	0,00	0,00	-1,80	-2,00	-1,50	-1,50	-1,50
Upodatnienie β [1]		0,50	0,00	0,74	0,88	0,99	1,13	1,13	-1,00	-1,00
Upodatnienie β [2]		0,50	0,33	0,72	0,72	1,00	1,13	1,13	-1,00	-1,00
Upodatnienie β [3]		0,50	0,89	0,80	0,93	0,99	1,21	1,21	-1,00	-1,00
Upodatnienie β [4]		0,50	0,00	0,00	0,00	1,01	1,15	1,15	-1,00	-1,00



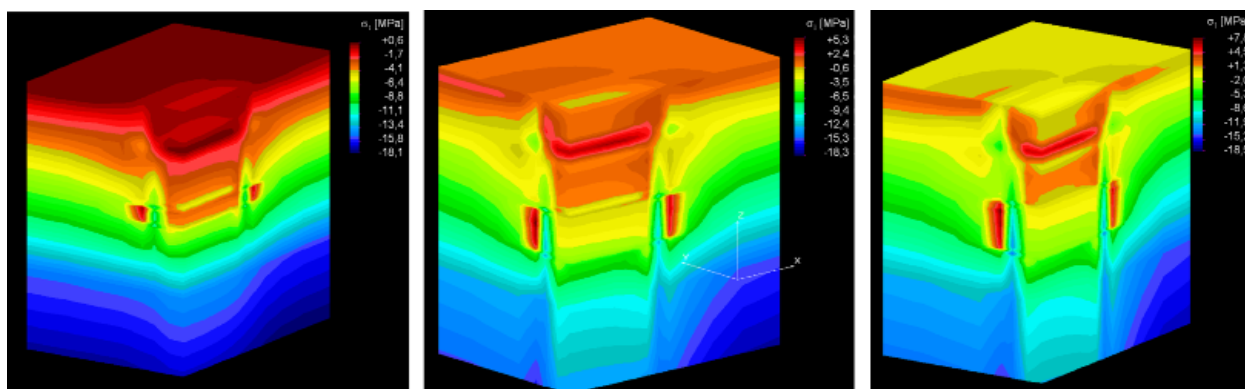
Rys. 13. Obniżenia powierzchni i górnych poziomów kopalni po uzgodnieniu z obniżeniami na powierzchni terenu i III poziomie kopalni (zadanie końcowe)

Należy zaznaczyć, że wprowadzane co 10 lat zmiany właściwości struktury wyrobisk powodują niezgodny z obserwacjami przyrost przemieszczeń pionowych spowodowany natychmiastową zmianą modułu sztywności. Mankament ten można wyeliminować poprzez zmniejszenie odstępów czasu np. do 5 lat lub 1 roku. Ponieważ jednak po wprowadzeniu takiej zmiany czas trwania obliczeń wzrasta wielokrotnie, nie wpływając istotnie na wynik określania zmian okresowych, otrzymany wynik modelowania uznano za zadawalający.

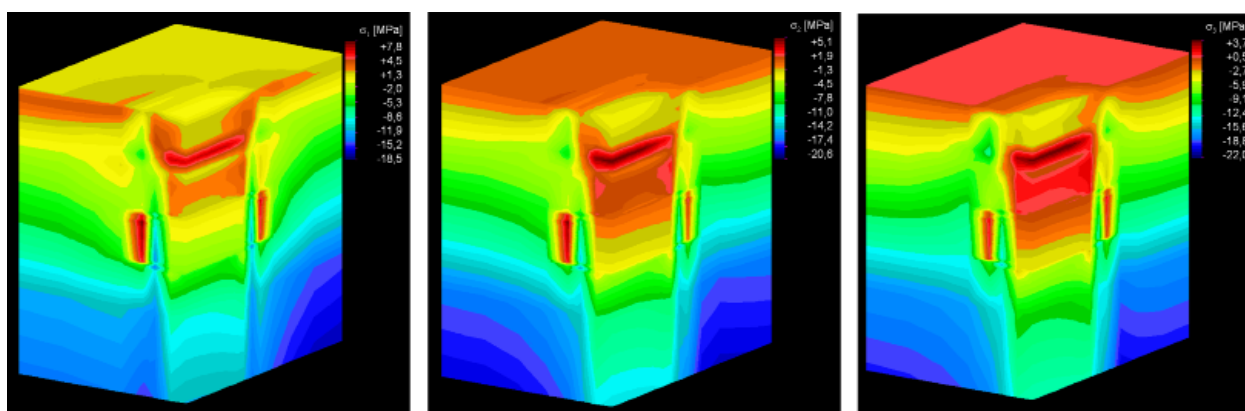
6. Naprężenia główne i efektywne w okresach eksploatacji złoża

