



# Rozwój fałdów futerałowych przy powierzchniach poślizgu ułożonych zgodnie z warstwowaniem

## *Evolution of sheath folds around layer-parallel slip surfaces*

Marta ADAMUSZEK<sup>1</sup>, Stanisław BURLIGA<sup>2</sup>, Marcin DĄBROWSKI<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Centrum Modelowania Procesów Geologicznych, Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa

<sup>2</sup> Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski, pl. Maksa Borna 9, 50-204 Wrocław

<sup>3</sup> Physics of Geological Processes, University of Oslo, Norway, e-mail: marta.adamuszek@pgi.gov.pl

### STRESZCZENIE

Fałdy w złożach soli często wykazują kształt niecylin-dryczny. Lokalnie strukturom fałdowym towarzyszą po-wierzchnie odkłuć, które w niektórych przypadkach mogą być uważane za czynnik inicjujący rozwój fałdów. W arty-kule przedstawiono badania ewolucji kształtu fałdów fute-rałowych rozwijających się w warunkach ścinania prostego w sąsiedztwie powierzchni odkłucia ułożonej zgodnie z war-stwowaniem. Do badań wykorzystano model analityczny opi-sujący deformację w otoczeniu powierzchni poślizgu w jed-norodnym ośrodku lepkim.

Wyniki modelowania wykazują, iż fałdy tworzące się pod-czas deformacji są wyraźnie niecylin-dryczne. Struktury ujawniające się na przekrojach prostopadłych do kierunku ścinania o charakterystycznej geometrii oczkowej wymagają odkształ-cenia ścięciowego  $\gamma > 5$ , natomiast fałdy futerałowe będące szczególnym typem fałdów niecylin-drycznych o wygięciu linii przegubowej przekraczającym  $90^\circ$  obserwowane są dla  $\gamma > 10$ . Fałdy charakteryzują się relatywnie małą wysokością. Kształt oczek jest zwykle silnie wydłużony, a ich stosunek osi wielkiej do małej nierzadko przekracza 10. Fałdy o najwięk-szej wysokości i wydłużeniu powstają w warstwach, oddalo-nych od powierzchni poślizgu o ok. 0,2 długości promienia tej powierzchni. Fałdy oczkowe widoczne tuż nad powierzchnią poślizgu mogą mieć U-kształtny kontur, jednakże fałdy o za-rysie oczek przeważnie wykształcają się w pewnej odległo-ści od powierzchni poślizgu, co w konsekwencji sprawia, że w naturze może być trudne zaobserwowanie związku fałdów futerałowych z powierzchniami odkłuć.

**Słowa kluczowe:** fałdy futerałowe, fałdy oczkowe, fał-dy niecylin-dryczne, powierzchnia poślizgu, ścinanie proste, kształt fałdów

### ABSTRACT

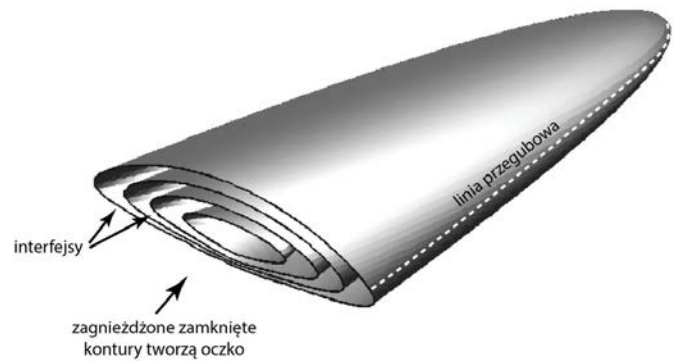
Folds in evaporites typically have non-cylindrical sha-pes. Various fold structures are associated with slip surfaces, which, in some cases, can be interpreted as the folding trigger. In the article, we present the analysis of fold shape evolution, studying folds that develop in the vicinity of the layer-paral-lel slip surface during simple shear deformation. We employ an analytical model that describes the deformation around the slip surface in an isotropic, viscous material.

Folds that develop during deformation are clearly non-cy-lindrical. Folds with an eye pattern in the sections perpendicu-lar to the shearing directions are observed after shear strain  $\gamma > 5$ , whereas sheath folds that are specific types of non-cylindrical folds with opening angle exceeding  $90^\circ$ , require  $\gamma > 10$ . The folds are characterised by small height. The eye-shape is highly elon-gated, and their axial ratio commonly exceeds 10. Folds with largest height and elongation are formed in the layers located at the distance of ca. 0.2 of the slip surface radius from the slip surface. Eye structures that develop in the layers closest to the slip surface can have geometry of a concave crescent-shaped roll. Folds with the eye pattern are unlikely to develop next to the slip surfaces in the model, thus, also in the nature these two structures can hardly be noticeable in a single outcrop.

