Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

Marcin Dąbrowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2008 stopień doktora w zakresie geofizyki nadany przez Instytut Fizyki na Wydziale Matematyki i Nauk Przyrodniczych Uniwersytetu w Oslo

Tytuł rozprawy doktorskiej: "*Anisotropy and heterogeneity in finite deformation - resolving vs. upscaling*", promotorzy: prof. Yuri Y. Podladchikov, dr Daniel W. Schmid, recenzenci: prof. Neil Mancktelow, prof. Viggo Tvergaard.

2004 dyplom magistra fizyki (specjalność geofizyka), Instytut Geofizyki, Uniwersytet Warszawski

Tytuł pracy magisterskiej: "Numeryczne modelowanie tekstur deformacyjnych", promotor: prof. dr hab. Leszek Czechowski.

2002 dyplom magistra geologii (specjalność geologia poszukiwawcza), Instytut Nauk Geologicznych, Uniwersytet Wrocławski

Tytuł pracy magisterskiej: "*PT and structural constraints on Variscan exhumation of eclogites in Śnieżnik Massif*", promotor: prof. dr hab. Stanisław Mazur.

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

2013 – obecnie	główny specjalista, Państwowy Instytut Geologiczny - PIB
2015 – 2019	adiunkt (*researcher*), 20% etatu, Instytut Geologii, Uniwersytet w Oslo
2012 – 2014	adiunkt (*researcher*), Centrum Doskonałości (do 2013) *Physics of Geological Processes*, Uniwersytet w Oslo
2008 – 2012	staż podoktorski, Centrum Doskonałości *Physics of Geological Processes*, Uniwersytet w Oslo

4. Jako osiągnięcie, o którym mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668 ze zm.) przedstawiam cykl sześciu powiązanych tematycznie publikacji naukowych:

a) tytuł osiągnięcia naukowego

Modelowanie numeryczne rozwoju wybranych podatnych struktur deformacyjnych w warunkach prostego, czystego i ogólnego ścinania

b) spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Omawiane osiągnięcie naukowe zostało przedstawione w postaci sześciu artykułów naukowych, opublikowanych w języku angielskim w czasopismach znajdujących się w części „A" wykazu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego:

A1) Exner U., **Dabrowski M.** Monoclinic and triclinic 3D flanking structures around elliptical cracks (2010) *Journal of Structural Geology*, 32 (12), 2009-2021

Liczba cytowań: 17(12)*	Impact Factor: 1,911**	Punkty MNSiW: 32(100)***

* w nawiasie liczba cytowań bez autocytacji
** 5-letni IF z roku publikacji
*** punktacja MNSiW zgodnie z rokiem publikacji, w nawiasie punktacja na rok 2019 r

Mój wkład w przygotowanie artykułu obejmował:

(1) opracowanie koncepcji i metodyki symulacji komputerowych, (2) wyprowadzenie wyrażeń analitycznych opisujących pole prędkości wokół eliptycznej szczeliny, (3) implementację i optymalizację numerycznego modelu rozwoju trójwymiarowych struktur deformacyjnych wokół rotujących powierzchni poślizgu w strefach ścinania, (4) opracowanie nowych wzorów analitycznych, w tym wyrażeń opisujących względne przemieszczenie wzdłuż powierzchni poślizgu w dwuwymiarowym przypadku granicznym, (5) wykonanie trójwymiarowych symulacji numerycznych oraz selekcję i analizę ich wyników, (6) opracowanie uzyskanych wyników w formie graficznej, (7) udział w opracowaniu dyskusji wyników, (8) współtworzenie manuskryptu artykułu, (9) przygotowanie odpowiedzi na recenzje i udział w finalnej edycji manuskryptu.

A2) **Dabrowski M.**, Grasemann B. Domino boudinage under layer-parallel simple shear (2014) *Journal of Structural Geology*, 68, 58-65

Liczba cytowań: 20(18)	Impact Factor: 2,884	Punkty MNSiW: 30(100)

Mój wkład w przygotowanie artykułu obejmował:

(1) opracowanie koncepcji i metodyki badań, (2) dostosowanie własnych kodów numerycznych bazujących na metodzie elementów skończonych do przypadku modeli periodycznych, (3) wykonanie systematycznych symulacji komputerowych, (4) analizę wyników numerycznych, (5) opracowanie rezultatów modelowania w formie graficznej, (6) dyskusję uzyskanych wyników, w tym w kontekście kinematycznej analizy odkształcenia całkowitego, (7) przygotowanie manuskryptu artykułu (oprócz rozdziału dotyczącego przykładów naturalnych), (8) przygotowanie odpowiedzi na recenzje i finalną edycja manuskryptu.

A3) Grasemann B., **Dabrowski M.** Winged inclusions: Pinch-and-swell objects during high-strain simple shear (2015) *Journal of Structural Geology*, 70, 78-94

Liczba cytowań: 13(12)	Impact Factor: 2,084	Punkty MNSiW: 35(100)

Mój wkład w przygotowanie artykułu obejmował:

(1) udział w tworzeniu koncepcji i metodyki badań, (2) dostosowanie własnych kodów numerycznych bazujących na metodzie elementów skończonych do przypadku materiałów nieliniowych, (3) przeprowadzenie systematycznych symulacji komputerowych, (4) zaprojektowanie narzędzi do automatycznej analizy wyników numerycznych, (5) analizę wyników numerycznych, (6) opracowanie rezultatów w formie graficznej (ryciny oraz animacje), (7) udział w dyskusji wyników, (8) przygotowanie fragmentów manuskryptu oraz przedstawienie uwag i komentarzy do pozostałych części manuskryptu, (9) udział w przygotowaniu odpowiedzi na recenzje.

A4) Adamuszek M., **Dabrowski M.** Sheath fold development in monoclinic shear zones (2017) *Terra Nova*, 29 (6), 356-362

Liczba cytowań: 2(1)	Impact Factor: 2,229	Punkty MNSiW: 35(100)

Mój wkład w przygotowanie artykułu obejmował:

(1) pomysł na badanie wpływu ogólnego ścinania na morfologię fałdów futerałowych powstających wokół powierzchni poślizgu, (2) udział w analizie literatury, (3) przygotowanie zoptymalizowanych kodów numerycznych służących do obliczania ewolucji struktur wokół powierzchni poślizgu w warunkach ogólnego ścinania, (4) udział w opracowaniu zestawu unikatowych konfiguracji początkowych modelu dla warunków ogólnego ścinania, (5) analizę i dyskusję wyników, (6) udział w przygotowaniu manuskryptu artykułu oraz odpowiedzi na recenzje.

A5) Grasemann B., **Dabrowski M.**, Schöpfer M.P.J. Sense and non-sense of shear reloaded (2019) *Journal of Structural Geology*, 125, 20-28

Liczba cytowań: 4(3)	Impact Factor: 3,128	Punkty MNSiW: 100(100)

Mój wkład w przygotowanie artykułu obejmował:

(1) udział w dyskusjach nad koncepcją artykułu, (2) przygotowanie kodów numerycznych oraz przeprowadzenie symulacji komputerowych metodą elementów skończonych, (3) opracowanie graficzne wyników, w tym w formie animacji dołączonych jako suplement elektroniczny do artykułu, (4) udział w analizie i dyskusji wyników, (5) przygotowanie fragmentów manuskryptu dot. modelowania numerycznego, (6) przedstawienie uwag i komentarzy do pozostałych części manuskryptu, (7) udział w przygotowaniu odpowiedzi na recenzje.

A6) **Dabrowski M.**, Grasemann B. Numerical modelling of boudinage under pure shear: implications for estimating viscosity ratios and finite strain from natural examples (2019) *Journal of Structural Geology,* 126, 109-128

Liczba cytowań: 1(1)	Impact Factor: 3,128	Punkty MNSiW: 100 (100)

Mój wkład w przygotowanie artykułu obejmował:

(1) opracowanie koncepcji i metodyki badań, (2) studia literaturowe, (3) przygotowanie narzędzi numerycznych, (4) wykonanie systematycznych symulacji komputerowych, (5) analizę i selekcję wyników numerycznych, (6) zaprojektowanie metody szacowania współczynnika rozciągnięcia oraz stosunków lepkościowych na podstawie szczegółowej analizy parametrów geometrycznych budin oraz struktur otaczających, (7) opracowanie rezultatów w formie graficznej, (8) przeprowadzenie dyskusji wyników na tle wcześniejszych badań, (9) przygotowanie manuskryptu artykułu (oprócz rozdziału dotyczącego przykładów naturalnych), (10) przygotowanie odpowiedzi na recenzje oraz finalną edycję manuskryptu.

Sumaryczny IF osiągnięcia naukowego*	15,364
Sumaryczna liczba punktów MNSiW**	332 (600)

* na podstawie 5-letniego IF z roku publikacji

** na podstawie punktacji MNSiW z roku publikacji, w nawiasie punktacja z 2019 r.

c) komentarz autorski do przedstawianego cyklu publikacji stanowiącego osiągnięcie naukowe

Wprowadzenie

Jednym z podstawowych zadań tektoniki i geologii strukturalnej jest ilościowa analiza deformacji w skałach. Zarówno kruche, jak i podatne struktury deformacyjne niosą szereg informacji o przebiegu odkształcania skał, a wyniki analiz mikro- i mezostrukturalnych stanowią cenny przyczynek do rozpoznania historii ruchów tektonicznych w dużej skali. U zarania ilościowej analizy strukturalnej leży przeniesienie na jej grunt, głoszącej postulat symetrii przyczyn i skutków, zasady Curie,. Zgodnie z nią symetria przestrzenna struktur deformacyjnych odzwierciedla symetrię czynnika sprawczego, pozwalając w efekcie na odszyfrowanie kinematyki deformacji (Sander, 1930; Paterson i Weiss, 1961). Badania elementów symetrii struktur deformacyjnych w skałach, a także ich orientacji względem kierunków geograficznych, głęboko zakorzeniły się w analizie strukturalnej i wciąż stanowią jedno z jej podstawowych narzędzi badawczych.

W kolejnym etapie rozwoju badań strukturalnych prym wiodły metody analizy kinematycznej dostosowane do reżimu dużych odkształceń, który jest charakterystyczny dla podatnie zdeformowanych skał. Ilościowa ocena rozmiaru odkształcenia okazała się niezmiernie owocna i stanowiła na tamtym etapie „koło napędowe" badań strukturalnych. Podwaliny teoretyczne analizy kinematycznej w zastosowaniu do geologii strukturalnej zostały wyłożone w podręczniku „Folding and fracturing of rocks" (Ramsay, 1967), który, doczekawszy się uaktualnień w postaci kilku kolejnych edycji, wywarł ogromny wpływ na

środowisko geologów strukturalnych i tektoników. Swój sukces klasyczna analiza kinematyczna zawdzięczała stosunkowo prostemu sformułowaniu, a jednym z jej ważniejszych założeń upraszczających było przyjęcie modelu ośrodka jednorodnego, co pozwalało na zastosowanie analiz opartych na stałym w przestrzeni polu deformacji, bez konieczności odwoływania się do równań różniczkowych mechaniki ośrodków ciągłych.

Niezależnie od rozwoju analizy kinematycznej już w latach 50. XX w. pojawiały się publikacje opisujące prace teoretyczne (np. Biot, 1957), modelowania analogowe (np. Ramberg, 1955), a nieco później także pionierskie badania numeryczne (np. Strömgård, 1973), których celem było wyjaśnienie fizycznych mechanizmów powstawania struktur tektonicznych takich jak fałdy, czy też budinaż, które rozwijają się w ośrodkach bezsprzecznie niejednorodnych. Z upływem czasu można było zauważyć narastający rozziew między zwolennikami klasycznych modeli kinematycznych a orędownikami bardziej złożonych, ale mających solidne fizyczne podstawy modeli mechanicznych. W kolejnych latach wiele spośród spornych kwestii udało się uzgodnić, ale echa tych dyskusji powracają po dziś dzień (Fletcher i Pollard, 1999), przyjmując niekiedy dość burzliwą formę (np. Passchier i in., 1992).

Okresem rozkwitu analizy strukturalnej była końcówka lat 70. i lata 80. XX w. Wtedy to, bazując na licznych obserwacjach terenowych podatnych struktur deformacyjnych występujących w obrębie stref ścinania, rozwinięto systematyczną klasyfikację kinematycznych wskaźników zwrotu ścinania (Berthé i in., 1979; Simpson i Schmid, 1983; Passchier i Simpson, 1986). Koncepcja ta z jednej strony łączyła osiągnięcia analizy kinematycznej, szczególnie w obszarze progresywnej deformacji typu ścinania prostego, a z drugiej obejmowała ówczesną wiedzę dotyczącą zachowania niejednorodnych obiektów w strefach intensywnego ścinania, która w tamtym okresie bazowała przede wszystkim na analizach teoretycznych (np. Ghosh i Ramberg, 1976) oraz modelach analogowych (np. Van Den Driessche i Brun 1987). W kolejnych dekadach modele mechaniczne ewolucji podatnych struktur tektonicznych w strefach ścinania były ugruntowywane od strony teoretycznej, a także mocno rozwijane dzięki coraz to dokładniejszym symulacjom numerycznym (Bjørnerud i Zhang, 1995; Bons i in., 1997; Ježek i in., 1999; Mandal i in., 2000; Schmid i Podladchikov, 2004; Marques i in., 2005; Dabrowski i Schmid, 2011; Griera i in., 2013). Po wkroczeniu w nowe milenium ogromnym wsparciem dla analiz strukturalnych stały się nowoczesne techniki trójwymiarowego obrazowania struktur takie jak mikrotomografia komputerowa (Fusseis i in., 2014), czy też wysokorozdzielcze, wydajne i precyzyjne metody pomiaru lokalnej orientacji sieci krystalograficznej minerałów bazujące na mikroskopii elektronowej (Prior i in., 2009).

Z synergii między obserwacjami terenowymi, wspartymi nowoczesnymi metodami obrazowania, modelami teoretycznymi oraz symulacjami numerycznymi i analogowymi wyłoniła się nowoczesna analiza mikrotektoniczna (Passchier i Trouw, 2005). W arsenale jej narzędzi, obok już klasycznych, jakościowych technik oceny kierunku i zwrotu ścinania, znalazły się także ilościowe metody szacowania rozmiaru deformacji, w tym stopnia jej niekoaksjalności (Xypolias, 2010). Warto odnotować współczesne osiągnięcia w obszarze analizy klasycznych struktur tektonicznych, takich jak chociażby fałdy z wyboczenia (Schmalholz i Podladchikov, 2000; Adamuszek i in., 2013; Schmalholz i Mancktelow, 2016).

Nowoczesna ilościowa analiza morfologii fałdów pozwala na wiarygodną ocenę współczynnika skrócenia w ośrodku, a do tego jest nieodłącznie stowarzyszona z szacowaniem stosunków lepkościowych między materiałami tworzącymi warstwę i jej otoczenie, które w efekcie mogą odgrywać rolę naturalnych reometrów (Schmalholz i Podladchikov, 2001; Adamuszek i in., 2011). Należy podkreślić, że tak oznaczone stosunki lepkości odzwierciedlają relacje między nieliniowymi parametrami płynięcia skał w warunkach naturalnego, zazwyczaj skrajnie niskiego tempa deformacji, które ze względów praktycznych jest nieosiągalne w toku badań laboratoryjnych.

Zanim opisane zostaną główne cele badawcze prac, których wyniki stanowią omawiane osiągnięcie naukowe, autor tego referatu pokusi się o skrótowe przedstawienie własnego spojrzenia na współczesne wyzwania i otwarte problemy analizy podatnych struktur deformacyjnych. Struktury typu cylindrycznych fałdów z wyboczenia, czy też liczne odmiany budinażu charakteryzują się dość dobrze ukształtowaną symetrią translacyjną i w efekcie, z dobrym przybliżeniem, można traktować je jako struktury dwuwymiarowe. Natomiast wiele innych rodzajów struktur tektonicznych, takich jak chociażby występujące w strefach ścinania σ- i δ-klasty, czy też fałdy futerałowe, cechuje się bezsprzecznie trójwymiarową morfologią. Stwarza to szereg wyzwań badawczych, przede wszystkim w zakresie ich opisu w terenie, gdzie do bezpośredniej obserwacji najczęściej dostępne są jedynie ich dwuwymiarowe przekroje. Pomimo ogromnego rozwoju nowoczesnych technik obrazowania 3D ich zastosowanie w analizie strukturalnej jest wciąż rzadkością, po części ze względu na dość wysoki koszt tych badań. Symulacje numeryczne skomplikowanych trójwymiarowych struktur deformacyjnych wciąż stanowią techniczne wyzwanie, mimo nieustającego wzrostu mocy obliczeniowej oraz pamięci operacyjnej współczesnych serwerów obliczeniowych. Problemem w tym przypadku jest zarówno odpowiednie reprezentowanie złożonej geometrii ewoluujących trójwymiarowych struktur, jak i konieczność użycia siatek obliczeniowych o ogromnej ilości węzłów obliczeniowych. Dodatkowo numeryczne rozwiązywanie układów równań liniowych związanych z dyskretyzacją problemów 3D jest ze względów *stricte* algebraicznych wyraźnie trudniejszym zadaniem w porównaniu z ich dwuwymiarowymi odpowiednikami. Wszystkie te czynniki sprawiają, że modelowanie 3D często wymaga sięgnięcia po dość złożone, choć silnie rozwijające się, techniki obliczeń równoległych i rozproszonych na klastrach obliczeniowych. W efekcie wiele zagadnień w geologii strukturalnej wciąż nie doczekało się systematycznych, trójwymiarowych symulacji numerycznych, a jedynie ich uproszczonych, dwuwymiarowych wariantów. Powoduje to, że ścieżki rozwoju niektórych grup struktur tektonicznych są wciąż dość słabo rozpoznane, a ich analiza ograniczona do zastosowania podstawowych modeli teoretycznych, które najczęściej obejmują jedynie reżim małych odkształceń. Atrakcyjną alternatywę dla modeli numerycznych może stanowić technika modelowania analogowego, ale często wiąże się ona z trudnościami przy odtwarzaniu właściwych warunków deformacji, doborze odpowiednich materiałów, a także przy eliminowaniu szeregu niepożądanych czynników takich jak m.in. efekty brzegowe. Dodatkowo w przypadku analogowych modeli 3D technicznym wyzwaniem jest obrazowanie rozwoju struktur w czasie i przestrzeni. Wszystkie te trudności niekiedy skutkują odwrotem od modeli mechanicznych i rozwijaniem w ich miejsce heurystycznych modeli kinematycznych (np. Bastida i in., 2005).

Omówione powyżej trudności techniczne są zapewne etapem przejściowym i można oczekiwać, że zostaną stopniowo pokonane wraz z dalszym rozwojem metod numerycznych, przyrostem mocy obliczeniowych oraz doskonaleniem metod modelowania analogowego. Innym poważnym wyzwaniem, przed którym obecnie stoimy jest konieczność właściwego ujęcia złożonych mikroskopowych mechanizmów pełzania dyslokacyjnego i dyfuzyjnego minerałów, wraz z szeregiem stowarzyszonych procesów takich jak np. dynamiczna rekrystalizacja. Makroskopowe modele deformacji skał współcześnie stosowane w geologii strukturalnej często opierają się na dość elementarnych modelach reologicznych, a najbardziej rozpowszechnionym jest izotropowy związek konstytutywny dla płynów liniowych lub potęgowych. Naturalnym jest, że każdy model jest zamierzonym uproszczeniem rzeczywistości, a o jego przydatności powinna przede wszystkim przesądzać zdolność do wytwarzania przewidywań zgodnych z obserwacjami terenowymi lub wynikami eksperymentów. Modele hydrodynamiczne bazujące na prostych modelach izotropowych płynów niewątpliwie odniosły wielki sukces w geologii strukturalnej, pozwolając na wyjaśnienie fizycznych mechanizmów genezy wielu podatnych struktur tektonicznych (np. Johnson i Fletcher, 1994). W opinii piszącego te słowa błędnym jest podejście, w którym pretekstem do całkowitego zanegowania modeli dynamicznych jest to, że nieuwzględnione jest w nich pełne spektrum złożoności obserwowanych w naturze (np. Aerden, 2005). Należy jednak zgodzić się z opinami wskazującymi na to, że deformacja skał może wyraźnie odbiegać od prostych przepływów hydrodynamicznych, a dużą w tym rolę odgrywają takie czynniki jak reologiczna nieliniowość minerałów, wielopoziomowa niejednorodność ośrodków skalnych, a także mechaniczna anizotropia związana zarówno z makroteksturą, np. warstwowaniem, jak i więźbą krystalograficzną (mikroteksturą). Wszystko to sprawia, że podatnie deformowane skały powinny być traktowane jako nieliniowe i anizotropowe „płyny z pamięcią". W opinii autora tego omówienia XXI wiek będzie okresem dalszego rozkwitu komputerowych symulacji procesów deformacyjnych z zastosowaniem coraz to bardziej realistycznych modeli reologicznych podatnie deformowanych skał, a także z uwzględnieniem sprzężenia między procesami mechanicznymi a reakcjami chemicznymi. Ulepszone modele rozwoju podatnych struktur deformacyjnych mogą m.in. uwypuklić ich znaczenie jako naturalnych reometrów, a w efekcie pomóc w ustaleniu zmienności ważnych parametrów mechanicznych skał takich jak lepkość, które ze względu na skalę czasową omawianych procesów są niemożliwe do bezpośredniego zweryfikowania w warunkach laboratoryjnych.