Celem poprzednio przedstawionych badań modelowych było rozpoznanie własności geomechanicznego modelu górotworu, ocena wpływu parametrów homogenizacji na efekty przemieszczeniowe i uzyskanie dopasowania do rozpoznanego ruchu górotworu i powierzchni terenu przed zatopieniem kopalni. Uzyskanie zgodności modelu z obserwacjami otwiera zasadnicze studia, dotyczące okresu przed zatopieniem kopalni, obejmujące analizy naprężeń kształtujących się w badanej strukturze oraz tendencji ich zmian w czasie.

Pierwotny stan naprężeń (w solach stan hydrostatyczny) zmienia się pod wpływem prowadzonej eksploatacji złoża. W półce stropowej, czapie wysadu i filarach brzeżnych pojawiają się naprężenia rozciągające. Narastanie naprężeń rozciągających ilustrują rozkłady największego z naprężeń głównych σ_1 po 10, 30 i 50 latach (Rys. 14). Po 10 latach maksymalna wartość największego z naprężeń głównych σ_1 osiąga wartość $\text{Max}(\sigma_1) = +0,06$ MPa, po 30 latach $+5,3$ MPa, a po 50 latach $+7,8$ MPa. Występowanie naprężeń rozciągających stwierdzono także w naprężeniach głównych σ_2 i σ_3 po 50 latach (Rys. 15).



Rys. 14. Rozkłady naprężeń głównych σ_1 po 10, 30 i 50 latach

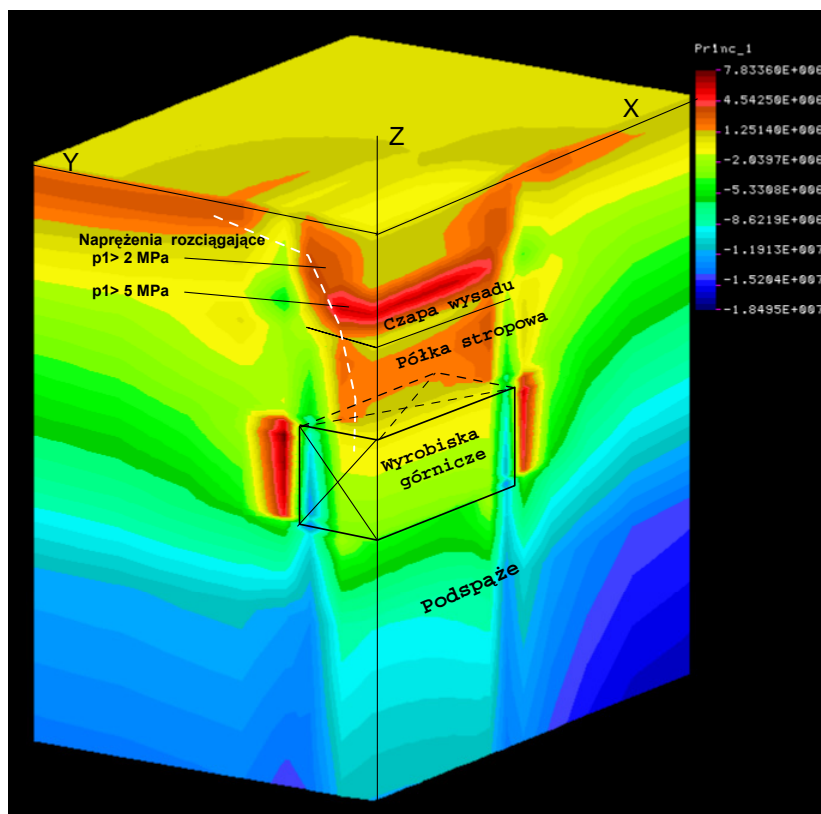


Rys. 15. Rozkłady naprężeń głównych σ_1 , σ_2 , σ_3 po 50 latach, $\text{Max}(\sigma_1) = +7,8$ MPa, $\text{Max}(\sigma_2) = +5,1$ MPa, $\text{Max}(\sigma_3) = +3,7$ MPa

