



Referat wygłoszony w dniu 19 lutego 2025r. na posiedzeniu Komisji Nauk Geologicznych PAN Oddział w Krakowie

Polska Akademia Nauk
Oddział w Krakowie
Komisja Nauk Geologicznych

Mgr Szymon Świątek

Doktorant
Pracownia Badań Systemów Depozycyjnych
Szkola Doktorska Nauk Przyrodniczych
Instytut Geologii
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu
ul. Krygowskiego 12, 61-680 Poznań
e-mail: szymon.swiatek@amu.edu.pl

Cechy osadów upłynnionych na przykładzie struktur deformacyjnych

Wprowadzenie

Upłynnienie osadów jest procesem geologicznym, w którym wzrost ciśnienia porowego powoduje tymczasową utratę wytrzymałości na ścinanie, doprowadzając do mobilizacji ziaren i zmian w strukturze osadu nieskonsolidowanego. Powstałe w wyniku tego procesu struktury deformacyjne, takie jak pseudonodule, struktury typu *load casty*, czy piłek i poduszek (ang. *ball and pillow*), struktury płomieniowe (ang. *flames*) czy wulkany klastyczne, nazywane są w literaturze anglojęzycznej *soft-sediment deformation structures (SSDS)*. Struktury te są szczególnie cenne w badaniach paleośrodowiskowych.

Sejsmity, czyli warstwy osadów zdeformowanych pod wpływem wstrząsów sejsmicznych, powstają w efekcie upłynnienia (ang. *liquefaction*) i uwodnienia (ang. *fluidization*) osadów nieskonsolidowanych. Proces ten jest zazwyczaj wywoływany przez fale sejsmiczne, które redukują odporność na ścinanie i prowadzą do zmiany stanu osadów z ciała stałego na plastyczne, powodując często przy tym rozwój SSDS. Sejsmity występują najczęściej w bezpośrednim sąsiedztwie epicentrów trzęsień ziemi (<30 km) i są kluczowe w rekonstrukcji przeszłych zdarzeń sejsmicznych (Moretti i in., 1999).

Rozpoznanie struktur sejsmogenicznych jest jednak sporym wyzwaniem. Podobne formy deformacji mogą powstawać w wyniku innych mechanizmów, takich jak procesy peryglacjalne, szybka agradacja czy uderzenia meteorytów (Pisarska-Jamroży i in., 2018). Aby potwierdzić lub wykluczyć sejsmiczne pochodzenie struktur deformacyjnych, konieczne jest wykorzystanie różnorodnych technik i metod badawczych, w tym analizy facjalnej, a także dokładny opis deformacji i rekonstrukcja stanu osadów przed deformacją. Ważna jest również ocena sił napędowych powodujących deformację na podstawie geometrii struktur i potencjalnych mechanizmów inicjujących. Badania te muszą uwzględniać wiedzę o regionalnej geologii, sytuacji tektonicznej, środowisku sedymentacyjnym, wieku i rozmieszczeniu

osadów, zawartości wody oraz stopniu ich konsolidacji (Owen i Moretti, 2011; Moretti i in., 2016). Istnieje kilka „stałych” kryteriów, które mogą potwierdzać lub wykluczać sejsmiczne pochodzenie struktur deformacyjnych. Do najważniejszych, wymienianych w literaturze (Owen, 1985; Moretti i in., 1999; Owen i Moretti, 2011), należą: (1) szeroki zasięg występowania struktur, (2) ich oboczna rozciągłość, (3) powtarzalność w profilu pionowym (tzw. budowa kanapkowa), (4) podobieństwo struktur do powstających współcześnie, (5) obecność deformacji plastycznych i kruchych w sąsiedztwie i (6) zmniejszenie intensywności struktur wraz z oddalaniem się od epicentrum.

Badania terenowe obejmowały pozyskanie 144 próbek osadu z 8 stanowisk, w których rozpoznano struktury deformacyjne wywołane upłynnieniem (Nartišs i in., 2018; Pisarska-Jamroży i in., 2018, 2019a, 2019b; Woronko i in., 2018; Woźniak i in., 2021) (rys. 1). Pobrane próbki zostały następnie poddane szczegółowej analizie statystycznej uziarnienia, co pozwoliło na dokładne określenie składu granulometrycznego i właściwości osadów (Świątek i in., 2023). Badania laboratoryjne, z kolei, skoncentrowały się na przeprowadzeniu doświadczenia inkubacyjnego, polegającego na symulacji wstrząsów sejsmicznych w kontrolowanych warunkach, mającego na celu odtworzenie procesów prowadzących do upłynnienia i deformacji osadów. Zbadano również wpływ różnych substancji chemicznych (getyt, siarczan żelaza) na powstawanie i rozwój SSDS. Na podstawie tych badań dokonano rozszerzenia kryteriów SSDS o pochodzeniu sejsmicznym.