**Keywords:** sheath folds, eye-folds, non-cylindrical folds, slip surface, simple shear, fold shape

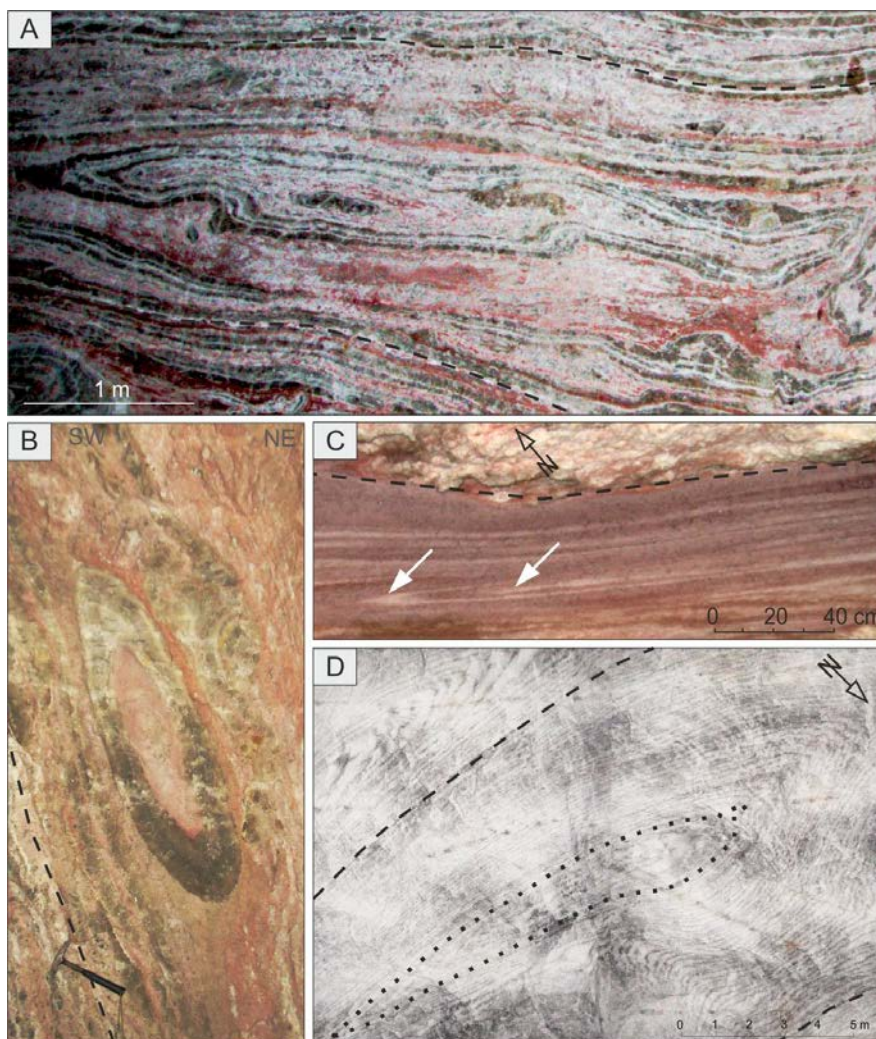
## WSTĘP

Analiza wewnętrznej budowy geologicznej wysadów solnych prowadzona sukcesywnie od pierwszej połowy XX wieku wykazała, iż bez względu na wiek ewaporatów oraz ewolucję geotektoniczną regionu, skały serii solnej są w wysadach intensywnie zafałdowane (Balk, 1949; Kupfer, 1962; Richter-Bernburg, 1980; Talbot i Jackson, 1987, Jackson i in., 1990, Burliga, 1996b, 2014; Alsop i in. 2015). Geometria fałdów w solach jest bardzo złożona, a struktury fałdowe widoczne w przekrojach na stropach i ociosach wyrobisk górniczych pospolicie wykazują zarys owalny lub eliptyczny. Od lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku powszechnie uznaje się, że fałdy w strukturach solnych z reguły posiadają geometrię fałdów futerałowych (*sheath folds*), która rozwinęła się podczas płynięcia skał solnych z warstw źródłowych do



**Ryc. 1.** Trójwymiarowy model fałdu futerałowego przedstawiający usytuowanie zakrzywionej linii przegubowej oraz charakterystyczne zamknięte kontury warstw tworzących kształt oczek w przekroju poprzecznym do wydłużenia fałdu.

**Fig. 1.** Three-dimensional sheath fold model showing the change in the hinge line orientation and the characteristic closed contours forming the eye structure in a cross-section normal to the fold elongation.



**Ryc. 2.** Przykłady fałdów futerałowych w obrębie cechsztyńskiej serii ewaporatowej z wysadu solnego Kłodawy. A, B – fałdy futerałowe rozwinięte w przewarstwiających się solach kamiennych i solach potasowo-magnezowych. C – silnie spłaszczone fałdy futerałowe w obrębie kompleksu soli potasowo-magnezowych. D – fałdy futerałowe w obrębie kompleksu soli kamiennych. Linie przerywane wskazują przybliżony przebieg strefy odłączenia. Linia kropkowaną na ryc. D podkreślono układ warstwowania.

**Fig. 2.** Examples of sheath folds in Zechstein (Upper Permian) evaporites from the Kłodawa Salt Structure, central Poland. A, B – Sheath folds developed in interlayering rock salt and potash complex; C – extremely flattened sheath folds in potash complex; D – Sheath folds in rock salt complex. Dashed-lines indicate approximate location of detachment zones. Dotted-line in D shows the trend of layering in the rock salt.

struktury wysadowej (Talbot i Jackson, 1987, 1991; Jackson i in., 1990; Fiduk i Rowan, 2012). Fałdy futerałowe zaliczają się do niecylicyrycznych fałdów, których linia przegubowa jest wygięta o więcej niż  $90^\circ$  (Ryc. 1). Z racji eliptycznej geometrii fałdu w przekroju poprzecznym do jego wydłużenia, w języku angielskim określane są one również jako *eye-folds* (Nicholson, 1963), czyli fałdy oczkowe. Zaproponowano dla nich odrębną klasyfikację, opartą m.in. na relacjach między kształtem najbardziej zewnętrznego do najbardziej wewnętrznego zamkniętego konturu tworzącego oczko (Alsop i Holdsworth, 2006; Alsop i in., 2007).

Badania prowadzone w ostatnich latach w pokładowych złożach soli w Polsce wskazują na bardzo wczesną inicjację rozwoju fałdów futerałowych, już na etapie subhoryzontalnego ułożenia warstw solnych (Burliga, 2007; Wilkosz i in., 2012), które mogą ulec zachowaniu w pierwotnej postaci nawet w strukturach wysadowych (Burliga, 1996a, 2014). Cechami charakterystycznymi fałdów futerałowych występujących w złożach pokładowych jest silne spłaszczenie oczek obserwowanych w przekroju poprzecznym do kierunku płynięcia mas solnych, równoległość powierzchni osiowych fałdów do powierzchni stratyfikacji oraz występowanie powierzchni odkłuc w sąsiedztwie fałdów (Burliga 1996a, 2007). Cechy te są szczególnie dobrze widoczne w litologicznie zróżnicowanych kompleksach solnych, np. w przypadku przewarstwiania się soli kamiennych i potasowo-magnezowych (Ryc. 2A i B), jednakże dostrzegalne są również w strukturach wysadowych w obrębie kompleksów litologicznie jednorodnych, zbudowanych z soli kamiennych, bądź z soli potasowo-magnezowych (Ryc. 2 C i D).

Poziomy przepływ mas solnych w początkowych etapach deformacji pokładów ewaporatowych wiąże się z dużym udziałem ścinania prostego. Warunki takie sprzyjają powstawaniu powierzchni poślizgu (odkłucia), a także tworzeniu się fałdów futerałowych. Możliwość rozwoju fałdów futerałowych w warunkach ścinania prostego w sąsiedztwie powierzchni poślizgu została wykazana przez Exner i Dabrowskiego (2010). Analiza modelu i systematyczne badania zależności pomiędzy początkową orientacją i kształtem powierzchni poślizgu a kształtem fałdów oczkowych obserwowanych na różnych przekrojach prostopadłych do kierunku ścinania zostały przedstawione przez Reber i in., (2012, 2013a). W artykule Reber i in. (2013a) podważono sugerowaną wcześniej przez Alsopa i Holdswortha (2006) możliwość wykorzystania kształtu fałdów oczkowych do określenia kierunku ścinania oraz typu deformacji. Reber i in. (2013b) wskazują ponadto, wbrew wcześniejszym przekonaniom, na możliwość rozwoju fałdów futerałowych w ośrodkach mechanicznie warstwowych, w których stosunek lepkości może przekraczać 20.

