

Grzegorz Kortas*

WPŁYW WŁAŚCIWOŚCI FIZYCZNYCH I GEOMETRII WYSADU SOLNEGO NA JEGO WYPIĘTRZANIE SIĘ**

1. Wstęp

Stosowanie metod numerycznych w badaniach tektonicznych otwiera nowe możliwości opisu zachowania się skał pod wpływem naprężeń. Celem tej pracy jest próba ilościowego określenia ruchu wysadu solnego, a właściwie wpływu gęstości i lepkości górotworu oraz kształtu wysadu na jego wypiętrzanie. Stosowano metodę elementów skończonych w *continuum* sprężysto-lepkim. Praca ta jest częścią projektu badawczego skierowanego na przedstawienie ruchu górotworu w polskich wysadach solnych.

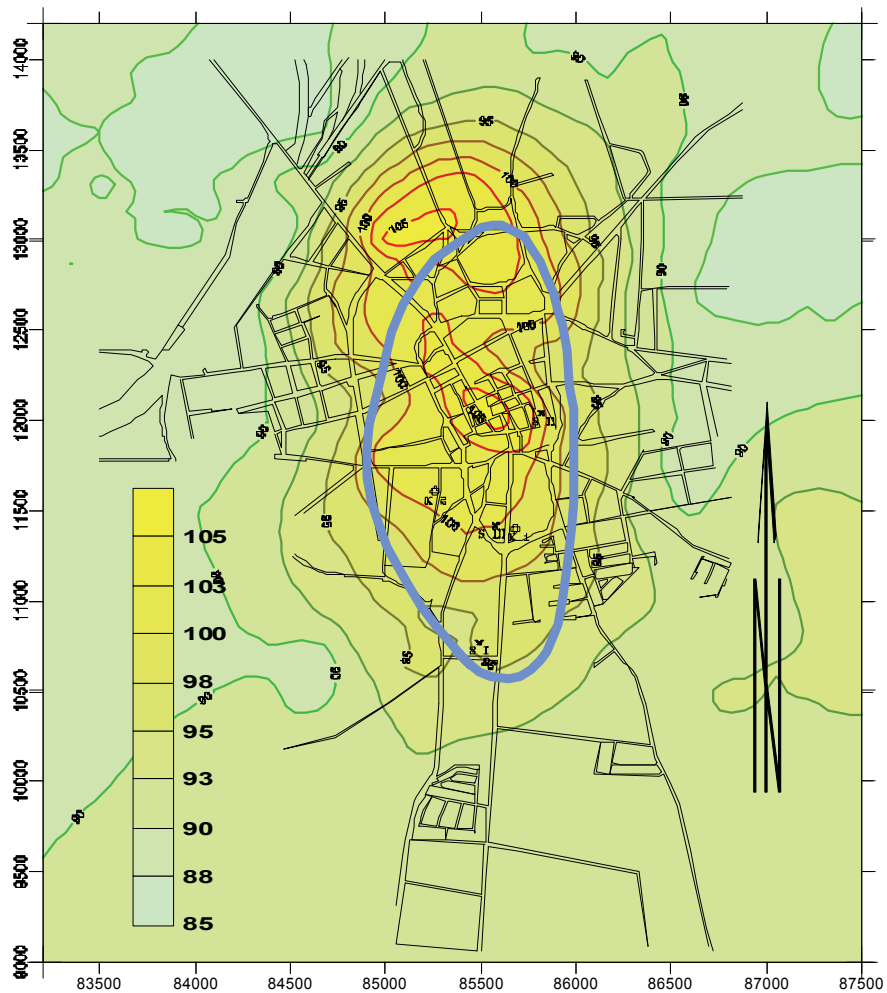
2. Zjawisko halokinezy

Jednym z przejawów tektoniki solnej jest wykształcanie się struktur w formie wysadów. Zjawisko to zalicza się do diapiryzmu, oznaczającego wciskanie się skał o mniejszej lepkości w obręb skał o większej lepkości. Diapir, a w szczególności wysad solny jest produktem takiego procesu [1]. Proces wypiętrzania skał solnych nazwany został przez *Trusheima halokinezą* [3].