Głównym celem badawczym prowadzonych w ramach omawianego osiągnięcia naukowego prac było systematyczne rozpoznanie ewolucji wybranych podatnych struktur deformacyjnych rozwijających się w szerokim spektrum warunków ścinania w tle. Szczególną uwagę poświęcono ich użyteczności z punktu widzenia analizy zwrotu ścinania, szacowania typu i rozmiaru odkształcenia, a także oceny stosunków lepkościowych. W toku prowadzonych prac analizowano rozwój struktur deformacyjnych powstających wokół powierzchni poślizgu, w tym dwuwymiarowych podatnych struktur przydyslokacyjnych (ang. *flanking structures*), a w szczególności ekstensyjnego kliważu krenulacyjnego, oraz trójwymiarowych fałdów futerałowych (ang. *sheath folds*) w skałach poddanych w tle ogólnemu ścinaniu. Badano także inkluzje skrzydlate (ang. *winged inclusions*) należące do kategorii rotujących inkluzji tektonicznych, które rozwijają się w strefach silnie

niekoaksjalnego ścinania, oraz struktury typu kostkowego budinażu (ang. *torn boudinage*) podatnie przeobrażonego pod wpływem nałożonego ścinania prostego lub czystego. Podstawową metodą badawczą stosowaną w ramach prowadzonych prac były symulacje komputerowe wykonywane z wykorzystaniem własnych, dostosowanych narzędzi numerycznych, wspierane metodą rozwiązań analitycznych, a także analizami teoretycznymi. Prowadzone badania rozwijane były na podstawie wyselekcjonowanych obserwacji terenowych. Prezentowane wyniki są oryginalnym osiągnięciem naukowym i poszerzają oraz systematyzują wiedzę o mechanizmach rozwoju podatnych struktur deformacyjnych. W efekcie prowadzonych prac zaproponowano m.in. nowe modele rozwoju fałdów futerałowych oraz inkluzji skrzydlatych w strefach ścinania, a także przewidziano teoretycznie rozwój nowej klasy struktur typu podatnie przeobrażonego budinażu. Wyniki opisane w należących do przedstawianego cyklu publikacjach zostaną omówione po krótkim scharakteryzowaniu istotnych z punktu widzenia prezentowanego osiągnięcia podatnych struktur deformacyjnych, a także po skrótowym przedstawieniu zastosowanej metodyki.

Podatne struktury deformacyjne

Podatne struktury deformacyjne, włącznie z więźbą krystalograficzną, stanowią fundament obserwacyjny w analizie strukturalnej skał metamorficznych. Problematyka rozwoju podatnych struktur deformacyjnych doczekała się szeregu wyłącznie jej poświęconych opracowań w formie wyspecjalizowanych podręczników (Passchier i Trouw, 2005), artykułów przeglądowych (Goscombe i in., 2004; Mukherjee, 2014a; Zhang i Fossen, 2020) oraz systematyzujących obserwacje terenowe i kameralne albumów (Mukherjee, 2014b; Vernon, 2018), a także jest ona omawiana w szerokim zakresie we współczesnych podręcznikach geologii strukturalnej (Pollard i Fletcher, 2005; Fossen, 2016). Warto przypomnieć, że analiza podatnych struktur tektonicznych w skali mikro i mezo niesie cenne wskazówki i klucz do zrozumienia genezy wielkoskalowych struktur, w przypadku których istotną rolę mogą odgrywać bardziej złożone, krucho-podatne mechanizmy deformacji, niekiedy z udziałem sprężystości, a także grawitacji. Na przełomie lat 80.-90. XX w. w polskiej literaturze pojawiły się przeglądowe opracowania odzwierciadlające stan ówczesnej wiedzy na temat mikrostrukturalnej analizy kinematycznej oraz ewolucji podatnych struktur deformacyjnych (Cymerman, 1989; Achramowicz i Cymerman 1992; Aleksandrowski, 1992). Wybrane zagadnienia związane z analizą mikrostrukturalną poruszane są też w krajowych podręcznikach geologii strukturalnej (Kuzak i Żaba, 2011) i tektoniki (Dadlez i Jaroszewski, 1994), a także w ramach skryptów i materiałów on-line związanych z kursami tektoniki. Niemniej jednak, zdaniem autora tego omówienia, odczuwalny jest brak współczesnej pozycji literaturowej w języku polskim, która wyczerpująco omawiałaby aktualną problematykę podatnych struktur deformacyjnych, a w szczególności systematyzowała ich terminologię. Poniżej zaprezentowane zostanie jedynie krótkie omówienie struktur istotnych z punktu widzenia przedstawianego cyklu.

Podatne struktury przydyslokacyjne

Podatne struktury przydyslokacyjne (ang. *flanking structure)* to mocno zróżnicowane, występujące w strefach podatnego ścinania struktury o charakterze łagodnych wygięć

foliacji, przechodzących niekiedy w wyraźniejsze zafałdowania. Rozwój struktur przydyslokacyjnych wiąże się z aktywnością powierzchni poślizgu (Grasemann i Stüwe, 2001; Passchier, 2001), których rolę mogą odgrywać m.in. ścięciowo reaktywowane powierzchnie spękań, czy też żyły mineralne wypełnione materiałem o obniżonej względem otoczenia lepkości. Zasadniczy wpływ na wstępne stadium rozwoju podatnych struktur przydyslokacyjnych ma początkowa orientacja powierzchni poślizgu oraz stopień niekoaksjalności deformacji w tle, charakteryzowany kinematycznym wskaźnikiem wirowości (ang. *kinematic vorticity number*; Truesdell, 1953). Orientacja powierzchni poślizgu względem kierunków głównych tensora prędkości deformacji decyduje o bieżącym zwrocie poślizgu, a w szczególności o jego relacji względem zwrotu ścinania w badanej strefie. W przypadku ścinania prostego poślizg na powierzchniach nachylonych względem kierunku ścinania pod kątem w zakresie między 45° a 135° jest antytetyczny, a w przypadku pozostałych orientacji mamy do czynienia z poślizgiem syntetycznym. Sektory te mają zawsze sumaryczny zakres 90°, a położenie granicy między nimi zmienia się wraz z orientacją kierunków głównych tensora prędkości deformacji, które zależne są od względnego udziału prostego i czystego ścinania w tle.

W warunkach dużego odkształcenia dochodzi też do deformowania powierzchni poślizgu. Koncepcja rotujących oraz rozciąganych lub skracanych powierzchni poślizgu była już rozwijana w latach 80. XX w. w odniesieniu do uskoków (Means, 1989). W ośrodku jednorodnym deformacja powierzchni poślizgu jest pasywna względem odkształcenia w tle, analogicznie do zachowania powierzchni materialnych. W obrębie omówionych wcześniej sektorów antytetycznego i syntetycznego poślizgu ich dwusieczna wyodrębnia poddomeny, w których zachodzi chwilowe skracanie lub rozciąganie powierzchni poślizgu. Nieco bardziej złożony jest rozkład sektorów syntetycznej i antytetycznej rotacji powierzchni poślizgu. W przypadku ścinania prostego wszystkie powierzchnie poślizgu, niezależnie od ich orientacji, rotują zgodnie ze zwrotem ścinania. Natomiast w przypadku deformacji o charakterze ogólnego ścinania ujawnia się sektor, w obrębie którego powierzchnia poślizgu rotuje antytetycznie. Rozciągłość kątowa tego sektora wzrasta wraz ze zwiększaniem udziału czystego ścinania w deformacji tła. Sektory syntetycznej i antytetycznej rotacji powierzchni poślizgu odgraniczone są przez, w ogólności skośne względem siebie, wektory własne tensora gradientu prędkości, które można określić mianem repulsora i atraktora ze względu na to, że stanowią kierunki „odpychania" (ang. *repulsor*) i „przyciągania" (ang. *attractor*) linii prądu przepływu tła.

Rotacja powierzchni poślizgu może powodować zmiany jego zwrotu, co jest kluczowym czynnikiem przesądzającym o niezmiernym bogactwie morfologicznym w grupie podatnych struktur przydyslokacyjnych. Dla typowej początkowej orientacji powierzchni poślizgu odpowiadającej kierunkowi szczelin tensyjnych charakterystyczne jest przejście od poślizgu antytetycznego do syntetycznego przy ścinaniu prostym w tle. Przy bardziej połogiej orientacji inicjalnej w początkowym stadium pojawić się może dodatkowa faza syntetycznego poślizgu, prowadząca w efekcie do trójetapowego rozwoju struktury. W oparciu o relację między zwrotem sumarycznego przemieszczenia na powierzchni poślizgu a zwrotem ścinania wyróżniono antytetyczne i syntetyczne typy struktury przydyslokacyjnych (Wiesmayr i Grasemann, 2005). Należy podkreślić, że obserwowany

finalny zwrot przemieszczenia stanowi skumulowany wynik jego niekiedy kilkuetapowej ewolucji i niekoniecznie odzwierciedla on zwrot ślizgania w ostatniej fazie rozwoju struktury. W analogii do klasyfikacji uskoków analiza przemieszczenia na powierzchni poślizgu pozwala na wyróżnienie ekstensyjnych i kontrakcyjnych struktur przydyslokacyjnych. W sąsiedztwie powierzchni poślizgu obserwowane są zarówno normalne, jak i odwrócone wygięcia foliacji (ang. *normal or reverse drag*), co stanowi kolejne ważne kryterium klasyfikacyjne w grupie podatnych struktur przydyslokacyjnych (Wiesmayr i Grasemann, 2005). Wbrew powszechnej opinii w początkowej fazie ewolucji struktury bardziej typowy jest rozwój wygięć odwróconych, przy czym należy podkreślić, że charakter wygięcia może się zmieniać wzdłuż powierzchni poślizgu (Grasemann i in., 2005). Podobnie jak w przypadku końcowego przemieszczenia foliacji finalny obraz jej wygięcia w sąsiedztwie powierzchni poślizgu jest efektem wieloetapowej ewolucji struktury, co może prowadzić do rozwoju dość złożonych morfologii na późnym etapie ich rozwoju (Exner i in., 2004).

Grasemann i in. (2003) przedstawili mechanizm powstawania syntetycznych struktur typu ekstensyjnego kliważu krenulacyjnego (ang. *extensional crenulation cleavage*, *shear bands*) na gruncie modelu rozwoju podatnych struktur przydyslokacyjnych w warunkach ogólnego ścinania. Syntetyczne przemieszczenie o znacznej amplitudzie może rozwinąć się dzięki powolnej rotacji powierzchniach poślizgu o początkowej orientacji zbliżonej do kierunku repulsora. Przydatność podatnych struktur przydyslokacyjnych pod kątem analizy zwrotu ścinania, wyznaczania kinematycznego wskaźnika wirowości w strefach ścinania oraz szacowania rozmiaru odkształcenia analizowana była w szeregu publikacji (Grasemann i Stüwe, 2001; Grasemann i in., 2003; Kocher i Mancktelow, 2005; Gomez-Rivas i in., 2007). Dyskutowano także podobieństwa i różnice miedzy typowo podatnymi strukturami jakimi są podatne struktury przydyslokacyjne wzrastające wokół silnie rotujących i rozciąganych powierzchni poślizgu w strefach ścinania a fałdami przyuskokowymi, które rozwijają się w płytszych, bardziej kruchych środowiskach basenów osadowych (Wiesmayr i Grasemann, 2005).

Fałdy futerałowe

W trakcie prowadzonych na przełomie lat 70. i 80. XX w. intensywnych badań stref ścinania udokumentowano w ich obrębie występowanie niecylindrycznych fałdów charakteryzujących się bardzo silnym wygięciem osi, która często przyjmowała kierunek równoległy do mineralnej lineacji z rozciągania (Carreras i in., 1977). W polskiej literaturze mocno niecylindryczne fałdy przyjęto określać mianem fałdów futerałowych (ang. *sheath folds*). Zarówno rozmiary, jak i geometria fałdów futerałowych wykazują bardzo duże zróżnicowanie (Alsop i Holdsworth, 2004), a późniejsze badania dowiodły, że ich wzrost może zachodzić w szerokim spektrum środowisk geologicznych, począwszy od stref ścinania w skałach metamorficznych, przez silnie zdeformowane wewnętrznie wysady solne, aż po spływy w obrębie niezdiagenezowanych osadów (Alsop i in., 2007). Struktury tego typu opisywane były w Polsce m.in. w utworach metamorficznych bloku sowiogórskiego (Cymerman, 1990) i masywu Śnieżnika (Cymerman, 1992), a także w obrębie wysadów solnych na Niżu Polski (Burliga, 2014) oraz w skałach Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (Teper, 1998).

Rozwój fałdów futerałowych wiązany jest przede wszystkim ze strefami intensywnego, niekoaksjalnego ścinania (Cobbold i Quinquis, 1980). Cechą diagnostyczną fałdów futerałowych są występujące w przekrojach prostopadłych do ich wydłużenia struktury oczkowe. Opierając się na parametrach geometrycznych konturów tworzących oczka, Alsop i Holdsworth (2006) zaproponowali ilościową metodę klasyfikacji fałdów futerałowych. Cytowani autorzy przedstawili zestawienie pomiarów opracowanego przez nich wskaźnika geometryczego dla struktur oczkowych (iloraz stosunków długości głównych osi zewnętrznego i wewnętrznego konturu w oczku), który korelowany był z parametrem Flinna K elipsoidy odkształcenia, oznaczonym dla badanych stref ścinania niezależnymi metodami.

Wczesne modele genetyczne fałdów futerałowych podkreślały rolę pasywnej amplifikacji inicjalnych zaburzeń na powierzchniach foliacji, a także zaburzeń samego pola deformacji związanych z obecnością sztywnych, korugowanych obramowań stref ścinania (Cobbold i Quinquis, 1980). W późniejszych latach zaproponowano model rozwoju fałdów futerałowych w zaburzonym polu przepływu wokół rotujących sztywnych inkluzji w strefach ścinania (Marques i Cobbold, 1995). W należącej do omawianego cyklu pracy A1 zasugerowano możliwość rozwoju fałdów futerałowych wokół eliptycznych powierzchni poślizgu. Model ten był rozwijany i systematycznie badany dla przypadku ścinania prostego w późniejszych publikacjach (Reber i in., 2012; Reber i in., 2013a; Adamuszek i Dabrowski, 2017). W szczególności szukano powiązania między parametrami geometrycznymi fałdów futerałowych, wyznaczanymi zgodnie z założeniami klasyfikacji przedstawionej przez Alsopa i Holdswortha (2006) a rozmiarem odkształcenia w tle i innymi parametrami takimi jak np. początkowa orientacja powierzchni poślizgu, czy też jej wydłużenie. Wszystkie dotychczas wspomniane analizy wzrostu fałdów futerałowych bazują na modelu pasywnego fałdowania z płynięcia, bez aktywności procesu fałdowania z wyboczenia. Proces rozwoju fałdów futerałowych w ośrodku mechanicznie uwarstwionym, wykazującym efektywnie anizotropię lepkości, był badany w eksperymentach numerycznych (Kocher i Mancktelow, 2006) oraz analogowych (Reber i in., 2013b).

Inkluzje tektoniczne w strefach ścinania

Szereg interesujących podatnych struktur tektonicznych związanych jest z występującymi w obrębie stref ścinania izolowanymi obiektami typu porfiroklastów lub ogólniej inkluzji tektonicznych. Obiekty te mogą podlegać zarówno rotacji, jak i wewnętrznej deformacji, a ich zachowanie uzależnione jest w dużej mierze od cechującego je kontrastu reologicznego względem ośrodka otaczającego. Liczne badania teoretyczne oraz symulacje numeryczne i eksperymenty analogowe pozwoliły na ilościowe opracowanie ścieżek deformacji podatnie deformowanych inkluzji tektonicznych w zależności od ich początkowych kształtów oraz typu deformacji w tle (np. Mancktelow, 2013). W przypadku obiektów o wysokiej względnej lepkości ich dynamika jest w dużej mierze ograniczona do syntetycznej rotacji, której tempo zależy od ich wydłużenia oraz orientacji względem kierunku ścinania (Ghosh i Ramberg, 1976). W warunkach ogólnego ścinania następuje stabilizacja rotacji inkluzji wzdłuż kierunków zależnych od ich wydłużenia. W efekcie statystyczna analiza orientacji licznych zespołów sztywnych, rotujących klastów może posłużyć do wyznaczenia stopnia niekoaksjalności deformacji w strefach ścinania (Simpson i De Paor, 1993; Jessup i in.,

2007). W przypadku obiektów o jednoskośnej symetrii takich jak np. ryby mikowe antytetyczna rotacja i późniejsza stabilizacja może zachodzić nawet w przypadku ścinania prostego (np. Ceriani i in., 2003).

Zaburzenie pola prędkości wokół rotujących inkluzji w strefach ścinania prowadzi do rozwoju charakterystycznych asymetrycznych struktur (ang. *rolling structures*), których znaczenie dla kinematycznej analizy zwrotu ścinania zostało już rozpoznane w latach 80. XX w. (Van Den Driessche i Brun, 1987). Rotacji obiektów typu porfiroklastów często towarzyszy dynamiczna rekrystalizacja ich brzegów, co skutkuje postępującą „erozją" trzonu inkluzji oraz doprowadzaniem do układu materiału o obniżonej lepkości. Przy niewielkim tempie rekrystalizacji postępująca rotacja klastów powoduje w efekcie powstanie silnie asymetrycznych struktur typu δ-klastów, natomiast gdy tempo rekrystalizacji jest wysokie rozwijają się σ-klasty (Passchier i Simpson, 1986). Struktury te należą do sztandarowych wskaźników kinematycznych zwrotu ścinania i wielokrotnie używane były do rekonstrukcji kinematyki stref ścinania, w tym występujących na obszarze Polski (np. Mazur i Puziewicz, 1994). Warto wspomnieć o tym, że zrekrystalizowana otoczka o niskiej względnej efektywnej lepkości może wyraźnie wpłynąć na tempo rotacji klastów, prowadząc często do ich stabilizacji (Schmid i Podladchikov, 2004). Niekiedy obserwowane są złożone typy asymetrycznych struktur typu porfiroklastów, w tym obiekty, w których otoczeniu rozwijają się tzw. cienie ciśnień, będące obszarami reprecypitacji rozpuszczonego pod ciśnieniem mobilnego składnika w skale. Szczegółowa klasyfikacja rekrystalizujących porfiroklastów w strefach ścinania oraz struktur pokrewnych, wraz z omówieniem mechanizmów ich powstania, została przedstawiona w podręczniku „*Microtectonics*" autorstwa Passchier i Trouw (2005).

Podatnie przeobrażony budinaż

Budinaże tektoniczne występują w bardzo szerokim zakresie wymiarów, począwszy od pojedynczych ziaren mineralnych, przez typowe wystąpienia w skali odsłonięcia, aż po struktury w skali skorupowej. Inicjalny rozwój budinażu najczęściej wiąże się z aktywnością procesu pękania i fragmentacji kompetentnych warstw skalnych pod wpływem kompresji zorientowanej pod dużym kątem do ich wydłużenia (Ramberg, 1955). Powiązane z tym procesem rozciąganie w kierunku zgodnym z warstwowaniem prowadzi do stopniowej separacji budin wraz z narastającą, podatną deformacją ośrodka otaczającego, czemu towarzyszy niekiedy wypełnianie powstającej przestrzeni między budinami produktami segregacji metamorficznej lub wręcz topienia skał (Ghosh i Sengupta, 1999). Na tym etapie rozwoju struktury może też dochodzić do podatnego deformowania samych budin i tego typu podatnie przeobrażony budinaż (ang. *reworked boudinage*) był przedmiotem prac badawczych prowadzonych w ramach omawianego osiągnięcia naukowego. Wcześniejsze badania eksperymentalne (np. Ramberg, 1955; Mandal i Khan, 1991) oraz numeryczne (Lloyd i Ferguson, 1981; Samanta i Deb, 2014; Samanta i in., 2017) ujawniły wpływ szeregu czynników na stopień rozseparowania, orientację oraz ostateczny kształt podatnie deformowanych budin. Analizowano efekty związane z m.in. początkową orientacją i gęstością spękań, inicjalnym nachyleniem warstwy, niekoaksjalnością deformacji w tle oraz kontrastem reologicznym między warstwą a otoczeniem. Pomimo tak licznych i złożonych uwarunkowań podatnie zdeformowane budiny używane są jako wskaźniki zwrotu ścinania

oraz rozmiaru i stopnia niekoaksjalności deformacji (np. Mandal i in., 2007; Maeder i in., 2009), a także kontrastu reologicznego (Treagus i in., 1996; Samanta i in., 2017).