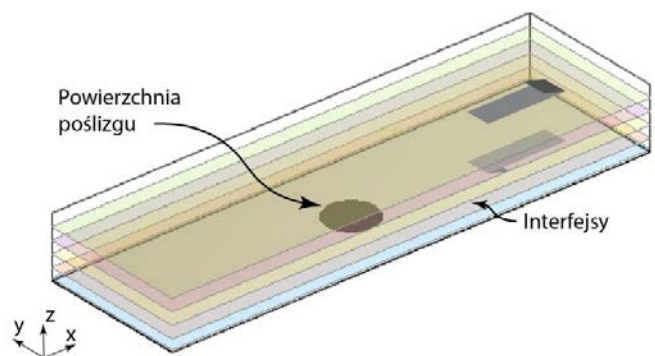
W niniejszej pracy przedstawiona jest analiza ewolucji fałdów futerałowych w sąsiedztwie powierzchni poślizgu

w ośrodku o stałej lepkości, w warunkach ścinania prostego. Naturalnym odpowiednikiem takiego ośrodka są np. kompleksy soli kamiennych zbudowane głównie z halitu, posiadające jedynie laminy z niewielką domieszką anhidrytu rozproszonego w halicie lub wzdłuż jego granic. W odróżnieniu od poprzednich prac (Exner i Dabrowskiego, 2010; Reber i in., 2013a, b), przeprowadzona została analiza wpływu odległości warstwy od powierzchni odkłucia na rozwój fałdów. Celem badań było określenie: 1) ewolucji kształtu fałdu, tj. wysokości i wydłużenia fałdu, 2) przestrzennej relacji położenia fałdu względem powierzchni poślizgu oraz 3) rozwoju geometrii kształtu fałdów w przekroju poprzecznym do kierunku ścinania.

### MODEL NUMERYCZNY

Badania ewolucji fałdów futerałowych prowadzono w oparciu o mechaniczny model deformacji w otoczeniu powierzchni poślizgu w jednorodnym ośrodku lepkiem (Ryc. 2). Powierzchnia poślizgu miała kształt koła i ułożona była w płaszczyźnie  $xy$  kartezjańskiego układu współrzędnych. Otoczona była ona nieściśliwym, jednorodnym, izotropowym materiałem o właściwościach reologicznych płynu newtonowskiego. Model poddawany był ścinaniu prostemu o kierunku równoległym do osi  $x$ . Podczas deformacji powierzchnia poślizgu nie propagowała się, a jej kształt nie ulegał zmianie podczas ścinania prostego ze względu na początkową jej orientację.

Pole prędkości wokół powierzchni poślizgu uzyskane zostało z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu odkształcenia sprężystego wokół elipsoidalnej inkluzji (Eshel-



**Ryc. 3.** Geometria modelu zawierająca powierzchnię poślizgu ułożoną zgodnie z warstwowaniem oraz pięć interfejsów oddalonych od powierzchni poślizgu o  $z_0=0,01, 0,25, 0,5, 0,75$  i  $1,0$  (odległość jest normalizowana przez promień powierzchni poślizgu). Model poddawany jest ścinaniu prostemu, którego kierunek jest zgodny z osią  $x$ .

**Fig. 3.** Model geometry comprising a layer-parallel slip surface and five interfaces that are located at the distances of  $z_0=0.01, 0.25, 0.5, 0.75$  and  $1.0$  from the slip surface (the distance is normalized by the radius of the slip surface). The model is subjected to simple shear deformation with the shearing direction oriented parallel to the  $x$  axis.

by, 1959). Model ten pozwala wyliczyć pole przemieszczeń wewnątrz i wokół dowolnie zorientowanej mechanicznej niejednorodności o kształcie elipsoidy, która otoczona jest izotropowym ośrodkiem sprężystym poddanym jednorodnemu ścinaniu w tle. Model sprężysty przystosowany został do opisu ruchu w nieściśliwym przepływie pelżającym dla granicznego przypadku nielepkiej inkluzji o kształcie elipsy, odpowiadającej pozbawionej tarcia powierzchni poślizgu. Model ten został szczegółowo przedstawiony przez Exner i Dabrowskiego (2010). Opis deformacji ośrodka w czasie otrzymaliśmy poprzez numeryczne całkowanie pola prędkości przy użyciu metody Rungego-Kutty czwartego rzędu w Matlabie. Matlab został także użyty do wizualizacji oraz analizy geometrii kształtu fałdów.

Rozwój struktur w sąsiedztwie powierzchni poślizgu analizowany był z wykorzystaniem pięciu, pierwotnie płaskich interfejsów, tj., powierzchni w obrębie deformowanego ośrodka równoległych do warstwowania, znajdujących się początkowo w odległości  $z_0=0,01, 0,25, 0,5, 0,75$  oraz  $1,0$  od powierzchni ślizgania (podane odległości są znormalizowane przez promień powierzchni poślizgu). Interfejsy te nie wpływały na deformację, lecz stanowiły jedynie pasywne markery służące do wizualizacji przestrzennej rozwijających się struktur. Analizę prowadzono dla różnych wartości odkształcenia aż do  $\gamma=20$ . Ze względu na symetrię modelu, badania prowadzono na interfejsach znajdujących się tylko ponad powierzchnią poślizgu.

## WYNIKI BADAŃ

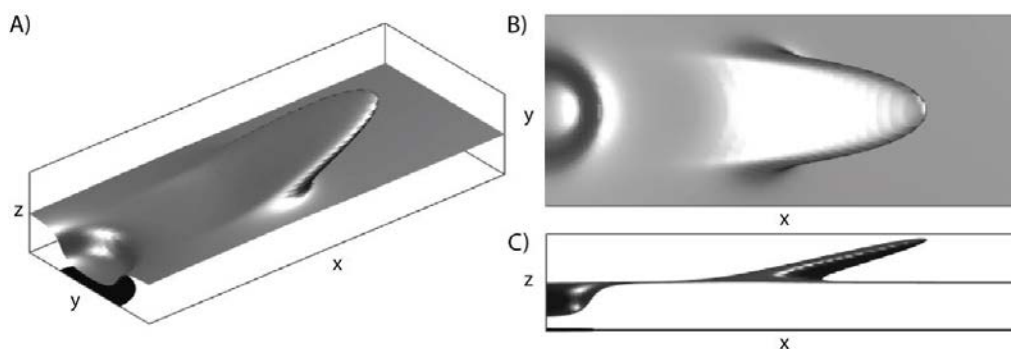
Zaburzenia deformacji wokół powierzchni poślizgu prowadzą do powstania niecylicydrycznych fałdów, które przy dużym odkształceniu mogą uzyskiwać geometrię fałdów futerałowych. Ryc. 4 przedstawia fałd futerałowy, który powstał w wyniku ścinania  $\gamma=20$  w interfejsie  $z_0=0,25$ . Wygięcie przegubu fałdu, który widoczny jest na rzucie  $xy$  w postaci kontu-

ru fałdu (Ryc. 4B), przekracza  $150^\circ$ , a kąt między skrzydłami fałdów wynosi ok.  $3^\circ$  (pomiar na centralnym przekroju  $xz$ ). Powierzchnia osiowa fałdu jest nachylona pod małym kątem ok.  $3^\circ$  do płaszczyzny  $xy$ .