Obrazy rozkładów σ_2 i σ_3 są podobne do σ_1 , ale wartości maksymalne naprężeń są mniejsze. Naprężenie medialne σ_2 w czapie wysadu i na granicy czapy wysadu i półki stropowej dochodzi do $+2,8$ MPa.

W innych obszarach jest naprężeniem ściskającym. Naprężenia minimalne σ_3 są generalnie ściskaniem i tylko na granicy czapy wysadu i półki stropowej pojawiły się rozciągania dochodzące do wartości +3 MPa.

Rozkłady naprężeń wskazują, że pod wpływem prowadzenia eksploatacji w półce stropowej występowały wszechstronne trójosiowe naprężenia rozciągające (trzy składowe naprężenia są dodatnie). Ich wartości systematycznie wzrastały w trakcie eksploatacji, osiągając maksimum po 50 latach. Lokalizację głównych obszarów modelu geometrycznego i naprężeń σ_1 przedstawiono na rysunku 16.



Rys. 16. Naprężenia σ_1 po 50 latach z lokalizacją wyrobisk kopalni

Na rysunku 16 zaznaczono układ współrzędnych, położenie obszarów: podspaże, wyrobisk górniczych, półki stropowej w nadstropiu i czapy wysadu. Rozkład naprężenia głównego σ_1 (maksymalnego), pozwala zlokalizować obszary występowania ekstremalnych naprężeń rozciągających. W tym modelu, po 50 latach obszary te pojawiają się w filarach brzeżnych, w półce stropowej i czapie wysadu. Maksymalna ich wartość to +7,8 MPa, a w półce stropowej +2,8 MPa. Zbliżone do maksimum wartości σ_1 występują także w filarze brzeżnym.

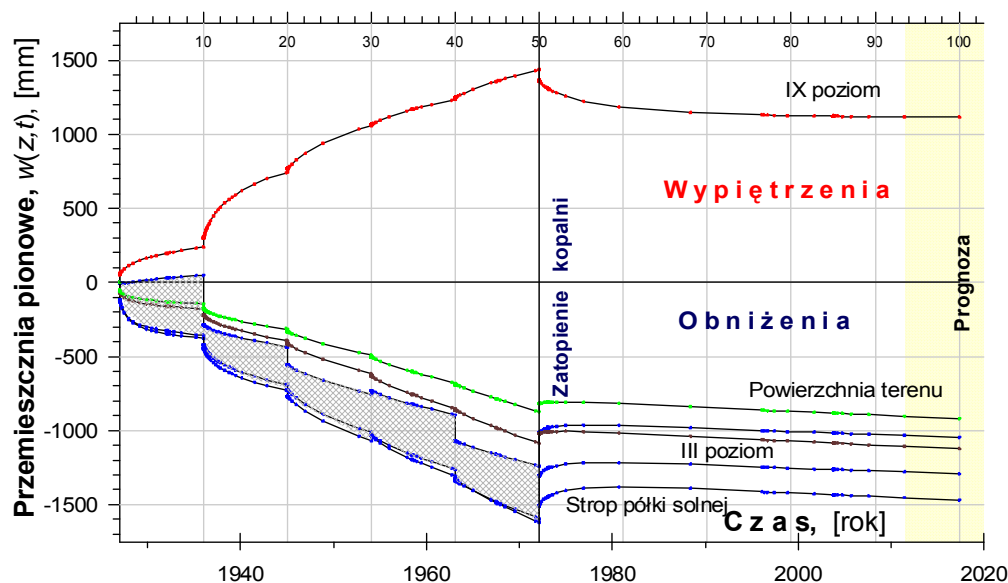
7. Modelowanie wpływu zatopienia kopalni na górotwór i powierzchnię terenu

Omawiane w tym rozdziale przemieszczenia i naprężenia dotyczą okresu po zatopieniu kopalni, które zostało odwzorowane w zadaniu końcowym zmianą warunków obciążeniowych w strefie wyrobisk kopalni po 50 latach od rozpoczęcia eksploatacji (tabela 2, po roku 50.). W wyniku obliczeń za ścianą NE i SW wysadu otrzymano wypiętrzenia, a nad wysadem obniżenia.