Na podstawie analizy morfologii licznych naturalnych wystąpień budinażu Goscombe et al. (2004) skonstruował rozbudowany schemat klasyfikacyjny struktur budinażowych, w tym budinażu podatnie przeobrażonego pod wpływem postępującej lub późniejszej, nałożonej deformacji. Należy podkreślić, że liczność czynników warunkujących oraz złożoność mechanizmów aktywnych podczas podatnej deformacji budin powodują znaczne trudności przy próbach opracowania spójnego schematu klasyfikacyjnego. Budinaż kostkowy (ang. *torn boudinage*) rozwija się w warunkach dominacji kruchego mechanizmu fragmentacji warstwy, w odróżnieniu od budin ciągnionych (ang. *drawn boudinage*) powstających przy wyraźnym udziale deformacji podatnej już w stadium inicjalnym. Początkowo ostrokrawędziste budiny kostkowe przy postępującym rozciąganiu zbudinażowanej warstwy nabierają pod wpływem podatnej deformacji beczułkowatych kształtów (Ramberg, 1955), o wklęsłych brzegach wewnętrznych, oddzielających sąsiadujące ze sobą budiny, i wypukłych zewnętrznych. Zależnie od kontrastu reologicznego oraz rozmiaru rozciągnięcia obserwowane jest dość szerokie spektrum morfologii budin (Samanta i Deb, 2014), które mogą przybrać niekiedy kształt „rybiej paszczy" (ang. *fish-mouth boudins*) lub przy pełnym zamknięciu ich wyciągniętych narożników postać wrzecionowatą.

Podczas postępującego podatnego przeobrażania zbudinażowanej warstwy może dochodzić do poślizgów na granicach między sąsiadującymi ze sobą budinami. Zwrot poślizgu względem zwrotu ścinania w tle stanowi podstawę do wyróżnienia dwóch genetycznych wariantów asymetrycznego budinażu: budinażu ze ścinania przy syntetycznym poślizgu (ang. *shear band boudinage*) oraz budinażu typu kostek domino przy poślizgu antytetycznym (ang. *domino boudinage*). Należy zauważyć, że asymetria budin może być związana zarówno z przeobrażeniem zbudinażowanej warstwy pod wpływem niekoaksjalnej deformacji, jak i z inicjalną skośnością spękań między budinami. Początkowa orientacja spękań, obok wydłużenia budin oraz kontrastu lepkości, jest istotnym czynnikiem wpływającym na rotację i deformację budin. Przy przeciwnej początkowej wergencji spękań może dochodzić do rozwoju asymetrycznych struktur o odmiennym zwrocie rotacji i poślizgu, które w efekcie stanowią względem siebie lustrzane odbicie. Dodatkowe komplikacje może powodować początkowe nachylenie warstwy względem kierunków głównych przepływu tła, skutkujące rotacją budin nawet w przypadku ścinania czystego. Sprawia to, że asymetryczny budinaż powinien być traktowany z dużą ostrożnością przy analizie zwrotu ścinania (Passchier i Druguet, 2002; Goscombe i Passchier, 2003).

Metodyka badawcza

Podstawową metodą badawczą stosowaną podczas realizacji omawianych prac były symulacje komputerowe, które wykonywane były z użyciem własnych narzędzi numerycznych, zaimplementowanych w środowisku obliczeniowym MATLAB. W analizach rozwoju podatnych struktur przydyslokacyjnych do obliczania pola prędkości stosowano jawne wyrażenia analityczne. Zostały one otrzymane przez zastosowanie potrójnego przejścia granicznego w rozwiązaniu analitycznym opisującym pole przemieszczeń w izotropowym ośrodku sprężystym wokół mechanicznej niejednorodności (inkluzji) o

kształcie elipsoidy (Eshelby, 1959). W pierwszym kroku przeprowadzono przejście graniczne odpowiadające przypadkowi ośrodka nieściśliwego (rozwiązanie w granicy współczynnika Poissona dążącego do 1/2), a otrzymane rozwiązanie sprężyste po zinterptowaniu pola przemieszczeń jako pola prędkości, zgodnie z tzw. zasadą korespondencji (Biot, 1954), bezpośrednio odpowiada rozwiązaniu dla ośrodka lepkiego. Następnie otrzymane wyrażenia zostały dostosowane do przypadku eliptycznej inkluzji (w granicy długości jednej z osi głównych inkluzji dążącej do zera) o zanikającej lepkości (w granicy zerowania stosunku lepkości między inkluzją a otoczeniem), co odpowiada przypadkowi szczeliny pozbawionej tarcia. Omawiane wyprowadzenia zostały szczegółowo opisane w załączniku pracy A1.

Przeprowadzone symulacje numeryczne trójwymiarowych struktur przydyslokacyjnych bazują na połączeniu kodu do obliczania rotacji i deformacji powierzchni poślizgu oraz kodu do wyznaczania pola prędkości w jej otoczeniu. Obliczenia pola prędkości wymagają uwzględnienia bieżącego kształtu powierzchni poślizgu oraz jej orientacji względem kierunków własnych przepływu tła. Prosta, pasywna ewolucja powierzchni poślizgu sprawia, że zachowuje ona swój eliptyczny charakter, co umożliwia sukcesywne obliczanie pola prędkości na podstawie opracowanych wyrażeń analitycznych. Analiza rozwoju struktur deformacyjnych odbywała się z wykorzystaniem adaptacyjnych metod numerycznego całkowania trajektorii punktów znajdujących się w otoczeniu powierzchni poślizgu. Ze względu na trójwymiarowy charakter struktury i związany z tym duży rozmiar danych, a także obecność dość złożonych obliczeniowo operacji w autorskiej implementacji zastosowano szereg optymalizacji, które finalnie pozwoliły na znaczne zredukowanie czasu obliczeń.

Metody analityczne nie mogą zostać bezpośrednio zastosowane do modelowania ewolucji złożonych, niejednorodnych struktur takich jak inkluzje skrzydlate, czy też podatnie przeobrażany budinaż. Aby przeanalizować ich rozwój prowadzono systematyczne, dwuwymiarowe symulacje komputerowe bazujące na tzw. mieszanym sformułowaniu metody elementów skończonych dla nieściśliwych przepływów Stokesa (np. Elman i in., 2014). Badania numeryczne prowadzone były z wykorzystaniem autorskich kodów zaimplementowanych w środowisku MATLAB, w oparciu o rozwijany od 2006 r. zoptymalizowany kod MILAMIN (Dabrowski i in., 2008; www.milamin.org). Ze względu na rozwój dość złożonych kształtów badanych struktur deformacyjncyh prowadzone symulacje wymagały użycia silnie adaptacyjnych siatek obliczeniowych, które były zagęszczane w bezpośrednim sąsiedztwie analizowanych obiektów. Zastosowane podejście pozwoliło na użycie domeny obliczeniowej o dużych względnych rozmiarach i w efekcie uniknięcie niepożądanych efektów brzegowych. Symulacje prowadzone były aż do osiągnięcia bardzo znacznych rozmiarów odkształcenia, co stanowiło jedno z poważniejszych wyzwań numerycznych podczas prowadzonych badań. Z jednej strony narastająca podczas symulacji złożoność kształtu struktur powodowała postępujący przyrost ilości elementów obliczeniowych, w tym niekiedy o bardzo niewielkich rozmiarach. Z drugiej strony, osiągnięcie dużych odkształceń w symulacjach komputerowych, przy zachowaniu odpowiedniego poziomu numerycznej dokładności, wymagało użycia bardzo licznych kroków czasowych, co stanowiło szczególne wyzwanie w przypadku materiałów o nieliniowej reologii, wymagających numerycznych iteracji dla każdego kroku czasowego.

Dzięki zastosowaniu silnie zoptymalizowanego kodu MILAMIN, a także wydajnych, wielowątkowych metod rozwiązywania układów równań liniowych oraz szybko zbieżnych metod iteracyjnych dla problemów nieliniowych udało się przeprowadzić systematyczne symulacje rozwoju analizowanych struktur. Pozwoliło to na szczegółowe rozpoznanie wpływu szeregu parametrów na rozwój struktur deformacyjnych w badanych modelach. Niektóre zestawy symulacji prowadzone były seryjnie z wykorzystaniem znajdującego się w Państwowym Instytucie Geologicznym-PIB klastra obliczeniowego Neptun.

Omówienie publikacji wchodzących w skład prezentowanego osiągnięcia naukowego

Poniżej omówione zostaną wyniki prac badawczych zawarte w publikacjach stanowiących przedstawiane osiągnięcie naukowe. W punkcie pierwszym zaprezentowane zostaną wyniki badań dotyczących rozwoju podatnych struktur przydyslokacyjnych. Zagadnieniu temu w całości poświęcone były publikacje A1 i A4 oraz w części artykuł A5. W kolejnym punkcie omówiony zostanie mechaniczny model rozwoju inkluzji skrzydlatych, który został szczegółowo przedstawiony w publikacji A3, a w publikacji A5 wspominany jest w kontekście analizy kinematycznej zwrotu ścinania. Ostatni punkt omówienia poświęcony będzie zagadnieniom związanym z podatnie przeobrażanym budinażem. Wyniki tych badań zostały opublikowane w pracach A2 i A5 oraz A6.

Podatne struktury przydyslokacyjne, w tym fałdy futerałowe, rozwijające się wokół powierzchni poślizgu w strefach ścinania (publikacje A1, A4 oraz A5)

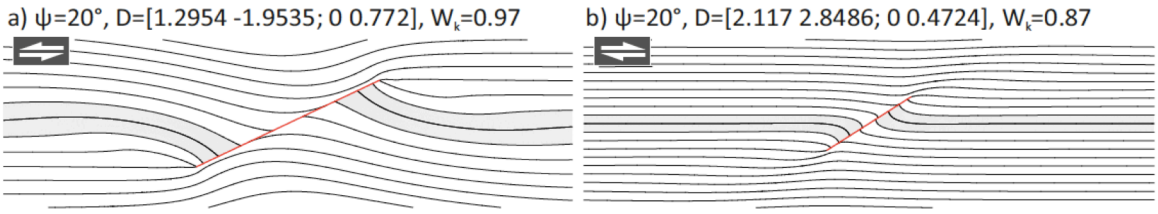
W publikacji A1 przedstawiono wyniki prac badawczych mających na celu rozpoznanie wpływu efektów trójwymiarowej deformacji na rozwój podatnych struktur przydyslokacyjnych (ang. *flanking structures*). Analizowano rozwój struktur wokół izolowanej, eliptycznej powierzchni poślizgu o zaniedbywalnym tarciu w ośrodku o charakterystyce izotropowego płynu o liniowej lepkości. W szczególności nie uwzględniano efektów mechanicznych związanych z warstwowaniem, które w przypadku skał o silnie rozwiniętej foliacji mogą niekiedy skutkować anizotropią lepkości. Ważnym parametrem geometrycznym, którego wpływ był systematycznie badany podczas prowadzonych analiz teoretycznych oraz symulacji numerycznych, było początkowe wydłużenie powierzchni poślizgu. W oddaleniu od zaburzającej lokalne pole prędkości powierzchni poślizgu odkształcenie tła miało charakter dwuwymiarowego ścinania prostego lub czystego w płaszczyźnie XZ. W większości analizowanych przypadków jedna z osi głównych eliptycznej powierzchni poślizgu skierowana była zgodnie z osią Y, co prowadziło do rozwoju struktur o symetrii jednoskośnej. Dla kilku wyselekcjonowanych układów przedstawiono wyniki modelowania trójskośnych struktur powstających przy skośnym ustawieniu powierzchni poślizgu względem kierunków głównych (XYZ) odkształcenia tła.

Podczas prowadzonych badań opracowano szereg wyników analitycznych, które zostały przedstawione i omówione w publikacji A1. Analizowano m.in. skok prędkości na powierzchni poślizgu w zależności od jej wydłużenia, kierunek poślizgu względem przyłożonego kierunku ścinania w tle, a także rotację i deformację powierzchni poślizgu wraz z narastającym odkształceniem w otoczeniu. Przeprowadzono także szczegółową analizę ewolucji przemieszczenia wzdłuż powierzchni poślizgu, a dla granicznych przypadków dwuwymiarowych uzyskano jawne wyrażenia analityczne opisujące

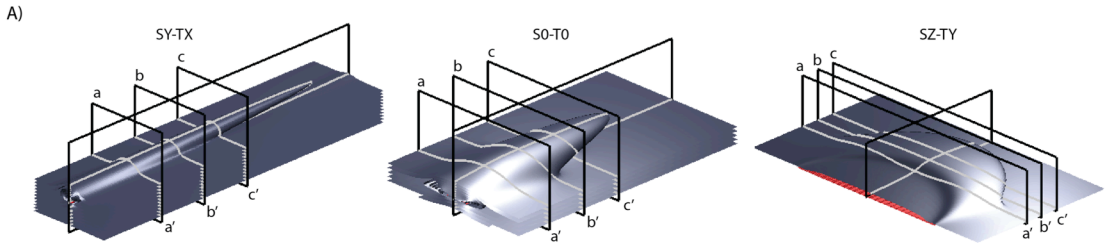
znormalizowane rozsunięcie centralnego horyzontu dla ścinania zarówno prostego, jak i czystego. Dzięki systematycznym symulacjom numerycznym rozpoznano ilościowo efekty związane ze zróżnicowaniem początkowego wydłużenia powierzchni poślizgu. Warto nadmienić, że obserwowana w centralnej płaszczyźnie XZ morfologia podatnych struktur przydyslokacyjnych nie wykazywała znaczących różnic przy zwiększaniu początkowego wydłużenia powierzchni poślizgu w kierunku Y ponad przypadek początkowo kołowej powierzchni poślizgu.

Przy znacznym rozmiarze ścięcia zaobserwowano rozwój struktur oczkowych w prostopadłych do kierunku ścinania przekrojach YZ. Obserwacja ta pozwoliła na sformułowanie w artykule A1 hipotezy o możliwości rozwoju fałdów futerałowych wokół eliptycznych powierzchni poślizgu aktywowanych w strefach ścinania prostego. Koncepcja ta była mocno rozwijana w późniejszym okresie i prezentowana w szeregu publikacji, w tym w należącej do przedstawianego cyklu publikacji A4. W pracy A1 omówiono także morfologię trójskośnych podatnych struktur przydyslokacyjnych, których rozwój badano ustawiając powierzchnię poślizgu w modelu skośnie względem głównych kierunków odkształcania. Podatne struktury przydyslokacyjne o trójskośnej symetrii obserwowane były w terenie (w publikacji zaprezentowano przykłady wystąpień z greckiej wyspy Serifos), a ich cechą charakterystyczną jest uginanie w obrębie powierzchni foliacji lineacji mineralnej w bezpośrednim sąsiedztwie powierzchni poślizgu. Należy podkreślić, że dzięki przeprowadzonym symulacjom numerycznym udało się wprost wykazać możliwość powstania trójskośnych struktur przydyslokacyjnych w warunkach płaskiego, dwuwymiarowego stanu odkształcenia w otoczeniu, bez konieczności odwoływania się do złożonej, trójskośnej deformacji tła. Analiza trójskośnych podatnych struktur przydyslokacyjnych może być pomocna przy określaniu kinematyki deformacji, a także przy szacowaniu rozmiaru odkształcenia w strefach ścinania.

Ze względu na swoje rozpowszechnienie podatne struktury przydyslokacyjne są często używane w analizie zwrotu ścinania. Niestety są to struktury dość problematyczne z punktu widzenia analizy kinematycznej. Ekstensyjny kliważ krenulacyjny jest jednym z częściej używanych wskaźników zwrotu ścinania. We wprowadzeniu wspomniano, że struktury o geometrii ekstensyjnego kliważu krenulacyjnego mogą rozwijać się w warunkach ogólnego ścinania wokół powierzchni poślizgu o orientacji zbliżonej do metastabilnego asymptotycznego kierunku skracania (repulsor). Tak zorientowane powierzchnie doświadczają antytetycznej rotacji, lub wręcz stagnacji, w reżimie stałej akumulacji



Ryc. 1
a) Ekstensyjny kliważ krenulacyjny powstający wokół powierzchni poślizgu w warunkach sinistralnego ścinania. b) Struktura przydyslokacyjna rozwinęta w warunkach dekstralnego ścinania. W opisie podano wartości początkowej orientacji powierzchni poślizgu ψ, tensora gradientu odkształcenia D oraz kinematycznego wskaźnika wirowości W_k.



Ryc. 2
Morfologia fałdów futerałowych powstających wokół rotujących powierzchni poślizgu w warunkach zróżnicowanego udziału ścinania czystego: A) konstrykcja, B) płaski stan odkształcenia (ścinanie proste), C) spłaszczanie.

syntetycznego poślizgu, co wraz z postępującym ścinaniem w tle może prowadzić do rozwoju wyraźnego rozsunięcia i powiązanych z tym silnych ugięć foliacji (ryc. 1a). Charakterystyczne dla tego typu struktur jest to, że wzdłuż powierzchni poślizgu obserwowane jest przejście od odwróconych do normalnych ugięć foliacji. Zbliżone wyglądem ekstensyjne struktury przydyslokacyjne (ryc. 1b) mogą rozwinąć się wokół typowych, syntetycznie rotujących powierzchni, które do pewnego etapu akumulują antytetyczny poślizg, zanim nastąpi przejście w poślizg syntetyczny oraz rozwój charakterystycznych, haczykowatych fałdków obalonych. W porównaniu z ekstensyjnym kliważem krenulacyjnym tego typu struktury charakteryzują się mniejszym rozsunięciem foliacji, a także słabiej rozwiniętym przejściem od odwróconego do normalnego jej uginania. Niestety, nie są to cechy wybitnie diagnostyczne i w warunkach terenowych, przy często niepełnym obrazie struktury, może dochodzić do pomyłek interpretacyjnych i w efekcie omyłkowego oznaczenia zwrotu ścinania. Szersza dyskusja tego zagadnienia została przedstawiona w publikacji A5.

W publikacji A4 przedstawiono wyniki analiz rozwoju fałdów futerałowych powstających wokół eliptycznych powierzchni poślizgu w warunkach ogólnego ścinania, ale z zachowaniem jednoskośnej symetrii przepływu. W badaniach skupiono się na przypadku ścięciowo reaktywowanego spękania tensyjnego o inicjalnym przekroju kołowym. Przyjęto także równoległy do płaszczyzny XY kierunek foliacji, co odpowiada jej położeniu asymptotycznemu. Przy takich założeniach otrzymano siedem istotnie różnych konfiguracji początkowych spośród dwunastu ogólnych przypadków jednoskośnego przepływu, w którym na proste ścinanie nałożona jest trójwymiarowa składowa ścinania czystego (Tikoff i Fossen, 1999). W symulacjach numerycznych analizowano rozwój fałdów futerałowych przy systematycznie zwiększanym udziale składowej czystego ścinania. Ewolucja struktury została szczegółowo omówiona dla ważnych rodzajów odkształcenia w tle: konstrykcji, płaskiego stanu odkształcenia (referencyjny model ścinania prostego) oraz spłaszczania (ryc. 2). W ośrodku poddanym konstrykcji obserwowano rozwój silnie wydłużonego, tubularnego fałdu futerałowego. W tym przypadku struktury oczkowe obserwowane na przekrojach YZ wykazywały niemalże idealnie kołowe kontury. Dla referencyjnego ścinania prostego obserwowano morfologię typowych struktur oczkowych, charakteryzujących się układem niekoncentrycznych, asymetrycznych konturów o kształcie zbliżonym do elips, a w przekrojach przecinających powierzchnię poślizgu wykazujących bardzo wskaźnikową geometrię typu kowadła. W warunkach spłaszczania nałożonego prostopadle do kierunku

ścinania struktury oczkowe, zgodnie z oczekiwaniami, charakteryzowały się silnym wydłużeniem w kierunku Y. W przekrojach przecinających powierzchnię poślizgu, w jej bezpośrednim sąsiedztwie obserwowane było wyraźne pogłębienie spłaszczenia struktury, która przybierała cechy biwergentnego fałdu przydyslokacyjnego. Należy zauważyć, że aktywne w tle spłaszczanie skutkowało rozwojem niecylindrycznego fałdu o dość łagodnym wygięciu osi, z kątem rozwarcia większym niż 90°, co sprawia, że analizowana struktura nie jest *sensu stricto* fałdem futerałowym.

