
Zbigniew Jan Ziarek*

NARZĘDZIE GEOEDUKACYJNE NA POTRZEBY GEOTURYSTYKI – STUDIUM SEDYMENTOLOGICZNEGO MODELOWANIA PRĄDU ZAWIESINOWEGO

Narzędzia geoedukacyjne ułatwiają dostrzeganie georóżnorodności w krajobrazie i elementach pojedynczego geostanowiska oraz uwrażliwiają odbiorcę na walory poznawcze i estetyczne. Skuteczność narzędzia geoedukacyjnego oparta jest na geointerpretacji, a samo narzędzie kierowane do geoturysty. Prezentowane narzędzie służy do zobrazowania procesów zasilania, transportu i sedymentacji materiału z prądu zawiesinowego, przy udziale którego powstaje turbidyt (jeden z rodzajów utworów fliszowych budujących Karpaty zewnętrzne). Zostało ono oparte na koncepcji sedymentologii procesowej obejmującej: (a) opis faktograficzny produktu, (b) interpretację procesu tworzenia, (c) konstrukcję ogólnego modelu niesprzecznego z obserwowanym zapisem skalnym – „od szczegółu do ogółu”. Realizacja projektu pozwoliła określić główne atrybuty narzędzia geoedukacyjnego: czytelność eksperymentu, jego wyrazistość, spektakularność, naturalizm i realizm. Dzięki nim odbiorca może poznać i zrozumieć zagadnienia dotyczące: naturalnego basenu sedymentacyjnego, punktowego zasilania zbiornika morskiego materiałem klastycznym, prądu zawiesinowego jako przykładu spływu grawitacyjnego osadu oraz modelu sedymentacji fliszowej w formie głębokomorskiego stożka.

THE GEOEDUCATIONAL TOOL FOR GEOTOURISM – A STUDY OF SEDIMENTOLOGICAL MODELING OF TURBIDITY CURRENT

A geoeducational tool is a common solution used to popularize knowledge about Earth Sciences. It facilitates the recognition of geodiversity in the landscape and the elements of individual geosites, sensitizing the audience to cognitive and aesthetic values. The effectiveness of the tool is based on a skilful geointerpretation. The target audience are geotourists. The goal of the presented geoeducational tool is to illustrate the processes of material feeding, transport, and sedimentation from a turbidity current, which contributes to the formation of turbidites (one of the types of flysch deposits that build the Outer Carpathians). The designed tool is based on the concept of process sedimentology: (a) factual description of the product, (b) interpretation of the creation process, (c) construction of a general model consistent with the observed rock record – „from detail to general.” The implementation of the project allowed for the determination of the main attributes of the geoeducational tool: experiment clarity, expressiveness, spectacularity, naturalism, and realism. Thanks to these attributes, the recipient is able to learn and understand issues related to the natural sedimentary basin, point- source feeding of the basin with clastic material, turbidity current as an example of sediment gravity flow, and the model of flysch sedimentation in the form of a submarine fan.

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Koło Naukowe „Geoturystyka”, Studenckie Koło Naukowe Kartografii Geologicznej i Komputerowej „Azymut”.

1. WPROWADZENIE

Celem projektu było stworzenie narzędzia w postaci filmu geoedukacyjnego z treścią geointerpretacyjną dotyczącą wybranego zagadnienia sedimentologicznego. Inspiracją do przeprowadzenia serii modelowań procesów sedimentacyjnych były pierwsze obserwacje terenowe autora poczynione w ramach zajęć terenowych w odsłonięciach fliszu karpackiego, wizyta w laboratorium sedimentologicznym Katedry Geologii Ogólnej i Geoturystyki WGGiOŚ AGH w Krakowie (rys. 1) [1], nad którym opiekę sprawują dr inż. Wojciech Mastej i dr inż. Tomasz Bartuś [2], a także modelowania sedimentacji przeprowadzone w tej pracowni przez Panów prof. Janusza Kotlarczyka i dra inż. Krzysztofa Pasierbiewicza [3].

Projekt narzędzia geoedukacyjnego oparto na idei geoedukacji, czyli popularyzacji wiedzy geologicznej przez przekazywanie informacji o obiektach przyrody nieożywionej i/lub procesów odpowiedzialnych za ich genezę, uznawanych za turystycznie atrakcyjne [4–9]. Narzędzie miało za zadanie zaprezentować i wyjaśnić naturę procesów sedimentacyjnych odpowiedzialnych za powstanie utworów prądów zawieszinowych, czyli turbidytów – reprezentujących jeden z rodzajów fliszu budującego Karpaty zewnętrzne (tzw. Karpaty fliszowe) [10–15].

Do realizacji zadania konieczne było zaprojektowanie i uruchomienie własnego studenckiego minilaboratorium sedimentologicznego (rys. 2), które następnie posłużyło jako „poligon doświadczalny”. Dzięki niemu osiągnięto cel geoedukacyjny, na który złożyły się wymienione poniżej geoturystyczne i geologiczne zadania.



Rys. 1. Laboratorium sedimentologiczne KGOiG WGGiOŚ AGH (fot. Z. Ziarek)



Rys. 2. Minilaboratorium sedimentologiczne, od lewej: R. Szczęch, P. Strzeboński, M. Pawlak, J. Andrzejak, J. Szydłowski, autor na pierwszym planie (fot. Z. Ziarek)

Zadania geoturystyczne:

- zaprezentowanie odbiorcy wyglądu hipotetycznego zbiornika morskiego, w którym powstawał jeden z rodzajów skał (turbidyty) budujących Karpaty fliszowe,
- pokazanie odbiorcy procesów: zasilania, transportu i osadzania materiału klastycznego, tworzących turbidyty,
- propozycja geointerpretacji na poziomie wiedzy odbiorcy, który nie jest specjalistą,
- popularyzacja wiedzy geologicznej oraz promocja geoturystyki przez geoedukację.