Obserwacje obniżeń nad zatapianą kopalnią soli w Inowrocławiu wykazały, że w okresie zatapiania wystąpiła rewersja osiadań z wykształceniem się lokalnych wypiętrzeń. W kopalni Solno na I poziomie, po zatopieniu dolnych poziomów wypiętrzenia osiągnęły wartość ponad 60 mm, a po całkowitym zatopieniu kopalni wypiętrzenia pojawiły się na powierzchni terenu w miejscach poprzednich maksymalnych osiadań. Rewersja obniżeń nie była tak wyraźnie obserwowana w Wapnie (niewielkie, kilkuletnie wypiętrzenia za

SW ścianą wysadu), ze względu na dominację osiadań spowodowanych obwałami i zapadliskami w trakcie katastrofального przepływu wód, a potem kilkuletniego obniżania poziomu wód w czapie wysadu.

Kształtowanie się maksymalnych przemieszczeń pionowych na powierzchni terenu i w górotworze z prognozą do 2017 roku pokazano na rysunku 17. Wyniki modelowania są w przybliżeniu zgodne z obserwacjami geodezyjnymi. Trudność porównania efektów symulacji wyłącznie oddziaływania kopalni z obserwacjami obniżenia terenu wynika z uproszczeń modelowych oraz nakładania się w rzeczywistości na wpływy kopalni efektów procesów hydrogeologicznych, w tym deformacji nieciągłych, które w pierwszych latach po wdarciu wód do kopalni były dominujące. Zatem model ten przede wszystkim stanowi podstawę do wnioskowania o kształtowaniu się obniżenia w ostatnim okresie. Prognoza ta nie dotyczy lokalnych ruchów terenu spowodowanych innymi czynnikami niż wpływy zatopionej kopalni.