W geomechanice istotny jest mechanizm wypiętrzania, jego warunki fizyczne i skutki przestrzenne. Czynnikiem inicjującym jest odpowiedni nacisk grawitacyjny na sole zalegające pod utworami o większej gęstości. Halokinezę rozpoczyna spękanie nadkładu, potem przez rozszerzającą się szczelinę wdzierają się sole. W końcowym etapie wysad może oderwać się od pokładu macierzystego. Kontakt z horyzontami wodonośnymi powoduje rozpuszczanie soli, a minerały nierozpuszczalne tworzą czapę wysadu, co powoduje, że tempo wypiętrzania terenu nad wysadem jest mniejsze niż na powierzchni lustra solnego.

* Instytut Mechaniki Górotworu, PAN, Kraków

** Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2005–2008 jako projekt badawczy nr 4 T12A 029 29



Rys. 1. Topografia terenu w Inowrocławiu i granice wysadu solnego

Niekiedy obecność wysadu zaznacza się wyniesieniem terenu. Przykładem tego jest topografia rejonu Inowrocławia zbudowanego nad wysadem solnym (rys. 1). Przy założeniu hipotezy, że wyniesienie to powstało po wyrównaniu terenu przed 10 tys. lat w trakcie ostatniego zlodowacenia, średnie tempo podnoszenia terenu nad tym wysadem wynosiło 1,5 mm/rok, największe na początku po ustąpieniu lodowca.

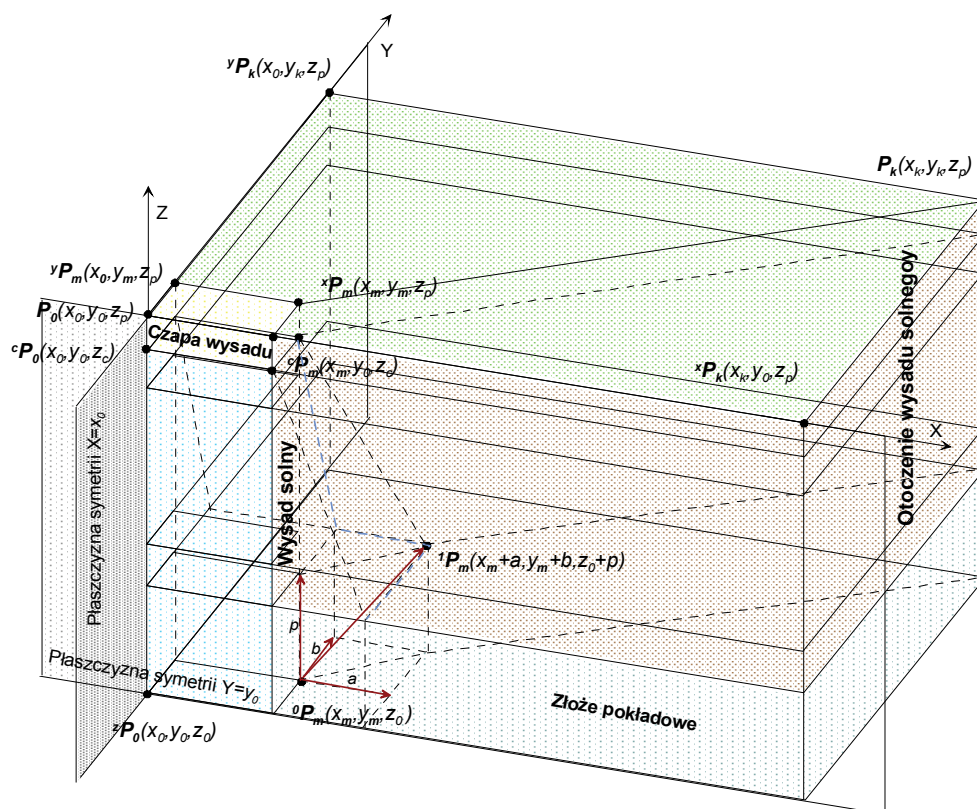
3. Założenia do badań modelowych

W modelu, zbudowanym także dla celów badania wpływów eksploatacji, wyróżniono wysad solny z pokładem macierzystym i skały otaczające. Pominięto szereg innych czynni-