W toku badań przeprowadzono ilościową analizę geometrii struktur oczkowych. Skupiono się na badaniu wydłużenia (stosunku długości osi głównych) zewnętrznych konturów oczek. Analiza wyników symulacji pozwoliła na zaobserwowanie i scharakteryzowanie wyraźnie malejącego trendu między wydłużeniem oczek a parametrem Flinna tensora całkowitego odkształcenia (tensor odkształcenia Greena), co jest zgodne z wynikami uzyskanymi na podstawie obserwacji terenowych (Alsop i Holdsworth, 2006). Dla poszczególnych rodzajów badanego odkształcenia tła (konstrykcja, płaski stan odkształcenia, spłaszczanie) określono także wskaźnikowe zakresy wartości wydłużenia oczek. Szczegółowe analizy pozwoliły wykazać, że wydłużenie zewnętrznego konturu w strukturze oczkowej można dość dobrze skorelować ze stosunkiem składowej odkształcenia w kierunku Y do mniejszej ze składowych mierzonych w płaszczyźnie XZ.

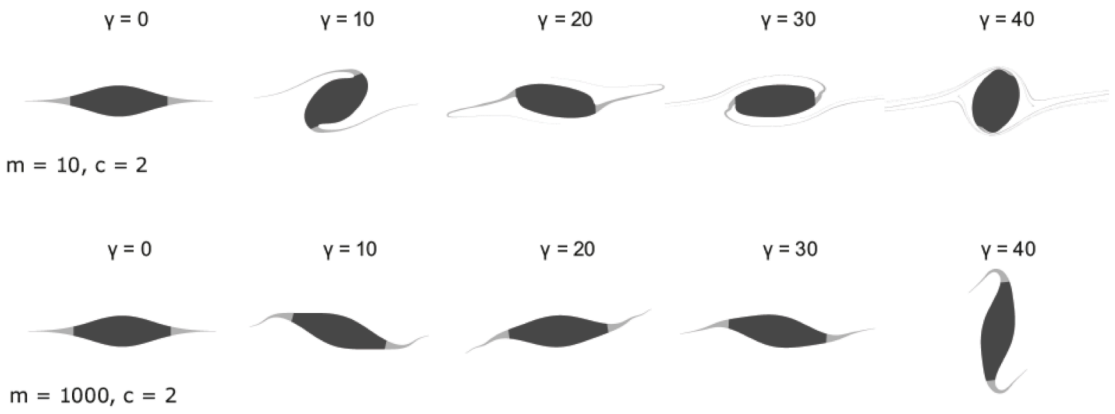
Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość powstania silnie niecylindrycznych fałdów w toku rozwoju podatnych struktur przydyslokacyjnych wokół powierzchni poślizgu aktywnych w ośrodku poddanym odkształceniu o dominacji ścinania prostego. Już niewielki udział ścinania czystego może mieć wyraźny wpływ na morfologię struktury, a w szczególności na wydłużenie struktury oczkowej. Transpresja powiązana z rozciąganiem w kierunku kinematycznej osi Y skutkuje rozwojem niecylindrycznych fałdów o łagodnym wygięciu osi, które nie mogą zostać sklasyfikowane jako *sensu stricto* fałdy futerałowe, a struktury oczkowe obserwowane w przekroju poprzecznym przyjmują charakter sprzężonych, biwergentnych fałdów przydyslokacyjnych, co w terenie może prowadzić do błędnego oznaczenia kierunku ścinania. Wydłużenie struktur oczkowych obserwowanych w płaszczyznach YZ może zostać wykorzystane do oceny rozmiaru odkształcenia, a w szczególności do oszacowania udziału składowej rozciągania lub skracania w kierunku Y.

Inkluzje skrzydlate (publikacje A3 i A5)

Podjęte badania miały na celu opracowanie i przeanalizowanie mechanicznego modelu ewolucji inkluzji skrzydlatych (ang. *winged inclusions*), szczególnego typu rotujących inkluzji tektonicznych w strefach ścinania prostego, oraz ocenę ich przydatności w analizie kinematycznej zwrotu ścinania oraz rozmiaru odkształcenia w tle. U podstaw prowadzonych badań legła koncepcja rozwoju inkluzji skrzydlatych pod wpływem podatnej deformacji nierekrystalizujących obiektów o początkowej geometrii ϕ-klastów w warunkach niekoaksjalnego ścinania w otoczeniu. Dobrym przykładem pierwotnej struktury dla inkluzji skrzydlatych są budiny ciągnione (ang. *drawn boudins*), będące późnym stadium rozwoju budinażu szyjkowego (ang. *pinch-and-swell*) (Goscombe et al., 2004).

Podczas systematycznie wykonywanych symulacji numerycznych skupiono się na analizie ewolucji kształtu izolowanych, początkowo ϕ-kształtnych inkluzji o jednorodnej strukturze wewnętrznej zanurzonych w ośrodku poddanym ścinaniu prostemu w tle. Do analizy deformacji inkluzji oraz ośrodka otaczającego zastosowano izotropowy model płynu w wariancie newtonowskiego lub potęgowego (model Carreau), a ważnym parametrem charakteryzującym badany układ był efektywny stosunek lepkości między inkluzją a otoczeniem. Początkowa geometria ϕ-kształtnej inkluzji reprezentowana była z wykorzystaniem odpowiednio „sklejonych", lustrzanie odbitych krzywych Gaussa, a ich szerokość (standardowe odchylenie) parametryzowała jej inicjalne wydłużenie. W celu usprawnienia ilościowej analizy wyników opracowana została pół-automatyczna metoda podziału deformowanego obiektu na część trzonową (ang. *core*) i skrzydła (ang. *wings*). Ostatecznie, po przetestowaniu szeregu procedur, zdecydowano się na użycie podejścia opartego na tzw. α-kształtach (ang. *α-shapes*) (Edelsbrunner i in., 1983).

Wyniki symulacji oraz ich analizy, wraz z obserwacjami terenowymi stanowiącymi motywację dla prowadzonych badań, a także przykładowe zastosowania opracowanych modeli przedstawione zostały w publikacji A3. Do publikacji dołączone zostały w formie elektronicznego suplementu animacje obrazujące ewolucję inkluzji skrzydlatych dla analizowanych wartości stosunku lepkości oraz początkowego wydłużenia inkluzji. Dzięki przeprowadzonym badaniom numerycznym udało się wykazać szereg prawidłowości rządzących rozwojem badanej struktury. Już we wczesnym stadium obserwowano wyraźne wyodrębnianie centralnej części inkluzji, która na późniejszych etapach tworzyła dość zwarty trzon podlegający deformacji oraz rotacji w sposób zbliżony do zachowania eliptycznych inkluzji w strefach ścinania (Mancktelow, 2013). W szczególności rejestrowano wyraźnie podwyższoną prędkość rotacji wydłużonej części trzonowej inkluzji w chwili jej prostopadłego ustawienia względem kierunku ścinania. We wszystkich analizowanych przypadkach obserwowano syntetyczne obracanie trzonu, bez wyraźnych tendencji do jego stabilizacji. Mniejsze wydłużenie centralnej partii inkluzji skutkowało większym średnim tempem rotacji. Już we wczesnym stadium deformacji skrzydłowe części inkluzji podlegaływyraźnie mocniejszemu rozciąganiu, a także wolniejszej rotacji od jej trzonu, co



Ryc. 3
Rozwój morfologii inkluzji skrzydlatych wraz z narastającym rozmiarem ścięcia γ dla stosunku lepkości m =10 (górny rząd) i 1000 (dolny rząd) oraz znormalizowanego parametru standardowego odchylenia c określającego szerokość pierwotnej ϕ–kształnej inkluzji wynoszącego 2.

prowadzi do ich postępującego różnicowania. W przypadku niskiego kontrastu lepkości między inkluzją a otoczeniem proces ten prowadził do skrajnego ścieniania skrzydeł inkluzji, a ich wolniejsza rotacja skutkuje rozwojem struktury o spiralnych ramionach (ryc. 3; górny rząd). Przy narastającym odkształceniu obserwowano wielokrotne nawinięcia silnie rozciągniętych skrzydeł wokół stabilnie rotującego trzonu inkluzji. W symulacjach ze zwiększonym kontrastem lepkości proces ten tracił na znaczeniu, a rotacja skrzydeł była jedynie okresowo opóźniona względem rotacji trzonu (ryc.3; dolny rząd). W tym reżimie zarejestrowano uaktywnienie epizodycznego rozwoju fałdów w obrębie skrzydeł inkluzji.

Zaobserwowany stosunkowo regularny przebieg odkształcania trzonu inkluzji skrzydlatych stał się zachętą do podjęcia próby jego bezpośredniego porównania ze ścieżkami deformacji obiektów idealnie eliptycznych (Bilby i Kolbuszewski, 1977). W celach porównawczych szukano dopasowania między zaobserwowanymi a teoretycznymi krzywymi rotacji dla elips. Należy podkreślić, że stopień dopasowania był w wielu przypadkach niestety dość niski, a uzyskane stosunki długości osi zastępczych elips były wyraźnie większe niż te otrzymane na podstawie analizy geometrycznej wyników symulacji. Pozwoliło to na wyciągnięcie wniosku, iż trzon inkluzji skrzydlatej obraca się wyraźnie wolniej niżby to wynikało z jego kształtu, co wskazuje na istotną rolę skrzydeł w kształtowaniu tempa rotacji tego typu obiektów. Warto też podkreślić niewielki, ale systematyczny trend spadkowy wydłużenia trzonu inkluzji, co kontrastuje z oczekiwaną periodyczną ewolucją kształtu inkluzji eliptycznych o odpowiednio wysokiej lepkości względem otoczenia. Opisane zachowanie może być wiązane ze słabym, ale jednak aktywnym transferem materiału z części trzonowej do partii skrzydłowych inkluzji.

Przeprowadzone badania pozwoliły na szczegółowe i systematyczne rozpoznanie ewolucji inkluzji tektonicznych o początkowej geometrii typu ϕ-klastu deformowanych pod wpływem działającego w tle ścinania prostego. We wszystkich analizowanych przypadkach zaobserwowano syntetyczną względem zwrotu ścinania, monotoniczną rotację trzonowej partii inkluzji skrzydlatej, która prowadziła do rozwoju wyraźnie asymetrycznej, a w przypadku niskiego kontrastu lepkości wręcz spiralnej struktury. Na pierwszy rzut oka zaobserwowana asymetria powstających struktur zdaje się ugruntowywać rolę inkluzji skrzydlatych jako kinematycznych wskaźników zwrotu ścinania. W tym zakresie bezdyskusyjna jest użyteczność inkluzji skrzydlatych o spiralnych ramionach. Co więcej, na podstawie analizy krotności zwinięcia spiralnych ramion inkluzji, które odzwierciedlają ilość jej obrotów, można by się wręcz pokusić o ocenę rozmiaru ścięcia w ośrodku otaczającym. Niestety, nie znaleziono naturalnych przykładów silnie spiralnych inkluzji skrzydlatych, co może mieć związek z niskim potencjałem zachowania skrajnie ścienionych ramion w warunkach dynamicznej rekrystalizacji w strefach ścinania. W przypadku wysokiego kontrastu lepkości między inkluzją a otoczeniem w symulacjach numerycznych obserwowano jej cykliczną ewolucję, w tym rozwój asymetrycznych struktur o łagodnie spiralnym charakterze, które w toku postępującej deformacji ulegały niemalże pełnemu rozprostowaniu, a wraz z dalszym obrotem trzonu ponownemu asymetrycznemu zwinięciu. Z jednej strony ogranicza to potencjał użycia tego rodzaju inkluzji skrzydlatych przy analizie zwrotu ścinania, a z drugiej w pełni dyskwalifikuje je jako wskaźnik rozmiaru odkształcenia. Największym problemem okazało się jednak udokumentowanie etapu rozwoju struktury, w

którym przy niewielkim syntetycznym wychyleniu długiej osi jej trzonu względem kierunku ścinania przyjmuje ona wygląd łudząco podobny do sigmoidalnych inkluzji tektonicznych typu rekrystalizujących σ_a- i σ_b-klastów. W takim przypadku omyłkowa interpretacja prowadzi niestety do błędnego oznaczenia zwrotu ścinania.

W zasadzie nie powinno być problemu z odróżnieniem w terenie rekrystalizujących struktur typu σ-klastów od inkluzji skrzydlatych powstających w efekcie przerotowania i podatnej deformacji nierekrystalizujących ϕ-klastów typu budin ciągnionych. Jednak analiza opublikowanych interpretacji kinematycznych dla podatnych stref ścinania wskazuje na to, że tego typu błędy interpretacyjne mogą być dość szeroko rozpowszechnione. Problem ten został poruszony w należącej do omawianego osiągnięcia publikacji A5. W pracy tej przedstawiono także propozycje reinterpretacji opublikowanych oznaczeń zwrotu ścinania opartych na analizie asymetrycznych inkluzji tektonicznych. Szczegółowo opisane w publikacji A3 wyniki symulacji wskazują na to, że analiza stowarzyszonych struktur fałdowych może być pomocna przy odróżnieniu inkluzji skrzydlatych od σ- lub δ-klastów i innych pokrewnych struktur. Przeprowadzone prace pozwoliły także na wysnucie dodatkowego wniosku o możliwości powstania fałdków odkorzenionych (ang. *rootless folds*) w warunkach ścinania prostego podczas ewolucji inkluzji skrzydlatych, co pozwala na odmienną od standardowej interpretację ich znaczenia w analizie kinematycznej.

Podatna deformacja budinażu kostkowego w warunkach ścinania prostego i czystego (publikacje A2, A5 i A6)

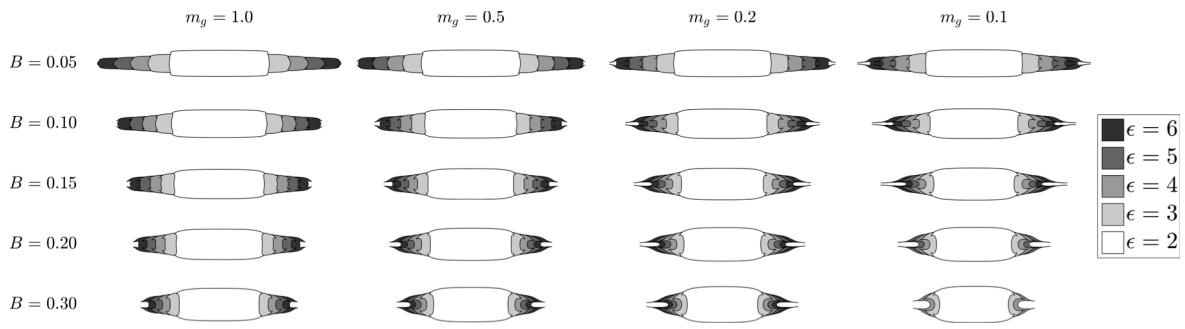
Celem prowadzonych badań było rozpoznanie czynników wpływających na przebieg podatnej deformacji zbudinażowanej warstwy skalnej, a także ocena przydatności tego typu struktur pod kątem m.in. analizy kinematycznej. Szczególną uwagę poświęcono ewolucji kształtu i orientacji budin oraz procesowi ich separacji. Analizowano rozwój struktur deformacyjnych w obrębie samych budin, a także w ich bezpośrednim otoczeniu. Przeprowadzono systematyczne symulacje numeryczne, w trakcie których rozpoznawano przebieg procesów deformacyjnych w zależności od stosunku lepkości między budinami a otoczeniem, a także od ich początkowego wydłużenia oraz separacji.

W publikacji A2 przedstawione zostały wyniki symulacji numerycznych podatnego przeobrażenia periodycznie zbudinażowanej warstwy poddanej ścinaniu prostemu wzdłuż jej rozciągłości. W przypadku budin o początkowo prostokątnym przekroju i lepkości 10-krotnie większej od lepkości ośrodka otaczającego udokumentowano ich syntetyczną rotację, której towarzyszyła silna wewnętrzna deformacja. We wczesnej fazie prowadziło to do rozwoju budin romboidalnych, których kształty przy ścięciu przekraczającym $\gamma=20$ stawały się wyraźnie sigmoidalne. Budiny o dużo wyższej lepkości od otoczenia wykazywały wyraźną reorientację zależną od ich początkowego wydłużenia i tylko w niewielkim stopniu podlegały wewnętrznej deformacji. Założenia przyjęte w modelu nie dopuszczały dalszej separacji budin w fazie ich podatnego przeobrażenia. W tej sytuacji rotacja budin mogła być wspomagana jedynie poprzez ich podatną deformację wewnętrzną oraz poślizg wzdłuż rozgraniczających je granic. W konsekwencji zwiększanie parametru początkowej separacji sprzyjało rotacji budin, a szczegółowa analiza wyników przeprowadzonych symulacji pozwoliła na ilościowe ujęcie tego efektu.

Klasyczne modele hydrodynamiczne wskazują na to, że izolowane obiekty wydłużone w kierunku ścinania prostego rotują wolniej niż obiekty izometryczne, co znajduje też odzwierciedlenie we wczesnych fazach rotacji periodycznie ułożonych budin. Z kolei można oczekiwać, że podtrzymanie rotacji izometrycznych budin w periodycznym ciągu wymaga uaktywnienia ich wewnętrznej deformacji ze względu na wyraźną tendencję do zaciskania separujących je wąskich apertur. Przypuszczenia te zostały potwierdzone podczas analizy wyników symulacji komputerowych, które pokazały systematyczny spadek tempa rotacji budin kostkowych. W przypadku obiektów o wydłużonym przekroju tempo rotacji utrzymywało się lub wręcz wzrastało po osiągnieciu krytycznego poziomu reorientacji prowadzącego do utraty bliskiego kontaktu między wewnętrznymi ścianami sąsiadujących budin. Należy podkreślić, że tempo rotacji słabo odseparowanych budin było wielokrotnie niższe w porównaniu z tempem rotacji obiektów izolowanych.

W ramach opisanych w publikacji A2 prac badawczych przeprowadzono także modelowanie procesu podatnego przeobrażenia w warunkach ścinania prostego zbudinażowanej warstwy o ograniczonej długości. Wyniki symulacji wykazały, że budiny znajdujące się w krańcowych sektorach warstwy rotują szybciej, czemu towarzyszy ich separacja od reszty ciągu i migracja w kierunku prostopadłym do rozciągłości warstwy. W efekcie działania tych procesów ciąg budin przyjmuje sigmoidalne ułożenie o silnie zawiniętych końcówkach. Przy odkształceniu w tle o rozmiarze $\gamma>20$ dochodziło do rozwoju dość chaotycznego układu budin, w obrębie którego szczególnie mocno zredystrybuowane są obiekty znajdujące się pierwotnie w krańcowych sektorach warstwy. W pracy pokazano naturalne przykłady sigmoidalnych oraz chaotycznych ciągów budin występujących w obrębie silnie zmylonityzowaych marmurów. Rozwój tych struktur można tłumaczyć w ramach zaproponowanego powyżej schematu oraz wiązać z dużym rozmiarem odkształcenia zarejestrowanym w analizowanych skałach.