Zadania geologiczne:

- zobrazowanie podwodnego środowiska formowania się turbidytów – czyli morskiego basenu sedimentacyjnego,
- uzyskanie naturalistycznej konfiguracji zbiornika: morfologii skłonu oraz dna oceanicznego,
- przedstawienie procesu turbulencji zawiesiny, transportu grawitacyjnego osadu, powstawania turbidytów oraz swobodnego opadania najdrobniejszych cząstek,
- uzyskanie rozprzestrzenienia materiału klastycznego w postaci „wachlarza” (forma stożka głębokomorskiego),
- uzyskanie uziarnienia frakcjonalnego normalnego (tzw. gradacji normalnej), czyli struktury, w której nagromadzenie grubiej klastycznego osadu (osadzanego najwcześniej) występuje w części dolnej turbidytu, a drobniej klastycznego – w jego części górnej.

2. ETAPY PROJEKTOWANIA NARZĘDZIA GEOEDUKACYJNEGO

Film (narzędzie geoedukacyjne) miał za zadanie zilustrowanie i wyjaśnienie odbiorcy, w jakim środowisku, za pomocą jakich procesów oraz z jakiego materiału powstały turbidyty osadów fliszowych. Kolejne etapy projektowania narzędzia geoedukacyjnego obejmowały:

- ustalenie przedmiotu, celu, metod i odbiorcy,
- zgromadzenie, uporządkowanie i ewentualne uzupełnienie wiedzy, stanowiącej bazę merytoryczną do projektu narzędzia geoedukacyjnego,
- wybór zagadnień i elementów, które będą prezentowane za pomocą narzędzia,
- projektowanie merytoryczne,
- projektowanie techniczne,
- testowanie narzędzia oraz wprowadzanie poprawek i uzupełnień,
- opracowanie filmu z objaśnieniami.

3. FLISZ KARPACKI – CHARAKTERYSTYKA

Przedmiotem analogowych modelowań sedymentologicznych były osady eksperymentalne mające w szerokim przybliżeniu odpowiadać turbidytom [16, 17] – jednemu z typów karpackich utworów fliszowych (rys. 3) [10, 12–15].



Rys. 3. Flisz karpacki z turbidyty – odsłonięcie w Żegocinie (fot. Z. Ziarek)

Sedymentacja w zewnętrznokarpackich subbasenach przebiegała w zróżnicowanych warunkach geotektonicznych, głębokościowych i różnej odległości od obszarów alimentacyjnych (źródłowych), z których pierwotnie dostarczany był terygeniczny materiał okruchowy – zatem flisz może być rozpatrywany w szerokim znaczeniu [10–15]:

- w ujęciu genetycznym jako zespół osadów głębokomorskich (pozaszelfowych), utworzony z materiału pochodzenia terygenicznego, powstały przy dominującym udziale spływów grawitacyjnych osadu (m.in. prądów zawieszinowych);
- w ujęciu litologicznym jako serie osadowe składające się z przeławicających się skał klastycznych o zróżnicowanej frakcji (psefitowej, psamitowej, aleurytowej i pelitowej) – najczęściej naprzemianległych piaskowców i łupków mułowcowych lub iłowcowych, którym mogą towarzyszyć osady gruboklastyczne (zlepienie);
- w ujęciu geotektonicznym: miększe (liczone w setkach, a nawet kilku tysiącach metrów) serie skał osadowych powstałe w pre- lub wczesnoorogenicznym etapie rozwoju basenów sedymentacyjnych (zamykania/zgniatania basenów, dźwigania i denudowania obszarów źródłowych).

4. SEDYMENTOLOGIA PROCESOWA

Metodykę badań oparto na założeniach sedymentologii procesowej [7, 9, 14, 16], której idea postępowania „od szczegółu do ogółu” obejmuje warunki konieczne, takie jak:

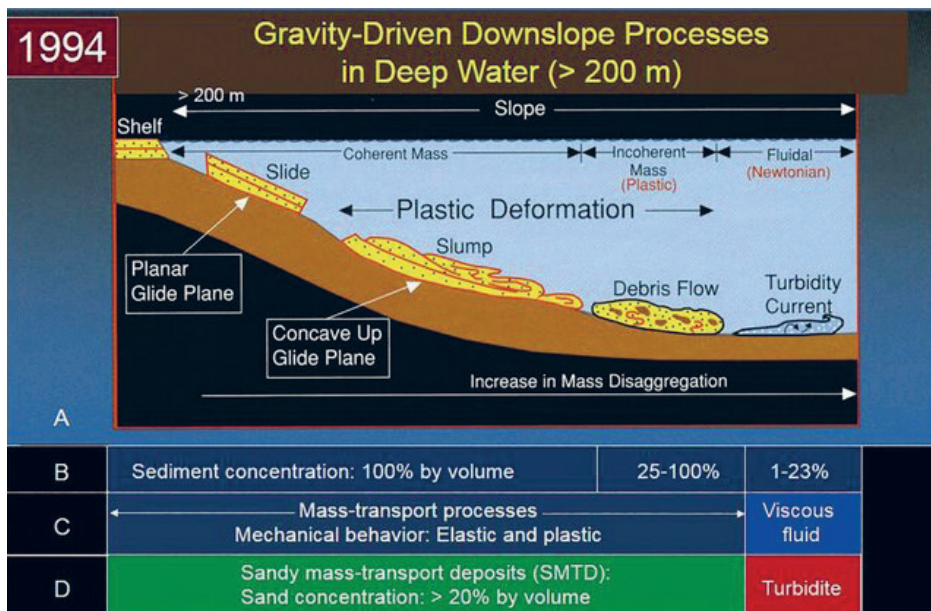
- szczegółowy opis wykształcenia produktu(ów), czyli charakterystyka cech litologiczno-sedymentologicznych, które można faktycznie zaobserwować (analiza faktograficzna);
- interpretację procesową, czyli dopasowanie możliwych mechanizmów transportowo-depozycyjnych do wykształcenia tychże produktów (analiza litologiczno-sedymentologiczna);
- założenie hipotetycznego modelu środowiskowo-depozycyjnego, które nie może być sprzeczne z faktami zebranymi na początku (zapis skalny) oraz ich interpretacją (szczegółową analizą teksturalno-strukturalną).