ków, jak zróżnicowanie wewnętrznej budowy litologicznej wysadu i utworów otoczenia, tarcie i pękanie skał na kontakcie wysadu z jego otoczeniem czy poślizgi na granicy wysadu i czapy. Założono symetrię względem dwóch pionowych płaszczyzn wzajemnie prostopadłych, co pozwoliło sprowadzić obliczenia do ćwiartki rozpatrywanego obiektu w przestrzeni 3D (rys. 2).

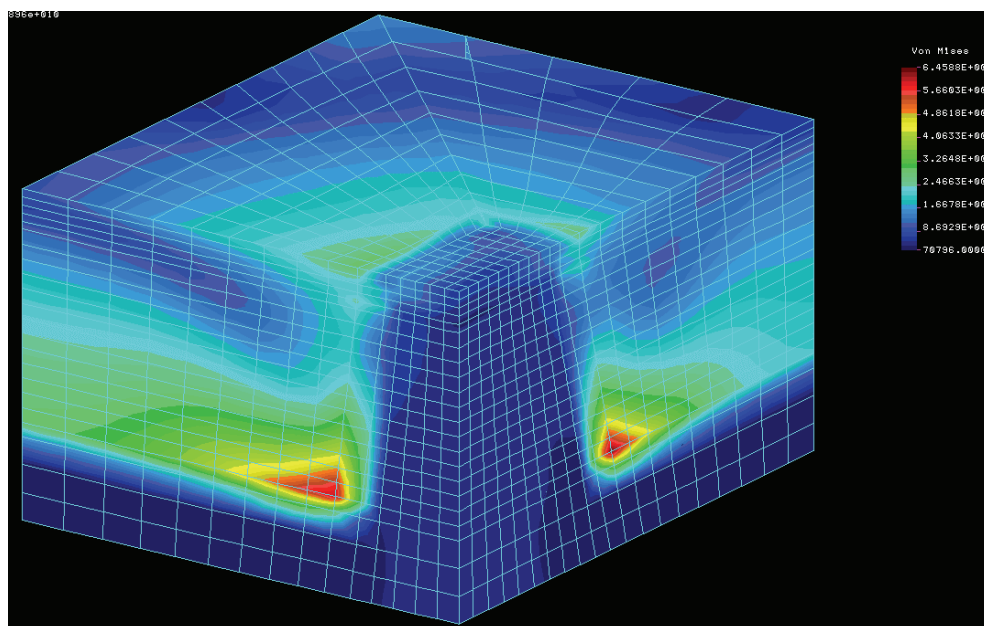
Model fizyczny górotworu to ośrodek sprężysto-lepki z liniowym prawem sprężystości Hooke'a i potęgowym prawem pełzania Nortona $\dot{\epsilon} = B(H)\sigma^n$ [2], dla $n = 2$. Podatność na pełzanie B zwiększa się z głębokością H . Wartość B podawano dla głębokości 11 m, poniżej — przy ustalonym gradiencie termicznym — $B(H)$ rośnie wykładniczo. Przyjęto przemieszczeniowe warunki brzegowe.

