

SubCav – nowe narzędzie do obliczania deformacji nad kawernami solnymi

SubCav - a new tool for calculating deformation over salt caverns



Prof. dr hab. inż. Antoni Sroka^{*)}



Dr inż. Rafał Misa^{*)}



Dr hab. inż. Krzysztof Tajduś^{*)},
prof. IMG PAN

Treść: W artykule przedstawiono możliwości nowego autorskiego oprogramowania SubCav do obliczania współczynników deformacji powierzchni i górotworu spowodowanych konwergencją kawern solnych służących do magazynowania ciekłych lub gazowych nośników energii. Oprogramowanie SubCav oparte jest na rozwiązaniach analitycznych podanych przez Sroka i Schobera (1982, 1987), a także Sroka i in. (2016). W artykule uwzględniono nowe osiągnięcia teoretyczne i aktualne wyniki pomiarów in situ. Przedstawiono nową metodę obliczania współczynników deformacji dla dowolnego punktu położonego w nadległym górotworze lub na powierzchni terenu. Pomimo koniecznych idealizacji geometrycznych i fizycznych dotyczących geometrii kawern, przebiegu konwergencji oraz faz użytkowania, obliczenia porównawcze wykonywane dla pola kawern EPE z przykładowymi 90 kawernami, w pełni potwierdziły przydatność przedstawionego rozwiązania.

Abstract: This paper presents new SubCav software for the computation of coefficients for surface and rock mass deformation caused by the convergence of salt caverns for storing liquid or gaseous energy carriers. This software is based on analytical solutions provided by Sroka and Schober (1982, 1987), and Sroka et al. (2016) taking into account new theoretical achievements and the current results of in situ measurements. The new method for calculating deformation coefficients for any point situated in the overlying rock mass or on the ground surface has been presented. Despite necessary geometrical and physical idealisations related to the cavern geometry, the course of convergence and phases of operation, comparative computations performed for the EPE cavern field with its 100 caverns, have fully confirmed the value and the integrity of the presented solution.

Słowa kluczowe:

konwergencja, kawerna solna, współczynniki deformacji, program SubCav©

Keywords:

convergence, rock salt cavern, deformation coefficient, SubCav© software

1. Wprowadzenie

Obserwowalny ogólnoswiatowy wzrost zapotrzebowania na energię powoduje wzrost produkcji gazu i ropy, dodatkowo częste skokowe zmiany cen paliw płynnych i gazowych na rynkach światowych sprawiają, że dochodzi coraz częściej do intensyfikacji procesów napełniania i opróżniania zbiorników (kawern) do przechowywania ww. paliw. W wyniku tych działań w sąsiedztwie kawern solnych dochodzi do zmiany stanu naprężenia, odkształcenia i przemieszczenia skał górotworu sięgającego do powierzchni terenu. Powstałe deformacje na powierzchni mogą prowadzić do tzw. szkód w obiektach budowlanych zlokalizowanych w zasięgu oddziaływania zespołu kawern.

2. Podstawy teoretyczne

W roku 2013 maksymalne wartości osiadania terenu w polu kawern EPE przekroczyły 700 mm (Hengst 2014). W celu kompleksowej oceny zagrożenia obiektów położonych na powierzchni terenu koniecznym jest stworzenie kompleksowej możliwości obliczania dowolnych wskaźników deformacji przy bardzo zmienionym w porównaniu z latami 90. ubiegłego stulecia użytkowaniu kawern. W wyniku przeprowadzonych badań i obliczeń symulacyjnych oraz przeprowadzonych identyfikacjach parametrów opracowano nowy program pod nazwą SubCav, którego matematyczne podstawy zostaną tutaj zaprezentowane.

Sroka i Schober podali w roku 1982 rozwiązanie oparte na tzw. metodach geometryczno-całkowych, wiążących przyczynę ze skutkiem według podanego poniżej schematu (rys. 1). Jako funkcję transformującą lub funkcję wpływów

^{*)} Instytut Mechaniki Górotworu PAN, Kraków



Rys. 1. Podstawowy związek przyczynowo-skutkowy w procesie deformacji górotworu

Fig. 1. Basic causality in the process of rock mass deformation

przyjęli odpowiednio sparametryzowaną funkcję Gaussa. Funkcja ta odpowiada w pełni rozwiązaniom podanym przez Knothego (1953), Litwiniszyna (1953) i Budryka (1953) na bazie tzw. ośrodka stochastycznego. Rozwiązanie podane przez Knothego określane jest w literaturze fachowej jako teoria Knothego i jest ona od ponad 60 lat z powodzeniem stosowana w górnictwie węgla kamiennego, górnictwie solnym i górnictwie rudnym wielu krajów na świecie.