Widoczny na Ryc. 4B fałd jest dość znacznie oddalony w poziomie względem powierzchni poślizgu, nad którą rozwinięta jest niecka. Między fałdem i niecką widoczne jest niewielkie zaburzenie w kształcie rynny o brzegach ułożonych równoległe do osi  $x$ . Zaburzenie to nieznacznie wpływa również na kształt górnego skrzydła fałdu, które przy podstawie jest lekko wklęsłe. Ugięcie to zanika w górnej części skrzydła. Rozciągliwość fałdu w kierunku  $y$  jest porównywalna z rozmiarem powierzchni poślizgu.

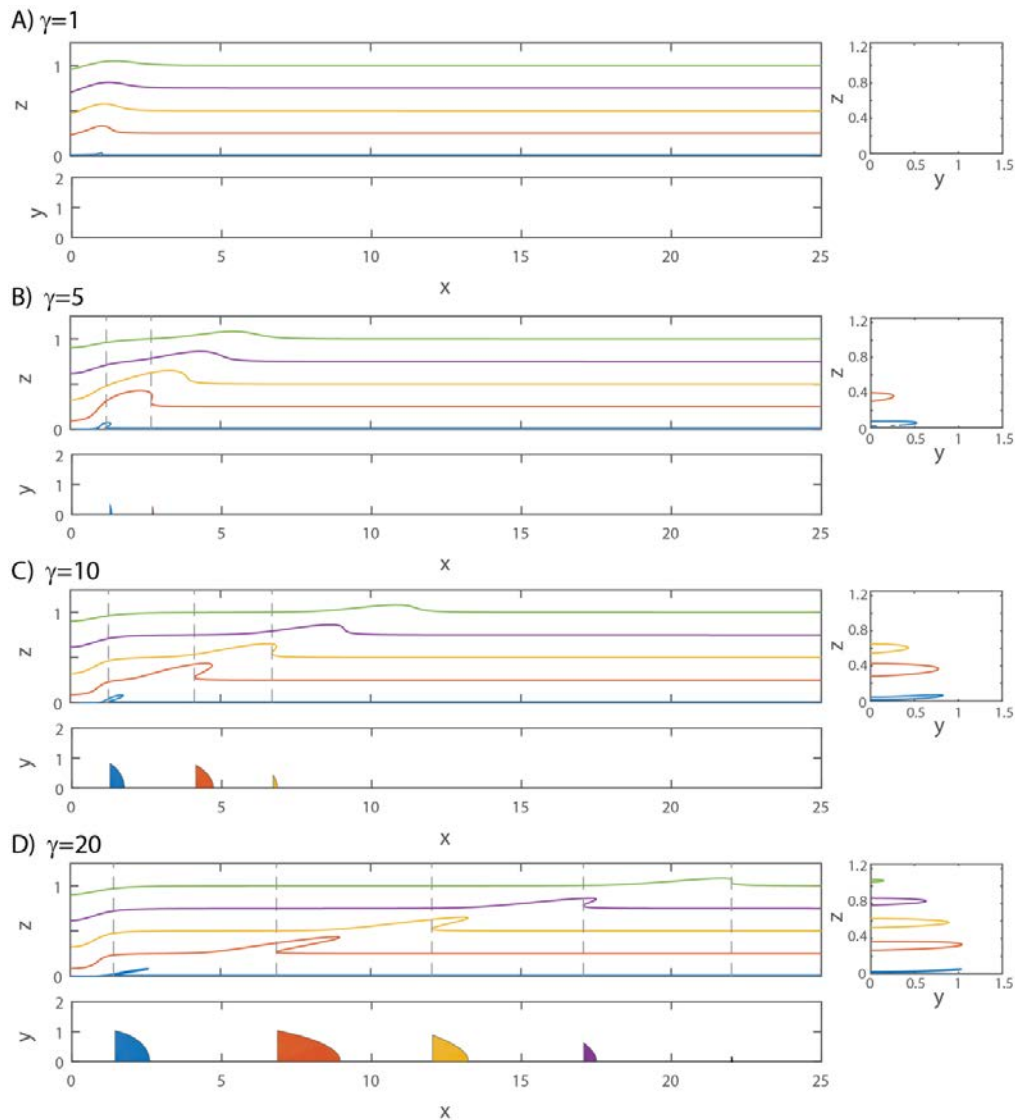
Kształt pięciu interfejsów na różnych etapach deformacji  $\gamma=1, 5, 10$  i  $20$  został przedstawiony na Ryc. 5 na sekcjach  $xz$  i  $yz$ , oraz na rzucie  $xy$ . Sekcja  $xz$  przedstawia przekrój przez środek powierzchni poślizgu. Na rzucie  $xy$  pokazany jest kształt fałdu futerałowego widzianego z góry, którego zarys obrazuje zmianę orientacji przegubu fałdu. Ze względu na symetrię na rzucie tym uwzględniono tylko połowę fałdu. Kolor wypełnienia zarysu fałdu odpowiada danemu interfejsowi, a zamalowany obszar pokrywa się z obszarem, gdzie na przekrojach  $yz$  widoczne są eliptyczne kontury fałdów. Sekcja  $yz$  przedstawia kształt oczek fałdów dla różnych interfejsów, w miejscach wyróżnionych szarą przerywaną linią na sekcji  $xz$ . Tu również ze względu na symetrię pokazano połowę struktury.

W początkowych etapach deformacji (Ryc. 5A) wygięciu ulegają wszystkie analizowane interfejsy, tworząc widoczne w sekcji  $xz$  asymetryczne fałdy. Fałdy na niższej położonych interfejsach mają mniejsze promienie i są wyraźnie asymetryczne, w porównaniu do fałdów rozwiniętych na wyżej położonych interfejsach. Początkowo wraz z przyrostem deformacji rośnie wielkość zaburzenia interfejsu i powiększa się asymetria fałdu. Pierwsze struktury o przekrojach oczkowych ob-



**Ryc. 4.** A) Przykład fałdu futerałowego wygenerowanego dla interfejsu  $z_0=0,25$  dla  $\gamma=20$ . Czarne pole u podstawy modelu wskazuje położenie powierzchni poślizgu. B) i C) Rzut na model z góry i z boku. Dla poprawy efektu wizualnego zastosowano pięciokrotne przewyższenie skali pionowej.

**Fig. 4.** A) Example of the sheath fold generated for a surface  $z_0=0,25$  after  $\gamma=20$ . The black field in the model base shows the position of the slip surface. B) and C) Top and side views of the model. For the visual purposes, we use the vertical exaggeration of 5.