Model taki ma w prosty i czytelny sposób zobrazować zachodzące procesy geologiczne oraz pokazać ich produkty. Natomiast podczas modelowania zachowana musi być zgodność z rzeczywistością w takim stopniu przybliżenia, aby uzyskać możliwie najbardziej naturalistyczny obraz środowiska oraz warunki, w których analizowany proces i jego produkt mogłyby zaistnieć.

5. SPŁYWY GRAWITACYJNE OSADU

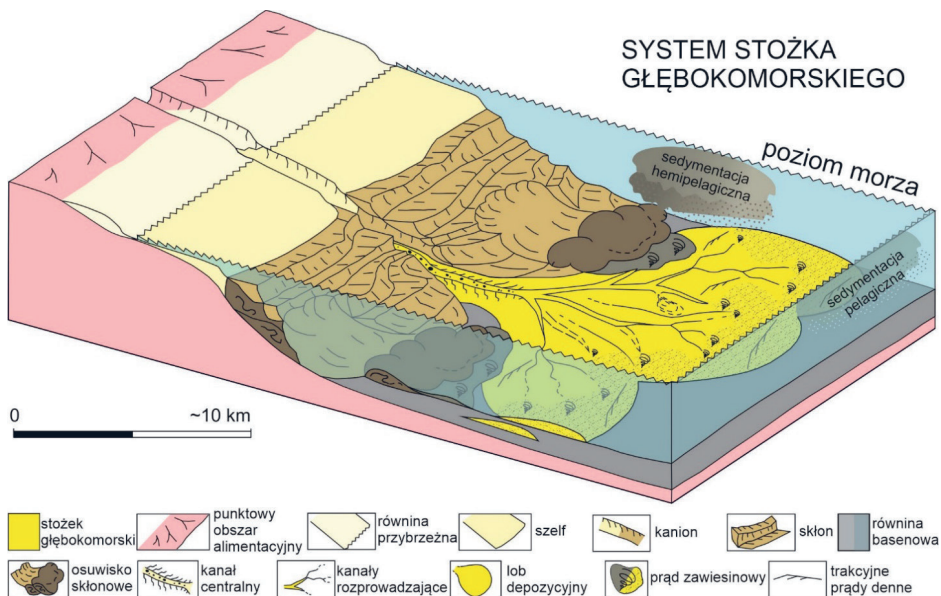
Istnieją różne spływy grawitacyjne osadów (rys. 4) [11, 14–17]: np. prądy zawieszinowe (rys. 5), których produktem są turbidyty (rys. 6) [9–17], czy spływy rumoszowe (kohezyjne i niekohezyjne) i ich produkty – debryty, których różne odmiany znane są np. z wielu odsłoneń skałek piaskowcowo-zlepieńcowych w Karpatach [7, 8, 14, 18, 19].

Głębokowodny prąd zawieszinowy to jeden z procesów grawitacyjnego transportu materiału klastycznego (jeden z typów spływów grawitacyjnych osadu), w którym podczas transportu dochodzi do turbulentnego mieszania osadu z otaczającą wodą (mechanizmem podtrzymującym przemieszczanie i utrzymywanie cząstek w zawieszeniu jest turbulencja).



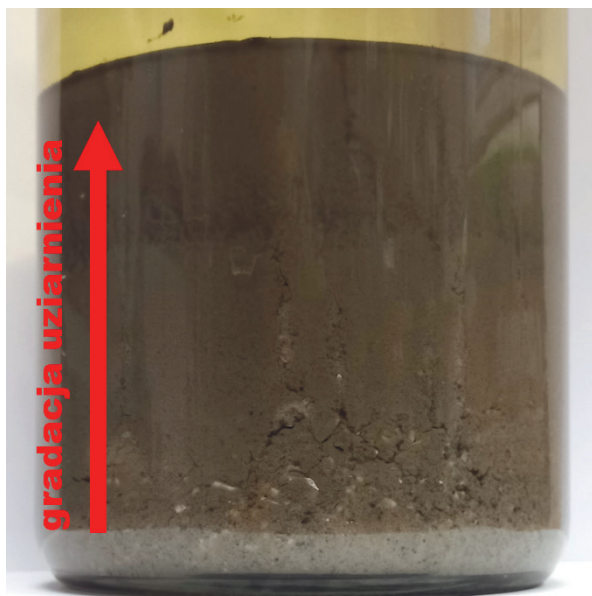
Rys. 4. Podmorskie spływy grawitacyjne

Źródło: [16]



Rys. 5. Model stożka głębokomorskiego

Źródło: opracowanie własne na podstawie [14]



Rys. 6. Model turbidyty uziarnionej frakcjonalnie normalnie (fot. Z. Ziarek)

Mieszanka osadu i wody tworząca niskoskoncentrowaną zawiesinę przemieszcza się grawitacyjnie za pośrednictwem turbulencji po skłonie i dnie basenu sedymentacyjnego. Turbulentna zawiesina stopniowo wytraca energię oraz prędkość i przechodzi od fazy erozyjnej (powstawanie m.in. jamek wirowych) do fazy depozycyjnej (grawitacyjna segregacja i powstawanie gradacji normalnej). Produktem tak rozumianego prądu zawiesinowego jest turbidyt o uziarnieniu frakcjonalnym normalnym, często z obecnymi na powierzchni spągowej odlewami jamek wirowych [11, 14].