Na podstawie rozwiązań opublikowanych m.in. w pracach: Sroki i Schobera (1982); Schobera i Sroki (1983); Haupta i in. (1983) oraz Schobera i in. (1987) opracowano na zlecenie firmy Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen (SGW) program obliczeniowy umożliwiający prognostyczne obliczanie osiadania punktów położonych na powierzchni terenu nad polem kawern (Sroka 1989, Hengst 2014). Program ten, pod nazwą PROSA (Programmsystem für den Salzbergbau) stosuje się nieprzerwalnie od 1989 roku. Na podstawie rocznych wyników pomiarów osiadania *in situ* firma SGW przeprowadza identyfikację parametrów modelu obliczeniowego i tym samym jego kalibrację. Przeprowadzone przez SGW obliczenia porównawcze pomiędzy osiadaniami pomierzonymi a osiadaniami obliczonymi na podstawie pro-

gramu PROSA są, przykładowo dla roku 2006, pokazane na rys. 2 (Hengst 2014).

Z rysunku 2 wynika, że opracowany przez Srokę i Schobera model matematyczny jest w stanie stosunkowo dobrze i wystarczająco dokładnie opisać proces osiadania powierzchni terenu nad polem kawern w górotworze solnym.

3. Model stosowany przy obliczaniu osiadań

Dla smukłych kawern, Sroka i Schober (1982) uzyskali następujący wzór (1) na rozkład osiadania na powierzchni terenu dla pojedynczej kawerny (rys. 3).

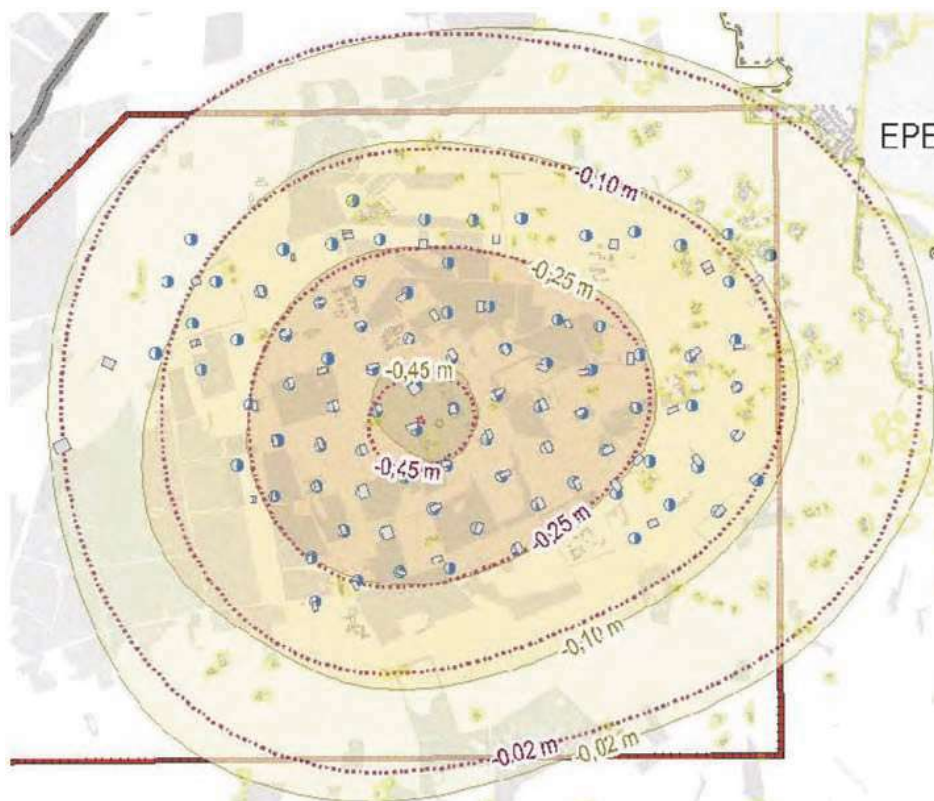
$$S(r, t) = s_{max}(t) \cdot \frac{R_o \cdot R_u}{r \cdot h} \cdot \tan \beta \cdot \left[F\left(\frac{r}{R_u}\right) - F\left(\frac{r}{R_o}\right) \right] \quad (1)$$

gdzie:

$$F\left(\frac{r}{R}\right) = \int_{r/R}^{\infty} \exp(-\pi \lambda^2) d\lambda \quad (2)$$

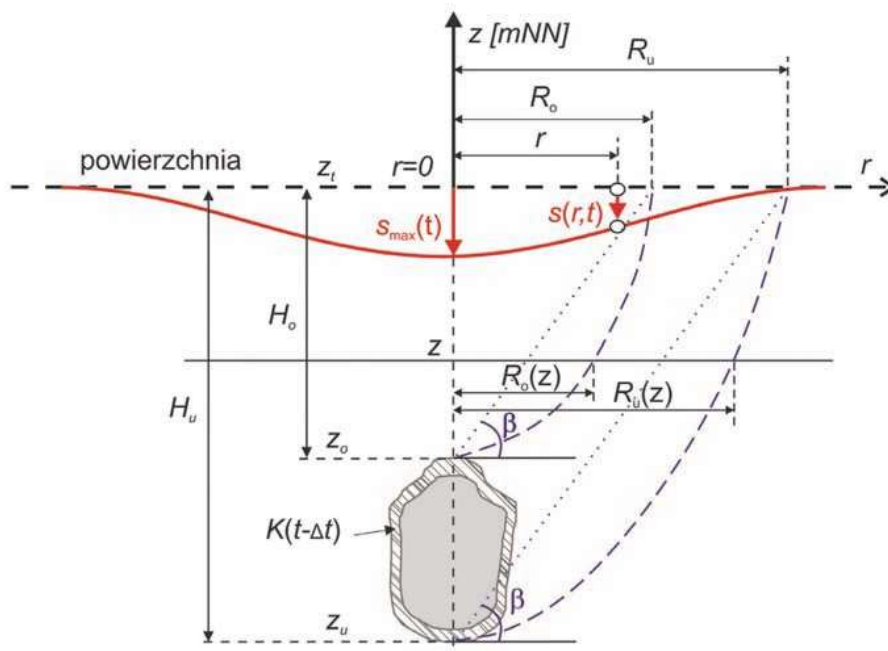
$$R_u = H_u \cdot \cot \beta, \quad R_o = H_o \cdot \cot \beta,$$