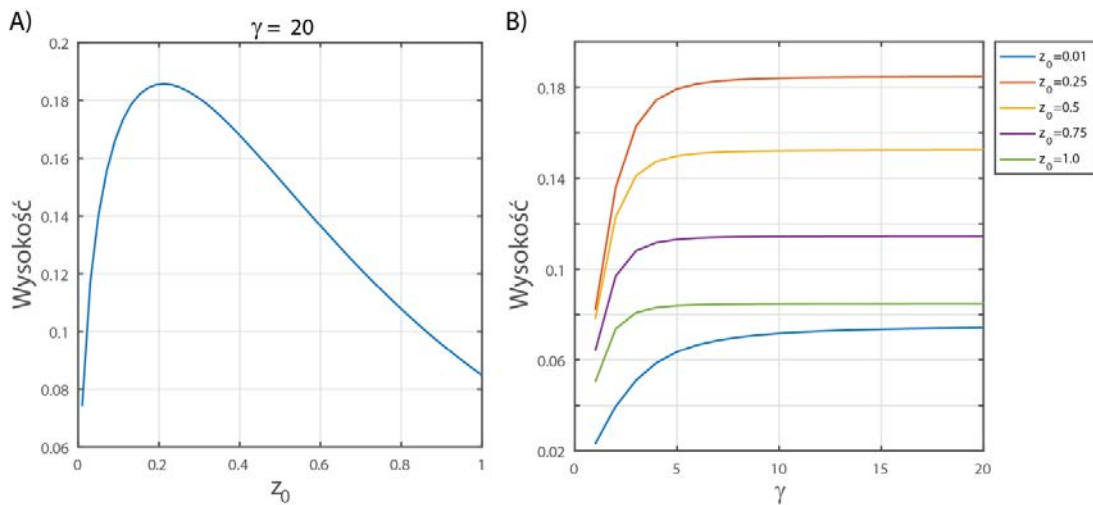


**Ryc. 5.** Sekcje modelu w płaszczyznach  $xz$ ,  $xy$ , oraz  $yz$  dla czterech etapów deformacji A)  $\gamma=1$ , B)  $\gamma=5$ , C)  $\gamma=10$  oraz D)  $\gamma=20$ . Kolory linii na różnych przekrojach odpowiadają tym samym interfejsom. W przekroju  $xz$  zastosowano trzykrotne przewyższenie pionowe, natomiast w pozostałych modelach zachowano jednakowe skalowanie osi.

**Fig. 5.**  $xz$ ,  $xy$ , and  $yz$  cross-sections through the model at different stages of deformation A)  $\gamma=1$ , B)  $\gamma=5$ , C)  $\gamma=10$ , and D)  $\gamma=20$ . The colours of the lines in different sections refer to the same interfaces. In section  $xz$ , we use vertical exaggeration by 5, whereas in other figures, the axes scaling is the same.

serwowane są już dla  $\gamma=5$  dla interfejsów  $z_0=0,01$  oraz  $0,025$ . Ze względu jednak na małą zmienność kierunku linii przegubowej fałdu ( $<90^\circ$ ), struktury te nie spełniają definicji fałdu futerałowego (Ramsay i Huber, 1987). Wraz ze wzrostem fałdów kształtuje się niecka bezpośrednio nad płaszczyzną poślizgu. Dla  $\gamma=10$ , fałdy oczkowe rozwinęły się dla trzech powierzchni, ale tylko struktury na interfejsie  $z_0=0,25$  są fałdami futerałowymi *sensu stricto*. Kształt fałdów oczkowych jest w przybliżeniu eliptyczny i można w nich wyróżnić dwie osie symetrii pionową i poziomą. Jedynie dla  $z_0=0,01$  kształt oczek jest owalny i charakteryzują się one tylko pionową osią symetrii, a między górną i dolną częścią zamkniętego konturu fałdu widoczna jest wyraźna asymetria. Dla  $\gamma=20$ , obserwuje

się niewielki wzrost amplitudy fałdu, a także niewielkie zmiany poziomu dna niecki w przekroju  $xz$ . Zamknięte kontury fałdów widoczne są w obrębie wszystkich powierzchni, ale definicji fałdów futerałowych odpowiadają tylko struktury rozwinięte na trzech najniższych interfejsach. Oczko tworzone przez sekcję interfejsu  $z_0=0,01$  jest mocno spłaszczone oraz wygięte na krańcach ku górze, tworząc strukturę U-kształtną (sekcja  $yz$  Ryc. 5D). Dla pozostałych interfejsów kształt oczek charakteryzuje się dużą symetrią. Pozioma separacja między strukturami utworzonymi dla różnych interfejsów jest większa niż ich rozciągłość w kierunku  $x$ , co sprawia, że przekrój w płaszczyźnie  $yz$  przez model przechodzi co najwyżej tylko przez jedną strukturę fałdową.



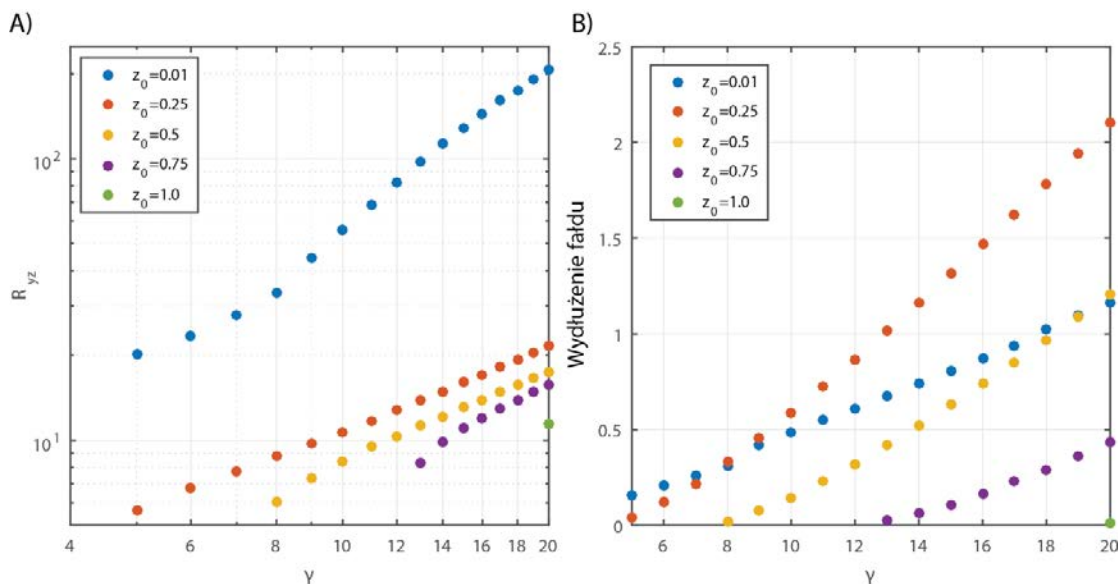
**Ryc. 6.** A) Rozkład wysokości fałdu w funkcji początkowego położenia interfejsu ( $z_0$ ) dla  $\gamma=20$ . B) Ewolucja wysokości fałdu w funkcji odkształcenia dla pięciu różnych interfejsów.

**Fig. 6.** A) Fold height as a function of the distance of the interface from the slip surface ( $z_0$ ) for  $\gamma=20$ . B) Fold height evolution as a function of strain calculated for different surfaces.