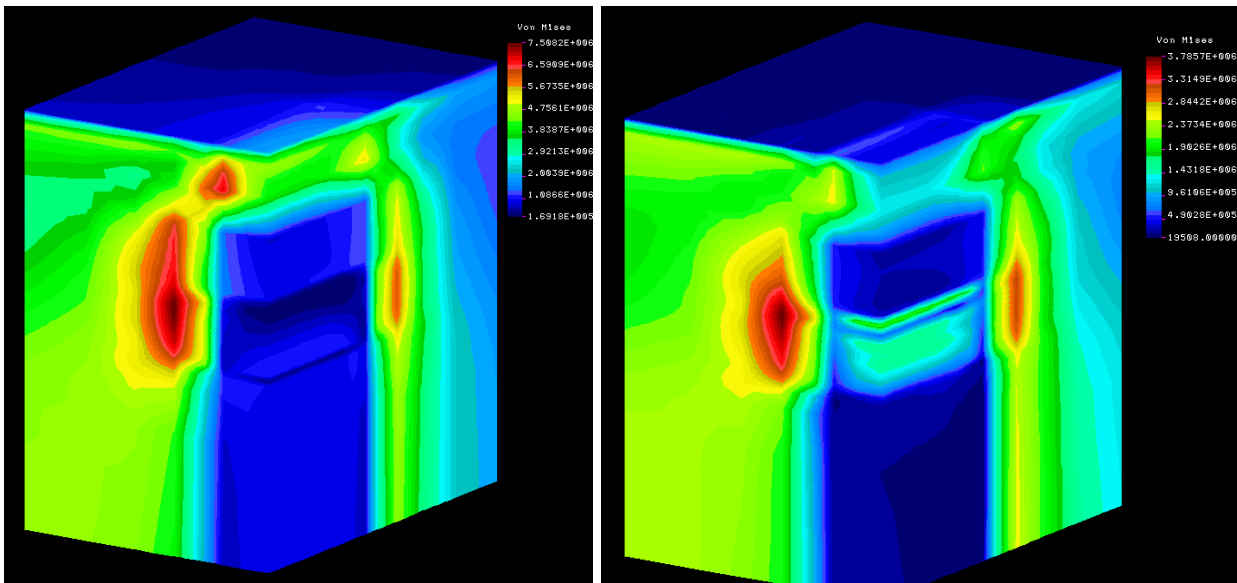


Rys. 17. Maksymalne przemieszczenia pionowe w górotworze i na powierzchni terenu do 100. roku od rozpoczęcia eksploatacji, czyli do 2017 r.

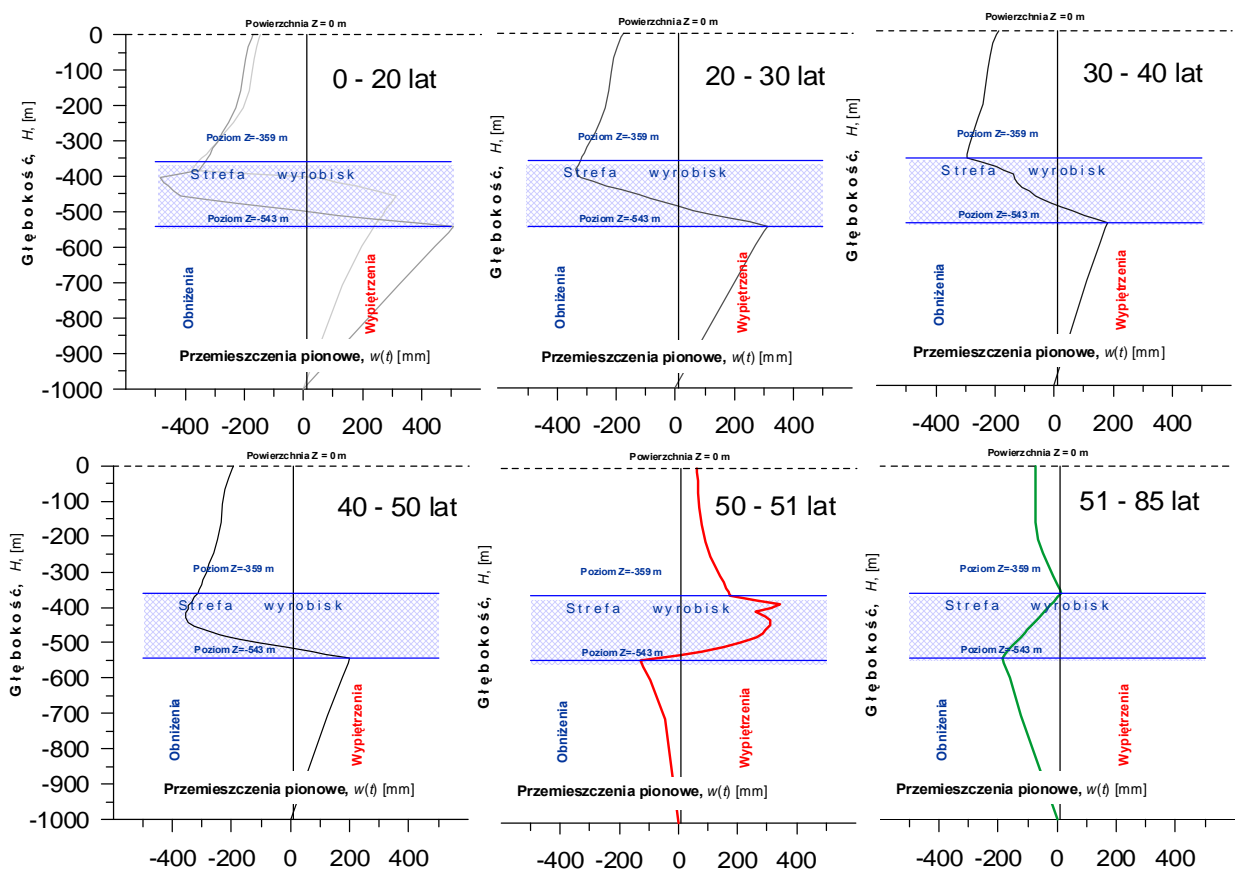
Zatopienie kopalni polepszyło stan geomechaniczny calizn poprzez podparcie hydrauliczne. Wypełnienie wyrobisk powoduje spadek obciążeń o wartość ciężaru wypartej przez calizny cieczy. Efekt ten jest widoczny na rozkładach naprężeń efektywnych (3) na rysunku 18.