Program badań przy wykorzystaniu MES zakładał dowolność kształtowania wszystkich wymiarów, opcje nachylenia skrzydeł wysadu w kierunku osi X i Y oraz obecność złoża pokładowego pod wysadem. Zadawane były dane fizyczne trzech utworów. W badaniach modelowych testowano wysad o wymiarach poziomych 1×2 km i głębokości 4 km. Okres czasu dla szacowania wypiętrzeń ograniczał się tylko do oddziaływań w okresie 100 lat.



Rys. 2. Model geometryczny

Warunki początkowe, przed testem wypiętrzania, wymagały wytworzenia w okresie $t_0 = 1000$ lat w obrębie wysadu solnego litostatycznego stanu naprężeń pierwotnych. Po tym czasie różnice względne naprężeń głównych w obrębie wysadu nie przekraczały 1% ich wartości (rys. 3). Obliczenia przeprowadzono modulem NonLinear programu Cosmos/M.



Rys. 3. Intensywność naprężenia po wstępnym pelzaniu w okresie 1000 lat

Prędkość wypiętrzania się wysadu solnego \dot{w} określano z różnicy wartości przemieszczenia pionowego w osi wysadu $w(t_0 + \Delta t) - w(t_0)$ w czasie $\Delta t = 100$ lat. Gęstość utworów wysadu i czapy wysadu przyjęto $\rho_s = 2200 \text{ kg/m}^3$ przy $E = 15 \text{ GPa}$ i $\nu = 0,3$, a w otoczeniu wysadu $E = 25 \text{ GPa}$. Współczynnik podatności na pelzanie B w prawie Nortona był największy dla skał solnych: $1,2e-24 \text{ Pa}^{-2}\text{s}^{-1}$, mniejszy dla utworów czapy gipsowej: $5,5e-25 \text{ Pa}^{-2}\text{s}^{-1}$ i najmniejszy w utworach otoczenia wysadu: $1,2e-27 \text{ Pa}^{-2}\text{s}^{-1}$. Temperatura na każdej głębokości była stała, ale wzrastała o 1°C na 35 m głębokości.

4. Wpływ gęstości i lepkości skał solnych, czapy i otoczenia wysadu na jego wypiętrzanie

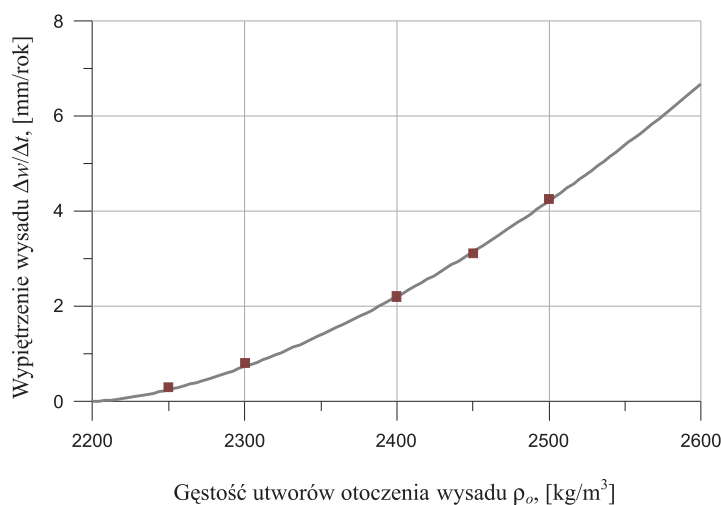
Przedział różnic gęstości wysadu ρ_s i otoczenia ρ_o zawierał się w granicach od 50 do 500 kg/m^3 .

W badanym zakresie stwierdzono potęgowy związek prędkości wypiętrzania ze względną różnicą gęstości skał w otoczeniu ρ_o i wysadzie solnym ρ_s w postaci zależności (rys. 4):

$$\dot{w} = C_1 \left[\frac{\rho_o - \rho_s}{\rho_s} \right]^C, \quad (1)$$

$$C = 1,60$$

Ze wzrostem różnicy gęstości $\rho_o - \rho_s$ rośnie wartość prędkości wypiętrzania wysadu. Dla $\rho_s = 2200 \text{ kg/m}^3$ wartości $C = 1,60$ i $C_1 = 108 \text{ mm/rok}$ w (1) wynikają z warunków zadania.