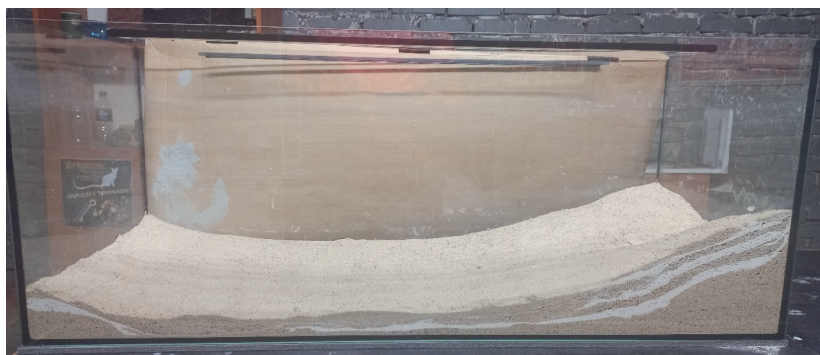
Utwory turbidytowe deponowane były głównie w dystalnej strefie basenu sedymentacyjnego (u podstawy skłonu i na równi basenowej) często w formie lobów depozycyjnych i ich obrzeżenia, tworzących razem z zasilającym kanałem centralnym, przechodzącym w rozgałęziające się kanały rozprowadzające, erozyjno-depozycyjny system głębokomorskiego stożka (rys. 5) [11, 14, 20].

6. POMYSŁ NA KONSTRUKCJĘ MINILABORATORIUM

Zamierzeniem autora było zrealizowanie filmu obrazującego mechanizm powstania (turbulencja) i rozwoju prądu zawiesinowego (transport i depozycja), a w konsekwencji tworzenia produktu (turbidyty). W tym celu należało stworzyć minilaboratorium naśladowujące naturalne środowisko, w którym zachodzą procesy sypływu turbulენტnej zawiesiny, depozycji uziarnionych frakcjonalnie normalnie turbidyty oraz formowania podwodnego stożka napływowego.

W tym celu opracowano następujące elementy składowe narzędzia geoedukacyjnego (rys. 7):

- jako zbiornik basenu sedymentacyjnego wykorzystano napełnione wodą akwarium (100 cm × 40 cm × 40 cm),
- jako skłon kontynentalny – zmatowioną płytę z pleksiglasu,
- jako alternatywne dla płyty wypełnienie dna – piasek,
- jako punktowe źródło zasilania – rurę plastikową zakończoną lejkiem,
- jako mieszadło do przygotowania zawiesiny (mieszaniny wody z gliną rzeźbiarską w stosunku około 4:1) zastosowano wiertarkę z wiertłem łopatkowym.



Rys. 7. Akwarium będące modelem basenu sedymentacyjnego (fot. Z. Ziarek)

7. PROBLEMY DO ROZWIĄZANIA

Problemy, które napotkano podczas kolejnych prób modelowania prądu zawiesinowego, sklasyfikowano jako merytoryczne i techniczne.

Problemy merytoryczne:

- Jakie powinny być proporcje elementów morfologicznych w modelu basenu sedymentacyjnego, aby w ograniczonej wielkości zbiorniku możliwe było zaprezentowanie prądu zawiesinowego?
- Pod jakim kątem powinien być nachylony „skłon kontynentalny” modelu?
- Z jakiego materiału powinna zostać przygotowana zawiesina i jaka powinna być jej koncentracja objętościowa?
- Jaki zakres merytorycznej geointerpretacji powinien być zaproponowany?

Problemy techniczne:

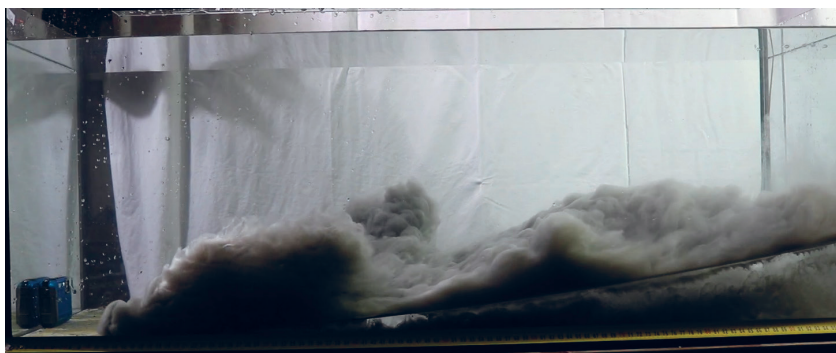
- Jak wprowadzić zawiesinę do akwarium?
- Z czego wykonać model skłonu kontynentalnego?
- Jakie ujęcia kamer zastosować?
- W jaki sposób oświetlić akwarium?
- Czy wprowadzić tło imitujące naturalne warunki środowiskowe, a jeśli tak, to jakiego powinno być rodzaju?

Zastosowano akwarium o znacznie większej długości niż szerokości ($100\text{ cm} \times 40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$), stanowiące przestrzeń dla modelu basenu sedymentacyjnego (rys. 7).

Model skłonu kontynentalnego początkowo został wykonany z płyty pleksiglasowej, zmatowionej na jednej powierzchni papierem ściernym w celu zwiększenia tarcia, na której naklejono piasek. Podobnie wykonano część odzwierciedlającą dno basenu. Na brzegi płyty imitującej skłon nałożono uszczelkę, zapobiegającą ślizganiu się płyty po dnie akwarium. Kąt nachylenia skłonu był regulowany.

W celu uzyskania bardziej naturalistycznego efektu modelu dna oceanicznego usypano go z piasku w dwóch kolorach, co oprócz odwzorowania morfologii miało symbolizować uławicenie. Dodatkowo zamarkowano warstwowanie typu sigmoidalnego, podkreślające morfologię skłonu. W części skłonowej wyprofilowano podłużny rowek mający odpowiadać kanałowi centralnemu, aby skanalizować punktowe rozprowadzanie i punktowe ujście prądu zawiesinowego.