$S(r, t)$ – osiadanie punktu powierzchni w chwili t położonego na powierzchni terenu w odległości r od osi kawerny,



Rys. 2. Porównanie wyników pomiarów osiadania (linia ciągła) i wyników obliczeń teoretycznych (linia przerywana) nad polem kawern EPE (Hengst 2014)

Fig. 2. Comparison of subsidence measurement results (solid line) with theoretical calculations (break line) above the EPE cavern field (Hengst 2014)



Rys. 3. Niecka obniżeniowa nad kawerną solną
 Fig. 3. A subsidence trough above a salt cavern

- $s_{max}(t)$ – maksymalne osiadanie w chwili t ,
- H_o – głębokość zalegania stropu kawerny,
- H_u – głębokość zalegania spągu kawerny,
- R_o – parametr skali zasięgu oddziaływania w kierunku poziomym, tzw. promień zasięgu wpływów głównych liczony od stropu kawerny,
- R_u – promień zasięgu wpływów głównych liczony od spągu kawerny,
- h – wysokość kawerny,
- β – tzw. kąt zasięgu wpływów głównych (Knothe 1953).

Przy przyjęciu pewnych upraszczających założeń wzór (1) można z bardzo dobrym przybliżeniem zastąpić wzorem (3).

$$S(r, t) = S_{max}(t) \cdot \exp\left(-\pi \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (3)$$

gdzie:

$$R = \sqrt{R_o \cdot R_u} \quad (4)$$

Z wzoru (3) wynika, że pomiędzy maksymalnym osiadanem a objętością niecki osiadania zachodzi związek (5):

$$M(t) = S_{max}(t) \cdot R^2 \quad (5)$$

gdzie:

$M(t)$ – objętość niecki osiadania.

W przypadku pola kawern obliczenie osiadania dowolnego punktu powierzchni odbywa się przy przyjęciu superpozycji liniowej, tzn. sumowania osiadań od pojedynczych kawern. Objętość niecki osiadania $M(t)$ jest zależna od konwergencji objętościowej $K(t)$, od opóźniającego oddziaływania nadległego górotworu oraz możliwych strat objętości związanych z deformacją nadległego górotworu. Konwergencję w czasie można opisać analitycznie za pomocą funkcji logarytmicznej lub eksponentialnej m.in. (Sroka 1984 i Schober, Sroka 1987). Przy założeniu modelu skokowego wysalania Schober i Sroka (1987) otrzymali, że objętość niecki osiadania na powierzchni można opisać wzorem (6):

$$M(t) = a \cdot V \cdot \left(1 + \frac{f}{\xi - f} \cdot \exp(-\xi \cdot t) - \frac{\xi}{\xi - f} \cdot \exp(-f \cdot t)\right) \quad (6)$$

gdzie:

- a – współczynnik strat objętości ($a=1,0$ – przejście przez górotwór bez straty objętości),
- V – objętość początkowa kawerny,
- ξ – relatywna prędkość konwergencji objętościowej (np. $\xi=0,02 \text{ rok}^{-1}$ oznacza, że konwergencja objętościowa przebiega z prędkością 2% aktualnej objętości na rok),
- f – relatywna prędkość przejścia niecki przez górotwór [rok^{-1}].

Przeprowadzone analizy wyników osiadania *in situ* wykazują, że współczynnik a ma wartość praktycznie równą jedności, tzn. w górotworze nie dochodzi do strat objętości (Hartmann 1984, Sroka i in. 1987).

Wzór (6) można przedstawić w prostszej postaci (7):

$$M(t) = a \cdot K(t - \Delta t) \quad (7)$$

gdzie:

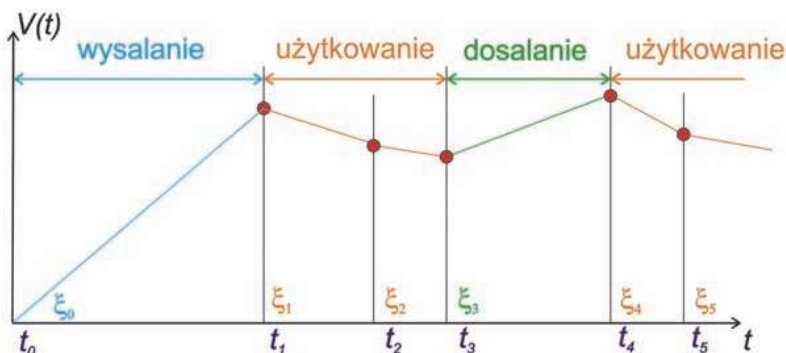
- $K(t-\Delta t)$ – konwergencja objętościowa kawerny w czasie $t-\Delta t$,
- Δt – czas opóźnienia spowodowany opóźniającym oddziaływaniem nadległego górotworu.