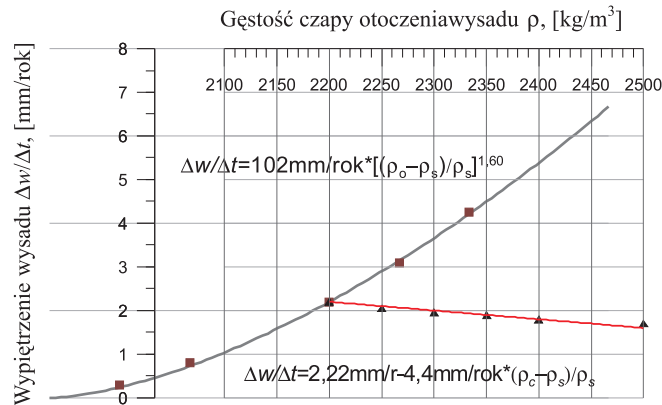


Rys. 4. Prędkość wypiętrzania wysadu w zależności od gęstości utworów otoczenia

W następnych testach obliczano wypiętrzenia, zwiększając wartość gęstości utworów czapy wysadu ρ_c . Gęstość utworów otoczenia była $\rho_o = 2400 \text{ kg/m}^3$ (rys. 5). Wzrost gęstości utworów czapy wysadu powoduje zmniejszanie się prędkości podnoszenia się wysadu. I tak w przedziale gęstości od 2200 do 2500 kg/m^3 prędkość ta zmniejsza się o 30%; w przybliżeniu jest to zależność liniowa. Uwzględniając związek (1) wypiętrzeń z gęstością czapy wysadu i otoczenia ma wtedy postać funkcyjną (2), a $C = 1,60$; $C_1 = 108 \text{ mm/rok}$ i $C_2 = -44 \text{ mm/rok}$.

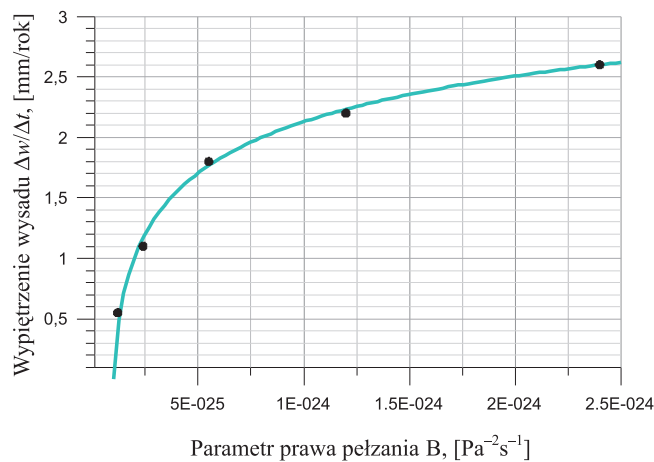
$$\dot{w} = C_1 \left[\frac{(\rho_o - \rho_s)}{\rho_s} \right]^C + C_2 (\rho_c - \rho_s) / \rho_s \quad (2)$$

Ze wzrostem gęstości czapy rosną przemieszczenia poziome na brzegu wysadu pod lustrem solnym. Ponieważ nie uwzględnia się skutku naturalnego ługowania, powodującego poślizg na zwierciadle solnym, uzyskane wartości dodatnich przemieszczeń w kierunkach X i Y pod czapą były małe, sygnalizując tylko poszerzanie się głowy wysadu w kierunku poziomym.



Rys. 5. Prędkość wypiętrzenia wysadu w zależności od gęstości czapy wysadu

Silnie oddziaływującym na wypiętrzenia wysadu czynnikiem jest podatność soli na pęzanie B . Badania przeprowadzono przy zachowaniu stałej wartości gęstości wszystkich utworów.