W pierwszej fazie prób modelowania, jako materiału do utworzenia zawiesiny spływu użyto tzw. gliny rzeźbiarskiej. Używano wtedy samego iłu illitowego, który w zależności od wpuszczonej do akwarium ilości i koncentracji różnie się zachowywał (maksymalną ilość i koncentrację wyznaczono eksperymentalnie) (rys. 8). Przykładowo zbyt duża ilość wprowadzonej zawiesiny powodowała odbijanie prądu od przeciwległej szyby akwarium i zmianę jego kierunku albo brak wytworzenia prądu turbulentnego przy zbyt dużej koncentracji (około 30% obj.), co skutkowało powstaniem kohezynego spływu bez turbulencji. Przy koncentracji powyżej 40% nie doszło do rozprzestrzenienia zawiesiny – podczas wprowadzenia zawiesiny powstały kohezynne „kluchy” (rys. 9). W finalnej próbie użyto mieszaniny iłu kaolinitowego z pyłem kwarcowym. Za pomocą wiertarki i mieszadła przygotowano zawiesinę osadu i wody o koncentracji objętościowej około 23%. Pozwoliło to na uzyskanie rozdzielenia grawitacyjnego połączonych w zawieszinie osadów i uzyskanie efektu uziarnienia frakcjonalnego normalnego (grubszy pył kwarcowy na dole, a drobniejszy ił na górze). Odpowiednia ilość zawiesiny powodowała, że prąd nie odbił się, tylko spokojnie wytracił energię i osadził materiał w formie wachlarzowego stożka.



Rys. 8. Turbulentny prąd zawiesinowy (zawiesina z iłem illitowym o koncentracji objętościowej około 23%) – początkowe próby nieskanalizowanego (niepunktowego / na całej szerokości) modelowania na sztucznym pleksiglasowym skłonie (fot. Z. Ziarek)



Rys. 9. Z zawiesiny o zbyt dużej koncentracji objętościowej (około 40%) nie udało wytworzyć się prądu zawiesinowego – powstały tzw. kluchy (fot. Z. Ziarek)

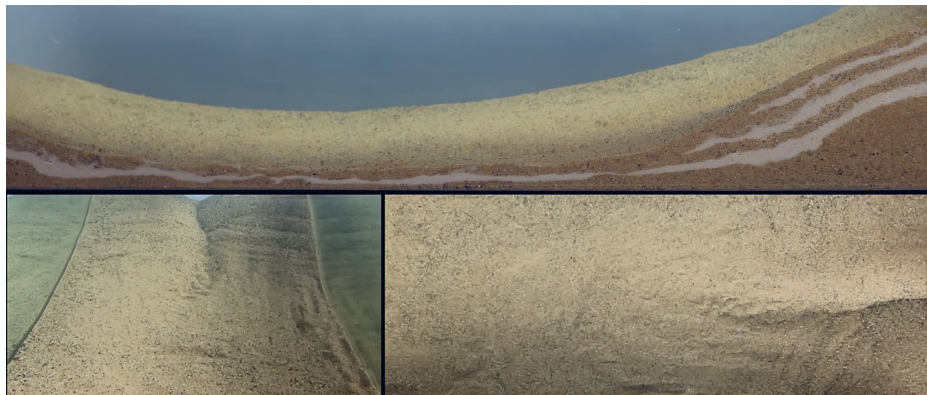
Aby model był jak najbardziej realistyczny, zastosowano punktowe źródło zasilania. W tym celu zawiesinę wprowadzono do akwarium na początek „kanału centralnego” przez rurę PCV (40 mm) z lejkiem na górze do łatwiejszego dozowania zawiesiny.

Przy pierwszych próbach filmowania modelowań (rys. 10) zwrócono uwagę na konieczność mocnego i równomiernego oświetlenia oraz zastosowania bardziej profesjonalnego tła, którym było dotychczas zwykłe, białe prześcieradło.



Rys. 10. Przygotowania do pierwszych modelowań.
Od lewej: J. Zasadni, P. Siwek, Z. Ziarek, J. Szydłowski, P. Strzeboński (fot. Z. Ziarek)

W finalnym produkcie zastosowano profesjonalne oświetlenie i tło ekranowe oraz sprawdzone wcześniej filmowanie z trzech ujęć kamer: od frontu, z boku i z góry (rys. 11).



Rys. 11. Przygotowany model basenu sedymentacyjnego (fot. K. Kulik)

8. NARZĘDZIE GEOEDUKACYJNE – FILM

Na etapie obróbki cyfrowej materiału filmowego dołożone zostały elementy „teatralności”: zmontowano obraz z trzech ujęć w spójną chronologicznie wizualizację procesu turbulentnego spływu grawitacyjnego oraz dołożono realistyczny pejzaż; ponadto wydzielono fragment ekranu na potrzeby wprowadzenia geointerpretacyjnych treści (rys. 12).



Rys. 12. Prąd zawiesinowy – ujęcie z trzech kamer (fot. K. Kulik)

Analizując końcową wersję finalnego produktu – filmu, dokonano podziału elementów tego narzędzia geoedukacyjnego na:

- elementy statyczne – basen, skłon, kanał centralny,
- elementy dynamiczne – turbulentny prąd zawieszinowy,
- geointerpretację – zakres i merytoryczny poziom treści geoedukacyjnej.

