

Anton Sroka*, Krzysztof Tajduś**

OBLICZANIE OSIADANIA POWIERZCHNI TERENU PRZY EKSPLOATACJI ZŁÓŻ ROPY I GAZU

1. WPROWADZENIE

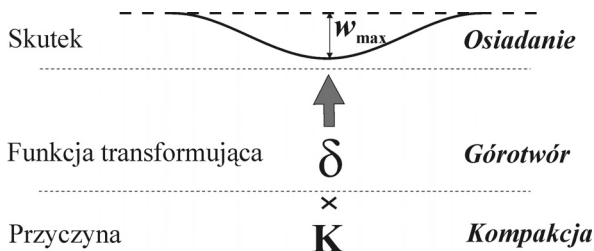
Ciągły wzrost zapotrzebowania na energię powoduje zarówno wzrost produkcji ropy i gazu, jak i intensyfikację w poszukiwaniu nowych złóż. Ich eksploatacja prowadzi do zmian stanu naprężenia, odkształcenia oraz przemieszczenia skał otaczającego górotworu. Na powierzchni powstaje niecka obniżeniowa charakteryzująca się w wielu przypadkach bardzo dużym zasięgiem wpływów. W zależności od rodzaju, porowatości oraz miąższości skały złożowej osiadania terenu mogą dochodzić do kilku metrów.

Zjawiska takie mogą prowadzić do tzw. szkód górniczych w obiektach budowlanych znajdujących się na powierzchni terenu. Z tej przyczyny, prognozowane wartości spodziewanych osiadań i deformacji terenu jest bardzo istotne. W tym celu autorzy posłużyli się metodą geometryczno-całkową opartą na normalnym rozkładzie wpływów Gaussa, zwaną w literaturze światowej teorią Knothego (Knothe, 1953). Teoria ta jest od około sześćdziesięciu lat z powodzeniem wykorzystywana do celów określania osiadania powierzchni spowodowanego eksploatacją kopalni surowców stałych takich jak węgiel, sól i rudy metali. Pod koniec lat 80. oraz na początku lat 90., zastosowano teorię Knothego do określenia osiadania spowodowanego eksploatacją złóż fluidalnych (m.in. Sroka (1988), Sroka i Schober (1990), Hejmanowski (1993)).

Ogólny schemat obliczeniowy pokazany jest na rysunku 1. W przedstawionym ciągu przyczynowo-skutkowym, przyczyną jest kompakcja złoża fluidalnego, spowodowana obniżeniem ciśnienia porowego w wyniku prowadzonej eksploatacji fluidu, zaś skutkiem osiadanie powierzchni. Elementem wiążącym jest funkcja transformująca w postaci funkcji Gaussa.

* Uniwersytet Techniczny Akademia Górnicza we Freibergu
Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie

** Instytut Mechaniki Górotworu PAN w Krakowie



Rys. 1. Schemat przyczynowo-skutkowy eksploatacji złóż fluidalnych

2. ZAŁOŻENIA I MODYFIKACJA TEORII KNOTHEGO DLA CELÓW OKREŚLANIA DEFORMACJI GÓROTWORU W REJONIE EKSPLOATACJI ZŁÓŻ FLUIDALNYCH

Dla nieskończenie małego elementu eksploatacji górniczej, odpowiadającą mu nieckę osiadania na powierzchni terenu można, zgodnie z zasadami teorii Knothego, opisać według poniższego wzoru:

$$dw(r) = \frac{a \cdot dV}{R^2} \exp\left(-\pi \frac{r^2}{R^2}\right) \quad (1)$$

$$R = \frac{H}{\operatorname{tg} \beta},$$

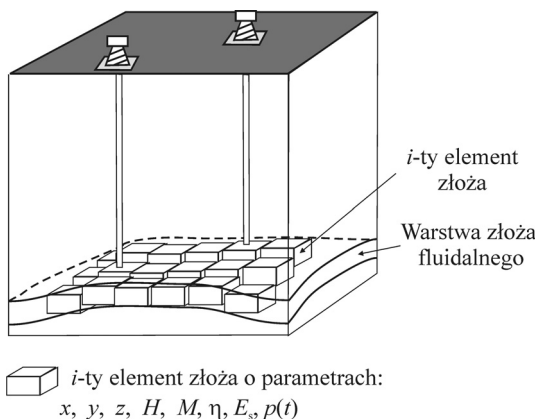
gdzie:

- a – współczynnik eksploatacji,
- R – promień zasięgu wpływów głównych,
- dV – objętość nieskończenie małego elementu eksploatacji górniczej,
- H – głębokość eksploatacji,
- β – kąt zasięgu wpływów głównych,
- r – odległość pozioma pomiędzy elementem eksploatacji, a punktem obliczeniowym na powierzchni terenu.

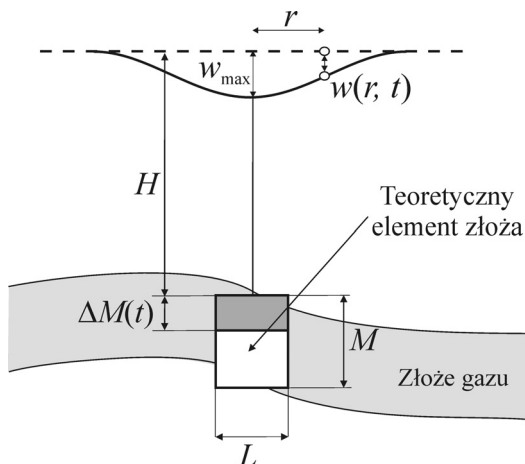
Podstawą modyfikacji jest zastąpienie nieskończenie małego elementu eksploatacji elementem skończonym w kształcie kwadratu o wielkości boku $L \leq 0,1R$. Przeprowadzone badania numeryczne wykazały, że element złożowy tej wielkości odpowiada dokładnie wzorowi (1). Ważnym etapem jest podział eksploatacji złoża fluidalnego na elementy o parametrach:

- współrzędne: x, y, z ,
- głębokość: H ,
- grubość warstwy złożowej: M ,
- porowatość: η ,
- moduł sztywności: E_s ,
- ciśnienie porowate dla różnych momentów czasu $p(t)$.

Tak przeprowadzona dyskretyzacja złoża (rys. 2) umożliwia na pełne uwzględnienie przestrzennego kształtu złoża i jego przestrzennych właściwości w procesie obliczeniowym.



Rys. 2. Schemat dyskretyzacji złoża fluidalnego na małe elementy złożowe



Rys. 3. Obniżenie terenu powstające nad eksploatacją i -tego elementu złoża

Jak wcześniej stwierdzono, przyczyną osiadania powierzchni terenu jest kompaktacja porowatych skał złożowych, spowodowana obniżeniem ciśnienia w porach. W przypadku elementu złożowego (rys. 3) kompaktacja złożowa prowadzi do tzw. niecki elementarnej opisanej równaniem (2).

$$w_i(r, t) = \frac{\Delta M_i(t) \cdot L^2}{R_i^2} \exp\left(-\pi \frac{r_i^2}{R_i^2}\right) \quad (2)$$

gdzie:

$\Delta M_i(t)$ – absolutna kompaktacja i -tego elementu w momencie t ,

$w_i(r, t)$ – osiadanie dowolnego punktu powierzchni terenu spowodowane kompaktacją i -tego elementu złożowego.

Osiadanie całkowite dowolnego punktu powierzchni terenu oblicza się przy założeniu tzw. superpozycji liniowej, tzn. jako sumę obniżen punktu od pojedynczych elementów złożowych

$w_c = \sum_{i=1}^{i=N} w_i$, gdzie N – ilość elementów złożowych.