Zmiany przemieszczeń w górotworze zachodzące w trakcie prowadzenia eksploatacji, zatapiania kopalni i w następnym okresie ilustrują przemieszczenia pionowe w osi pionowej modelu, czyli obniżenia i wypiętrzenia maksymalne na poszczególnych poziomach kopalni. Wprowadzenie wypełnienia solanką powoduje spadek prędkości obniżenia. Na najniższym poziomie wypełnienie powoduje dodatkowe dociążenie, w wyniku którego proces wypiętrzenia przechodzi w powolne obniżenia. Zmiany przyrostów przemieszczeń pokazują wykresy na rysunku 19.

Efektom zaciskania struktury kopalni była obserwowana konwergencja liniowa w kilku chodnikach na poziomach od III do VII. Z obliczeń modelowych wynika, że dominującym w konwergencji objętościowej kopalni jest ruch pionowy, ponad dwukrotnie większy niż zaciskanie wywołane ruchem poziomym (w kopalniach otworowych dominantą konwergencji jest zaciskanie poziome). Przyczyną tego jest forma kopalni. Po zatopieniu wyrobisk wystąpiła rewersja konwergencji i okresowe poszerzenie objętości wyrobisk. Obecnie występuje ujemna konwergencja objętościowa, której efektem jest wyciskanie solanki z zatopionych wyrobisk.



Rys. 18. Rozkład naprężeń efektywnych przed zatopieniem kopalni (50. rok) i po 30 latach od jej zatopienia (80. rok), maksymalne 7,5 MPa i 3,7 MPa



Rys. 19. Okresowe maksymalne przemieszczenia pionowe w górotworze (1927-2012)

8. Podsumowanie i wnioski

1. Założenia tego modelu i przeprowadzone symulacje skierowane były przede wszystkim na określenie rozkładu przemieszczeń we wnętrzu górotworu i na powierzchni w okresie 50 lat, czyli do czasu wdarcia wody do wyrobisk kopalni. Symulacja rozwoju przestrzennego kopalni uzyskana została po raz

- pierwszy na drodze homogenizacji struktury komorowo-filarowej. Uzyskano to poprzez odpowiedni dobór wartości zmian parametrów odkształcalności objętościowej i postaciowej ośrodka sprężysto-lepkiego w dostosowaniu do zmierzonych przemieszczeń pionowych. Stanowi to znaczący postęp metodyczny w modelowaniu czasoprzestrzennych procesów w ośrodku wykazującym właściwości reologiczne, a zarazem umożliwiło to realizację tej pracy i uzyskanie wyników istotnych dla aktualnej oceny zagrożenia terenów pogórnich.
2. Model geometryczny wysadu solnego i jego otoczenia został znacznie uproszczony, przede wszystkim przez założenie symetrii w prostopadłych do siebie płaszczyznach pionowych poprowadzonych przez środek wysadu. Z tego względu możliwe było sprowadzenie obliczeń do $1/4$ przestrzeni modelu, zmniejszenie liczby elementów i stopni swobody modelu, a w konsekwencji wielokrotne zmniejszenie czasu obliczeń. Należy podkreślić, że obliczenia sprowadzone do $1/4$ modelu geometrycznego nie wpłynęły w najmniejszym stopniu na wyniki obliczeń. Oczywiście wprowadzenie symetrii modelu było zabiegiem koniecznym, ale zmniejszającym podobieństwo modelu do rzeczywistości, która nie spełnia ściśle warunków symetrii.
 3. Sformułowany tu model jest pierwszym modelem kopalni Wapno i jej otoczenia, który umożliwia symulację czasoprzestrzennego procesu eksploatacji złoża i jego skutków w postaci narastających w czasie rozkładów wypiętrzeń na najniższych poziomach kopalni i obniżen śródkowych i górnych poziomów. Związek przemieszczeń z czasem ilustrują przedstawione zależności przemieszczeń maksymalnych w środku wysadu z czasem oraz rozkłady przyrostów osiadań w okresach 10-cio letnich. Dzięki temu można było jakościowo i ilościowo dopasować parametry modelu do wyników obserwacji przemieszczeń *in situ* i na terenie górnym.