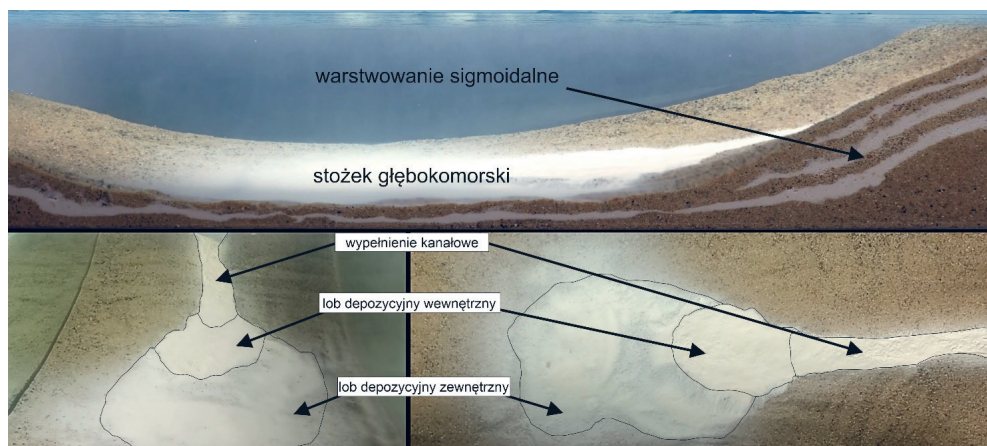
Projektowanie i konstruowanie narzędzia geoedukacyjnego pozwoliły ustalić najważniejsze cechy takiego narzędzia, którymi są:

- wyrazistość eksperymentu modelowania – sugestywność cechy,
- czytelność – ułatwienie zrozumienia,
- naturalizm – naśladowanie rzeczywistości,
- realizm – zgodność z obserwacjami, odtwarzanie rzeczywistości,
- spektakularność – wywarcie dużego wrażenia na odbiorcy,
- „teatralność” – sztuczność wywołująca konkretne wrażenie,
- powtarzalność – otrzymanie takiego samego wyniku w tych samych warunkach i przy tych samych parametrach.

9. WNIOSKI

Przeprowadzone fizyczne modelowania sedymentologiczne prądów zawieszinowych w poszukiwaniu analogii procesowej dla genezy turbidytów fliszu karpackiego, celem stworzenia narzędzia geoedukacyjnego, pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków.

- Tworzenie narzędzia geoedukacyjnego wymaga przygotowania merytorycznego na znacznie wyższym poziomie niż później prezentowane i objaśniane odbiorcy treści (szczegółowe studia literaturowe, obserwacje, badania terenowe itp.).
- Dopracowanie narzędzia wymaga wielu powtórzeń opartych na metodzie prób i błędów, pozwalających ostatecznie na osiągnięcie oczekiwanego efektu – uzyskania naturalistycznego modelu basenu sedymentacyjnego, turbulentnego prądu zawieszinowego i realistycznego modelu stożka głębokomorskiego (rys. 13). Jest to bardzo czasochłonne, pracochłonne i materiałochłonne.
- Efekt końcowy wymaga atrakcyjnej oprawy wizualnej.
- Poziom atrakcyjności można zwiększać przez dodanie ścieżki dźwiękowej, treści czytanych przez lektora, różnych wersji językowych itp.
- Zakres geointerpretacji prezentowanych procesów powinien być dostosowany do odbiorcy zdefiniowanego na początku prac.
- Jeśli pozwalają na to warunki, prezentowany poziom i zakres merytoryczny geointerpretacji powinien być sprawnie modyfikowany, w zależności od tego, kim jest aktualnie zainteresowany narzędziem odbiorca – inny poziom treści powinien być przeznaczony dla dzieci, a inny dla pasjonatów.
- Gotowy produkt może wzbudzić zainteresowanie jednostek muzealnych i być ekspozycyjny na wystawach związanych z budową Ziemi.



Rys. 13. Model stożka głębokomorskiego – ujęcie z trzech kamer

Podziękowania

Autor dziękuje recenzentom, Pani Ewie Welc i Panu Piotrowi Strzebońskiemu, za cenne uwagi i sugestie oraz za merytoryczne wsparcie w zakresie zagadnień geoturystycznych i sedimentologicznych. Za ciekawą dyskusję, rady i pomoc w tłumaczeniu na język angielski autor dziękuje Panu Markowi Wendorffowi. Za opiekę i pomoc w pozyskaniu środków finansowych niezbędnych do powstania i uruchomienia minilaboratorium sedimentologicznego – Opiekunom Studenckiego Koła Naukowego Kartografii Geologicznej i Komputerowej „Azymut” – Panom Jerzemu Zasadniemu, Andrzejowi Świąderowi i Piotrowi Strzeleckiemu. Za osobiste wsparcie idei i rozwoju projektu Panom Wojciechowi Mastejowi, Tomaszowi Bartusiowi, Piotrowi Siwkowi, Stanisławowi Godyniowi, Konstantemu Kulikowi oraz Paniom Monice Pilarz i Renacie Stadnik. Za nieocenione pomysły i pomoc merytoryczną w trakcie realizacji prac laboratoryjnych – Piotrowi Strzebońskiemu, a za wsparcie logistyczne Kolegom z Koła – Radosławowi Szczęchowi, Jakubowi Andrzejakowi, Mikołajowi Pawlakowi, Janowi Szydłowskiemu, a także Marcelowi Mrocze, Karolowi Herokowi, Adamowi Garbarczykowi, Michałowi Majewskiemu, Nicolasowi Sołkowi i Dominikowi Polakowi. Pracę zrealizowano przy wsparciu i pod opieką naukową Pani Ewy Welc i Pana Piotra Strzebońskiego w ramach działalności kół naukowych WGGiOŚ Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie – Koła Naukowego „Geoturystyka” oraz Studenckiego Koła Naukowego Kartografii Geologicznej i Komputerowej „Azymut”.

LITERATURA

- [1] Pasierbiewicz K.W., *Laboratorium do modelowych badań sedimentologicznych*, Zeszyty Naukowe Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica, nr 488, Geologia, t. 1, z. 1, 1975, s. 49–60.
- [2] Bukowski K., Mastej W., Kępiński J., *Badania laboratoryjne nad sedimentacją osadów mułowo-solnych w zależności od warunków przepływu i charakteru materiału sedimentacyjnego*, Technika Poszukiwań Geologicznych. Geosynoptyka i Geotermia, r. 44, z. 234–235, nr 4–5, 2005, s. 69–76.