Dla skał złożowych w postaci piaskowca o porowatości do 20% kompaktację złożową można oszacować za pomocą teorii konsolidacji Biota.

$$\Delta M_i(t) = C_{mi} [p_0 - p_i(t)] \cdot M_i \quad (3)$$

$$C_{mi} = \frac{\lambda_i(\eta)}{E_{si}}$$

gdzie:

C_{mi} – współczynnik kompaktacji, określający przyrost odkształcenia porowatego złoża przy zmianie ciśnienia o jednostkę,

p_0 – ciśnienie pierwotne,

$p_i(t)$ – ciśnienie w i -tym elemencie złożowym w chwili t ,

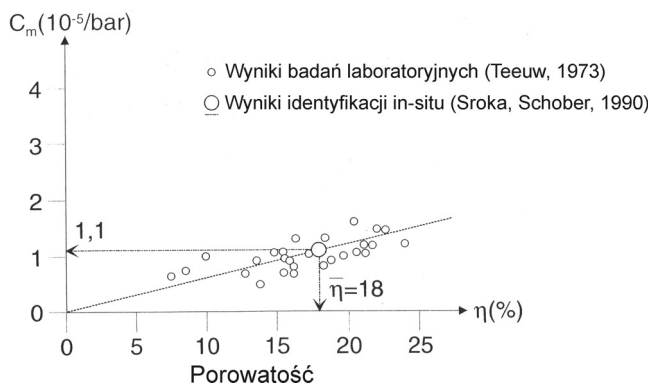
M_i – miąższość złoża porowatego,

E_{si} – moduł sztywności skał,

$\lambda_i(\eta)$ – współczynnik Biota zależny od rodzaju skał złożowej i jego porowatości.

Wartość współczynnika kompaktacji jest zależna od rodzaju skały oraz jej parametrów odkształceniowych. W literaturze jest często podawana zależność wartości współczynnika kompaktacji od porowatości (Teeuw, 1973; Schutjens *et al.*, 1995).

Rysunek 4 przedstawia wyniki badań laboratoryjnych zależności współczynnika kompaktacji w porównaniu z zależnością uzyskaną poprzez identyfikację tego parametru na podstawie analizy wyników pomiarów osiadania *in situ* (Sroka, Schober, 1990).



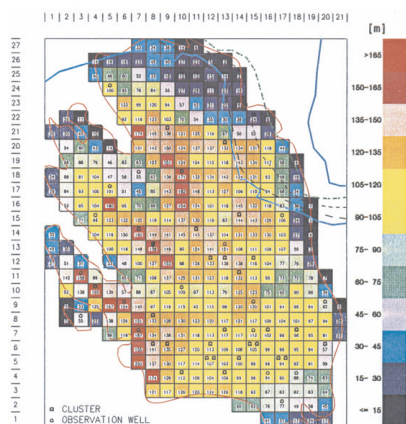
Rys. 4. Zależność pomiędzy współczynnikiem kompaktacji a porowatością skał złożowych

3. ANALIZOWANY PRZYKŁAD OBLICZANIA DEFORMACJI TERENU NAD EKSPLOATOWANYM ZŁOŻEM GAZU W GRONINGEN

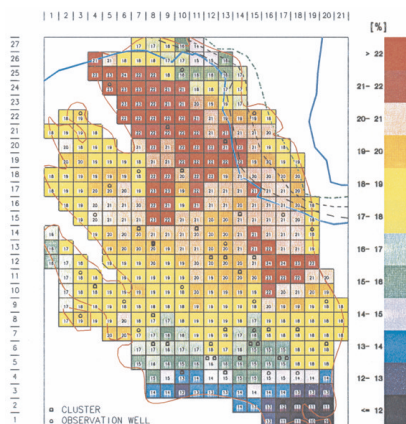
Przedstawiona metoda obliczeniowa została z powodzeniem zastosowana do analizy wyników pomiarów osiadań *in-situ* i do prognozy dla złoża gazu w Groningen (Sroka, Schober, 1990).

Analiza pomiarów osiadania obejmowała okres do 1987, natomiast prognoza została wykonana na lata 2030, 2060 i 2100, w zależności od założonego stanu ciśnienia porowego w tych latach.