W publikacji A6 opisane zostały wyniki symulacji numerycznych procesu podatnego przeobrażenia regularnie zbudinażowanej warstwy w warunkach jej postępującego rozciągania. W badaniach skupiono się na obiektach o prostokątnym przekroju początkowym, ale uwzględniono też przypadek asymetrycznych budin romboidalnych. Dodatkowo analizowano efekty związane z wypełnieniem inicjalnej luki między budinami materiałem o obniżonej lepkości. Szczególnie interesujące wyniki uzyskano dla dotychczas słabo zbadanego reżimu niewielkiej, sięgającej kilku procent miąższości warstwy, początkowej separacji między budinami. W tym reżimie nawet w przypadku bardzo wysokiego stosunku lepkości między budiną a materiałem otaczającym obserwowano jej wyraźną podatną deformację. Zaobserwowano także rozwój nietypowych budin, cechujących się rozwojem wypukłych ścian wewnętrznych i płaskich lub lekko wklęsłych ścianach zewnętrznych. Przy początkowej separacji przekraczającej 20-30% miąższości warstwy rejestrowano typowy rozwój beczułkowatej geometrii budiny o wklęsłych ścianach wewnętrznych i lekko wypukłych ścianach zewnętrznych, zgodnie z opublikowanymi wcześniej wynikami symulacji numerycznych innych autorów (np. Samanta i Deb, 2014). Przy dużym współczynniku rozciągnięcia budiny o 10-krotnie większej lepkości od otoczenia wykazywały C-kształtne ściany wewnętrzne o charakterystycznym szponiastym zadarciu narożnika, a przy nieco niższym stosunku lepkości rozwijały się silnie rozciągnięte



Ryc. 4
Morfologia podatnie przeobrażonych budin kostkowych w funkcji współczynnika rozciągnięcia warstwy ε. W rzędach zaprezentowano wyniki dla różnych wartości parametru znormalizowanej przez miąższość warstwy początkowej szerokości luki międzybudinowej B, a w kolumnach różnicowany jest parameter stosunku lepkości materiały wypełnienia luki między budinami względem materiału otoczenia. Stosunek lepkości budiny względem otoczenia wynosi 5.

struktury typu „rybiej paszczy" (ang. *fish-mouth boudins*). W reżimie pośrednich wartości początkowej separacji zaobserwowano rozwój nieopisywanych dotychczas złożonych struktur charakteryzujących się występowaniem centralnej wypukłości w obrębie generalnie wklęsłej ściany wewnętrznej. Przeprowadzone systematyczne symulacje numeryczne pozwoliły na scharakteryzowanie szerokiego spektrum kształtów budin w zależności od wartości początkowej separacji, stosunku lepkości oraz stopnia rozciągnięcia warstwy. Dla wyselekcjonowanych przypadków przeprowadzono także analizy rozwoju struktur w obrębie deformowanych budin, a także w ich otoczeniu, w szczególności zwracając uwagę na ścienianie obszaru stanowiącego pierwotne wypełnienie luki między sąsiadującymi budinami, które tworzy charekterystyczną strukturę żyłową typu „muchy do smokingu" (ang. *bow-tie veins*), oraz stowarzyszone z nią fałdowanie w obszarze przyległym, tzw. fałdy zabliźniające (ang. *scar folds*).

Nie stwierdzono dużego wpływu nieliniowości reologicznej, a także początkowego wydłużenia budin na późniejszy rozwój ich kształtu. Natomiast wprowadzenie materiału o obniżonej lepkości w lukę między budinami spowodowało zauważalne zmiany w ewolucji ich kształtu (ryc. 4). Przy małej początkowej separacji już dwukrotnie niższa lepkość wypełnienia luki względem lepkości materiału otoczenia powodowała wyraźne osłabienie obserwowanej wcześniej tendencji do rozwoju centralnej wypukłości w obrębie wewnętrznych ścian budin. Przy dalszym obniżaniu lepkości wypełnienia centralna wypukłość nie rozwijała się na żadnym etapie deformacji. Obniżonej lepkości materiału między budinami towarzyszyło silne rozciąganie ich narożników, skutkujące rozwojem dość nietypowych struktur typu „rybiej paszczy", które, pozostając przy skojarzeniach ichtiologicznych, wyglądem przypominały głowę marlina.

Ważnym wynikiem prowadzonych prac było rozpoznanie wyraźnej tendencji do powstawania centralnego wybrzuszenia w obrębie wewnętrznych ścian budin przy początkowej ich separacji nie przekraczającej 20% miąższości warstwy. W publikacji A6 przedstawiono naturalne przykłady tego typu struktur, ale należą one raczej do rzadkości. Zahamowanie rozwoju wybrzuszenia w przypadku naturalnie przeobrażanych budin może być np. związane z odmiennym od założonego w modelu, niekostkowym początkowym kształtem budin, wskazującym na aktywność plastycznego ich odkształcania podczas

propagacji pierwotnych szczelin. Zdaje się to jednak przede wszystkim wskazywać na aktywność procesów rozpuszczania, mobilizacji i reprecypitacji materiału w obrębie luk międzybudinowych, która może prowadzić do ich dużej inicjalnej szerokości, bez udziału mechanizmu lepkiej deformacji na tym początkowym etapie. Co więcej, wyniki symulacji komputerowych pokazały, że przy obniżonej względem otoczenia lepkości materiału wypełniającego luki między budinami nawet w przypadku małych początkowych separacji nie dochodzi do rozwoju wybrzuszenia w obrębie ścian wewnętrznych budin. Silnie zlokalizowana deformacja w przestrzeni międzybudinowej może powodować zmiany strukturalne, np. redukcję rozmiaru ziarna, czy też zmiany teksturalne takie jak rozwój więźby krystalograficznej, co może dodatkowo prowadzić do efektywnie obniżonej lepkości materiału w tym obszarze.

Początkowa separacja budin ma wyraźny wpływ na ewolucję ich późniejszego wydłużenia. Budiny o niewielkiej początkowej separacji wykazywały silne rozciągnięcie nawet przy dużym stosunku lepkości. Na podstawie analizy wyników symulacji opracowane zostały zestawy krzywych pokazujących ewolucję wydłużenia budin oraz ich znormalizowanej separacji w zależności od wartości początkowych tych parametrów oraz stosunku lepkości między budinami a ośrodkiem otaczającym. W praktyce wyniki te mogą być przydatne do wyznaczania współczynnika rozciągnięcia w zdeformowanym ośrodku skalnym. Określenie wartości kluczowych dla metody parametrów jakimi są początkowa separacja oraz stosunek lepkości może bazować na szczegółowej analizie kształtu budiny. W publikacji A6 przedstawiono przykładowe szacowanie współczynnika rozciągnięcia na podstawie analizy geometrii zbudinażowanej i podatnie zdeformowanej warstwy amfibolitu. W toku analizy uwzględniono obecność wypełnienia przestrzeni między budinami materiałem o obniżonej lepkości, a także brano pod uwagę geometrię fałdów zabliźniających. W rezultacie otrzymano nie tylko szacunkową wartość współczynnika rozciągnięcia, ale także początkowej separacji między budinami oraz efektywnych stosunków lepkości między amfibolitem, łupkiem biotytowym oraz kwarcem tworzącym wypełnienie pierwotnej luki między budinami.

Prowadzone prace badawcze obejmowały także przypadek budin o romboidalnym przekroju początkowym. Przy konsekwentnie asymetrycznym, periodycznym ułożeniu romboidalne budiny rotują syntetycznie względem nachylenia ich wewnętrznych brzegów. Rotacja budin zachodzi pomimo tego, że wzdłuż rozciąganej warstwy nie występuje ścinanie proste. W przeprowadzonych symulacjach reorientacja sztywnych, romboidalnych budin zachodziła do momentu ułożenia ich dłuższej przekątnej wzdłuż kierunku rozciągania. Wykazano, że przy niewielkiej początkowej separacji kinematyczny model reorientacji typu „półka z książkami" (ang. *book-shelf model*; Mandl, 1987) stanowi bardzo dobre przybliżenie ewolucji ich orientacji. Zastosowanie materiału otoczenia o nieliniowym prawie płynięcia nie miało dużego wpływu na proces reorientacji budin, ale skutkowało rozwojem silnie asymetrycznych fałdków wokół rotujących kostkowych budin o przekroju kwadratowym.

Analizowano także ewolucję kształtu i orientacji romboidalnych budin charakteryzujących się niewielkim kontrastem lepkości względem materiału otaczającego. Zaobserwowano m.in. zanik rozwoju centralnej wypukłości na ścianach wewnętrznych przy zmniejszaniu ich początkowego nachylenia. W obrębie budin obserwowano rozwój odwróconego podginania

warstwowania w sąsiedztwie wewnętrznych brzegów, co wskazuje na aktywność zlokalizowanego poślizgu w tym obszarze. Silnie skośne romboidalne budiny, których wewnętrzne brzegi były początkowo nachylone pod kątem 60^{o} przeobrażały się w budiny sigmoidalne, czemu towarzyszyła wyraźna redukcja ich separacji. Podobnie jak w omawianym wcześniej przypadku ekstensyjnego kliważu krenulacyjnego obserwowano przejście od odwróconego do normalnego ugięcia warstwowania wzdłuż zdeformowanego wewnętrznego brzegu budiny. Reorientacja budiny znajduje odzwierciedlenie w asymetrycznym rozwoju struktur z nią sąsiadujących. Skośny charakter wykazywały zarówno zdeformowane pierwotne wypełnienia przestrzeni między budinami, jak i fałdy zabliźniające.

Wyniki symulacji przedstawione w publikacjach A2 i A5 wskazują na problemy ze stosowaniem asymetrycznego budinażu jako kinematycznego wskaźnika zwrotu ścinania. Podstawa trudność związana jest z poprawnym rozróżnieniem antytetycznie rotujących budin ze ścinania od syntetycznie rotującego budinażu typu kostek domino. Ugięcia warstwowania obserwowane w sąsiedztwie ścian wewnętrznych budin typu kostek domino przyjmują dość nieoczekiwanie charakter normalny. Powoduje to wyraźne upodobnienie tych struktur do budinażu ze ścinania, ale już rozwijającego się pod wpływem ścinania o przeciwnym zwrocie. Dodatkowym problemem jest rozwój asymetrycznych kształtów w efekcie podatnego przeobrażania budin o początkowym przekroju romboidalnym w warunkach koaksjalnego rozciągania warstwy. W tych przypadkach niekiedy pomóc może wskaźnikowy beczułkowaty kształt budin. Natomiast styl uginania warstwowania budin przy kontakcie ze ścianami wewnętrznymi może odzwierciedlać stopień ich początkowej skośności, który w przypadku deformujących się budin jest niestety ciężki do odtworzenia.

Podsumowanie

Przeprowadzone symulacje komputerowe pozwoliły na systematyczne zbadanie mechanicznych modeli rozwoju wybranych podatnych struktur deformacyjnych. Uzyskane wyniki umożliwiły rozpoznanie ich użyteczności dla kinematycznej analizy zwrotu ścinania, a także z punktu widzenia analizy reometrycznej oraz szacowania rozmiaru odkształcenia w ośrodkach geologicznych.

Za jedno z najważniejszych osiągnięć prezentowanego cyklu publikacji uznaję wykazanie na gruncie modelowania mechanicznego możliwości rozwoju fałdów futerałowych wokół eliptycznych powierzchni poślizgu w strefach ścinania. Przedstawiona interpretacja fałdów futerałowych jako trójwymiarowych podatnych struktur przydyslokacyjnych pozwala też spojrzeć w innym świetle na rolę i aktywność powierzchni poślizgu w strefach ścinania. Dzięki systematycznym symulacjom komputerowym udało się rozpoznać duże bogactwo morfologii trójwymiarowych struktur przydyslokacyjnych, w tym *sensu stricto* fałdów futerałowych, co może ułatwić geologom strukturalnym i tektonikom ich poprawną identyfikację i interpretację.

Za kolejne cenne osiągnięcie uważam rozpoznanie przebiegu podatnego przeobrażania ϕ-kształtnych inkluzji tektonicznych w warunkach ścinania prostego o dużym rozmiarze. Ze względu na złożoność kształtu tego typu struktur właściwe zbadanie ich ewolucji wymagało użycia wysokorozdzielczego modelowania numerycznego. Uzyskane wyniki

mogą zachęcić geologów do uwzględnienia w swoich analizach stref ścinania struktur związanych z nierekrystalizującymi, rotującymi inkluzjami tektonicznymi.

Przeprowadzone badania pozwoliły także na systematyczne rozpoznanie procesu podatnego przeobrażania kostkowego budinażu pod wpływem zarówno ścinania prostego, jak i postępującego rozciągania zbudinażowanej warstwy. W efekcie udało się zreprodukować szerokie spektrum opisanych już w literaturze kształtów budin, ale także udokumentować struktury dotychczas nieopisywane. Można spodziewać się, że opublikowane wyniki pozwolą geologom terenowym spojrzeć w nowy sposób na podatnie przeobrażony budinaż, a w szczególności w większym stopniu zwrócić uwagę na relacje między kształtem budin a stopniem ich separacji. Szczegółowe obserwacje w tym zakresie mogą przynieść cenne implikacje dla ogólnych rozważań dotyczących m.in. roli mechanizmu rozpuszczania pod ciśnieniem podczas podatnej deformacji.

Ważnym osiągnięciem było rozpoznanie ewolucji badanych struktur dla szerokiego spektrum warunków ścinania w tle. W przypadku przeobrażonego budinażu analizowano przebieg deformacji w warunkach zarówno prostego, jak i czystego ścinania. Natomiast w przypadku podatnych struktur przydyslokacyjnych udało się rozpoznać ich ewolucję w warunkach ogólnego (trójskośnego) ścinania w trzech wymiarach. Opracowane wyniki analiz morfologii wymodelowanych struktur mogą posłużyć do określenia kinematycznych warunków deformacji w naturalnych strefach ścinania, w tym stopnia jej niekoaksjalności.

Podczas prowadzonych badań szczególną uwagę poświęcono roli, jaką mogą odgrywać badane podatne struktury deformacyjne w kinematycznej analizie zwrotu ścinania. Wskazywano na konieczność zachowania daleko posuniętej ostrożności ze względu na niejednoznaczności interpretacyjne, które dotyczą też uznanych i szeroko stosowanych wskaźników kinematycznych. Opracowane wskazówki metodyczne mogą przyczynić się do zmiany spojrzenia na rolę omawianych podatnych struktur deformacyjnych jako kinematycznych wskaźników zwrotu ścinania, a także spowodować w niektórych przypadkach analiz terenowych konieczność reinterpretacji zwrotu ścinania, a w efekcie modyfikację lokalnych lub wręcz regionalnych rozwiązań tektonicznych.

Istotnym osiągnięciem było rozpoznanie możliwości oceny rozmiaru deformacji na podstawie analizy morfologii badanych struktur. Duży potencjał w tym zakresie można wiązać z budinażem przeobrażonym pod wpływem postępującego rozciągania. W ramach omawianego osiągnięcia naukowego zaproponowano ilościową ocenę współczynnika rozciągnięcia w ośrodku na podstawie szczegółowej analizy kształtu budin, ich separacji, a także morfologii zdeformowanego wypełnienia pierwotnej luki między budinami. Podczas analizy wyznaczany jest także stosunek lepkości między budinami a otoczeniem, co sprawia, że struktury te mogą też odgrywać rolę naturalnych reometrów. Należy jednak podkreślić, że podobnie jak w przypadku innych struktur tektonicznych, analiza tego typu daje raczej niewielkie możliwości określenia współczynnika charakteryzującego stopień reologicznej nieliniowości badanych materiałów.

Przeprowadzone symulacje komputerowe i analizy ich wyników pozwoliły osiągnąć zamierzony cel badawczy. Udało się szczegółowo przeanalizować szereg problemów, których rozwiązania były niekiedy dość zaskakujące. Niemniej jednak

wciąż pozostały ciekawe zagadnienia do zbadania, a w toku analiz pojawiły się także nowe pytania. W ramach omówianego cyklu publikacji przedstawiono uproszczoną dwuwymiarową analizę ewolucji ϕ-kształtnych inkluzji tektonicznych. W przyszłości, wraz z rozwojem możliwości obliczeniowych, można pokusić się o przeprowadzenie pełnej, trójwymiarowej analizy tego problemu. Interesującym uzupełnieniem przedstawionych badań byłoby przeanalizowanie procesu podatnego przeobrażania budinażu, w tym romboidalnego, w warunkach ogólnego ścinania. W opinii autora tego omówienia najciekawszym rozwinięciem omówionych badań byłoby systematyczne rozpoznanie roli mechanicznej anizotropii w rozwoju podatnych struktur deformacyjnych w strefach ścinania. Modele mechaniczne oparte na izotropowych związkach konstytutywnych w wielu przypadkach dostarczają nam wyniki zgodne z obserwacjami. Jest to dość intrygująca konstatacja, zważywszy na fakt, iż silnie zdeformowane w strefach ścinania skały cechują się ewidentnie anizotropowymi teksturami. Badania tego zagadnienia zostały już zainicjowane przez autora tego omówienia.

Literatura

Achramowicz S., Cymerman Z. (1992) Struktury linijne głównie w skałach metamorficznych. In: M.P. Mierzejewski (ed.), Badania elementów tektoniki na potrzeby kartografii wiertniczej i powierzchniowej. *Instrukcje i metody badań geologicznych Państwowego Instytutu Geologicznego*, 51, 105-115. Warszawa

Adamuszek M., Schmid D. W., Dabrowski M. (2011) Fold geometry toolbox–Automated determination of fold shape, shortening, and material properties. *Journal of Structural Geology*, *33*(9), 1406-1416

Adamuszek M., Schmid D. W., Dabrowski M. (2013) Theoretical analysis of large amplitude folding of a single viscous layer. *Journal of Structural Geology*, 48, 137–152

Adamuszek M., Dabrowski M. (2017) Sheath folds as a strain gauge in simple shear. *Journal of Structural Geology*, *102*, 21-36

Aerden D. (2005) Comment on "Reference frame, angular momentum, and porphyroblast rotation" by Dazhi Jiang and Paul F. Williams. *Journal of Structural Geology*, *27*(6), 1128-1133

Aleksandrowski P. (1992) Drobne uskoki i strefy ścinania (Minor faults and shear zones). In: M.P. Mierzejewski (ed.), Badania elementów tektoniki na potrzeby kartografii wiertniczej i powierzchniowej. *Instrukcje i metody badań geologicznych Państwowego Instytutu Geologicznego*, 51: 105-115. Warszawa

Alsop G. I., Holdsworth R. E. (2004) The geometry and topology of natural sheath folds: a new tool for structural analysis. *Journal of Structural Geology*, *26*(9), 1561-1589

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*(10), 1585-1604

Bastida F., Aller J., Bobillo-Ares N. C., Toimil N. C. (2005) Fold geometry: a basis for their kinematical analysis. *Earth-Science Reviews*, *70*(1-2), 129-164

Berthé D., Choukroune P., Jégouzo P. (1979) Orthogneiss, mylonite and non coaxial deformation of granites: the example of the South Armorican Shear Zone. *Journal of Structural Geology*, 1(1), 31-42

Bilby B. A., Kolbuszewski M. L. (1977) The finite deformation of an inhomogeneity in two-dimensional slow viscous incompressible flow. *Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences*, *355*(1682), 335-353

Biot M. A. (1954) Theory of stress-strain relations in anisotropic viscoelasticity and relaxation phenomena. *Journal of Applied Physics*, *25*(11), 1385-1391

Biot M. A. (1957) Folding instability of a layered viscoelastic medium under compression. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, *242*(1231), 444-454

Bjørnerud M. G., Zhang H. (1995) Flow mixing, object-matrix coherence, mantle growth and the development of porphyroclast tails. *Journal of Structural Geology*, *17*(9), 1347-1350

Bons P. D., Barr T. D., Ten Brink C. E. (1997) The development of δ-clasts in non-linear viscous materials: a numerical approach. *Tectonophysics*, *270*(1-2), 29-41

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

Carreras J., Estrada A., White S. (1977) The effects of folding on the c-axis fabrics of a quartz mylonite. *Tectonophysics*, *39*(1-3), 3-24

Ceriani S., Mancktelow N. S., Pennacchioni G. (2003) Analogue modelling of the influence of shape and particle/matrix interface lubrication on the rotational behaviour of rigid particles in simple shear. *Journal of Structural Geology*, *25*(12), 2005-2021

Cobbold P. R., Quinquis H. (1980) Development of sheath folds in shear regimes. *Journal of Structural Geology*, *2*(1-2), 119-126

Cymerman Z. (1989) Określanie zwrotu ścinania. *Przegląd Geologiczny*, *37*(12), 605-613

Cymerman Z. (1990) Ewolucja strukturalna jednostki sowiogórskiej na obszarze północnej części Wzgórz Bielawskich, Sudety. *Geologia Sudetica*, *24*(2), 191-283

Cymerman Z. (1992) Rotational ductile deformations in the Śnieżnik metamorphic complex (Sudetes). *Geological Quarterly*, *36*(4), 393-420

Dabrowski M., Krotkiewski M., Schmid D. W. (2008) MILAMIN: MATLAB-based finite element method solver for large problems. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, *9*(4)

Dabrowski M., Schmid D. W. (2011) A rigid circular inclusion in an anisotropic host subject to simple shear. *Journal of Structural Geology, 33*(7), 1169-1177

Dadlez R., Jaroszewski W. (1994) Tektonika. PWN. Warszawa

Edelsbrunner H., Kirkpatrick D., Seidel R. (1983) On the shape of a set of points in the plane. *IEEE Transactions on information theory*, *29*(4), 551-559

Elman H. C., Silvester D. J., Wathen A. J. (2014) *Finite elements and fast iterative solvers: with applications in incompressible fluid dynamics*. Oxford University Press, USA

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., Mancktelow N. S., Grasemann B. (2004) Progressive development of s-type flanking folds in simple shear. *Journal of Structural Geology*, *26*(12), 2191-2201

Fletcher R. C., Pollard D. D. (1999) Can we understand structural and tectonic processes and their products without appeal to a complete mechanics? *Journal of Structural Geology*, *21*(8-9), 1071-1088