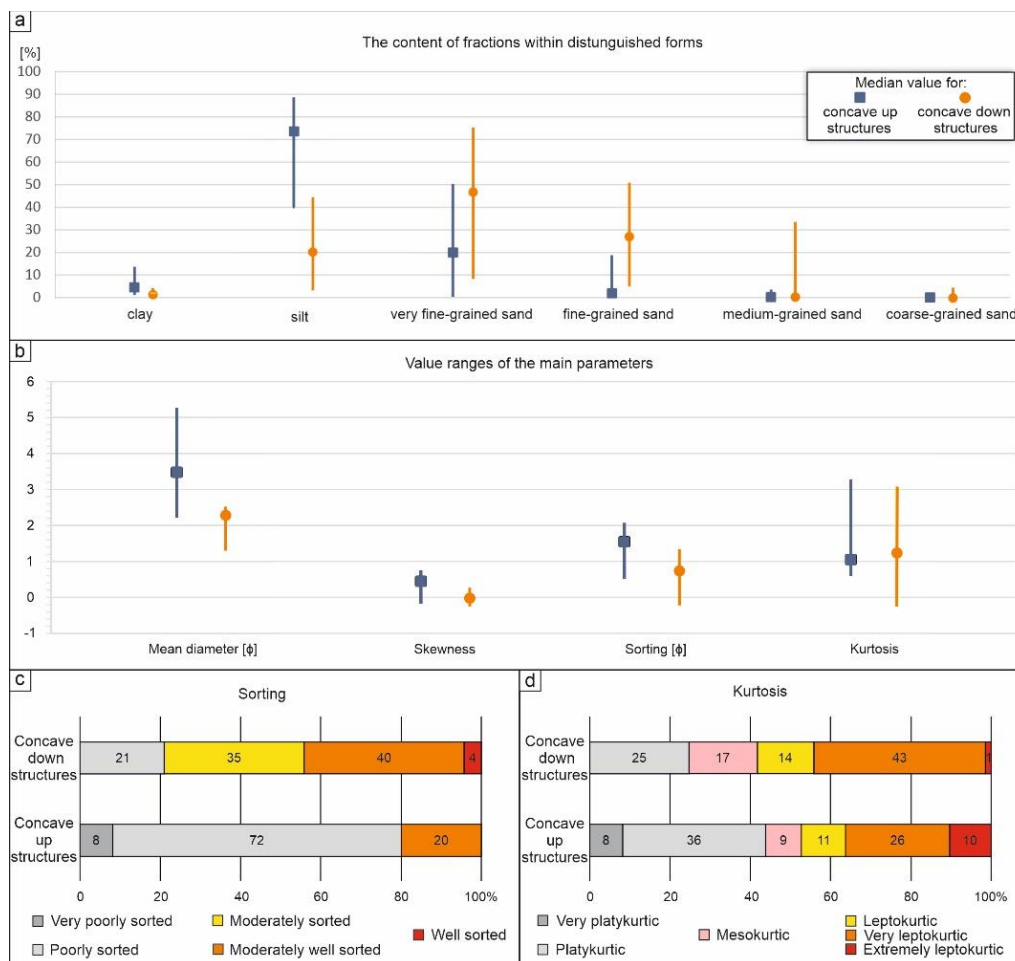
Wyniki badań terenowych i laboratoryjnych



Rys. 1. Lokalizacja stanowisk badawczych (Strefa S-T — strefa uskokowa Sorgenfrei-Tornquist, LGM — maksymalny zasięg lądolodu fennoskandzkiego podczas ostatniego maksimum glacialnego)