Wartość $s_{max}(t)$ zależy także od kształtu kawerny (np. cylinder, kula, stożek) i od geometrycznego modelu konwergencji m.in. (Haupt i in. 1983 i Hartmann 1984). Wyniki przeprowadzonych obliczeń porównawczych prowadzą do stwierdzenia, że wartość maksymalnego osiadania można z bardzo dobrym przybliżeniem wyznaczyć z wzoru (8):

$$S_{max}(t) = \frac{a \cdot K(t - \Delta t)}{R^2} \quad (8)$$

4. Obliczenia konwergencji objętościowej

Podstawowym elementem modelu obliczeniowego jest prawidłowe określenie warunku początkowego w postaci konwergencji objętościowej pojedynczej kawerny. Historia



Rys. 4. Schematyczny przebieg faz użytkowania
Fig. 4. Schematic course of operational phases

Tab. 1. Zestawienie średniej wartości prędkości konwergencji (Hengst 2014)
Table 1. Specification of average convergence rate value (Hengst 2014)

Faza produkcyjna	Roczna prędkość konwergencji	Czas w latach
Produkcja/Wysalanie	0,6%	7 – 10
Gotowość	0,3%	1 – 5
Przechowywanie (gaz)	0,8 – 1,6%	30 – 50
Przechowywanie (ropa)	0,2%	30 – 50

użytkowania pojedynczych kawern wskazuje, że fazy wysalania lub dosalania i fazy użytkowania mogą wielokrotnie się zmieniać, dotyczy to także składowanego medium (ropa lub gaz). W związku z tym do opisu przebiegu konwergencji w czasie przyjęto model wielofazowego użytkowania kawern, wprowadzając fazy wysalania, gotowości (przygotowania), użytkowania oraz dosalania (rys. 4).

Jest rzeczą oczywistą, że każda faza prowadzi do różnych wartości konwergencji, a co za tym idzie do innych wartości parametru ξ . Średnie wartości relatywnej prędkości konwergencji ξ w zależności od fazy produkcyjnej dla pola kawern EPE podane są przykładowo w tabeli 1 (Hengst 2014).

Przy przyjęciu modelu eksponentialnego procesu konwergencji objętościowej dla i -tej fazy użytkowania przyrost konwergencji w tej fazie (rys. 5) można obliczyć wg wzoru (9):

$$\Delta K(t_i, t_{i+1}) = V(t_i) \cdot [1 - \exp(-\xi_i(t_{i+1} - t_i))] \quad (9)$$

gdzie:

$\Delta K(t_{i+1})$ – przyrost konwergencji w czasie odpowiadającym okresowi od t_i do t_{i+1} ,

t_i – czas odpowiadający początkowi i -tej fazy użytkowania,

t_{i+1} – czas odpowiadający końcowi i -tej fazy użytkowania, $V(t_i)$ – objętość kawerny w czasie t_i (na początku i -tej fazy użytkowania),

ξ_i – relatywna prędkość konwergencji objętościowej przypisana i -tej fazie użytkowania.

Objętość kawerny na końcu i -tej fazy użytkowania wynosi zatem (10):

$$V(t_{i+1}) = V(t_i) - \Delta K(t_i, t_{i+1}). \quad (10)$$

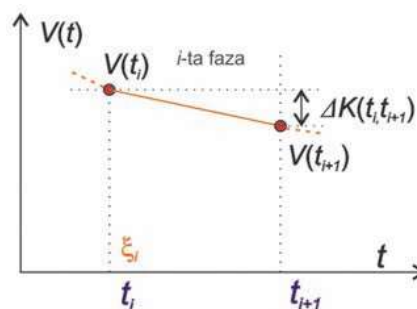
Dla fazy wysalania, przy założeniu modelu liniowego procesu wysalania, wartość konwergencji można obliczyć wg wzoru (11):

$$\Delta K(t_0, t_1) = V^e \cdot \left[1 - \frac{1}{\xi_0 T} (1 - \exp(-\xi_0 \cdot T))\right] \quad (11)$$

gdzie:

V^e – objętość wysolona,

ξ_0 – relatywna prędkość konwergencji w fazie wysalania,



Rys. 5. Schemat obliczania konwergencji dla pojedynczej fazy użytkowania

Fig. 5. Scheme of convergence calculation for a single phase of operation

T – czas wysalania ($T=t_1-t_0$)

Według różnych źródeł literaturowych wartości ξ_0 leżą w granicach:

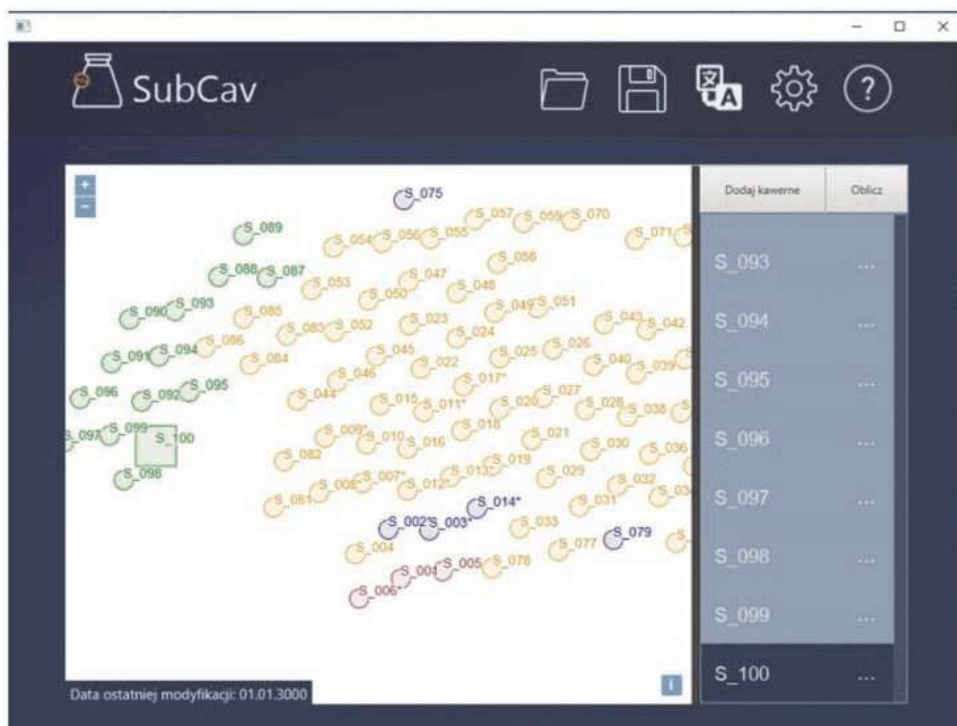
$$0,5\% \leq \xi_0 \leq 1,5\%.$$

Dla określonego czasu obliczeniowego t należy zsumować wartości konwergencji dla faz eksploatacji pomiędzy początkiem wysalania t_0 i czasem $t-\Delta t$.

Program SubCav (rys. 6) umożliwia przeprowadzenie obliczeń dla każdej fazy eksploatacji kawern, obliczane są m.in. wartości konwergencji oraz wolnej objętości, następnie: osiadania, nachylenia, krzywizny, przemieszczenia poziome oraz odkształcenia. Obliczenia można wykonywać dla każdego momentu czasowego, nie tylko dla końcowego okresu danej fazy.

5. Przykład obliczeniowy

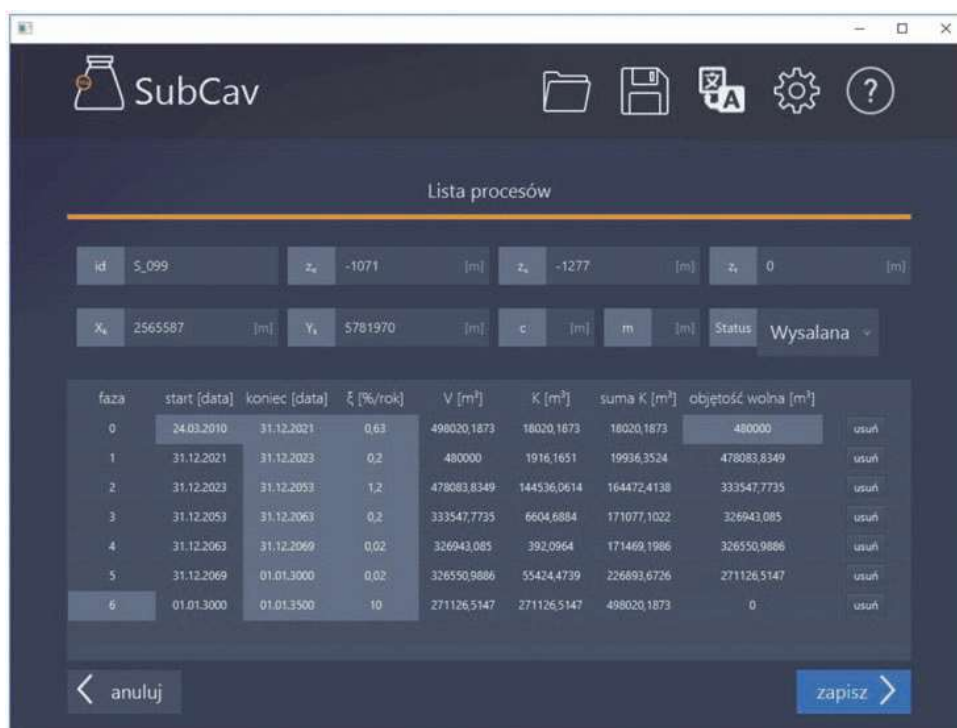
Obliczenia wskaźników deformacji spowodowanych konwergencją kawern solnych pola kawern EPE wykonano wykorzystując autorskie oprogramowanie SubCav. Dla dostarczonych przez SGW danych obejmujących w sumie