Fossen H. (2016) Structural geology. Cambridge University Press

Fusseis F., Xiao X., Schrank C., De Carlo F. (2014) A brief guide to synchrotron radiation-based microtomography in (structural) geology and rock mechanics. *Journal of Structural Geology*, 65, 1-16

Ghosh S. K., Ramberg H. (1976) Reorientation of inclusions by combination of pure shear and simple shear. *Tectonophysics*, *34*(1-2), 1-70

Ghosh S. K., Sengupta S. (1999) Boudinage and composite boudinage in superposed deformations and syntectonic migmatization. *Journal of Structural Geology*, *21*(1), 97-110

Gomez-Rivas E., Bons P. D., Griera A., Carreras J., Druguet E., Evans L. (2007) Strain and vorticity analysis using small-scale faults and associated drag folds. *Journal of Structural Geology*, *29*(12), 1882-1899

Goscombe B. D., Passchier C. W. (2003) Asymmetric boudins as shear sense indicators—an assessment from field data. *Journal of Structural Geology*, *25*(4), 575-589

Goscombe B. D., Passchier C. W., Hand M. (2004) Boudinage classification: end-member boudin types and modified boudin structures. *Journal of Structural Geology*, *26*(4), 739-763

Grasemann B., Stüwe K. (2001) The development of flanking folds during simple shear and their use as kinematic indicators. *Journal of Structural Geology*, *23*(4), 715-724

Grasemann B., Stüwe K., Vannay J. C. (2003) Sense and non-sense of shear in flanking structures. *Journal of Structural Geology*, *25*(1), 19-34

Grasemann B., Martel S., Passchier C. (2005) Reverse and normal drag along a fault. *Journal of Structural Geology*, *27*(6), 999-1010

Griera A., Llorens M. G., Gomez-Rivas E., Bons P. D., Jessell M. W., Evans L. A., Lebensohn, R. (2013) Numerical modelling of porphyroclast and porphyroblast rotation in anisotropic rocks. *Tectonophysics*, 587, 4-29

Jessup M. J., Law R. D., Frassi C. (2007) The rigid grain net (RGN): an alternative method for estimating mean kinematic vorticity number (Wm). *Journal of Structural Geology*, *29*(3), 411-421

Ježek J., Saic S., Segeth K., Schulmann K. (1999) Three-dimensional hydrodynamical modelling of viscous flow around a rotating ellipsoidal inclusion. *Computers & Geosciences*, *25*(5), 547-558

Johnson A. M., Fletcher R. C. (1994) Folding of viscous layers: mechanical analysis and interpretation of structures in deformed rock. New York. Columbia University Press

Kocher T., Mancktelow N. S. (2005) Dynamic reverse modelling of flanking structures: a source of quantitative kinematic information. *Journal of Structural Geology*, *27*(8), 1346-1354

Kocher T., Mancktelow N. S. (2006) Flanking structure development in anisotropic viscous rock. *Journal of Structural Geology*, *28*(7), 1139-1145

Kuzak R., Żaba J. (2011) Podstawy geologii strukturalnej. Struktury fałdowe. Wyd. Nauk. PWN. Warszawa

Lloyd G. E., Ferguson C. C. (1981) Boudinage structure: some new interpretations based on elastic-plastic finite element simulations. *Journal of Structural Geology*, *3*(2), 117-128

Maeder X., Passchier C. W., Koehn D. (2009) Modelling of segment structures: Boudins, bone-boudins, mullions and related single-and multiphase deformation features. *Journal of Structural Geology*, *31*(8), 817-830

Mancktelow N. S. (2013) Behaviour of an isolated rimmed elliptical inclusion in 2D slow incompressible viscous flow. *Journal of Structural Geology*, *46*, 235-254

Mandal N., Khan D. (1991) Rotation, offset and separation of oblique-fracture (rhombic) boudins: theory and experiments under layer-normal compression. *Journal of Structural Geology*, *13*(3), 349-356

Mandal N., Samanta S. K., Chakraborty C. (2000) Progressive development of mantle structures around elongate porphyroclasts: insights from numerical models. *Journal of Structural Geology*, *22*(7), 993-1008
Mandal N., Dhar R., Misra S., Chakraborty C. (2007) Use of boudinaged rigid objects as a strain gauge: Insights from analogue and numerical models. *Journal of Structural Geology*, *29*(5), 759-773
Mandl G. (1987) Tectonic deformation by rotating parallel faults: the "bookshelf" mechanism. *Tectonophysics*, *141*(4), 277-316
Marques F. G., Cobbold P. R. (1995) Development of highly non-cylindrical folds around rigid ellipsoidal inclusions in bulk simple shear regimes: natural examples and experimental modelling. *Journal of Structural Geology*, *17*(4), 589-602
Marques F. O., Taborda R., Antunes J. (2005) Influence of a low-viscosity layer between rigid inclusion and viscous matrix on inclusion rotation and matrix flow: a numerical study. *Tectonophysics*, *407*(1-2), 101-115
Mazur S., Puziewicz J. (1994) Mylonity strefy Niemczy. W: *Annales Societatis Geologorum Poloniae, 64*(1-4), 23-52
Means W. D. (1989) Stretching faults. *Geology*, *17*(10), 893-896
Mukherjee S. (2014a) Review of flanking structures in meso-and micro-scales. *Geological Magazine*, *151*(6), 957-974
Mukherjee S. (2014b) Atlas of shear zone structures in meso-scale. Cham: Springer International Publishing
Passchier C. W., Simpson C. (1986) Porphyroclast systems as kinematic indicators. *Journal of Structural Geology*, 8(8), 831-843
Passchier C. W., Trouw R. A. J., Zwart H. J., Vissers R. L. M. (1992) Porphyroblast rotation: eppur si muove*? *Journal of Metamorphic Geology*, 10(3), 283-294
Passchier C. W. (2001) Flanking structures. *Journal of Structural Geology*. *23*(6-7), 951-962
Passchier C. W., Druguet E. (2002) Numerical modelling of asymmetric boudinage. *Journal of Structural Geology*, *24*(11), 1789-1803
Passchier C. W., Trouw R. A. (2005) Microtectonics. Springer Science & Business Media
Paterson M. S., Weiss L. E. (1961) Symmetry concepts in the structural analysis of deformed rocks. *GSA Bulletin*, *72*(6), 841-882
Pollard D., Fletcher R. C. (2005) Fundamentals of structural geology. Cambridge University Press
Prior D. J., Mariani E., Wheeler J. (2009) EBSD in the earth sciences: applications, common practice, and challenges. In Electron backscatter diffraction in materials science (pp. 345-360). Springer, Boston, MA
Ramberg H. (1955) Natural and experimental boudinage and pinch-and-swell structures. *The Journal of Geology*, 63(6), 512-526
Ramsay J. G. (1967) Folding and fracturing of rocks. Mc Graw Hill Book Company
Reber J. E., Dabrowski M., Schmid D. W. (2012) Sheath fold formation around slip surfaces. *Terra Nova*, *24*(5), 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., de Veslud C. L. C. (2013b) Experimental study of sheath fold development around a weak inclusion in a mechanically layered matrix. *Tectonophysics*, 586, 130-144
Samanta S. K., Deb I. (2014) Development of concave-face boudin in Chhotanagpur Granite Gneiss Complex of Jasidih-Deoghar area, eastern India: Insight from finite element modeling. *Journal of Structural Geology*, *62*, 38-51
Samanta S. K., Majumder D. B., Sarkar G. (2017) Geometry of torn boudin–An indicator of relative viscosity. *Journal of Structural Geology*, *104*, 21-30
Sander B. (1930) Gefügekunde der Gesteine mit besonderer Berücksichtigung der Tektonik. - 352 S., Wien (Springer)
Schmalholz S. M., Podladchikov Y. Y. (2000) Finite amplitude folding: transition from exponential to layer length controlled growth. *Earth and Planetary Science Letters*, *179*(2), 363-377
Schmalholz S. M., Podladchikov Y. Y. (2001) Strain and competence contrast estimation from fold shape. *Tectonophysics*, *340*(3-4), 195-213
Schmalholz S. M., Mancktelow N. S. (2016) Folding and necking across the scales: a review of theoretical and experimental results and their applications. *Solid Earth*, *7*(5), 1417–1465
Schmid D. W., Podladchikov Y. Y. (2004) Are isolated stable rigid clasts in shear zones equivalent to voids?. *Tectonophysics*, 384(1-4), 233-242
Simpson C., Schmid S. M. (1983) An evaluation of criteria to deduce the sense of movement in sheared rocks. *Geological Society of America Bulletin*, 94(11), 1281-1288
Simpson C., De Paor D. G. (1993) Strain and kinematic analysis in general shear zones. *Journal of Structural Geology*, *15*(1), 1-20
Strömgård K. E. (1973) Stress distribution during formation of boudinage and pressure shadows. *Tectonophysics*, 16(3-4), 215-248
Teper L. (1998) Wpływ nieciągłości podłoża karbonu na sejsmotektonikę północnej części Górnośląskiego Zagłębia Węglowego. Katowice: Wydawnictwo Uniwersytetu Śląskiego
Tikoff B., Fossen H. (1999) Three-dimensional reference deformations and strain facies. *Journal of Structural Geology*, *21*(11), 1497-1512
Treagus S. H., Hudleston P. J., Lan L. (1996) Non-ellipsoidal inclusions as geological strain markers and competence indicators. *Journal of Structural Geology*, *18*(9), 1167-1172
Truesdell C. (1953) Two measures of vorticity. *Journal of Rational Mechanics and Analysis*, *2*, 173-217
Van Den Driessche J., Brun J. P. (1987) Rolling structures at large shear strain. *Journal of Structural Geology*, 9(5-6), 691-IN10
Vernon R. H. (2018) *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge university press

Wiesmayr G., Grasemann B. (2005) Sense and non-sense of shear in flanking structures with layer-parallel shortening: implications for fault-related folds. *Journal of Structural Geology*, *27*(2), 249-264
Xypolias P. (2010) Vorticity analysis in shear zones: a review of methods and applications. *Journal of Structural Geology*, 32(12), 2072-2092
Zhang Q., Fossen H. (2020) The dilemma of asymmetric porphyroclast systems and sense of shear. *Journal of Structural Geology*, *130*, 103893

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

Po podjęciu w 2013 r. pracy w Oddziale Dolnośląskim Państwowego Instytutu Geologicznego-PIB (PIG-PIB) podtrzymałem bliską współpracę z działającym na Uniwersytecie w Oslo Centrum *Physics of Geological Processes* (PGP), przemianowanym w 2018 r. na *The Njord Center.* W tym okresie byłem promotorem dwóch prac doktorskich (Pana Kjetila Thøgersena, tytuł pracy: „*Statistical properties of sheared suspensions*" oraz Pana Jana Stanislasa Corneta, tytuł pracy: „*Analytical and numerical modeling of cavity closure in rock salt"*) realizowanych w PGP, a także kontynuowałem współpracę badawczą z dr. Albanem Souchem oraz dr. Marcinem Krotkiewskim. W efekcie tej współpracy opublikowanych zostało 9 wspólnych publikacji w m.in. *Journal of Fluid Mechanics, Rock Mechanics and Rock Engineering, Tectonophysics* oraz *Parallel Computing.*

Byłem w grupie inicjatywnej projektu pt. „*Physico-chemical effects of sequestration of CO2 in the gas-bearing shales in Pomerania: ShaleSeq*", w którym rolę norweskiego partnera odgrywało PGP, a polskim liderem został PIG-PIB. Projekt ShaleSeq był finansowany ze środków funduszy norweskich, w ramach programu Polsko-Norweska Współpraca Badawcza realizowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). W toku realizacji projektu współpracowaliśmy z dr Anne Pluymakers z PGP, a efektem tej współpracy jest wspólna publikacja w *The Photogrammetric Record*.

Od 2017 r. prowadzę wspólne badania z dr. Xin Zhongiem, który tym czasie rozpoczął swój staż podoktorski w PGP. Nasza współpraca badawcza skupia się na mechanicznych aspektach zyskującej na popularności metody rekonstrukcji ciśnienia lub temperatury metamorfizmu, która opiera się na pomiarach rezydualnych naprężeń w inkluzjach mineralnych z wykorzystaniem spektroskopowej analizy ramanowskiej. Dotychczasowym efektem współpracy są 2 publikacje, w *Geophysical Journal International* oraz *Contributions to Mineralogy and Petrology*, zaakceptowany manuskrypt w *American Mineralogist* oraz kilka kolejnych manuskryptów złożonych do redakcji czasopism. W ramach tej oraz pokrewnych aktywności naukowych współpracuję też z dr. hab., prof. UWr Jackiem Szczepańskim z Instytutu Nauk Geologicznych Uniwersytetu Wrocławskiego (ING UWr). Badania zagadnień związanych z efektami mechanicznymi w zastosowaniu do systemów petrologicznych rozwijałem też wspólnie z prof. Yurim Podladchikovem z Uniwersytetu w Lozannie oraz prof. Rogerem Powellem z Uniwersytetu w Melbourne (wspólna publikacja w *Journal of Metamorphic Geology*).

Od 2009 r. rozwijam współpracę badawczą z kierowanym przez prof. Bernharda Grasemanna zespołem *Structural Processes Group* na Uniwersytecie Wiedeńskim. Tematyka

badawcza realizowana w ramach tej współpracy skupia się na zagadnieniach związanych z ewolucją podatnych struktur deformacyjnych w warunkach dużego odkształcenia skał w strefach ścinania, a moim wkładem są analizy mechaniczne oraz tektoniczne oparte na modelach analitycznych oraz numerycznych. Pierwszy artykuł w ramach prowadzonej przeze mnie współpracy badawczej z grupą wiedeńską ukazał się w 2010 r. w *Journal of Structural Geology.* Od 2013 r. współpraca uległa dalszemu zacieśnieniu (co roku spędzam około tygodnia w Wiedniu wizytując grupę prof. Grasemanna), a jej pokłosiem jest seria 4 wspólnych artykułów w *Journal of Structural Geology*, która stanowi dużą cześć omawianego osiągnięcia naukowego.

W latach 2011-15 byłem promotorem pomocniczym pracy doktorskiej realizowanej w Uniwersytecie Poczdamskim (Pani Elvira Mulyukova: „*Stability of the large low shear velocity provinces: numerical modeling of thermochemical mantle convection*"). Jestem też współautorem publikacji w *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, która powstała na bazie uzyskanych podczas tego doktoratu wyników.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Osiągnięcia dydaktyczne:

Po uzyskaniu stopnia doktora byłem promotorem pomocniczym 7 obronionych prac doktorskich, z czego 5 doktoratów realizowanych było na Uniwersytecie w Oslo, a po jednym na Uniwersytecie Poczdamskim i w Instytucie Geofizyki PAN w Warszawie. Byłem też opiekunem i współopiekunem 6 prac magisterskich (Uniwersytet w Oslo, Uniwersytet Wrocławski oraz Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie).

W 2009 r. poprowadziłem blok 4 wykładów oraz ćwiczeń dotyczących przepływów w ośrodkach porowatych oraz numerycznych metod rozwiązywania równania Stokesa. Zajęcia prowadzone były na Uniwersytecie w Oslo w ramach semestralnego kursu pn. „*Methods in Physics of Geological Processes*" (FYS-GEO4300). Brałem też udział jako jeden z prowadzących w tygodniowych praktykach terenowych związanych z tym kursem.

W latach 2010-12 w semestrach letnich prowadziłem dla studentów studiów magisterskich oraz doktorantów w PGP na Uniwersytecie w Oslo wykłady i ćwiczenia pn. „*Introduction to mechanical geomodelling*" (FYS-GEO4510) w wymiarze 6h tygodniowo.

W okresie 2013-16 organizowałem wewnętrzne szkolenia z zakresu numerycznego rozwiązywania równań różniczkowych cząstkowych dla pracowników Laboratorium Modelowania Procesów Geologicznych w Oddziale Dolnośląskim PIG-PIB.

W 2015 r. wygłosiłem w ramach Letniej Szkoły ShaleMech w Srebrnej Górze dla wykonawców projektu ShaleMech wykłady pn. „Mikromechanika i efektywne parametry materiałowe" oraz „Efektywna lepkość".

W I półroczu 2017 prowadziłem regularnie dla kilkunastoosobowej grupy fakultatywne zajęcia pn. „Modelowanie Procesów Geologicznych", a w lipcu 2017 poprowadziłem 3-dniowe „Letnie Warsztaty Numeryczne". Na początku I półrocza 2020 prowadziłem dla

kilkuosobowej grupy studentów ING UWr fakultatywne zajęcia pn. „Modelowanie Procesów Termicznych."

Osiągnięcia organizacyjne:

W 2009 r. współorganizowałem warsztaty pn. „*Numerical modeling in Earth sciences*" w ramach 33. Międzynarodowego Kongresu Geologicznego (IGC) w Oslo.

W 2009 r. byłem koordynatorem grupy „*Geodynamics group*", a w latach 2010-2012 koordynatorem grupy "*Earth Materials group*" w PGP na Uniwersytecie w Oslo. Do moich obowiązków należało m.in. raportowanie aktywności badawczej grupy podczas regularnych posiedzeń Rady Naukowej Centrum oraz w ramach raportów rocznych.

Od 2011 r. jestem współorganizatorem sesji referatowych podczas spotkań EGU w Wiedniu. W 2011 r. współorganizowałem sesję pt. „ *Recent advances in modelling of tectonic processes",* w latach 2012-14 "*Recent advances in computational geodynamics*", w okresie od 2016 do 2018 „*Recent advances in Geodynamics: Computational methods and applications*", a w roku 2019 pt. "*Quantitative structural geology: 3D characterisation, analysis and modelling*".

Od 2013 r. tworzyłem w Oddziale Dolnośląskim PIG-PIB Laboratorium Modelowania Procesów Geologicznych, które zostało później włączone w skład Centrum Modelowania Procesów Geologicznych (CMPG). W kolejnych latach koordynowałem prace merytoryczne wrocławskiej części zespołu CMPG (4-8 osób), który brał udział w realizacji szeregu projektów finansowanych przez NCBiR, NCN, MNiSW oraz Ministerstwo Środowiska. Jednym z moich osiągnięć organizacyjnych były działania przygotowawcze oraz prace konfiguracyjne związane z zakupem i systematyczną rozbudową klastra obliczeniowego Neptun. Klaster Neptun złożony jest obecnie z 33 wysokowydajnych serwerów, które służą do wykonywania seryjnych symulacji numerycznych w CMPG.

Od 2015 r. współorganizowałem cykliczne warsztaty z dziedziny obliczeniowej mechaniki płynów (CFD in Wrocław; http://www.ift.uni.wroc.pl/~maq/cfdwroclaw/ ; główny organizator: dr hab. Maciej Matyka z IFT UWr.). Dotychczas odbyło się 6 spotkań, podczas których wygłoszono 29 referatów.

W ramach realizowanego w PIG-PIB projektu ShaleMech współorganizowałem w 2015 r. tygodniowe Letnie Spotkanie w Srebrnej Górze, w którym wzięło udział 45 realizatorów projektu, oraz V walne spotkanie projektu we Wrocławiu („Zaduszki Geomechaniczne") w 2016 r., w którym, obok realizatorów projektów, liczny udział wzięli reprezentanci Polskiego Górnictwa Nafty i Gazu (PGNiG) - lidera przemysłowego projektu. W 2016 r. organizowałem także finalne spotkanie w międzynarodowym projekcie ShaleSeq, które zgromadziło wszystkich wykonawców projektu we Wrocławiu.

Od 2018 r. prowadzę posiedzenia naukowe w Oddziale Dolnośląskim (OD) PIG-PIB. W latach 2018-19 r. w ramach posiedzeń naukowych w OD PIG-PIB wygłoszone zostały 44 referaty.

Osiągnięcia popularyzujące naukę:

Wygłosiłem wykład popularyzujący zagadnienia związane z procesami fałdowania skał podczas warsztatów pn. „Analogowe i numeryczne modelowanie struktur fałdowych", które współorganizowałem w ramach III Polskiego Kongresu Geologiczne we Wrocławiu w 2016 r.