Ryc. 6A przedstawia wysokość fałdu (maksymalne odchylenie interfejsu) w funkcji odległości interfejsu od powierzchni poślizgu  $z_0$  dla  $\gamma=20$ . Wysokość fałdu obliczana jest jako różnica między współrzędną  $z$  najwyższego położonego punktu należącego do interfejsu a początkowym położeniem powierzchni interfejsu  $z_0$  (nie jest to więc amplituda fałdu). Wartość ta jest normalizowana przez wielkość powierzchni poślizgu. Wysokość fałdu rośnie wraz z odległością od powierzchni poślizgu osiągając największą wartość ok. 0,186 dla  $z_0=0,212$ . Dla wyżej położonych interfejsów wysokość

maleje z odległością od powierzchni poślizgu, nie przekraczając 0,09 dla  $z_0=1,0$ . Wysokość fałdu każdego interfejsu rośnie wraz z rosnącym odkształceniem (Ryc. 6B). Początkowo wzrost ten jest znaczny, jednak dla  $\gamma>10$  zmiany parametru są już niewielkie i stabilizują się na określonym poziomie, jak przedstawia Ryc. 6A.

Zamknięte kontury widoczne w przekroju  $yz$  pojawiają się na różnym etapie deformacji dla różnych interfejsów (Ryc. 7A). Najwcześniej widoczne są dla interfejsów położonych najbliżej powierzchni poślizgu. Pierwsze wartości  $R_{yz}$



**Ryc. 7.** A) Stosunek aspektów eliptycznych konturów dla różnych płaszczyzn w funkcji odkształcenia. B) Wydhuzenie fałdu w funkcji odkształcenia. Wydhuzenie fałdu mierzone jest jako różnica między współrzędnymi  $x$  dwóch punktów znajdujących się na najbardziej oddalonych od siebie przekrojach  $yz$ , dla których obserwowane są fałdy oczkowe. Wartość ta jest normalizowana przez długość powierzchni poślizgu.

**Fig. 7.** Aspect ratio of the elliptical contours for different interfaces as a function of strain. B) Fold elongation as a function of strain. Fold elongation is measured as a difference between the  $x$ -coordinates of two points located on the two most distant  $yz$  sections, for which eye-folds can be observed. The value is normalized by the crack length.

zmierzono dla  $z_0=0,01$  oraz  $z_0=0,25$  dla  $\gamma=5$ . Następnie, dla  $z_0=0,5$ ,  $z_0=0,75$  i  $z_0=1,0$  zamknięte kontury pojawiły się odpowiednio przy  $\gamma=8$ , 13 i 20. Dla danego tempa odkształcenia największe wartości  $R_{yz}$  obserwowane są dla interfejsów sąsiadujących z powierzchnią ślizgania, a najmniejsze dla najbardziej zewnętrznych interfejsów. Ewolucja  $R_{yz}$  w funkcji odkształcenia jest bardzo podobna dla czterech górnych interfejsów (oprócz  $z_0=0,01$ ). Wzrost  $R_{yz}$  charakteryzuje się liniowym trendem o podobnym tempie wzrostu. Wartości  $R_{yz}$  dla małych deformacji nie przekraczają 10, natomiast dla  $\gamma=20$  nie są większe niż 30. Ewolucja  $z_0=0,01$  znacznie różni się od pozostałych, gdzie wzrost  $R_{yz}$  ma charakter zmienny i nieliniowy. Dla  $\gamma=5$  wynosi on ok. 20, natomiast dla  $\gamma=20$  osiąga ponad 200.

Wraz z rosnącą deformacją zwiększa się również wydłużenie fałdu (Ryc. 7B) mierzone jako odległość w poziomie między sekcją, na której obserwuje się fałd oczkowy o największej rozciągłości w kierunku  $y$  a wierzchołkiem fałdu. Dla  $\gamma=5$  fałd na interfejsie  $z_0=0,01$  jest dłuższy niż w  $z_0=0,25$ . Tempo wydłużania fałdu w  $z_0=0,25$  jest jednak większe niż dla  $z_0=0,01$  i dla  $\gamma=8$  relacje te zostają odwrócone. Na tym etapie deformacji pojawia się również fałd na interfejsie  $z_0=0,5$ , a jego szybki wzrost powoduje, że dla  $\gamma=20$ , jest on drugim najdłuższym fałdem po fałdzie na interfejsie  $z_0=0,01$ . Znacznie krótsze są fałdy rozwinięte na interfejsach  $z_0=0,75$  oraz  $z_0=1,0$ .

## DYSKUSJA

### Morfologia fałdów

W osrodku reologicznie jednorodnym poddanym ścinaniu prostemu, zaburzenia przepływu w sąsiedztwie powierzchni poślizgu prowadzą do powstania fałdów niecylicyrycznych, a przy dużej deformacji także fałdów futerałowych. W początkowym etapie ścinania, fałdy tworzą się nad powierzchnią poślizgu. Wraz z rosnącym odkształceniem, powierzchnia osiowa rotuje ku płaszczyźnie warstwowania. W efekcie, fałdy utworzone na interfejsie  $z_0=1,0$  widoczne są przy  $\gamma=20$  w odległości przekraczającej 20-krotność promienia powierzchni poślizgu od centrum modelu (Ryc. 5D). Efekt transpozycji w ścinaniu prostym powoduje, że fałdy futerałowe nie rozwijają się bezpośrednio nad powierzchnią poślizgu, co może powodować trudności w powiązaniu struktur fałdowych o zarysie oczkowym z powierzchniami poślizgu na sekcjach  $yz$ .

Początkowo szybko wzrastająca wysokość fałdów stabilizuje się na wartości, która zależy od odległości interfejsu od powierzchni poślizgu (Ryc. 6 B). Fałdy o największej wysokości zlokalizowane są w interfejsach odległych o ok. 0,2 długości promienia powierzchni poślizgu (Ryc. 6A). Podczas ścinania prostego, wysokość fałdu wpływa wprost na różnicę w tempie przemieszczania dolnej części skrzydeł fałdu wzglę-

dem wierzchołka fałdu. W efekcie wydłużenie fałdu skaluje się z jego wysokością. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na wydłużenie fałdów futerałowych jest stosunek promienia do wysokości fałdu. Wpływa on także na minimalną wartość odkształcenia, przy której obserwuje się w sekcjach  $yz$  fałdy oczkowe. Fałdy wąskopromienne, rozwijające się w pobliżu powierzchni poślizgu, utworzą fałdy oczkowe przy mniejszym  $\gamma$  w porównaniu do bardziej odległych fałdów szerokopromiennych. Zamknięte kontury na sekcjach  $yz$  pojawiają się przy  $\gamma=5$ , jednak ze względu na małe wygięcie osi fałdy te nie mogą zostać uznane za fałdy futerałowe *sensu stricto* (Ryc. 5B). Do powstania fałdów futerałowych wymagana jest deformacja ok.  $\gamma=10$  (Ryc. 5C). Do pojawienia się fałdów oczkowych na sekcjach  $yz$  na interfejsie  $z_0=1,0$  potrzeba co najmniej  $\gamma=20$  (Ryc. 5D).