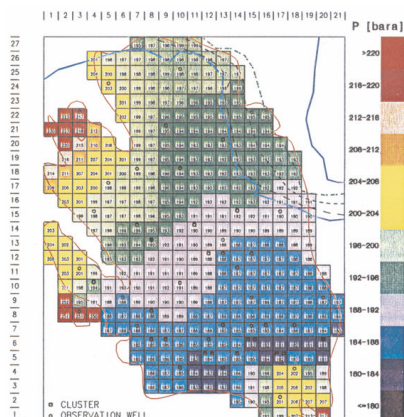
Złoże gazu w Groningen położone jest na głębokości ok. 2900–3000 m. Początkowe ciśnienie w porach skał złożowych wynosiło 350 bar. Na rysunkach 5, 6, 7 przedstawione są przykładowo: dyskretny rozkład miąższości złoża, jego porowatości oraz rozkład ciśnienia porowego w roku 1987.



Rys. 5. Dyskretny rozkład miąższości złoża w polu Groningen



Rys. 6. Dyskretny rozkład porowatości skał złożowych w polu Groningen



Rys. 7. Dyskretny rozkład ciśnień w złożu w polu Groningen

Przedstawiona na rysunkach 5, 6, 7 dyskretyzacja złoża w postaci pojedynczych elementów złożowych bazowała na kwadratowych elementach o wymiarach $1,5 \times 1,5$ km. Przeprowadzona na podstawie danych złożowych i wyników pomiarów osiadania identyfikacja parametrów metody obliczeniowej, tzn. wyznaczenie współczynnika kompaktacji C_m i kąta zasięgu wpływów głównych β , pozwoliła na osiągnięcie następujących wyników:

- dla normy wyrównawczej L1:

$$C_m = 0,75 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$$

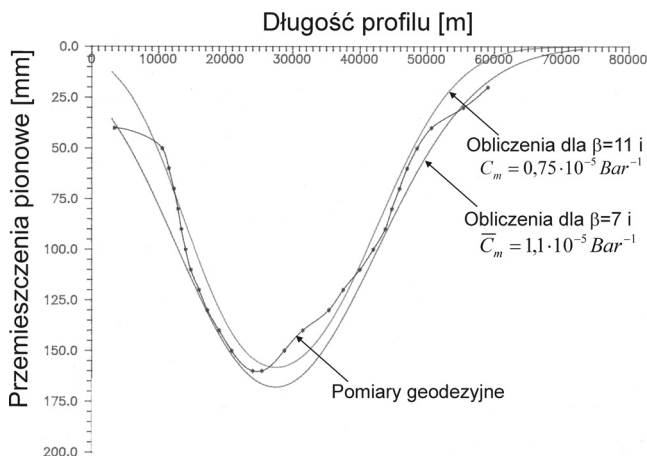
$$\beta = 11^\circ$$

- dla normy wyrównawczej L2:

$$C_m = 1,1 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$$

$$\beta = 7^\circ$$

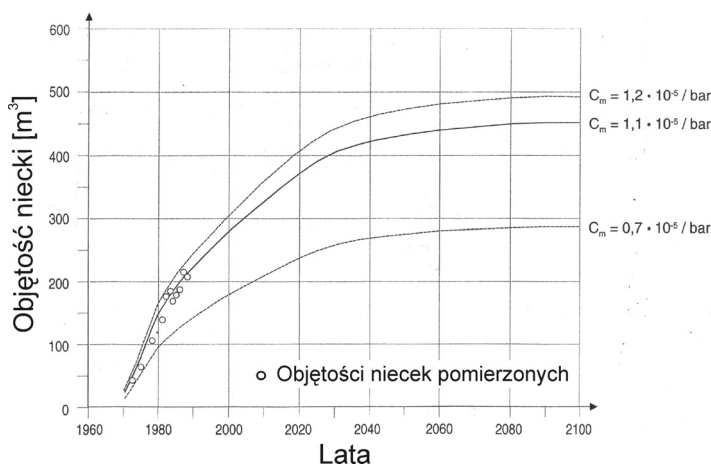
Na rysunku 8 przedstawiono przykładowe porównanie pomierzonych wartości osiadania (stan 12.1987) z osiadaniami obliczonymi na podstawie wartości zidentyfikowanych parametrów wzdłuż jednego profilu pomiarowego.