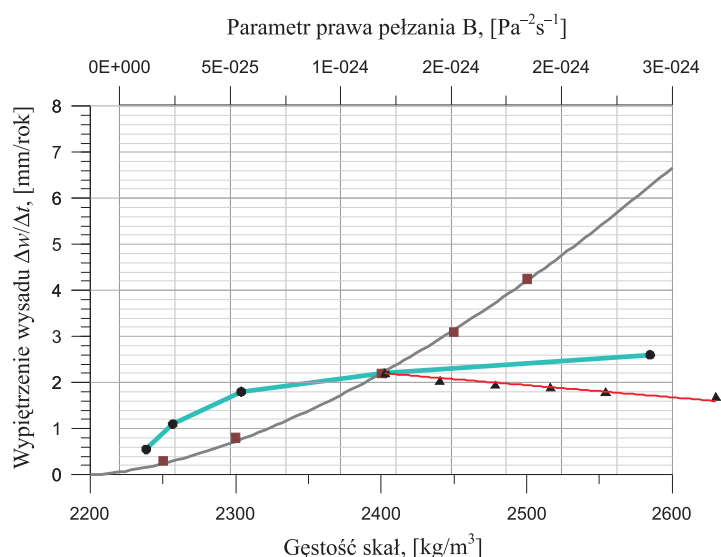


Rys. 6. Wpływ parametru podatności na pęzanie B w wysadzie na prędkość wypiętrzenia

Wyniki obliczeń (rys. 6) pokazują wzrost wypiętrzenia się wysadu ze wzrostem podatności na pęzanie B (spadkiem lepkości). Wzrost lepkości (spadek B) hamuje ruch wypiętrzący. Zależność $\Delta w/\Delta t$ od B utworów solnych wyraża potęgowa funkcja logarytmiczna (3), gdzie $C_3 = 1,27$ mm/rok dla utworów otoczenia wysadu o $B = 1,2e-27$ Pa⁻²s⁻¹.

$$\dot{w} = C_3 \left(\ln \frac{B}{B_0} \right)^{0,62}, \quad B_0 = 10^{-25} [\text{Pa}^{-2}\text{s}^{-1}] \quad (3)$$

Zestawienie zależności funkcyjnych gęstości i lepkości soli w wysadzie, utworów czapy wysadu i otoczenia na prędkość wypiętrzania wysadu pokazano na rysunku 7.



Rys. 7. Prędkość wypiętrzania wysadu w funkcji lepkości i gęstości skał

5. Wpływ wymiarów i kształtu wysadu na prędkość wypiętrzania

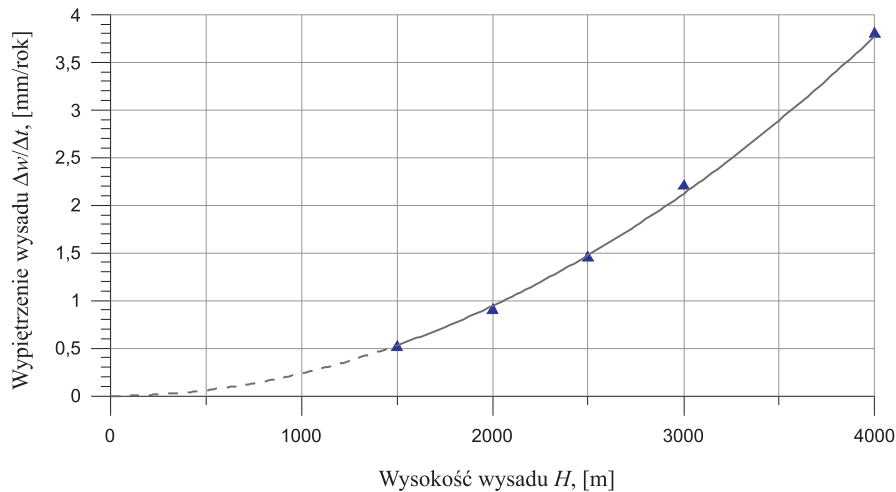
Kolejna seria zadań skierowana była na określenie związku geometrii wysadu z prędkością wypiętrzania wysadu i wyznaczenie rozkładu przemieszczeń na powierzchni terenu. Zależność \dot{w} od wysokości wysadu $H = z_p - z_0$ (rys. 8) wyraża się funkcją kwadratową (4).