- [3] Pasierbiewicz K.W., Kotlarczyk J., *Flume experiments with fine-grained suspension, with applications for the origin of mud laminites*, Journal of Sedimentary Research, vol. 67, no. 3, 1997, s. 510–513, <https://doi.org/10.1306/D42685B3-2B26-11D7-8648000102C1865D>.
- [4] Słomka T., Kicińska-Świdarska A., *Geoturystyka – podstawowe pojęcia*, Geoturystyka, vol. 1(1), 2004, s. 5–7.
- [5] Welc E.M., Miśkiewicz K., *Geoturystyka i geoedukacja w rezerwacie przyrody nieożywionej „Prądky” im. prof. Henryka Świdzińskiego*, Geotourism/Geoturystyka, vol. 1–2(56–57), 2019, s. 11–42, <https://doi.org/10.7494/geotour.2019.56-57.2>.
- [6] Migoń P., *Geoturystyka*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.
- [7] Strzeboński P., *Residual rocky forms in the landscape of the Outer Carpathians (Silesian Beskid Mts, Poland) – geotourist and sedimentological case study*, Geotourism/Geoturystyka, vol. 18(1–2) (64–65), 2021, s. 3–22, [https://doi.org/10.7494/geotour.2021.1-2\(64-65\).3](https://doi.org/10.7494/geotour.2021.1-2(64-65).3).
- [8] Ziarek Z., *Kamienie Brodzińskiego jako atrakcja geoturystyczna gminy Lipnica Murowana*, [w:] Bogacz P. (red.), *Artykuły Laureatów 63. Barbórkowej Konferencji Studenckich Kół Naukowych AGH*, Wydawnictwa AGH, Kraków 2023, s. 239–248, <https://repo.agh.edu.pl/entities/publication/d81969de-bca9-48ef-a3c4-388dcdfdbc806>.
- [9] Ziarek Z., *Projektowanie narzędzia geoedukacyjnego dla potrzeb geoturystyki – studium przypadku sedymentologicznego modelowania prądu zawiesinowego*, [w:] 64. Barbórkowa Konferencja Studenckich Kół Naukowych Pionu Górniczego AGH, 7 grudnia 2023 Kraków 2023, s. 76–77 [materiały konferencyjne], https://www.researchgate.net/publication/376312074_Designing_a_geoeducational_tool_for_geotourism_needs_-_a_case_study_of_sedimentological_modeling_of_turbidity_current_-_Projektowanie_narzedzia_geoedukacyjnego_dla_potreb_geoturystyki_-_studium_przyp.
- [10] Unrug R. (red.), *Przewodnik po zachodnich Karpatach fliszowych*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1969.
- [11] Gradziński R., Kostecka A., Radomski A., Unrug R., *Zarys sedymentologii*, Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1986.
- [12] Słomka T., *Głębokomorska sedymentacja silikoklastyczna warstw godulskich Karpat*, Prace Geologiczne – Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie, 139, Wydawnictwo Polskiej Akademii Nauk, Kraków 1995.
- [13] Ślaczka A., Kaminski M.A., *A Guidebook to Excursions in the Polish Flysch Carpathians. Field Trips for Geoscientists*, Grzybowski Foundation Special Publication, no. 6, The Grzybowski Foundation, Kraków 1998.
- [14] Strzeboński P., *Contrasting styles of siliciclastic flysch sedimentation in the Upper Cretaceous of the Silesian Unit, Outer Western Carpathians: sedimentology and genetic implications*, Annales Societatis Geologorum Poloniae, vol. 92, no. 2, 2022, s. 159–180, <https://doi.org/10.14241/asgp.2022.04>.
- [15] Siwek P., Waśkowska A., Wendorff M., *Mud-rich low-density turbidites in structurally-controlled intraslope mini-basin: The influence of flow containment on depositional processes and sedimentation patterns (Szczawa, Oligocene, Polish Outer Carpathians)*, Sedimentology, vol. 70, iss. 6, 2023, s. 1741–1784, <https://www.doi.org/10.1111/sed.13095>.

- [16] Shanmugam G., *Mass Transport, Gravity Flows, and Bottom Currents: Downslope and Alongslope Processes and Deposits*, Elsevier, 2021.
- [17] Talling P.J., Masson D.G., Sumner E.J., Malgesini G., *Subaqueous sediment density flows: Depositional processes and deposit types*, *Sedimentology*, vol. 59, iss. 7, 2012, s. 1937–2003, <https://doi.org/10.1111/j.1365-3091.2012.01353.x>.
- [18] Alexandrowicz Z., *Skalki piaskowcowe Zachodnich Karpat fliszowych*, *Prace Geologiczne – Polska Akademia Nauk. Oddział w Krakowie. Komisja Nauk Geologicznych*, 113, Zakład Narodowy im. Ossolińskich – Wydawnictwo PAN, Wrocław 1978, s. 1–86.
- [19] Alexandrowicz W.P., Alexandrowicz Z., *Geosites in tourist areas: the best method for the promotion of geotourism and geoheritage (an example from the Polish Flysch Carpathians)*, *Geoheritage*, 14, iss. 2, 2022, 45, <https://doi.org/10.1007/s12371-022-00655-2>.
- [20] Reading H.G., Richards M., *Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system*, *AAPG Bulletin*, vol. 78(5), 1994, s. 792–822, <https://doi.org/10.1306/A25FE3BF-171B-11D7-8645000102C1865D>.

SUMMARY

Geoeducational tools are common used to popularize knowledge in the field of Earth Sciences, including geological knowledge, and the promotion of geotourism. They facilitate the recognition of geodiversity in the landscape and in individual geosites, sensitizing the audience to cognitive and aesthetic values. This approach translates into caring for the preservation of natural heritage for future generations and emphasizes the need for its protection. The effectiveness of a geoeducational tool is based on reliable knowledge of geological processes and their products, as well as skilful geointerpretative phase. In the geointerpretation process, it is important to maintain factual correctness and to indicate and explain the most significant elements/stages (e.g., of a particular process) while simultaneously maintaining a level of knowledge transfer that is understandable. The main user of geoeducation and its tools is a geotourist and a tourist interested in the origins of the surrounding inanimate natural objects, but lacking specialized education helpful in understanding them.