Rys. 6. Okno programu SubCav z zapisanymi kavernami
 Fig. 6. SubCav software window with saved caverns

114 kavern i dotyczących zarówno ich geometrii jak i przebiegu faz użytkowania w czasie wykonano przykładowo dla czasu 01.07.2015 obliczenia wskaźników deformacji powierzchni terenu. Dane te dotyczą czasokresu od 1972 roku. Przykładowe dane przypisane kavernie S_099 i dotyczące jej charakterystyki geometrycznej oraz poszczególne fazy produkcyjne zostały ukazane na rys. 7. Obliczenia wykonano dla następujących wartości parametrów charakterystycznych dla pola kavern EPE: $\beta=37^\circ$; $\alpha=1,0$; $\Delta t=4$ miesiące (Sroka i in. 2017).

Obliczona maksymalna wartość osiadania wynosi 80 cm, zaś wartość pomierzona 78 cm. Inne maksymalne wartości obliczonych wskaźników wynoszą:
 max. nachylenie: $T_{max} = 0,52$ mm/m
 max. przemieszczenia poziome: $u_{max} = 340$ mm
 max. odkształcenia ściskające: $\left| \varepsilon^- \right|_{max} = -0,42$ mm/m
 max. odkształcenia rozciągające: $\left| \varepsilon^+ \right|_{max} = 0,30$ mm/m.
 W programie SubCav użytkownik ma możliwość obliczania wskaźników deformacji dla pojedynczego punktu, zbioru



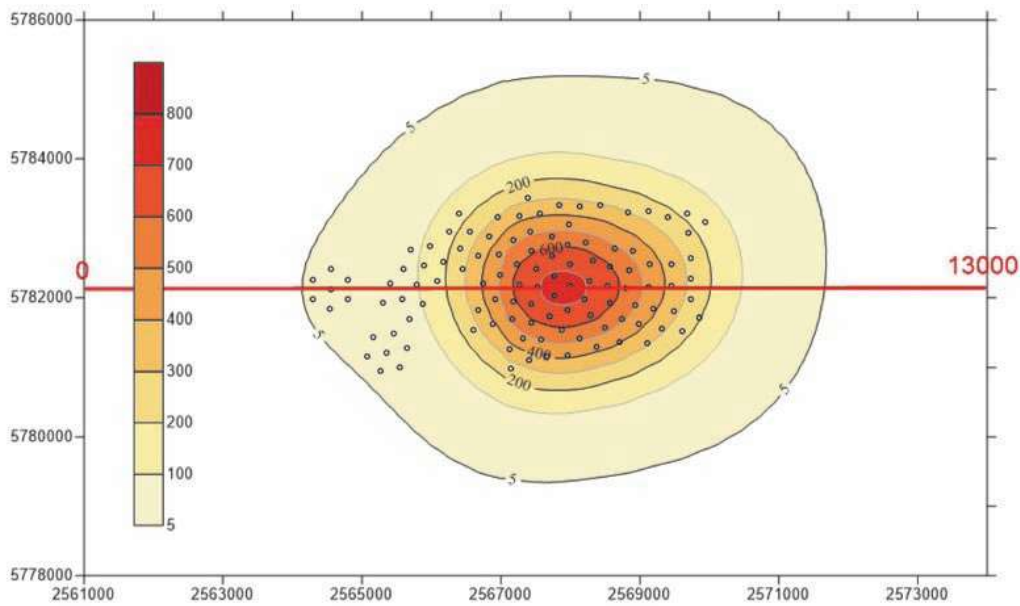
Rys. 7. Dane charakteryzujące kavernę S_099
 Fig. 7. Data characterising cavern S_099

punktów, pojedynczego profilu lub grupy profili oraz dla wybranego rastra. Wyniki obliczeń są zapisywane w formie tabelarycznej, można je wyeksportować do programów zewnętrznych, dodatkowo istnieje możliwość zobrazowania wyników bezpośrednio z programu w formie map izolinii lub prezentacji wyników w formie wykresów dla wybranych profili. W artykule zaprezentowano jedynie wybrane możliwości programu. Na rys. 8 przedstawiono wyniki obliczeń osiadania, dodatkowo linią czerwoną zaznaczono profil, dla którego zostały obliczone wartości osiadania (rys. 9a), nachylenia (rys. 9b), przemieszczenia poziomego (rys. 10a) oraz odkształcenia poziomego (rys. 10b) dla czasu 01.07.2015.