Oczka fałdów obserwowane w modelu na sekcjach  $yz$  mają kształt eliptyczny i charakteryzują się dużym stosunkiem długości wielkiej do małej osi ( $R_{yz}>6$ ), która nierzadko przekracza 10. Wyniki te są zgodne z zakresem wartości przedstawionym przez Reber i in. (2013a). Interfejs z największym  $R_{yz}$  znajduje się najbliżej powierzchni poślizgu. Zamknięty kontur nie ma tu jednak kształtu elipsy, lecz U-kształtną formę. Duży zakres wartości  $R_{yz}$  obserwowany dla różnych interfejsów dla danego  $\gamma$  wskazuje na małą użyteczność tego parametru do określania rozmiaru odkształcenia (Ryc. 7A). Podobne wnioski wysunęli Reber i in. (2013a).

Powstanie niecki nad powierzchnią poślizgu ściśle związane jest z rozwojem struktury fałdowej. Podczas deformacji zachowana jest objętość, a materiał tworzący fałd dostarczany jest z obszaru, gdzie powstała niecka. Początkowo dynamiczny rozwój wysokości fałdu oraz niecki stabilizuje się na określonym poziomie. Dla  $\gamma>10$ , wysokość fałdu tylko nieznacznie rośnie (Ryc. 6B). Podobnie, dla tej wartości odkształcenia nie zmienia się położenie dna niecki. Dalsza deformacja powoduje wyłączenie transpozycję powierzchni osiowej i zmianę kształtu struktur fałdowych. Dla dużych deformacji powierzchnia osiowa fałdów jest ułożona subrównolegle do warstw, co sprawia, że na przekrojach  $xz$  fałdy te mogą przypominać izoklinalne fałdy śródwarstwowe.

Kształt fałdów futerałowych może wyraźnie różnić się w przypadku innego początkowego kształtu powierzchni poślizgu. Reber i in. (2013) pokazali, że stosunek wielkiej do małej osi elipsy najbardziej zewnętrznego kształtu oczka jest znacznie większy dla eliptycznej powierzchni poślizgu, której dłuższa oś jest ułożona prostopadle do kierunku ścinania i znacznie mniejszy w porównaniu, gdy dłuższa oś jest ułożona równolegle do kierunku ścinania.

W modelu powierzchnia poślizgu pozbawiona jest tarcia, którego obecność redukuje tempo ślizgania, co prawdopodobnie ograniczyłoby rozwój fałdów. Ponadto, zgodnie ze stanowiskiem prezentowanym przez Reber i in. (2013b) dodatkowym czynnikiem hamującym rozwój fałdów

jest obecność mechanicznie uwarstwionego ośrodka (warstwy o zróżnicowanej lepkości).

### Fałdy futerałowe w strukturach solnych

Modelowana deformacja reologicznie jednorodnego ośrodka stanowi analogię do naturalnej deformacji kompleksów soli kamiennych o dużej miąższości. Fałdy futerałowe w solach kamiennych są dobrze udokumentowane w wysadowych oraz pokładowych złożach soli, lecz o wiele słabsza jest dokumentacja stref ścinania i powierzchni odkłuc (Balk, 1949; Kupfer, 1962; Richter-Bernburg, 1980; Talbot i Jackson, 1987, Jackson i in., 1990, Burliga, 1996b, 2007, 2014; Wilkosz i in., 2012; Alsop i in. 2015). Trudności w dostrzeganiu powierzchni poślizgów wynikają z jednorodności ośrodka skalnego i równoległości powierzchni ścinania do warstwowania, w wyniku czego powierzchnie odkłuc niemal nie odróżniają się od lamin sedymentacyjnych. Zacieranie się powierzchni poślizgów jest skutkiem łatwej rekryształizacji halitu, zachodzącej podczas oraz po deformacji skały (rekryształizacja dynamiczna i statyczna). Rekryształizacja ujednocila strukturę soli w całej deformowanej strefie kompleksu solnego.

Pomimo trudności w identyfikacji powierzchni odkłuc, struktury fałdowe o zarysie oczkowym występują w złożach soli kamiennych w pewnej odległości od powierzchni odkłuc (Ryc. 2), analogicznie jak w modelach uzyskanych podczas testowania numerycznego. Wnioskować na tej podstawie można, iż odkłucia i poślizgi śródwarstwowe zachodzące zarówno na etapie lateralnego jak i pionowego przemieszczania soli mogły przyczynić się do rozwoju fałdów futerałowych. Konsekwentnie, obecność fałdów futerałowych w strukturach solnych może stanowić przesłankę, iż w niedalekim sąsiedztwie takich fałdów występują strefy ścinania i śródwarstwowe odkłucia. Identyfikacja wielkoskalowych stref ścinania w eksploatowanych złożach soli jest bardzo pożądana, gdyż wzdłuż stref poślizgów śródsolnych ułatwiona była migracja cieczy i gazów, a zatem potencjalnie stowarzyszone z nimi mogą być lokalne zjawiska gazowe i wodne.

Szerokie rozpowszechnienie fałdów futerałowych w strukturach solnych, z których część charakteryzuje się małym aspektem eliptycznego kształtu w przekrojach yz, może sugerować aktywność również innych mechanizmów powstawania fałdów w solach. W literaturze zostało zaproponowanych kilka mechanizmów powstawania tych fałdów w warunkach ścinania prostego, m. in. poprzez amplifikację perturbacji wokół sztywnej inkluzji lub budiny (Marques i Cobbold, 1995; Marques i in., 2008) lub nad sztywnym podłożem o nieregularnym kształcie (Cobbold i Quinquis, 1980). Niektóre modele wskazują na możliwość powstania fałdów futerałowych w warunkach ścinania czystego w wyniku superpozycji kilku deformacji, w której skracanie miało miejsce w prostopadłych do siebie kierunkach (Ramsay i Huber, 1987) lub po-

przez nałożenie na siebie kilku etapów deformacji (Ramsay, 1967). W złożach soli istotnym czynnikiem wpływającym na powszechny rozwój fałdów futerałowych jest zróżnicowanie ciężaru właściwego i związane z tym przepływy gęstościowe.

### WNIOSKI

1. Fałdy futerałowe mogą powstać w wyniku deformacji ośrodka poddanego ścinaniu prostemu w wyniku zaburzenia przepływu wokół powierzchni poślizgu zorientowanej równoległe do warstwowania.
2. Kształt fałdów charakteryzuje się niewielką wysokością (maksymalnym odchyleniem warstwy od swojego początkowego położenia). Wysokość fałdów zmienia się wraz z odległością interfejsu od powierzchni poślizgu i największą wartość osiąga dla warstwy oddalonej o ok. 0,2 długości promienia powierzchni poślizgu od tej powierzchni.
3. Fałdy widoczne w przekroju poprzecznym do kierunku ścinania w postaci oczek mają mocno wydłużony eliptyczny kształt. Jedynie w interfejsach znajdujących się tuż nad powierzchnią poślizgu kontury mają U-kształtny zarys.
4. Fałdy futerałowe w dyskutowanym modelu nie rozwijają się bezpośrednio nad powierzchnią poślizgu, co powoduje, że związek między strukturami nie zawsze może być jednoznaczny.
5. Ponieważ w naturalnych strukturach solnych fałdy futerałowe występują w sąsiedztwie stref ścinania, można wnioskować, iż rozwój przynajmniej części z tych fałdów zainicjowany został przez poślizgi śródwarstwowe. Obecność fałdów oczkowych może ułatwiać identyfikację stref ścinania w kompleksach solnych, ze względu na potencjalne współwystępowanie obu rodzajów struktur tektonicznych.

