

Dr hab. inż. Leszek Książek, prof. URK  
Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki  
Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji  
Uniwersytet Rolniczy im. Hugona Kołłątaja w Krakowie

Kraków, dn. 31.08.2023 r.

## RECENZJA

### **rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Majchrzaka pt. "Erozja gruntów spoistych poniżej budowli piętrzących na przykładzie stopni wodnych Brzeg Dolny i Malczyce"**

#### **Wstęp**

Recenzję pracy doktorskiej mgr inż. Artura Majchrzaka opracowałem na zlecenie dr hab. inż. Justyny Hachoł, prof. UPWr – Przewodniczącej Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, górnictwo i energetyka Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, pismem z dnia 16.06.2023 roku (data wpływu 29.06.2023 r.). Rozprawa zawiera 139 stron, w tym: podziękowania, spis treści, tekst główny z 19 fotografiami, 49 rycinami, 5 tabelami, wykaz literatury, spis fotografii, rycin i tabel oraz streszczenie w języku polskim i angielskim.

#### **Charakterystyka pracy**

Celem dysertacji jest prognozowanie rozwoju erozji gruntów spoistych oraz wypracowanie odpowiednich środków zapobiegawczych lub ograniczających jej przebieg.

Trzon pracy stanowią cztery zasadnicze części. W części pierwszej obejmującej rozdział 1 (str. 5-33) został zidentyfikowany problem badawczy, przedstawiono uzasadnienie podjęcia badań, cel pracy oraz sformułowaną hipotezę badawczą. Autor opisał zagadnienia związane występowaniem gruntów spoistych na terenie Polski oraz charakteryzował Odrę. Następnie opisał proces erozji gruntów spoistych, który kształtował koryto Odry. W dalszej części opisał przykłady badań procesów erozji gruntów spoistych w warunkach laboratoryjnych. Autor w tym opisie opiera się na literaturze krajowej i zagranicznej.

W części drugiej (rozdziały 2 – 4, str. 54-91) opisano obiekt badań oraz wykorzystane materiały i metody badawcze. Przedstawiono zakres i sposób przeprowadzania badań oraz wyniki badań. W tej części pracy opisano procedurę wyboru badanego obiektu, tj. odcinka Odry pomiędzy stopniami wodnymi Brzeg Dolny – Malczyce oraz odcinek poniżej stopnia wodnego Malczyce ponieważ zagadnieniem użytkowym jest powstrzymanie erozji na Odrze określanej jako swobodnie płynąca. W tej części Autor przedstawił warunki hydrogeologiczne, przebieg i intensywność erozji liniowej w ujęciu historycznym, Następnie opisał stopnie wodne Brzeg Dolny i Malczyce oraz kształtowanie się erozji lokalnej poniżej stopni. Omówiono zakres badań terenowych, właściwości fizycznych badanych gruntów, rozmakania, ciśnienie pęcznienia gruntów, składu mineralnego i pierwiastkowego gruntów. Jako kolejne omówiono przebieg badań erozji na modelu fizycznym w laboratorium hydrotechnicznym w trzech wariantach oraz analizę uzyskanych wyników.

Trzecia część pracy (rozdział 5, str. 92-111) zawiera propozycję sposobu zatrzymania erozji poniżej stopnia wodnego Malczyce wskazując na uwarunkowania związane z obniżeniem dna koryta rzeki, kształtowaniem szlaku żeglownego, zmniejszeniem głębokości tranzytowych oraz obniżeniem poziomu wód gruntowych na terenach przyległych.



W tej części pracy Autor rozważa dwa scenariusze zabezpieczenia dna Odry poniżej stopnia wodnego Malczyce przed erozją: scenariusz I - zachowawczy i II - rozwojowy opisując uwarunkowania obu scenariuszy oraz zwracając uwagę na parametry stabilności dna konieczne do zachowania i konsekwencje przyjętych rozwiązań, w tym proces obrukowania dna oraz uwarunkowania inżynierskie, ekonomiczne, prawne i ekologiczne.

Rozdziały 6 i 7 (część czwarta pracy, str. 112-116) zawierają wnioski i podsumowanie badań. Wnioski zestawiono w 3 głównych punktach, a w podsumowaniu zawarto zalecenia praktyczne wynikające z badań.

W wykazie literatury znajdują się 194 pozycje, z czego tylko ok. 5% stanowią pozycje opublikowane po roku 2015.

## **Ocena poziomu naukowego pracy**

Prezentowana praca ma duże znaczenie dla poznania procesu erozji gruntów spoistych w korytach rzek co jest kluczowe w kształtowaniu się procesów morfologicznych rzek, stateczności budowli hydrotechnicznych oraz dla środowiska wodnego i obszarów od wód zależnych. Dodatkowo Odra jest rzeką żeglowną, gdzie procesy morfologiczne wpływają na warunki żeglowności.