6. Podsumowanie

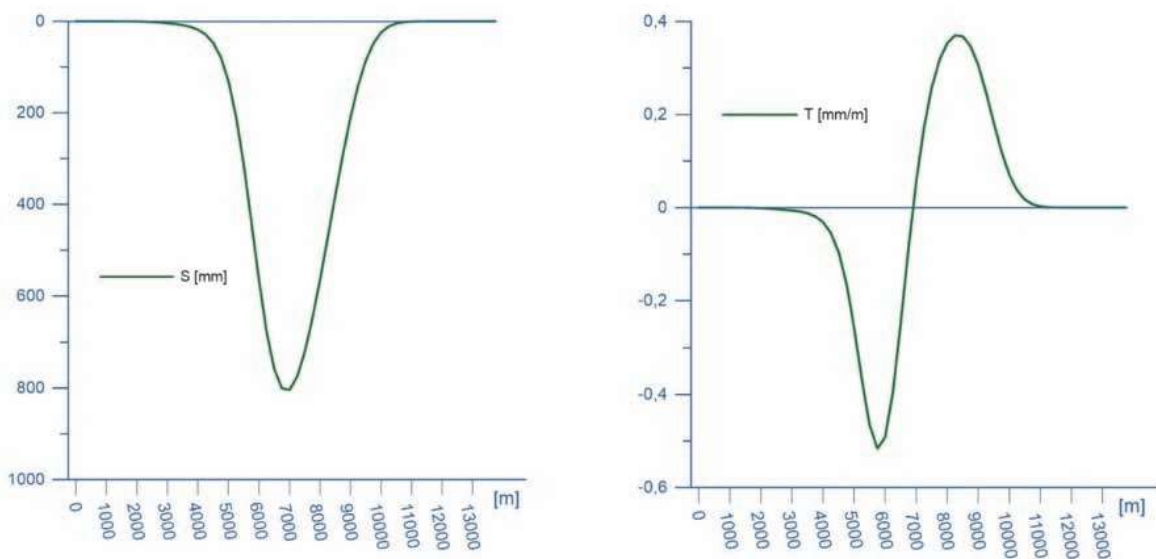
W niniejszej publikacji przedstawiono wybrane możliwości nowego programu SubCav do obliczania wskaźników deformacji powierzchni oraz górotworu spowodowanej konwergencją kawern solnych do składowania płynnych i gazowych środków energetycznych. Program ten został oparty o rozwiązania analityczne podane przez Srokę i Schobera (1982, 1987) oraz Srokę i in. (2016), które są szeroko stosowane w Europie Zachodniej, m.in. (Reitze 2017, Zander-Schiebenhöfer i in. 2017).

Przeprowadzone obliczenia porównawcze dla pola kawern EPE obejmującego 114 kawern, pomimo koniecznych ide-



Rys. 8. Mapa obliczonych wartości osiadania terenu nad polem kawern EPE – dla czasu 01.07.2015 (O - pojedyncza kawerna)

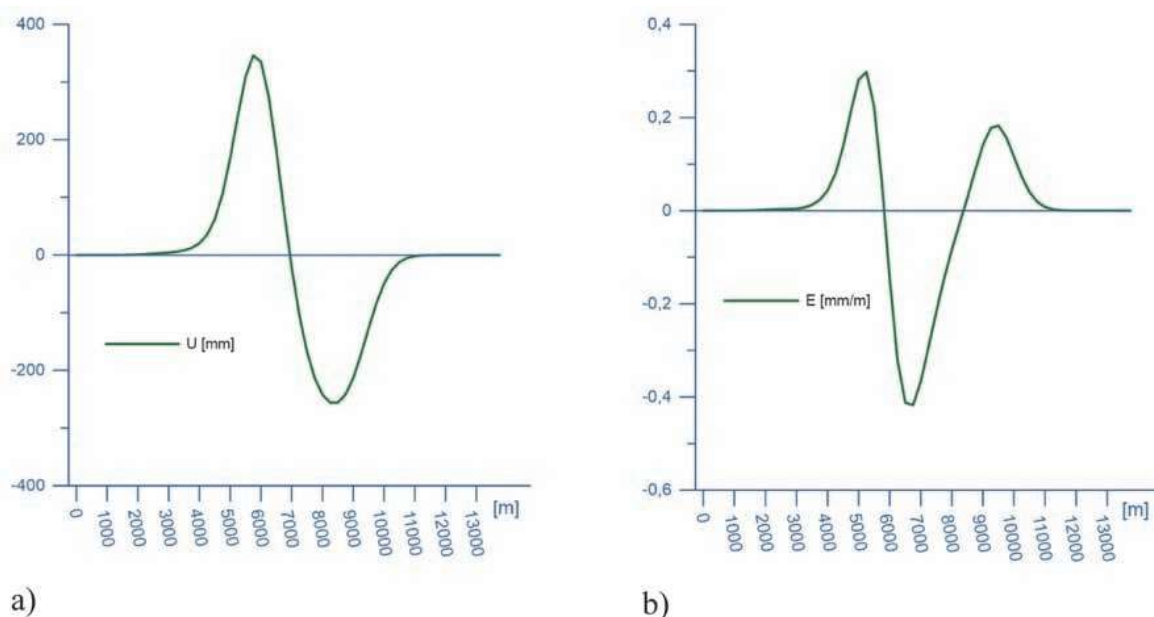
Fig. 8. Map of calculated values for the ground subsidence above the EPE cavern field – as of 1 July 2015 (O - a single cavern)



a)

b)

Rys. 9. Obliczone wartości osiadania (a) oraz nachylenia (b) wzdłuż profilu obliczeniowego dla czasu 01.07.2015
Fig. 9. Calculated values of subsidence (a) and tilt (b) along the calculation profile as of 1 July 2015



Rys. 10. Obliczone wartości przemieszczenia poziomego (a) oraz odkształcenia (b) wzdłuż profilu obliczeniowego dla czasu 01.07.2015

Fig. 10. Calculated values of horizontal movement (a) and deformation (b) along the calculation profile as of 1 July 2015

alizacji geometrycznych i fizycznych dotyczących geometrii kawerny, przebiegu konwergencji oraz faz użytkowania, potwierdziły w pełni przydatność przedstawionego rozwiązania.