Przygotowałem i przedstawiłem szereg prezentacji mających na celu uprzystępnienie wyników prac badawczych prowadzonych w CMPG szerokiemu gronu odbiorców, m. in. na forum studenckiego koła naukowego w ING UWr, w ramach seminarium wydziałowego na Wydziale Fizyki i Astronomii UWr, w KGHM Cuprum we Wrocławiu, podczas odczytów Polskiego Towarzystwa Geologicznego oraz w trakcie uroczystości jubileuszowych w Oddziale Dolnośląskim PIG-PIB.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (niezwiązanych z pracą doktorską)

Pozostałe osiągnięcia związane z modelowaniem podatnych struktur deformacyjnych

W tym punkcie omówię moje pozostałe prace związane z problematyką rozwoju podatnych struktur deformacyjnych, w których mój udział był nieduży, bądź które nie zostały jeszcze zakończone. W ramach opieki naukowej nad wykonywaną w PGP pracą doktorską Pani Jacqueline Reber brałem udział w pracach badawczych nad rozwojem fałdów futerałowych w warunkach ścinania prostego. W pracach tych wykorzystywany był trójwymiarowy model mechaniczny ewolucji fałdów przydyslokacyjnych wokół eliptycznych powierzchni poślizgu, który został szczegółowo opisany w należącej do omawianego osiągnięcia naukowego publikacji A1. W pracy Reber i in. (2012) zaprezentowany został model rozwoju fałdów futerałowych wokół powierzchni poślizgu zainicjowanej w obrębie podatnej strefy prostego ścinania. Wyniki modelowania zostały porównane z przykładami naturalnych wystąpień fałdów futerałowych i stanowiły potwierdzenie hipotezy wysuniętej wcześniej w publikacji A1. W kolejnej pracy Reber i in. (2013) przedstawiono wyniki systematycznych symulacji numerycznych, które pozwoliły na rozpoznanie wpływu m.in. początkowej orientacji powierzchni poślizgu oraz rozmiaru odkształcenia na charakterystykę rozwijającego się fałdu futerałowego. W późniejszym okresie badania morfologii fałdów futerałowych powstających w strefach ścinania prostego zostały uszczegółowione (Adamuszek i Dąbrowski, 2017). Obecnie jestem zaangażowany w realizację prac, których celem jest analiza rozwoju struktur tektonicznych wokół i w obrębie obłej niejednorodności deformowanej pod wpływem ścinania prostego w otoczeniu. W badaniach tych analityczny model zaburzenia przepływu używany jest w swoim ogólnym sformułowaniu, które obejmuje przypadek inkluzji o kształcie elipsoidy.

W latach 2008-2012 byłem promotorem pomocniczym realizowanej w PGP pracy doktorskiej Pani Marty Adamuszek. Prowadzone badania dotyczyły procesu fałdowania z wyboczenia. Korzystając ze zautomatyzowanej analizy parametrów geometrycznych fałdów, analizowano zastosowanie mechanicznych modeli fałdowania pojedynczej warstwy do

oceny stopnia skrócenia ośrodka oraz stosunku lepkości między sfałdowaną warstwą a otoczeniem (Adamuszek i in., 2011). W pracy Adamuszek i in. (2013a) zaproponowany został nowy model teoretyczny fałdowania lepkiej warstwy, uwzględniający reżim dużego skrócenia warstwy oraz znacznej amplitudy fałdów. Model został zweryfikowany w oparciu o wyniki systematycznych symulacji numerycznych. W kolejnej pracy prowadzono analizy procesu fałdowania wyodrębnionego horyzontu skalnego o podwyższonej koncentracji sztywnych klastów, a także analizowano wpływ procesu fałdowania na efektywną lepkość ośrodka (Adamuszek i in., 2013b).

Po uzyskaniu stopnia doktora rozwijałem też prace badawcze będące kontynuacją zapoczątkowanych w trakcie doktoratu badań nad wpływem ewoluującej tekstury niejednorodnej skały na jej efektywną lepkość w warunkach dużego odkształcenia. W swoich badaniach podkreślałem konieczność stosowania przy tego typu analizach wysokorozdzielczych schematów numerycznych. Wykazałem, że użycie standardowych schematów adwekcyjnych do analizy rozwoju tekstur deformacyjnych w niejednorodnych ośrodkach może prowadzi do rozwoju dość licznych artefaktów, szczególnie w warunkach prostego ścinania. Niestety, artefakty te niekiedy łudząco przypominają naturalnie występujące struktury. Wykonałem też systematyczne symulacje ewolucji tekstury w niejednorodnym i nieliniowym ośrodku lepkim poddanym rozciąganiu. W szczególności analizowałem rozwój anizotropii efektywnej lepkości oraz związane z tym procesy niestabilności mechanicznej przyjmujące formę budinażu wewnętrznego (ang. *internal boudinage*). Wyniki tych prac dotychczas przedstawiane były podczas międzynarodowych konferencji (Dabrowski, 2012; Dabrowski, 2014a; Dabrowski, 2014b).

W ostatnich latach prowadziłem prace metodyczne mające na celu weryfikację działania tzw. metoda Fry'a, która umożliwia szacowanie odkształcenia na podstawie analizy wydłużenia pola centralnego wakansu na diagramie względnego położenia antyklastrowanych elementów skały. W swoich pracach skupiłem się na ocenie przydatności metody dla przypadku skał z porfiroklastami, których redystrybucja przestrzenna pod wpływem deformacji może być zaburzana efektami lokalnej interakcji mechanicznej. W efekcie przeprowadzonych prac badawczych udało mi się zaproponować techniczne ulepszenie identyfikacji i analizy anizotropii centralnego pola wakansu Rozwinięty wariant metody Fry'a testowany był w zastosowaniu do kwarcytów daktylowych z Krzywiny (masyw Strzelina) w ramach współpracy z prof. Jackiem Szczepańskim z ING UWr, a otrzymane wartości odkształcenia zostały porównane z przewidywaniami niezależnej metody. Wyniki tych prac prezentowane były kilkukrotnie na międzynarodowych konferencjach (Dabrowski i in., 2016, Dabrowski, 2016). Obecnie przygotowuję manuskrypt opisujący wyniki symulacji numerycznych dynamiki porfiroklastów w warunkach ścinania prostego oraz czystego.

Adamuszek M., Schmid D.W., Dabrowski M. (2011) Fold geometry toolbox - Automated determination of fold shape, shortening, and material properties. *Journal of Structural Geology*, 33(9), 1406-1416

Adamuszek M., Schmid D.W., Dabrowski M. (2013a) Theoretical analysis of large amplitude folding of a single viscous layer. *Journal of Structural Geology*, 48, 137-152.

Adamuszek M., Dabrowski M., Schmid D.W. (2013b) Interplay between metamorphic strengthening and structural softening in inclusion-bearing layered rocks. *Terra Nova*, 25(5), 381-386

Adamuszek M., Dabrowski M. (2017) Sheath folds as a strain gauge in simple shear. *Journal of Structural Geology*, 102, 21-36

Dabrowski M. (2012) Analytical and numerical modeling of ductile deformation in anisotropic rocks. *GeoMod 2012*, Lausanne, Switzerland

Dabrowski M. (2014a) Mechanical instability and effective anisotropic properties in two-phase rocks under pure and simple shear. *Kachanov Symposium*, Wiedeń, Austria

Dabrowski M. (2014b) Can we understand rocks without anisotropy?. *EGU General Assembly Conference Abstracts 16*

Dabrowski M., Szczepański J., Grasemann B., Rogowitz A. (2016) The Jegłowa metaconglomerate ("Dattelquarzit", SW Poland): a source of conflicting microstructural interpretations since the advent of modern fabric analysis by Bruno Sander. *GeoTirol*, Innsbruck, Austria

Dabrowski M. (2016) The evolution of spatial distribution patterns of rigid porphyroclasts under pure and simple shear. *EGU General Assembly Conference Abstracts 18*

Reber J.E., Dabrowski M., Galland O., Schmid D.W. (2013) Sheath fold morphology in simple shear. *Journal of Structural Geology*, 53, 15-26

Reber J.E., Dabrowski M., Schmid D.W. (2012) Sheath fold formation around slip surfaces. *Terra Nova*, 24(5), 417-421

Badania z obszaru geodynamiki, tektoniki oraz geomechaniki

Po uzyskaniu stopnia doktora zainteresowałem się modelowaniem mechanicznym w zastosowaniu do problemów tektonicznych oraz wielkoskalowych zagadnień geodynamicznych, a w kolejnych latach brałem także udział w badaniach z obszaru geomechaniki. W ramach opieki nad pracą magisterską (Uniwersytet w Oslo), a później doktorską (Uniwersytet Poczdamski) Pani Elviry Mulyukovej byłem zaangażowany w modelowanie procesu konwekcji termomechanicznej w płaszczu ziemskim, z uwzględnieniem obecności w jego dolnych partiach stref o anomalnym chemizmie (ang. *Large Low Shear Velocity Provinces*). W pracy Mulyukova i in. (2015) przedstawione zostały systematyczne analizy nastawione na ocenę wpływu ruchów konwekcyjnych na stabilność segregacji anomalnie ciężkiego materiału w dolnym płaszczu Ziemi.

W tym okresie interesowałem się też problemem fałdowania w skali litosfery, a swoje prace skupiłem na opracowaniu analitycznego modelu rozwoju wielkoskalowych zaburzeń fałdowych, uwzględniając nieliniową i zależną od temperatury reologię stratyfikowanego ośrodka, a także efekty związane z grawitacją. Wyniki tych prac były przedstawiane podczas międzynarodowych konferencji (np. Dąbrowski i Jarosiński, 2011). W kolejnych latach zająłem się badaniami struktur fałdowych powstających nad uskokiem w podłożu, szukając m.in. związków między ewolucją fałdów nad- i przyuskokowych a rozwojem podatnych struktur przydyslokacyjnych w strefach ścinania. Przeprowadziłem symulacje numeryczne mające na celu rozpoznanie stanu naprężeń w obrębie uwarstwionego basenu osadowego nad uskokiem w sztywnym podłożu, a także ocenę potencjalnych ścieżek propagacji uskoków w oparciu o analizę pola naprężeń. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane podczas międzynarodowej konferencji CETEG (Dąbrowski i Badura, 2014). W kolejnych latach, we współpracy z prof. Rayem Fletcherem, opracowałem też nowe rozwiązanie analityczne dla problemu półpłaszczyzny poddanej skokowej zmianie przemieszczenia (prędkości) na brzegu, z uwzględnieniem anizotropii parametrów sprężystych.

W latach 2014-18 pełniłem rolę opiekuna pracy doktorskiej Pana Jana Corneta w PGP. Prowadzone badania dotyczyły głównie problemu zaciskania w obrębie pokładów soli kamiennej pustek skalnych takich jak otwory wiertnicze, czy też kawerny powstające w efekcie technologicznego procesu ługowania soli. Opracowany został analityczny model mechaniczny zaciskania cylindrycznej pustki o przekroju kołowym uwzględniający złożoną

odpowiedź reologiczną soli kamiennej, w tym wysokonaprężeniowy reżim nieliniowego pełzania dyslokacyjnego oraz silnie zależny od rozmiaru ziarna reżim pełzania dyfuzyjnego (Cornet i in., 2017). Analizowano zaciskanie pustek pod wpływem obciążenia ośrodka ciśnieniem litostatycznym, ale i też w warunkach niezerowych naprężeń dyferencjalnych (Cornet i in., 2018). W publikacji Corneta i Dąbrowskiego (2018) przedstawione zostało rozwinięcie modelu na przypadek nieliniowego ośrodka lepkosprężystego.

W latach 2014-17 kierowałem pracami zespołu badawczego realizującego zadanie pn. "Modelowanie stanu naprężeń i przepływów w kompleksach łupkowych" w projekcie „Zintegrowane badania geomechaniczne w celu intensyfikacji wydobycia gazu z łupkowych formacji Pomorza: ShaleMech" finansowanym ze środków programu BlueGas - Polski Gaz Łupkowy przez NCBiR. W projekcie ShaleMech brałem udział w m.in.: teoretycznych i numerycznych analizach anizotropii efektywnych parametrów sprężystych skał łupkowych, z uwzględnieniem roli mikroszczelinowatości oraz anizotropii indukowanej stanem naprężeń; analitycznych i numerycznych modelowaniach trójwymiarowych zaburzeń stanu naprężeń wokół szczelin hydraulicznych (ang. *stress shadows*) w ośrodku mechanicznie anizotropowym; w ocenie potencjału reaktywacji naturalnej sieci szczelin pod wpływem zabiegów szczelinowania w warunkach dyferencjalnego stanu naprężeń w ośrodku. Wyniki tych badań prezentowane były podczas walnych spotkań przed przedstawicielami PGNiG – lidera projektu. Obecnie we współpracy z prof. Markiem Jarosińskim z PIG-PIB przygotowuję manuskrypt opisujący wyniki modelowania trójwymiarowego stanu naprężeń w ośrodku mechanicznie anizotropowym zaburzonego pod wpływem wieloetapowego szczelinowania hydraulicznego. Jako promotor pomocniczy byłem też zaangażowany w badania realizowane w wykonywanej w ramach projektu ShaleMech pracy doktorskiej Pana Macieja Trzeciaka. W artykule Trzeciak i in. (2018) przedstawione zostały wyniki pomiarów laboratoryjnych, które posłużyły do opracowania lepkosprężystego modelu konstytutywnego procesu pełzania łupków. W kolejnej publikacji (Trzeciak i in., 2020) analizowano wpływ lepkosprężystego pełzania łupków na ewolucję stanu naprężeń w basenie osadowych poddanym obciążeniom tektonicznym oraz glacjalnym.

W ostatnich kilku latach zajmowałem się też modelowaniem stanu naprężeń w skorupie ziemskiej kształtowanego pod wpływem obciążenia topograficznego. Prowadzone badania miały na celu m.in. ocenę warunkowania rozwoju rzeźby terenu stanem naprężeń w ośrodku skalnym, a także rozpoznanie stopnia zaburzenia naprężeń tektonicznych czynnikiem topograficznym, co stanowi cenną wskazówkę przy ich ewentualnych próbach pomiaru in situ. Wstępne wyniki tych prac, w zastosowaniu do obszaru sudeckiego, przedstawiłem w formie referatu podczas międzynarodowej konferencji (Dąbrowski i in., 2015). W ramach mojego zaangażowania w realizację projektu służby geologicznej pn. „Kartografia *4D* w strefie brzegowej południowego Bałtyku – Etap I" prowadziłem też prace badawcze nad zastosowaniem metody elementów skończonych do analizy mechanicznej stabilności zboczy, w tym oceny wpływu naprężeń in situ na rozwój ruchów masowych. Wyniki tych działań zaprezentowane zostały podczas konferencji GEOST II (Dąbrowski i in., 2016) i będą także opracowane w formie publikacji.

W latach 2018-19 byłem też zaangażowany w prace badawcze związane z tektoniką solną oraz zjawiskami tektonicznymi towarzyszącymi procesom wulkanicznym. W publikacji

Adamuszek i Dąbrowskiego (2019) przedstawione zostały wyniki symulacji numerycznych oraz model teoretyczny opisujący proces tonięcia ciężkich fragmentów zbudinażowanej warstwy anhydrytowej w obrębie soli kamiennej. W pracy szczególny nacisk położono na procesy związane z mechaniczną interakcją między sąsiadującymi ze sobą blokami tonącego anhydrytu. Z kolei w pracy Soucha i in. (2019) analizowano inicjalną fazę sprężysto-plastycznych odkształceń warstwowanych skał osadowych pod wpływem iniekcji magmy w formie rozrastającej się palczastej intruzji.

Adamuszek M., Dabrowski M. (2019) Sinking of a fragmented anhydrite layer in rock salt. *Tectonophysics*, 766, 40-59

Cornet J., Dabrowski M., Schmid D.W. (2017) Long term cavity closure in non-linear rocks. *Geophysical Journal International*, 210(2), 1231-1243

Cornet J., Dabrowski M., Schmid D. W. (2018) Long term creep closure of salt cavities. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 103, 96-106

Cornet J.S., Dabrowski M. (2018) Nonlinear Viscoelastic Closure of Salt Cavities. *Rock Mechanics and Rock Engineering,* 51(10), 3091-3109

Dąbrowski M., Jarosiński M. (2011) Lithospheric folding - to fold or not to fold? *Kongsberg Seminar*, Kongsberg Norway

Dąbrowski M., & Badura J. (2014) Finite element modeling of fault-propagation folding above a rigid basement: A case study of the Nysa Kłodzka Graben (Sudetes, SW Poland). *Geologia Sudetica*, *42*

Dąbrowski M., Badura J., Aleksandrowski P. (2015) Rock failure due to topographic stress in the Sudetes Mts: towards a three-dimensional numerical model. 16th Workshop On Recent Geodynamics of the Sudety Mts. and Adjacent Areas, Srebrna Góra

Dąbrowski M., Badura J., Pacuła J. (2016) Modelowanie procesów geologicznych aktywnych w pasie brzegu klifowego. *„Procesy geologiczne w strefie brzegowej morza - GEOST II"* Jastrzębia Góra

Mulyukova E., Steinberger B., Dabrowski M., Sobolev S.V. (2015) Survival of LLSVPs for billions of years in a vigorously convecting mantle: Replenishment and destruction of chemical anomaly. *Journal of Geophysical Research B: Solid Earth*, 120(5), 3824-3847

Souche A., Galland O., Haug Ø.T., Dabrowski M. (2019) Impact of host rock heterogeneity on failure around pressurized conduits: Implications for finger-shaped magmatic intrusions. *Tectonophysics,* 765, 52-63

Trzeciak M., Sone H., Dabrowski M. (2018) Long-term creep tests and viscoelastic constitutive modeling of lower Paleozoic shales from the Baltic Basin, N Poland *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,* 112, 139-157

Trzeciak M., Dabrowski M., Jarosiński M. (2020) Stress distribution models in layered, viscoelastic sedimentary basins under tectonic and glacial loads. *Geophysical Journal International*, 220(2), 768–793

Modele mechaniczne w zastosowaniu do petrologii

Moje zainteresowanie zagadnieniem zróżnicowania pola naprężeń w skałach oraz związanymi z tym implikacjami petrologicznymi, w tym wpływem na termodynamiczną równowagę faz mineralnych, sięgają okresu studiów licencjackich. Różnorakie procesy geologiczne mogą powodować długotrwałe lokalne nadciśnienie w inkluzjach i ziarnach mineralnych, a nawet w wyodrębniających się jednostkach skalnych w większej skali. Efekty petrologiczne związane z rozwojem lokalnego nadciśnienia w metamorfizowanych skałach mogą mieć istotne konsekwencje dla regionalnych rekonstrukcji tektonicznych i geodynamicznych. Dopuszczenie możliwości nielitostatycznego profilu ciśnienia w skorupie ziemskiej sprawia, że konwencjonalne techniki oceny głębokości pogrążenia oraz rozmiaru ekshumacji skał stają się problematyczne. Z zagadnieniem ekshumacji wysokociśnieniowych skał metamorficznych miałem okazję zetknąć się podczas wykonywania pracy magisterskiej skupionej na wystąpieniach skał wysokociśnieniowych w metamorfiku Lądka i Śnieżnika, a także podczas późniejszych prac terenowych w Norwegii (*Western Gneiss Region*) oraz Grenlandii (*Liverpool Land*). W związku z tymi ostatnimi pracami brałem udział w opracowywaniu teoretycznego modelu rozwoju nadciśnienia w obrębie migmatytyzowanych kompleksów metamorficznych (Hartz i in., 2007).

Od 2013 r. skupiłem się na problemie nadciśnienia rozwijającego się w skali inkluzji i ziaren mineralnych. W publikacji Dąbrowskiego i in. (2015) opracowany został mechaniczny model lepkiej relaksacji nadciśnienia w materiale o reologii płynu potęgowego, która jest szeroko używana do opisu procesu płynięcia skał i minerałów. Przeprowadzone analizy wykazały zasadniczy wpływ nieliniowości reologicznej na charakterystyczną skalę czasową procesu relaksacji, co może mieć swój wyraz w rozwoju paragenez mineralnych w skałach metamorficznych. W kolejnych latach kontynuowałem badania relaksacji lokalnego nadciśnienia w skałach, co pozwoliło uwzględnić efekty związane z lepkosprężystością, a także złożony model lepkościowy płynu typu Carreau, odpowiadający reologii ośrodka charakteryzującego się jednoczesną aktywnością pełzania dyslokacyjnego i dyfuzyjnego (Dabrowski i in., 2016).