$$\dot{w} = C_4 \left(\frac{H}{H_0} \right)^2,$$

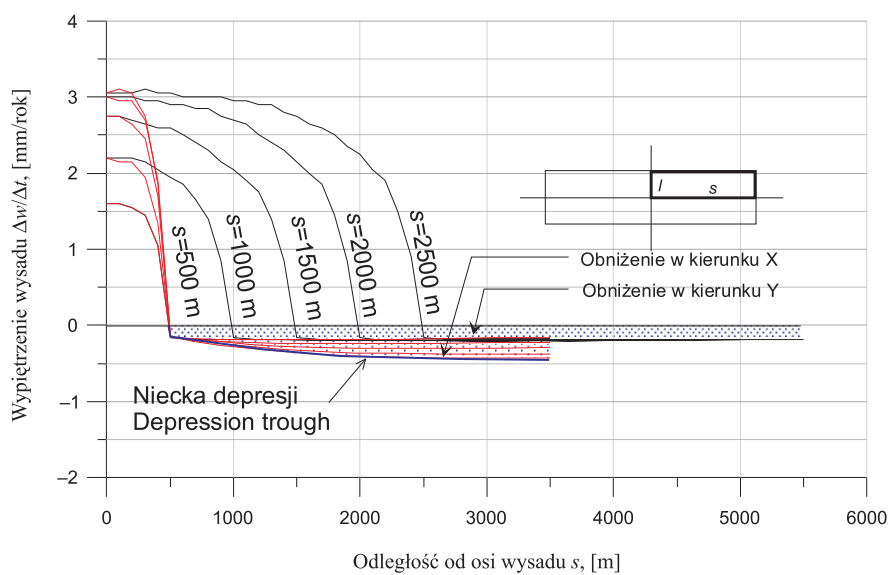
$$H_0 = 1000 \text{ m}, \quad (4)$$

$$C_4 = 0,236 \text{ mm/rok}.$$

Wzrost wysokości s przy utrzymaniu stałego wymiaru $l = 500 \text{ m}$ powoduje zwiększenie prędkości wypiętrzania wysadu. Nad konturem wysadu teren podnosi się, a w otoczeniu obniża, tworząc nieckę depresyjną (rys. 9).