Rozpoznane struktury deformacyjne podzielono na struktury wklęsłe do góry oraz wklęsłe w dół. Osady struktur wklęsłych do góry (tj. iniekcje, dajki, struktury płomieniowe) charakteryzują się bardzo wysoką zawartością pyłu oraz stosunkowo niską zawartością bardzo drobnego i drobnego piasku, podczas gdy osady struktur wklęsłych w dół (pseudonodule, *load casty*, struktury typu piłek i poduszek) cechuje przewaga bardzo drobnego i drobnego piasku oraz znacznie niższa zawartość frakcji pylastej (rys. 2). Zawartość frakcji ilastej w osadach struktur wklęsłych do góry wynosi od 2% do 14%, a w strukturach wklęsłych w dół od 0% do 3%. Średnica ziaren w osadach struktur wklęsłych do góry jest mniejsza i bardziej zróżnicowana niż w strukturach wklęsłych w dół. Wartości wysortowania osadów w strukturach wklęsłych do góry są ponad dwukrotnie wyższe, co oznacza, że są one głównie słabo lub

bardzo słabo wysortowane, w przeciwieństwie do struktur wklęsłych w dół, które są umiarkowanie lub dobrze wysortowane. Wartości kurtozy są porównywalne w obu typach struktur, jednak bardziej platykurtyczne rozkłady występują w strukturach wklęsłych do góry niż w strukturach wklęsłych w dół, gdzie dominują rozkłady leptokurtyczne lub bardzo leptokurtyczne.

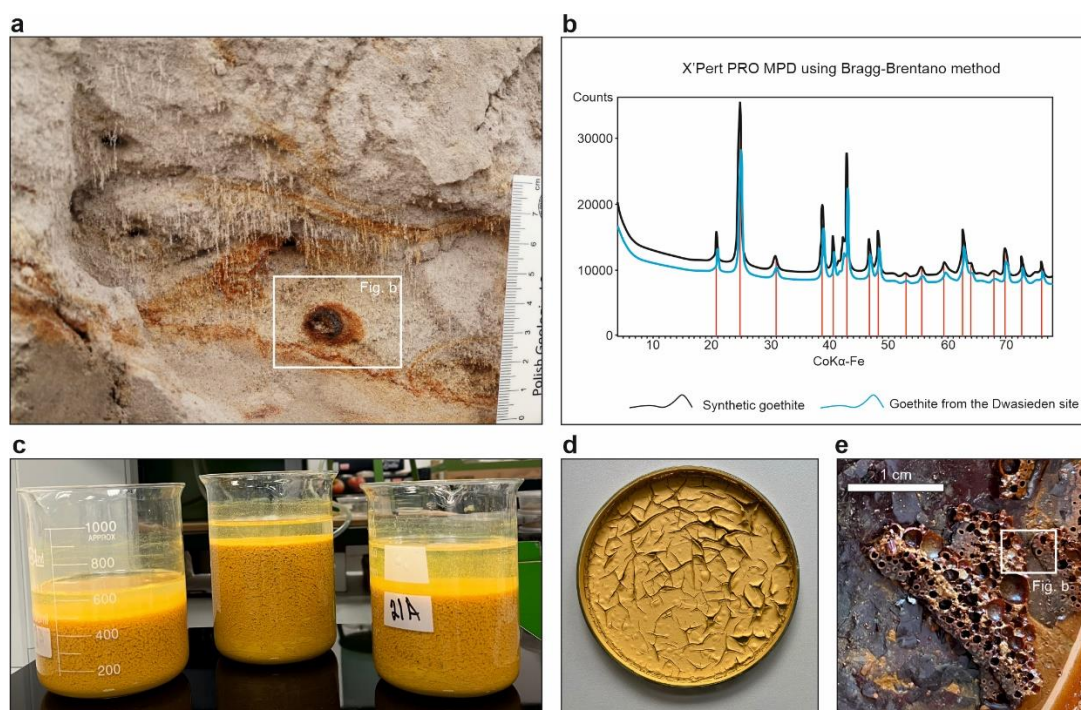


Rys. 2. Wartości poszczególnych frakcji i parametrów oraz ich udział w strukturach wklęsłych do góry i wklęsłych w dół, przedstawione dla: (a) frakcji, (b) podstawowych parametrów statystycznych, (c) wysortowania oraz (d) kurtozy.