Od 2017 r. prowadzę z dr. Xin Zhongiem (obecnie Wolny Uniwersytet Berliński; wcześniej PGP, Uniwerystet w Oslo) wspólne badania nad elastotermobarometrią ramanowską. Jest to niezależna od założeń i komplikacji równowagowej termodynamiki faz mineralnych metoda służąca rekonstrukcji warunków metamorfizmu, która przeżywa w ostatnich latach swój rozkwit dzięki znacznemu rozwojowi możliwości mikrospektroskopii ramanowskiej. Dzięki dużej dokładności pomiarów umożliwiającej analizę przesunięcia położenia maksimów w widmie Ramana oraz bazując na kalibracjach eksperymentalnych i modelach teoretycznych możliwe jest określenie ciśnienia, a niekiedy wręcz pełnego stanu naprężeń w obrębie analizowanych ziaren mineralnych. Pomiary ramanowskie w inkluzjach kwarcu w granatach występujących w skałach poddanych metamorfizmowi wysokiego stopnia wykazały dość powszechną obecność rezydualnego ciśnienia („nadciśnienia") sięgającego poziomu kilkuset MPa. Niepełna relaksacja naprężenia w obrębie inkluzji kwarcowych występujących w ekshumowanych skałach wiązana jest z ich wyraźnie odmiennymi parametrami termosprężystymi względem osłaniających je ziaren granatu. Znajomość parametrów termomechanicznych badanych minerałów pozwala w oparciu o przewidywania modelu mechanicznego oraz pomiar rezydualnego ciśnienia na wyznaczenie pierwotnego ciśnienia, w którym ziarno otaczające obrastało inkluzję. Szereg czynników ma wpływ na zachowanie rezydualnego naprężenia w inkluzjach mineralnych, a obok istotnej w warunkach wysokich temperatur lepkiej relaksacji, ważnym procesem prowadzącym do spadku rezydualnego naprężenia jest powstawanie mikrospękań. Przecięcie inkluzji przez powierzchnię szlifu (płytki cienkiej) prowadzi do pełnej relaksacji normalnej składowej naprężenia i takie ziarna nie są właściwe z punktu widzenia analizy elastotermobarometrycznej. W związku z powyższym zaleca się wręcz używanie płytek cienkich o niestandardowej, zwiększonej grubości. W metodycznej pracy Zhonga i in. (2019a) analizowaliśmy stopień redukcji rezydualnego ciśnienia w inkluzji m.in. w zależności od jej odległości od powierzchni płytki cienkiej. W ostatnim czasie prowadziliśmy też badania nad wpływem sprężystej anizotropii fazy mineralnej tworzącej inkluzję na indukowane naprężenia rezydualne. Wyniki naszych badań pokazują, że w przypadku kwarcu dla typowych wartości gradientu termicznego wpływ jego mechanicznej anizotropii jest w dużym stopniu kompensowany przez efekty związane z anizotropią rozszerzalności cieplnej. Natomiast anizotropia parametrów termomechanicznych może odgrywać istotną rolę chociażby w przypadku inkluzji rutylu. W pracy Zhong i in. (2019b) zaprezentowane zostało użycie inkluzji cyrkonu w granacie jako elastotermometru, a porównanie wyników

elastotermobarometrii z wynikami klasycznej geotermobarometrii przeprowadzone dla eklogitów z okolic Bergen w zachodniej Norwegii wykazało wysoki stopień ich zbieżności. Wspólnie z prof. Jackiem Szczepańskim z ING UWr oraz dr. Xin Zhongiem jestem też zaangażowany w badania aplikacyjne, w których metoda elastobarometrii kwarcu w granacie została zastosowana do skał z pasma metamorficznego Kamieńca Ząbkowickiego w Sudetach.

Hartz E. H., Podladchikov Y. Y., Dabrowski M. (2007) Tectonic and reaction overpressures: theoretical models and natural examples. *EGU General Assembly Conference Abstracts 9*

Dabrowski, M., Powell, R., Podladchikov, Y. (2015) Viscous relaxation of grain-scale pressure variations. *Journal of Metamorphic Geology*, 33 (8), 859-868

Dabrowski M., Powell R., Podladchikov Y. (2016) Grain-scale pressure variations: build-up and viscoelastic relaxation. *EGU General Assembly Conference Abstracts 18*

Zhong X., Dabrowski M., Jamtveit B. (2019a) Analytical solution for the stress field in elastic half space with a spherical pressurized cavity or inclusion containing eigenstrain. *Geophysical Journal International,* 216(2), 1100-1115

Zhong X., Andersen, N.H. Dabrowski M., Jamtveit B. (2019b) Zircon and quartz inclusions in garnet used for complementary Raman thermobarometry: application to the Holsnøy eclogite, Bergen Arcs, Western Norway. *Contributions to Mineralogy and Petrology,* 174, 50

Przepływy w ośrodkach porowatych i szczelinowatych

Po doktoracie zainteresowałem się zagadnieniami związanymi z dynamiką płynów w ośrodkach porowatych. Początkowo zajmowałem się głównie modelami jednofazowego przepływu w przestrzeni porowej syntetycznych ośrodków ziarnistych. Interesowało mnie porównanie między efektywną przepuszczalnością hydrauliczną wyznaczoną numerycznie a przewidywaniami modeli empirycznych oraz teoretycznych (ang. *effective media approximation*). Modelowanie przepływu w skali porów wymaga prowadzenia symulacji nieściśliwego przepływu Stokesa w skomplikowanych, trójwymiarowych domenach. Analizowane przykłady służyły mi do testowania iteracyjnych metod rozwiązywania trójwymiarowych problemów Stokesa z użyciem metody elementów skończonych w sformułowaniu dla niestrukturalnych (tetraedrycznych) siatek obliczeniowych. Interesowałem się też numerycznymi metodami modelowania trójwymiarowej konwekcji płynów w ośrodku porowatym w ujęciu przepływu Darcy. W kolejnych latach byłem też zaangażowany w realizację projektu komercyjnego dotyczącego przepływów wielofazowych (migracja węglowodorów) w ośrodku porowatym. W latach 2009-12 pełniłem rolę promotora pomocniczego pracy doktorskiej Pana Albana Soucha w PGP na Uniwersytecie w Oslo. W związanej z tym doktoratem publikacji Soucha i in. (2014) analizowany był proces konwekcji płynów w obrębie basenu sedymentacyjnego zlokalizowanego na skrzydle zrzuconym niskokątowego uskoku normalnego. Wyniki symulacji numerycznych pozwoliły na rozpoznanie rozwoju przejściowych anomalii termicznych o dość znacznej amplitudzie, które związane były z pióropuszami konwekcyjnymi nad silnie grzejącym ekshumowanym podłożem.

W latach 2014-2017 kierowałem pracami zespołu badawczego realizującego zadanie pn. "*Multiphase flow in fractured shale rocks*" w projekcie „*Physico-chemical effects of sequestration of CO2 in the gas-bearing shales in Pomerania: ShaleSeq*" finansowanym ze środków funduszy norweskich w ramach programu Polsko-Norweska Współpraca Badawcza obsługiwanego przez NCBiR. Głównym celem prac w zadaniu było rozpoznanie charakterystyki przepływów jedno- i dwufazowych w szczelinach z szorstkością i/lub

podparciem. Dla analizowanej klasy przepływów zaproponowano nowy model zastępczy 2.5D oparty na równaniu Stokesa-Brinkmana, którego główną zaletą jest możliwość narzucenia warunku brzegowego typu Dirichleta na brzegach kontaktów między ścianami szczeliny. Bazując na wynikach bezpośrednich, trójwymiarowych symulacji przepływu Stokesa w szczelinie, zaproponowany model zastępczy został zweryfikowany przez Pana mgr. Piotra Olkiewicza dla szerokiego spektrum typów szorstkości ścian szczeliny oraz dla zróżnicowanego stopnia domknięcia szczeliny. Wyniki tych badań zostały zaprezentowane podczas międzynarodowych konferencji (Olkiewicz i Dabrowski, 2017). Brałem też udział w pokrewnych pracach badawczych, które miały na celu opracowanie fotogrametrycznej metody rekonstrukcji szorstkości ścian szczelin występujących w skałach łupkowych. Nowatorska metoda fotogrametryczna, dostosowana do pomiaru szorstkości o amplitudzie rzędu kilkudziesięciu mikrometrów, została opisana w publikacji Olkowicz i in. (2019). Wspólnie z dr. Michałem Dzikowskim oraz dr. Łukaszem Jasińskim zaprezentowaliśmy systematyczne porównanie wyników symulacji numerycznych prowadzonych metodami gazu sieciowego Boltzmanna oraz elementów skończonych dla przepływu jednofazowego w szczelinie z cylindrycznymi przeszkodami o przekroju kołowym (Dzikowski i in., 2018). Analizowana geometria jest wyidealizowanym odpowiednikiem szczeliny hydraulicznej podpartej ziarnami podsadzki. Wyniki trójwymiarowych symulacji numerycznych zostały także zestawione z przewidywaniami 2.5D modelu zastępczego Stokesa-Brinkmana. Model ten w zastosowaniu do przepływu jednofazowego w szczelinie z przeszkodami był też przedmiotem szczegółowych analiz opisanych w publikacji Jasińskiego i Dąbrowskiego (2018). Wykonane w ramach tych badań porównania z wynikami trójwymiarowych symulacji Stokesa wykazały wyraźną przewagę modelu Stokesa-Brinkmana nad konwencjonalnym modelem Reynoldsa. Model zastępczy 2.5D posłużył też do skonstruowania, a także przetestowania schematów efektywnej przepuszczalności szczeliny z przeszkodami, m.in. w oparciu o analityczne rozwiązanie elementarnego zagadnienia przepływu Stokesa-Brinkmana wokół pojedynczej, cylindrycznej przeszkody o przekroju kołowym w szczelinie o stałej aperturze. W późniejszym okresie model Stokesa-Brinkmana został uogólniony na przypadek przepływów wielofazowych, z uwzględnieniem czynnika napięcia powierzchniowego na granicy faz. W okresie realizacji projektu *ShaleSeq*, a także w kolejnych latach, wspólnie z dr. Dzikowskim, byłem zaangażowany w prace badawcze mające na celu systematyczną analizę działania modelu Stokesa-Brinkmana w zastosowaniu do przepływu dwufazowego w szczelinie z przeszkodami.

Dzikowski M., Jasinski L., Dabrowski M. (2018) Depth-averaged Lattice Boltzmann and Finite Element methods for single-phase flows in fractures with obstacles. *Computers & Mathematics with Applications,* 75(10), 3453-3470

Jasinski L., Dabrowski M. (2018) The effective transmissivity of a plane-walled fracture with circular cylindrical obstacles. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 123, 242-263

Olkiewicz P., & Dabrowski M. (2017) Numerical modelling of single-phase flow in rough fractures with contacts. *EGU General Assembly Conference Abstracts* 19

Olkowicz M., Dabrowski M., Pluymakers A. (2019) Focus stacking photogrammetry for micro-scale roughness reconstruction: a methodological study. *The Photogrammetric Record,* 34, 11-35

Souche A., Dabrowski M., Andersen T.B. (2014) Modeling thermal convection in supradetachment basins: Example from western Norway. *Geofluids*, 14(1), 58-74

Dynamika zawiesin

W swojej pracy doktorskiej analizowałem problem rozwoju struktur deformacyjnych wokół sztywnej, rotującej inkluzji w ośrodku uwarstwionym poddanym ścinaniu prostemu w tle. W tym okresie zainteresowałem się też ogólniejszym zagadnieniem kolektywnej dynamiki klastów w strefach ścinania. W badaniach skupiłem się na wpływie koncentracji oraz kształtu inkluzji na stopień uporządkowania ich orientacji, a także efektywną lepkość całego systemu. Wstępne wyniki moich badań przedstawiłem podczas kilku międzynarodowych konferencji (np. Dabrowski, 2009; Dabrowski, 2010). W kolejnych latach dopracowywałem i dostosowywałem narzędzia numeryczne do analizy dynamiki sztywnych inkluzji w strefach prostego i czystego ścinania, z uwzględnieniem periodycznej symetrii układu. Zastosowane sformułowanie i użyta metoda numeryczna pozwoliły na dużą swobodę przy doborze numerycznych metod całkowania trajektorii inkluzji, co umożliwiło przeprowadzenie analizy ich wydajności, szczególnie w kontekście numerycznego rozwiązywania dynamiki bliskiego kontaktu między inkluzjami (badania prowadzono w granicy hydrodynamicznej, bez wprowadzania sztucznych oddziaływań, które miałyby na celu ograniczenie rozwoju małych apertur między inkluzjami).

W późniejszym okresie zagadnienia związane z dynamiką zawiesin były przedmiotem badań prowadzonych w ramach pracy doktorskiej Pana Kjetila Thøgersena, której byłem opiekunem. Badania te wymagały całkowania trajektorii inkluzji, których ilość sięgała w niektórych modelach kilku tysięcy, w reżimie bardzo dużych odkształceń (ścinanie proste o odkształceniu γ>100). W swojej pracy Pan Thøgersen studiował m.in. zjawiska samodyfuzji i klastrowania inkluzji w zawiesinie, które poddał szczegółowej analizie z wykorzystaniem metod fizyki statystycznej (Thøgersen i in., 2016). W publikacji Thøgersena i Dąbrowskiego (2017) przeanalizowany został wpływ rotacji inkluzji na efektywność procesu mieszania w płynie. Przeprowadzone zostały też symulacje, które pozwoliły na ocenę fluktuacji efektywnej anizotropii lepkości zawiesiny w powiązaniu z ewolucją jej mikrostruktury, a wyniki tych badań zostały opisane w jednym z rozdziałów pracy doktorskiej Pana Thøgersena. Interesującym zjawiskiem obserwowanym w zawiesinach, w tym w badanych przez wulkanologów układach kryształ-stop, jest migracja inkluzji (klastów) związana z gradientem ich koncentracji oraz gradientem prędkości ścinania (efekt Bagnoldsa). Przeprowadzone przez nas pilotażowe badania wskazują na to, że bezpośrednia, numeryczna analiza efektu Bagnoldsa wymaga studiowania systemów poddanych dużo większym odkształceniom (γ>1000) oraz ze znacznie większą liczbą inkluzji (N>10000).

Dabrowski M. (2010) Crystal-bearing melts – a perplexing rheological enigma. *22th Kongsberg Seminar*, Kongsberg, Norwegia

Dabrowski M. & Schmid D.W. (2009) Effective mechanical properties of composite rocks. *Deformation, Rheology & Tectonics*, Liverpool, UK

Thøgersen K., Dabrowski M., Malthe-Sørenssen A. (2016) Transient cluster formation in sheared non-Brownian suspensions. *Physical Review E - Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics,* 93 (2), 022611

Thøgersen K., Dabrowski M. (2017) Mixing of the fluid phase in slowly sheared particle suspensions of cylinders. *Journal of Fluid Mechanics*, 818, 807-837

Metody numeryczne oraz ich implementacja

Ważnym obszarem mojej aktywności badawczej są prace związane z rozwijaniem, ulepszaniem i implementacją narzędzi numerycznych, w tym przede wszystkim metody

elementów skończonych (MES) w zastosowaniu do problemów termo-mechanicznych dyskretyzowanych niestrukturalnymi siatkami obliczeniowymi. Po uzyskaniu stopnia doktora brałem udział w pracach badawczych mających na celu optymalizację wydajnościową zrównoleglonej implementacji procedury mnożenia macierzy rzadkiej przez wektor, która stanowi trzon iteracyjnych metod rozwiązywania układów równań liniowych związanych z niestrukturalnymi dyskretyzacjami MES (Krotkiewski i Dabrowski, 2010). W kolejnej pracy Krotkiewskiego i Dąbrowskiego (2013) przedstawiona została wysokowydajna, dostosowana do kart graficznych, implementacja procedury działania szablonu („stencila") obliczeniowego na trójwymiarowy, regularny grid danych. Procedura ta stanowi istotny i często wywoływany krok obliczeniowy m.in. podczas rozwiązywania równań różniczkowych dyskretyzowanych metodą różnic lub elementów skończonych na siatkach strukturalnych. W późniejszym okresie zajmowałem się też opracowaniem procedury mnożenia wektora przez macierz rzadką związaną z niestrukturalną dyskretyzacją MES w wariancie pozwalającym na uniknięcie jej jawnego tworzenia. Tego typu podejście umożliwia znaczną oszczędność pamięci operacyjnej, przy akceptowalnych narzutach obliczeniowych.

Po doktoracie angażowałem się w prace badawcze i implementacyjne mające na celu ulepszanie i rozwijanie pakietu obliczeniowego MILAMIN (www.milamin.org), którego pierwotna wersja została opublikowana w ramach mojej pracy doktorskiej. Działania te rozwijały się wielotorowo. Opracowałem i zaimplementowałem procedury pozwalające na zastosowanie kodu w przypadku materiałów nieliniowych. Implementacja dostosowana do nieliniowych materiałów lepkich (płyn Carreau) została m.in. użyta w pakiecie FOLDER (Adamuszek i in., 2016), który jest narzędziem do analizy struktur tektonicznych w ośrodkach uwarstwionych. Działanie kodu dla materiałów sprężysto-plastycznych o prostej obwiedni wytrzymałości zgodnym z kryterium von Misesa zostało opisane w publikacji Yarushiny i in. (2010). W późniejszym okresie rozwinąłem też sformułowanie obejmujące przypadek plastyczności typu Drucker-Prager. Opracowałem też kilka ulepszeń względem pierwotnej wersji kodu, m.in. w zakresie obliczania tzw. macierzy sztywności w MES oraz aplikacji warunków brzegowych. Byłem też zaangażowany w prace programistyczne mające na celu zakodowanie oraz optymalizację szeregu narzędzi pomocniczych, w tym z obszaru geometrii obliczeniowej. Uczestniczyłem też w licznych dyskusjach dotyczących *stricte* optymalizacyjnych i implementacyjnych prac prowadzonych przez dr. Marcina Krotkiewskiego, których efektem jest pakiet wysokowydajnych procedur numerycznych MUTILS, wspierających obliczenia MES dla siatek niestrukturalnych.

Adamuszek M., Dabrowski M., Schmid D.W. (2016) Folder: A numerical tool to simulate the development of structures in layered media. *Journal of Structural Geology*, 84, 85-101

Krotkiewski M., Dabrowski M. (2010) Parallel symmetric sparse matrix-vector product on scalar multi-core CPUs. *Parallel Computing*, 36(4), 181-198

Krotkiewski M., Dabrowski M. (2013) Efficient 3D stencil computations using CUDA. *Parallel Computing*, 39(10), 533-548

Yarushina V.M., Dabrowski M., Podladchikov Y.Y. (2010) An analytical benchmark with combined pressure and shear loading for elastoplastic numerical models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 11(8)

Podsumowanie dorobku

Mój dorobek obejmuje 40 publikacji indeksowanych w bazie Web od Science (WoS), z czego 6 publikacji wchodzi w skład omawianego osiągnięcia, a 5 związanych jest z moim doktoratem. Wskaźnik IF publikacji wchodzących w skład prezentowanego cyklu wynosi 15,364, prac związanych z doktoratem 12,415, a sumaryczny wskaźnik IF wszystkich moich publikacji to 105,361. Według wskazań bazy WoS (stan na 06.04.2020) prace stanowiące omawiane osiągnięcie cytowane były łącznie 57 razy (47 z pominięciem autocytacji), prace związane z moim doktoratem 187 (151 bez autocytacji), a zbiorczy indeks cytowań wszystkich moich publikacji wyniósł 453 (377 bez autocytacji). W moim dorobku znajduje się też 9 publikacji nieindeksowanych w bazie WoS oraz rozdział w monografii. Mój indeks Hirsha według bazy WoS wynosi 13.

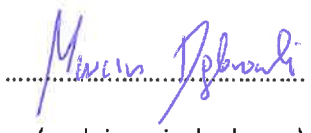
Jestem autorem lub współautorem 187 doniesień konferencyjnych, prezentowanych głównie podczas międzynarodowych konferencji. Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiłem 15 referatów, w tym 6 wykładów na zaproszenie. Osobiście zaprezentowałem 25 posterów, z czego 16 po uzyskaniu stopnia doktora. Jestem też współautorem 40 referatów (35 po uzyskaniu stopnia doktora) oraz 105 posterów (100 po uzyskaniu stopnia doktora).

Byłem liderem kilkuosobowych zespołów badawczych realizujących zadania w projektach *ShaleSeq* i *ShaleMech* finansowanych przez NCBiR. Brałem udział w realizacji projektów finansowanych przez KBN, NCN i ERC.

W latach 2008-2020 sporządziłem 36 recenzji prac naukowych, w tym 8-krotnie dla *Journal of Structural Geology.* Przygotowałem też recenzję rozprawy doktorskiej procedowanej w ETH Zurich.

Po uzyskaniu stopnia doktora byłem promotorem pomocniczym 7 obronionych prac doktorskich oraz opiekowałem się 6 pracami magisterskimi.

Za rozprawę doktorską otrzymałem złoty medal JKM Króla Norwegii. Już po uzyskaniu stopnia doktora zostałem nagrodzony za działalność dydaktyczną w PGP na Uniwersytecie w Oslo. Trzykrotnie otrzymałem nagrody specjalne Dyrektora PIG-PIB, w tym za całokształt działalności naukowej w 2019 r. Zostałem też wyróżniony w kategorii *Dorobek* w zorganizowanym przez Ministerstwo Środowiska konkursie „Geologia 2019".



(podpis wnioskodawcy)