Rys. 8. Porównanie niecki pomierzonej i niecki obliczeniowej teoretycznie, stan 1987

Kompakcja złoża gazu w Groningen mierzona była także w warunkach polowych za pomocą radioaktywnych markerów zlokalizowanych w skałach złożowych. W wyniku pomiarów prowadzonych sukcesywnie w czasie, na podstawie zmian odległości pomiędzy markerami, uzyskano przedział wartości współczynnika kompaktacji od $0,7$ do $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$ (Leegre, 1974).

Na podstawie wyników pomiarów *in situ* przeprowadzono obliczenia objętości niecek osiadania do roku 1987 (rys. 9). Następnie wykonano obliczenia objętości niecek teoretycznych dla granicznych wartości współczynnika kompaktacji podanych przez Leegre (1974) oraz dla wartości wyznaczonych na drodze procesu identyfikacji. Z rysunku wynika, że uzyskane wartości współczynnika kompaktacji przy użyciu normy wyrównawczej L2 odpowiada w pełni wynikom pomiarów *in situ*. Norma L2 jest identyczna z tzw. metodą najmniejszych kwadratów.



Rys. 9. Porównanie objętości niecek osiadania na podstawie wyników pomiarów *in situ* (do roku 1987) z przebiegiem objętości niecek obliczonych teoretycznie dla różnych wartości współczynnika kompaktacji

Przy założeniu, że średnia porowatość skał złożowych wynosi 18%, uzyskana przez Srokę i Schobera (1990) wartość współczynnika kompaktacji odpowiada także w pełni wynikom prac laboratoryjnych (Teeuw, 1973 – rys. 4).

Obliczone wartości maksymalnych osiadań dla różnych momentów czasu są przedstawione na rysunku 10, gdzie podane są wartości pomierzone do roku 1987 oraz wartości prognozowane na cały okres planowanej eksploatacji złoża fluidalnego. Obliczenia do roku 1987 zostały wykonane dla rzeczywistych danych dotyczących rozkładu ciśnienia w porach złoża natomiast, obliczenia dla lat 2030, 2060 i 2100 na podstawie danych koncernu wydobywającego gaz.

Otrzymane wyniki zaproksymowano funkcją regresyjną postaci:

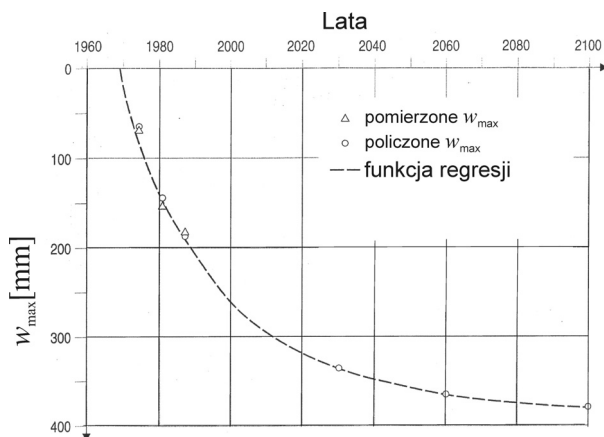
$$w_{\max}(t) = w_{\max}^K [1 - \exp(-b(t - t_0))] \quad (4)$$

uzyskując wartości:

$$w_{\max}^K = 378 \text{ mm},$$

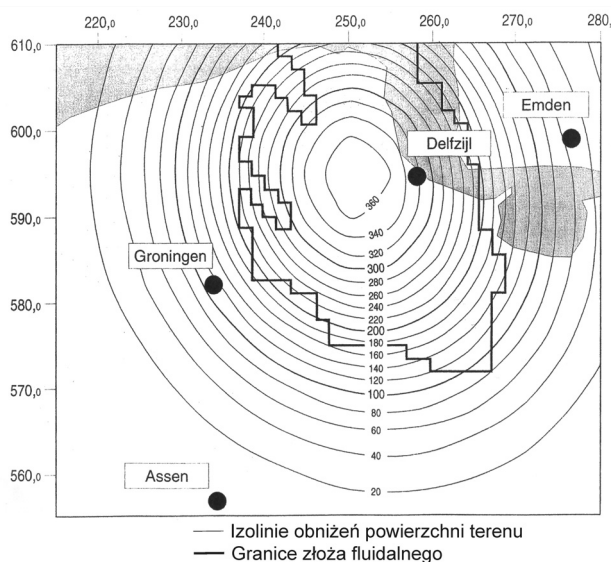
$$t_0 = 1968,$$

$$b = 0,0036 \text{ rok}^{-1}.$$



Rys. 10. Przebieg wartości maksymalnego osiadania nad złożem gazu w Goningen do roku 2100

Na rysunku 11 przedstawiono wyniki obliczeń rozkładu osiadania spowodowanego planowaną eksploatacją złoża gazu do roku 2100. Maksymalne osiadanie wg. tych obliczeń będzie wynosiło ok. 380 mm, przy czym otrzymana niecka będzie bardzo rozległa.



Rys. 11. Izolinie osiadania końcowego nad złożem gazu w roku 2100

4. WNIOSKI

Prezentowana metoda pozwala na stosunkowo łatwe prognozowanie osiadań powierzchni terenu nad eksploatowanym złożem fluidalnym. Umożliwia ona na bardzo do-

kładne uwzględnienie kształtu przestrzennego złoża i przestrzennych rozkładów jego własności fizyko-mechanicznych. Zastosowanie funkcji Knothego jako funkcji transformującej pozwala także na stosunkowo prostą identyfikację parametrów obliczeniowych na podstawie wyników pomiarów *in-situ*.

Przeprowadzone w roku 2000 pomiary osiadania w Groningen wykazały, że pomierzone maksymalne osiadanie różni się zaledwie o 3mm od osiadania obliczonego ze wzoru regresyjnego (4), a tym samym potwierdziły przydatność proponowanego rozwiązania.

LITERATURA

- [1] Fabre D., Gustkiewicz J.: *Poroelastic properties of limestones and sandstone under hydrostatic condistions*. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 34, 1997, 127–134
- [2] Hardy N.C.: *In-situ Compaction Monitoring in the Groningen Field*. N.A.M. rapport 15.392
- [3] Hejmanowski R.: *Zur Vorausberechnung fördebedingter Bodensenkungen über Erdöl- und Erdgalagestätten*. Praca doktorska, TU Clausthal, 1993
- [4] Knothe S.: *Równanie profilu ostatecznie wykształconej niecki osiadania*. Archiwum Górnictwa, t. 1, z. 1, Warszawa, PWN 1953
- [5] Leegre K.: *Bodemdalingsmetiongen in het Groningen Gasveld*. Nederlands Geodetisch Tijdschrift, vol. 10, Delft 1974
- [6] Schutjens P.M.T.M., Fens T.W., Smits R.M.M.: *Experimental observations of the uniaxial compaction of quartz-rich reservoir rock at stress of up to 80MPa*. Land Subsidence, Balkema, Rotterdam, 1995
- [7] Sroka A.: *Selected problems in predicting influence of mining induced ground subsidence and rock deformations*. Proc. 5th Int. Symp. on Deformation Measurements and Canadian Symp. on Mining Surveying on Rock Deformation Measurements, Fredericton/Canada 6–9 June 1988
- [8] Sroka A., Schober F.: *Studie zur Analyse und Vorhersage der Bodensenkungen und des Kompaktionsverhaltens des Erfgasfeldes Groningen/Emsmündung*. Abschlussbericht, Clausthal 1990
- [9] Sroka A., Hejmanowski R.: *Prognozowanie osiadania punktów powierzchni przy eksploatacji złóż gazu*. Geotechnika i Budownictwo Specjalne 2000, XXIII Zimowa Szkoła Mechaniki Górniczej, Bukowina Tatrzańska 13–17 marca 2000
- [10] Teeuw D.: *Laboratory Measurment of Compaction Properties of Groningen Reservoir Roc*. Verhandeligen kon., Ned. Geol. Mijnbouwk. Gen., vol. 28, 1973