Wyniki przeprowadzonego eksperymentu laboratoryjnego

W eksperymencie laboratoryjnym 108 cylindrów wykonanych z przezroczystego pleksi, wypełnionych zostało różnymi sukcesjami uwodnionych osadów o strukturze masywnej, imitujących naturalnie występujące profile sedymentologiczne, które następnie zostały nawodnione. Modele powstawania struktur deformacyjnych zakładały różne układy osadów (m.in. o różnym uziarnieniu i uwodnieniu, miąższości i układzie warstw), i odnosiły się do obserwacji terenowych i dotychczas opublikowanych wyników badań (np. Pisarska-Jamroży i in., 2019; Belzyt i in., 2021). Dodatkowo, osady były także wzbogacane w m.in. związki żelaza, tj. siarczan żelaza, getyt (rys. 3). Kolejnym etapem przeprowadzanych doświadczeń była inicjacja wstrząsów sejsmicznych (fali szokowej) przy wykorzystaniu urządzenia imitującego fale sejsmiczne (magnituda (~ 3.5), częstotliwość (50 Hz), amplituda (3 mm) a czas trwania nie przekraczał 15 s). Cylindry były inkubowane w warunkach

ograniczonej dostępności światła oraz odpowiednio zamknięte, celem ograniczenia dostępu powietrza, co miało na celu próbę wytworzenia warunków redukcyjnych. Kolejnym krokiem były, w zaplanowanych odstępach czasu (miesiąc, trzy miesiące, pół roku, rok), pomiary odczynu roztworu i potencjału oksydacyjno-redukcyjnego (ORP). Powstałe SSDS zostały badane metodami sedimentologicznymi (makroskopowo), chemicznymi i tomograficznymi.



Rys. 3. Etapy przygotowania badań. (a) Akumulacje getytu zaobserwowane w stanowisku Dwasieden. (b) Analiza XRF materiału bogatego w żelazo przeprowadzona na Uniwersytecie Warszawskim, potwierdzająca identyfikację getytu. (c) Przygotowanie syntetycznego getytu, obejmujące proces podgrzewania i neutralizacji do pH 7. (d) Wysuszony syntetyczny getyt. (e) Krystalizacja getytu w próbkach laboratoryjnych.

Podsumowanie

- Osady struktur wklęsłych w górę są bardziej drobnoziarniste niż osady struktur wklęsłych w dół i zawierają wyższą zawartość iłu i pyłu. Ponadto zauważono, że im większa średnia średnica, tym większa wartość wysortowania, a także im większy współczynnik skośności osadów struktur wklęsłych w dół, tym większa wartość ich wysortowania. Słabe wysortowanie osadów może wynikać z: (a) wychwywania drobniejszych, lżejszych ziaren otaczających osadów, obecnych podczas ucieczki osadu, (b) wymywania mniejszych frakcji z otaczających osadów, lub (c) mieszania osadów. Osady struktur wklęsłych w dół charakteryzują się dominującą zawartością piasku.
- W żadnym z analizowanych osadów zawartość frakcji ilastej ($<2 \mu\text{m}$) nie przekroczyła 14%. Wartość ta, zgodnie z wynikami dotychczasowych badań, wydaje się być maksymalną zawartością iłu w osadach podatnych na upłynnienie. Wysoka zawartość iłu (14%) wiąże się jednocześnie z dużą zawartością pyłu ($>75\%$).
- Mobilizacja frakcji pylastej jest siłą napędową inicjującą dalszy proces deformacji, szczególnie w przypadku struktur iniekcyjnych. Najbardziej podatny na mobilizację podczas zjawisk upłynniania i uwodnienia jest osad pylasty.

- Wpływ związków chemicznych, takich jak np. siarczan żelaza czy wodorotlenek żelaza mają istotny wpływ w powstawaniu, rozwoju i zapisie struktur deformacyjnych. Obecność substancji chemicznych inicjuje przeobrażenia mineralne, np. kwarcu czy glinokrzemianów. Ponadto, badania laboratoryjne pozwoliły na obserwację nowych zmian osadu i ziaren go budujących podczas wstrząsów sejsmicznych i krótko po nich.
- Badania wykazały, że upłynnienie osadów prowadzi do powstania zróżnicowanych mikrostrukturalnych zmian w ziarnach kwarcu, takich jak subtelne czy wyraźne pęknięcia, korozja krawędzi i defragmentacja. Zmiany te były szczególnie intensywne w warunkach silnego nawodnienia zmineralizowaną wodą, co może wnioskować, że procesy chemiczne mogą mieć znaczącą rolę w stopniu zachowania ziaren. Eksperymenty ujawniły również, że w wyniku aktywności sejsmicznej na ziarnach kwarcu formowały się nanocząstki i skupiska złota, co stanowi bezpośredni dowód na udział sejsmiczności w mobilizacji i depozycji minerałów (Voisey i in., 2024). Wyniki podkreślają rolę interakcji mechanicznych i chemicznych w procesach deformacji osadów, a także znaczenie morfologii ziaren kwarcu w rekonstrukcji paleosejsmicznych zdarzeń.