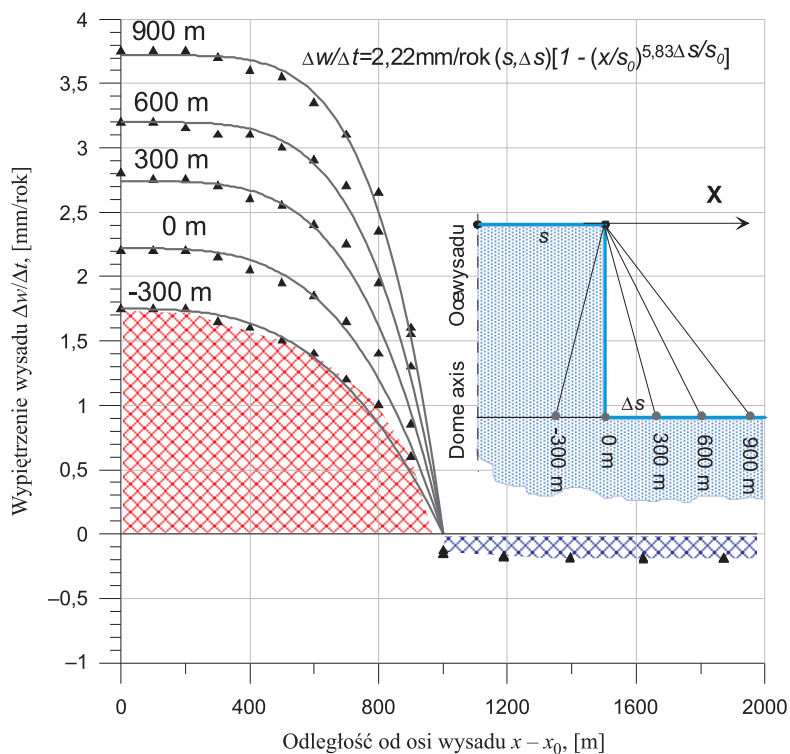


Rys. 8. Wpływ wysokości wysadu na wypiętrzanie wysadu



Rys. 9. Prędkość wypiętrzania wysadu w zależności od podłużnego wymiaru wysadu s

Poszerzenie wysadu z głębokością prowadzi do przesunięcia dolnego punktu $Q \rightarrow Q'$ i nachylenia skrzydła wysadu. Niech dla boku s przesunięcie to będzie $\Delta s \in \{-300 \text{ m}, 900 \text{ m}\}$. W serii 5 zadań obliczono także rozkład prędkości przemieszczenia pionowego wzdłuż osi X. Im skrzydło wysadu jest bardziej odchylone od pionu, tym prędkość \dot{w} jest większa. Zmniejsza się natomiast, jeżeli wymiar poziomy maleje z głębokością, $\Delta s < 0$ (rys. 10).



Rys. 10. Prędkość wypiętrzenia wysadu w zależności od nachylenia skrzydła wysadu

$$\dot{w}(\Delta s) = C_5(1 + 0,75\Delta s / s_0) \quad (5)$$

$$\dot{w}(x, s, \Delta s) = \dot{w}(\Delta s) \left[1 - (x / s_0)^{5,83s/s_0} \right]$$

Dla tych warunków prędkość wypiętrzania punktu osiowego jest liniową funkcją przesunięcia Δs . Z poprzednich obliczeń wynika, że $C_5 = 2,22$ mm/rok i dla $s_0 = 1000$ m zachodzi związek (5). Otrzymany profil przemieszczeń pionowych jest funkcją potęgową s .

6. Podsumowanie

Otrzymane w wyniku badań modelowych związki (1–3) wypiętrzania wysadu jako funkcji gęstości i lepkości utworów solnych, czapy wysadu i jego otoczenia wyrażają ilościowo wpływ głównych czynników fizycznych na ruch wysadowy. Określono także zależność wypiętrzania się wysadu od jego geometrii, w szczególności od nachylenia skrzydeł wysadu.

Wyniki i wzory dotyczą tylko pewnego modelu rzeczywistych warunków geologicznych, fizycznych i geometrycznych. Ujawniają jednak proste funkcje określające zmienność prędkości wypiętrzania jako wskaźnika badanego zjawiska.

Otrzymane wyniki są zgodne z teoriami i hipotezami o mechanizmie halokinezy. Mają znaczenie jako wstęp do badań modelowych tektoniki solnej przy użyciu MES.

LITERATURA

- [1] *Dadlez R., Jaroszewski W.*: Tektonika. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 1994
- [2] *Kortas G., Maj A.*: Modelowanie konwergencji w modularnej strukturze wielopoziomowej kopalni soli. *Prace Instytutu Mechaniki Górotworu PAN*, t. 7, nr 3–4, 2005, s. 237–252
- [3] *Trusheim F.*: Über Halokinese und ihre Bedeutung für die strukturelle Entwicklung Norddeutschlands, *Z. deutsch. Geol. Ges.*, 109, 1957, s. 119–150