The aim of the presented geoeducational tool is to provide a simplified illustration of the key stages of formation of one of the types of flysch deposits (turbidite) that predominate in the Outer Carpathians – the process of transport and sedimentation of clastic material involving turbidity currents.

The inspiration for conducting sedimentological modelling for the development of a geoeducational tool came from the geological field observations of the author, visit to the sedimentological laboratory of Department of General Geology and Geotourism at the Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection of AGH University of Krakow, and previous experiments conducted in this laboratory (Fig. 1) [1–3]. The design of the geoeducational tool was based on the idea of geoeducation through the dissemination of geological knowledge [4–9]. The aim of the project was to create a geoeducational tool – an instructional video

explaining to the audience the nature of sedimentary processes responsible for the formation of the Carpathian flysch turbidites [9–17].

The presented idea of geoeducation was realized by designing our own student sedimentological mini laboratory (Fig. 2). Therefore, the successive stages of designing the geoeducational tool included: (a) determining the subject, aim, methods, and audience, (b) gathering, organizing, and possibly supplementing knowledge, which formed the substantive basis for the project of the geoeducational tool, (c) selection of issues and elements to be presented using the tool, (d) substantive design, (e) technical design, (f) testing of the tool and introducing corrections and improvements, and (g) compiling a film with explanations.

Experiments on the formation of sediments broadly corresponding to turbidites [14, 16–17] – one of the types of flysch deposits that form the Outer Carpathians (Fig. 3) [9, 11–14] – were the subject of analog sedimentological modeling. Flysch can be considered in a broad sense [10–19] as:

- genetically: a set of deep-water sediments formed from terrigenous material, created mainly by sediment gravity flows;
- lithologically: sedimentary series consisting of alternating sandstone and shale beds which can be associated with coarser-grained strata (conglomerates);
- geotectonically: thick series of sedimentary rocks formed in the pre- or early orogenic stage of development of sedimentary basins.

Deep-water turbidity current is one of the mechanisms of gravity-driven transportation-depositional processes of clastic material (Fig. 4). Low-concentration suspension (a mixture of sediment and water with a volumetric concentration up to 23%) moves as turbulent flow powered by gravity along the slope (Fig. 8) and the bottom of the sedimentary basin (Fig. 5) gradually losing velocity, energy and sediment. The product (bed) of turbidity current (understood in this way) is a turbidite with normal grain-size gradation (Fig. 6), often with flute casts present on the soles (undersides) of beds [10, 14]. Turbidite formations were deposited mainly in the distal sedimentary zone (at the base of the slope and on the basin plain), often in the form of depositional lobes, together forming a deep-sea fan system with central channel passing into branching-off distributary channels [11, 14, 20].

The methodics of the research was based on the assumptions of process sedimentology [7, 8, 14, 16], whose idea of proceeding „from detail to general” includes necessary conditions in the form of: (a) detailed factographic analysis (litho-sedimentological characteristics) of the products, based on which its belonging to a particular category (lithofacies) is defined, (b) the physical sedimentary process interpretation, i.e., matching transport-deposition mechanisms, and (c) creating a general erosional-depositional system model that cannot contradict the facts collected at the beginning and is consistent with the observed rock record and its interpretation (descriptive textural-structural characteristics). Such a model is intended to visualize geological processes in a simple and clear manner and to show their products. However, during modelling, the correspondence with reality must be maintained to such an extent of approximation as to obtain the most naturalistic image of the environment and the conditions under which the analysed process and its product could occur.

In the sedimentological mini laboratory, a film was planned to be shot presenting the environmental model of the inflow submarine fan depositional system, turbulent suspension flow, and deposition of normally graded turbidites. For this purpose, the following components of the geoeducational tool were developed: (a) an aquarium filled with water as the sedimentary basin tank (Fig. 7), (b) a plexiglass-based “continental” slope (Fig. 9), (c) sand as an alternative bottom fill (Fig. 11), and (d) a plastic tube with a funnel as a point supplying source.

During the digital processing of the film material, elements of „theatricality” were added in the form of: assembling the image from 3 shots into a coherent chronological visualization, adding a realistic landscape, and isolating a screen fragment for the introduction of geointerpretational content (Fig. 12).

Working on constructing the geoeducational tool allowed to specify its most important features, which are: clarity of the experiment, readability, naturalism, realism, spectacularity, theatricality, and repeatability. Thanks to these attributes, the recipient is able to learn and understand issues related to: the natural sedimentary basin, its configuration and components, point feeding of the subaqueous reservoir with clastic material, turbidity current as one of the examples of sediment gravity flows, and the model of deep-sea fan as the channelized erosional-depositional body characteristic for flysch sedimentary successions.

The conducted physical sedimentological modelling of turbidity currents (Fig. 10) aimed to search for process analogies for the genesis of the Carpathian flysch turbidites and the creation of a geoeducational tool (Fig. 13). It allowed drawing the following conclusions: (a) creating a geoeducational tool requires the author to prepare at a much higher level of expertise than later presented and explained to the audience, (b) refining the tool requires many repetitions based on trial and error to achieve the expected effect – this is very time, labour, and material-consuming, (c) the final effect requires attractive visual presentation, (d) the level of attractiveness can be increased by adding a narrator, various language versions, etc., (e) the level of geointerpretation of the presented processes should be adapted to the audience defined at the beginning, (f) if conditions allow, the presented level and scope of geointerpretation should be smoothly modified depending on the type of audience, and (g) the finished product may arouse the interest of museum units and be applied to museum exhibitions.