Literatura

- BUDRYK W. 1953 – Wyznaczanie wielkości poziomych odkształceń terenu. „Archiwum Górnictwa i Hutnictwa”, t. 1, z. 1, PWN, Warszawa, s. 63-74.
- HARTMANN A. 1984 – Ein Beitrag zur Überwachung von Kavernenanlagen. Technische Universität Clausthal, Dissertation, 15. Juni 1984.
- HENGST G. 2014 – Monitoring der durch Kavernenkonvergenz induzierten Bodensenkungen unter Betrachtung ihrer Wirkungen auf die ökologischen Zusammenhänge. 15. Geokinematischer Tag, 15. und 16. Mai 2014. Freiberg, s. 237-251.
- HAUPT W., SROKA A., SCHÖBER F. 1983 – Die Wirkung verschiedener Konvergenzmodelle für zylinderförmige Kavernen auf die übertägige Senkungsbewegung. Das Markscheidewesen, Jahrgang 90(1983), Heft 1, s. 159-164.
- KNOTHE S. 1953 – Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania. „Archiwum Górnictwa”, t. 1, z. 1, PWN, Warszawa, s. 22-38.
- LITWINISZYN J. 1953 – Równanie różniczkowe przemieszczeń górotworu. „Archiwum Górnictwa i Hutnictwa”, t. I., z. 1. PWN, Warszawa, s. 9-21.
- REITZE A. 2017 – Cavern-induced Subsidence - New German Regulations and Operating Requirements. SMRI Fall 2017 Technical Conference, 25 - 26 September 2017, Münster, Germany.
- SCHÖBER F., SROKA A. 1983 – Die Berechnung von Bodenbewegungen über Kavernen unter Berücksichtigung des zeitlichen Konvergenz- und Gebirgsverhaltens. Kali u. Steinsalz Bd. 8 (1983), Heft 10, s. 352-358.
- SCHÖBER F., SROKA A., HARTMANN A. 1987 – Ein Konzept zur Senkungsvorausberechnung über Kavernenfeldern. Kali u. Steinsalz Bd. 9 (1987), Heft 11, s. 374-379.
- SCHÖBER F., SROKA A. 1987 – Zur Langzeitbelastung über- und untertägiger Anlagen bei Speicher- und Deponiekavernen. Kali u. Steinsalz Bd. 9 (1987), Heft 12, s. 408-414.
- SROKA A., SCHÖBER F. 1982 – Die Berechnung der maximalen Bodenbewegungen über kavernenartigen Hohlräumen unter Berücksichtigung der Hohlraumgeometrie. Kali u. Steinsalz Bd. 8 (1982), Heft 8, s. 273-277.
- SROKA A. 1984 – Abschätzung einiger zeitlicher Prozesse im Gebirge. Schriftenreihe Lagerstättenerfassung und – Darstellung, Bodenbewegungen und Bergschäden, Ingenieurvermessung. Kolloquium Leoben 15/16.11.1984, s. 103-132.
- SROKA A., SCHÖBER F., SROKA T. 1987 – Ogólne zależności między wybraną objętością pustki poeksploatacyjnej a objętością niecki osiadania z uwzględnieniem funkcji czasu. „Ochrona Terenów Górniczych” nr 79/1, s. 3-9.
- SROKA A. 1989 – PROSA Programmsystem für den Salzbergbau. Studie für die Salzgewinnungsgesellschaft Westfalen mbH & Co. KG (SGW), TU Clausthal.
- SROKA A., TAJDUŚ K., MISA R. 2016 – Analytisches Modell zur konvergenzbedingten Senkungen über Kavernenfeldern. Studie im Auftrag der KBB Underground Technologies GmbH Hannover, Krakau 06.2016.
- SROKA A., MISA R., TAJDUŚ K., KLAUS M., MEYER S., FELDHAUS B. 2017 – Forecast of rock mass and ground surface movements caused by the convergence of salt caverns for storage of liquid and gaseous energy carriers. 18. Geokinematischer Tag, 11. und 12. Mai 2017. Wagner Digitaldruck und Medien GmbH. Heft 2017 -1. ISBN 978-3-938390-19-1, s. 34-51.
- ZANDER-SCHIEBENHÖFER D., ROORDINK P., ROBERTUS S. 2017 – Subsidence Modelling for the Zuidwending Cavern Field. SMRI Fall 2017 Technical Conference, 25 - 26 September 2017, Münster, Germany.

Artykuł wpłynął do redakcji – październik 2017
Artykuł akceptowano do druku 30.11.2017