Literatura:

- Moretti, M., Alfaro, P., Caselles, O., Canas, J.A., 1999. Modelling seismites with a digital shaking table. *Tectonophysics* 304, 369–383.
- Moretti, M., Alfaro, P., Owen, G., 2016. The environmental significance of soft-sediment deformation structures: key signatures for sedimentary and tectonic processes. *Sedimentary Geology* 344, 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.10.002>.
- Nartišs, M., Woronko, B., Pisarska-Jamroży, M., Belzyt, S., & Bitinas, A. (2018). Injection structures and load casts in lagoon sediments (Sārņate outcrop, W Latvia). Paper presented at International Palaeoseismological Field Workshop, Lithuanian Geological Survey, Lithuanian Geological Society, Vilnius, Lithuania.
- Owen, G., 1985. Mechanisms and controls of deformation in unconsolidated sands: an experimental approach. Unpublished PhD thesis, University of Reading.
- Owen, G., Moretti, M., 2011. Identifying triggers for liquefaction-induced soft-sediment deformation in sands. *Sedimentary Geology* 235, 141–147. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2010.10.003>
- Pisarska-Jamroży, M., Belzyt, S., Bitinas, A., Jusienė, A., & Woronko, B. (2019a). Seismic shocks, periglacial conditions and glaciotectonics as causes of the deformation of a Pleistocene meandering river succession in central Lithuania. *Baltica*, 32(1), 63–77. <https://doi.org/10.5200/baltica.2019.1.6>
- Pisarska-Jamroży, M., Belzyt, S., Bitinas, A., Jusienė, A., Damušytė, A., & Woronko, B. (2018). A glaciolacustrine succession (Dyburiai outcrop, NW Lithuania) with numerous deformed layers sandwiched between undeformed layers. Paper presented at International Palaeoseismological Field Workshop, Lithuanian Geological Survey, Lithuanian Geological Society, Vilnius, Lithuania.
- Pisarska-Jamroży, M., Belzyt, S., Börner, A., Hoffmann, G., Hüneke, H., Kenzler, M., et al. (2019b). The sea cliff at Dwasieden: Soft-sediment deformation structures triggered by glacial isostatic adjustment in front of the advancing Scandinavian Ice Sheet. *DEUQUA Special Publications*, 2, 61–67. <https://doi.org/10.5194/deuquasp-2-61-2019>

- Świątek, S., Belzyt, S., Pisarska-Jamroży, M., Woronko, B., 2023. Sedimentary records of liquefaction: Implications from field studies. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 128, e2023JF007152. <https://doi.org/10.1029/2023JF007152>
- Voisey, C.R., Hunter, N.J.R., Tomkins, A.G., Brugger, J., Liu, W., Liu, Y., Luzin, V., 2024. Gold nugget formation from earthquake-induced piezoelectricity in quartz. *Nat. Geosci.* 17, 920–925. <https://doi.org/10.1038/s41561-024-01514-1>
- Woronko, B., Pisarska-Jamroży, M., Belzyt, S., Karmazienė, D., Bitinas, A., & Damušytė, A. (2018). Multi-type soft-sediment deformation structures in glaciolacustrine kame sediments (Liciškėnai outcrop, S Lithuania). Lithuanian Geological Survey, Lithuanian Geological Society. Paper presented at International Palaeoseismological Field Workshop.
- Woźniak, P. P., Belzyt, S., Pisarska-Jamroży, M., Woronko, B., Lamsters, K., Nartišs, M., & Bitinas, A. (2021). Liquefaction and re-liquefaction of sediments induced by uneven loading and glacialogenic earthquakes: Implications of results from the Latvian Baltic Sea coast. *Sedimentary Geology*, 421, 105944. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2021.105944>