### PODZIĘKOWANIA

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2013/11/D/ST10/03458.

### SUMMARY

1. Sheath folds can form as a result of deformation of the model subjected to simple shear due to the flow perturbation around the layer-parallel slip surface
2. Fold shape is characterized by small height (maximum deflection of the interface from the initial position). Fold height changes with the interface distance from the slip surface and reaches the maximum for the interface located ca. 0.2 of the slip surface radius from the surface.
3. Folds observed in the section perpendicular to the shearing direction in the characteristic eye-pattern have very



elongated shape. Only interfaces located just above the slip surface develop a U-shape structure.

4. Sheath folds do not develop above the slip surface in the model, causing that relation between the structures might not be easily recognizable.
5. The sheath fold formation mechanism described in the article can explain some of the sheath folds observed in salt complexes. Moreover, the presence of the eye-folds can help identifying position of shear zones in salt complex, due to the potential coexistence of the two structures.

#### LITERATURA/REFERENCES

- ALSOP G.I., HOLDSWORTH R.E., 2006, Sheath folds as discriminators of bulk strain type. *Journal of Structural Geology*, 28(9): 1588-1606.
- ALSOP G.I., HOLDSWORTH R.E., MCCAFFREY K.J.W., 2007, Scale invariant sheath folds in salt, sediments and shear zones. *Journal of Structural Geology*, 29: 1585-1604.
- ALSOP G.I., WEINBERGER R., LEVI T., MARCO S., 2015, Deformation within an exposed salt wall: Recumbent folding and extrusion of evaporites in the Dead Sea Basin. *Journal of Structural Geology*, 70: 95-118.
- BALK R., 1949, Structure of Grand Saline salt dome, Van Zandt County, Texas. *AAPG Bulletin*, 33: 1791-1829.
- BURLIGA S., 1996A, Implications for early basin dynamics of the Mid-Polish Trough from deformational structures within salt deposits in central Poland. *Geological Quarterly*, 40 (2): 185-202.
- BURLIGA S., 1996B, Kinematics within the Kłodawa salt diapir, central Poland. *Geological Society Special Publications*, 100: 11-21.
- BURLIGA S., 2007, Internal structure of subhorizontal bedded rock salt formation in the area of Sieroszowice – meso- and micro-structural investigations. *Gospodarka Surowcami Mineralnymi*, 23: 51-64.
- BURLIGA S., 2014, Heterogeneity of folding in Zechstein (Upper Permian) salt formations in the Kłodawa Salt Structure, central Poland. *Geological Quarterly*, 58(3): 565-576
- COBBOLD P.R., QUINQUIS H., 1980, Development of sheath folds in shear regimes. *Journal of Structural Geology* 2 (1-2): 119-126
- ESHELBY J.D., 1959, The elastic field outside an ellipsoidal inclusion. *Proceedings of the Royal Society of London Series a-Mathematical and Physical Sciences*, 252 (1271): 561-569.
- EXNER U., DABROWSKI M., 2010, Monoclinic and triclinic 3D flanking structures around elliptical cracks. *Journal of Structural Geology*, 32 (12): 2009-2021.
- FIDUK J.C., ROWAN M.G., 2012, Analysis of folding and deformation within layered evaporites in Blocks BM-S-8 and -9, Santos Basin, Brasil. *Geological Society Special Publications*, 363: 471-487.
- JACKSON M.P.A., CORNELIUS R.R., CRAIG C.H., GANSSER A., STÖCKLIN J., TALBOT C.J., 1990, Salt diapirs of the Great Kavir, Central Iran. *GSA Memoir*, 177.
- KUPFER D.H., 1962, Structure of Morton Salt Company mine, Weeks Island salt dome, Louisiana. *AAPG Bulletin*, 46: 1460-1467.
- MARQUES F.G., COBBOLD P.R., 1995, Development of highly noncylindrical folds around rigid ellipsoidal inclusions in bulk simple shear regimes – natural examples and experimental modeling. *Journal of Structural Geology*, 17 (4): 589-&.
- MARQUES F.O., GUERREIRO S.M., FERNANDES A.R., 2008, Sheath fold development with viscosity contrast: analogue experiments in bulk simple shear. *Journal of Structural Geology*, 30 (11), 1348-1353.
- NICHOLSON R., 1963, Eyed folds and interference patterns in the Sokumfjell marble group, northern Norway: *Geol. Mag.*, 100: 59-70.
- RAMSAY J.G., 1967, Folding and Fracturing of Rocks. Mc-Graw Hill, New York, 568
- RAMSAY J.G., HUBER M.J., 1987, The techniques of modern structural geology. Volume 2: Folds and fractures, Academic Press, London.
- REBER J.E., DABROWSKI M., SCHMID D.W., 2012, Sheath fold formation around slip surfaces. *Terra Nova*, 24: 417-421.
- REBER J.E., DABROWSKI M., GALLAND O., SCHMID D.W., 2013A, Sheath fold morphology in simple shear. *Journal of Structural Geology*, 53: 15-26.
- REBER J.E., GALLAND O., COBBOLD P.R., LE CARLIER DE VESLUD C., 2013B, Experimental study of sheath fold development around a weak inclusion in a mechanically layered matrix. *Tectonophysics*, 586: 130-144.
- RICHTER-BERNBURG G., 1980, Salt tectonics, interior structures of salt bodies. *Bulletin des Centres de Recherches Exploration-Production Elf-Aquitaine*, 4: 373-393.
- TALBOT C.J., JACKSON M.P.A., 1987, Internal kinematics of salt diapirs: *AAPG Bulletin-American Association of Petroleum Geologists*, 71(9): 1068-1093.
- TALBOT C.J., JACKSON M.P.A., 1991, A glossary of salt tectonics. University of Texas at Austin, Bureau of Economic Geology, Geological Circular, 91-4: 44.
- WILKOSZ P., BURLIGA S., GRZYBOWSKI Ł., KASPRZYK W., 2012, Comparison of internal structure and geomechanical properties in horizontally layered Zechstein rock salt. In: *Mechanical Behavior of Salt VII* (eds. P. Bérest, M. Ghoreychi, F. Hadji-Hassen and M. Tijani): 89-96. CRC Press, Taylor and Francis Group, Leiden.