Praca została wykonana w roku 2014 w ramach prac statutowych realizowanych w IMG PAN w Krakowie, finansowanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.

Literatura

- Cieślak J., Flisiak D., Flisiak J., Mazurek J., 2008: *Przestrzenna analiza numeryczna wyężenia filarów komór solnych pola eksploatacyjnego Pagory w Otworowej Kopalni Soli „Barycz”*, Górnictwo i geoinżynieria, Rok 32, z. 1, s. 27-35.
- Cieślak J., Pietruszka K., 2008: *Analiza zachowania górotworu i powierzchni terenu w rejonie komory E 140 pola OKS „Łężkowice” w trakcie likwidacji pustek poeksploatacyjnych z wykorzystaniem MES i pomiarów geodezyjnych*, Gospodarka Surowcami mineralnymi, t. 24, z. 2/3, s. 359-369.
- Flisiak D., Flisiak J., Tajduś A., 1997: *Geomechaniczne problemy projektowania podziemnych magazynów sprężonego powietrza dla energetyki*, Biblioteka Szkoły Eksploatacji podziemnej Nr 6, Kraków.
- Kortas G. (red.), 2004: *Ruch górotworu i powierzchni w otoczeniu zabytkowych kopalń soli*, Wydawnictwo Inst. Gosp. Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- Kortas G. (red.), 2008: *Ruch górotworu w rejonie wysadów solnych*, Wydawnictwo Inst. Gosp. Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków.
- Kortas G., Maj A., 2012: *Warunki geomechaniczne w caliznach chroniących kopalnię przed wodami na przykładzie kopalni soli Kłodawa*, Przegląd Górniczy, Nr 12/2012, s. 112-117.
- Kortas G., Maj A., 2013: *Geomechaniczne badania modelowe terenu pogórnich Wapno w zakresie oceny zagrożenia powierzchni terenu wynikającego z awaryjnego zatopienia kopalni soli*, [w:] Rasała M. (red.) *Dokumentacja geologiczna określająca zagrożenia terenu pogórnich kopalni soli Wapno w zakresie określenia jego przydatności do zagospodarowania i rewitalizacji*. Hydro-Nafta, UAM, (praca niepublikowana).
- Maj A., 2007: *Określenie konwergencji i właściwości lepkich górotworu solnego na przykładzie obserwacji w ZG Polkowice-Sieroszowice*, Przegląd Górniczy, nr 6, s. 25-29.
- Maj A., 2012: *Convergence of gallery workings in underground salt mines*, Archives of Mining Sciences, Monograph, No. 14, (s. 111).
- Majcherczyk T., Małkowski P., Niedbalski Z., 2006: *Ruchy górotworu i reakcje obudowy w procesie niszczenia skał wokół wyrobisk korytarzowych na podstawie badań „in-situ”*, Wyd. AGH WGiG, Kraków.

Displacements and stress distributions in the neighbourhood of the Wapno mine during its life and after flooding

Abstract

The behaviour of rock mass before the flooding of the Wapno salt mine, in the course of this process and afterwards was studied basing on results of geomechanical model testing using the homogenisation method. The strategy is outlined that was adopted to obtain simulation data consistent with subsidence measurements on the surface and on several levels within the mine. Of particular importance are vertical subsidence profiles and stress distributions in the neighbourhood of the mine. This study is the starting point for the assessment of the water hazard in Wapno salt mine and other underground multi-level salt mines.

Keywords: salt diapirs, model tests, homogenisation, stress, displacement, flooding of mine workings