**Celem pracy jest prognozowanie rozwoju erozji gruntów spoistych oraz wypracowanie odpowiednich środków zapobiegawczych lub ograniczających jej przebieg.**

Postawiona hipoteza badawcza zakłada, że proces przyspieszonej erozji gruntów spoistych (iłów) zalegających na dnie w korycie Odry Środkowej jest wywołany bezpośrednim działaniem na nie płynącej wody wywołującej przekroczenie krytycznych naprężeń ścinających. Autor dąży do weryfikacji tezy, że erozja przebiega inaczej niż wg schematu: pęcznienie i rozmakanie ilów na skutek ich odsłonięcia (odciążenia), a następnie rozmywanie gruntu strumieniem płynącej wody. Takie podejście wynikało z utrwalenia się poglądu, że „erozja ilów wywołana jest ich odsłonięciem spod aluwiów i odciążeniem, a następnie w wyniku kontaktu z wodą, ich pęcznieniem i rozmakaniem. Natomiast przemieszczanie cząstek ilastych wywołanych strumieniem wody jest zjawiskiem wtórnym”.

Cel pracy realizowano w następujących zadaniach cząstkowych:

- badania ilów poniżej stopnia wodnego Malczyce,
- obserwacji zachowania się gruntów spoistych w warunkach statycznego kontaktu z wodą,
- obserwacji zachowania się gruntów spoistych w stanie naturalnym w warunkach kontaktu z wodą płynącą,
- analizy zachowania się gruntów spoistych poddanych długotrwałemu (356 dni) namakaniu w warunkach kontaktu z wodą płynącą,
- stopnia ekspansywności (pęcznienia) badanych gruntów,
- przedstawienie sposobu zatrzymania erozji poniżej stopnia wodnego Malczyce.

Na podstawie danych geologicznych została wykonana analiza intensywności erozji dna Odry na odcinku Brzeg Dolny – Ścinana w okresie obejmującym lata 1925-1992, na odcinku Brzeg Dolny – Malczyce w okresie obejmującym lata 1841-2003 oraz przebiegu erozji (wyboju) poniżej stopnia wodnego Brzeg Dolny. Rozpoznanie przyczyn powstawania wyboju poniżej stopnia wodnego Brzeg Dolny jest kluczowe dla uniknięcia lub ewentualnego przeciwdziałania negatywnym skutkom występowania tego zjawiska zagrażającemu stateczności budowli poniżej kolejnego stopnia wodnego na Odrze, tj. Malczyce.



W kolejnym kroku Autor przeprowadził badania:

- 1) własności fizycznych gruntów, rozmakania, ciśnienia pęcznienia, składu mineralnego oraz składu pierwiastkowego.
- 2) hydrauliczne w laboratorium wodnym:
  - a) badania erozji na modelu fizycznym w korycie hydraulicznym,
  - b) badania erozji pod działaniem poziomego skoncentrowanego strumienia wody (jet's),
  - c) badania erozji pod działaniem pionowego skoncentrowanego strumienia wody (jet's).

Ad. 1) Autor z dolnego stanowiska stopnia wodnego Malczyce pobrał próby materiałów ilastych w stanie nienaruszonym, które w kolejnym etapie poddano badaniom laboratoryjnym.

Próby do badań właściwości fizycznych gruntu próbki pobrano:

- a) z poziomu niecki wypadowej – 92,0 m n.p.m., progę poniżej niecki - 96,6 m n.p.m., płyty wypadowej jazu ruchomego - 96,6 m n.p.m. oraz z poziomu dolnego stanowiska elektrowni wodnej – 92,0 m n.p.m.,
- b) do badań składu mineralogicznego z próbki pobranej z poziomu niecki wypadowej wydzielono próbki łu szarego i rdzawo-zielonego o masie 100 g,
- c) do badań mikroskopowych z próbki wydzielono łu szary i rdzawo-zielony,
- d) do badań jakościowych rozmakania próbki o średnicy 75 mm i wysokości 95 mm oraz próbki, które pobrano bez naruszenia struktury o wymiarach ok. 80 x 80 x 140 mm,
- e) do badań ilościowych rozmakania próbki o średnicy 41 mm i wysokości 32 mm,
- f) do badań ciśnienia pęcznienia próbki o średnicy 70 mm i wysokości 20 mm,
- g) do badań laboratoryjnych w korycie hydraulicznym próbki z poziomu niecki wypadowej o wymiarach 950 x 200 x 100 mm,
- h) do badań erozji pod działaniem poziomego, skoncentrowanego strumienia wody próbki o wymiarach 600 x 200 x 100 mm,
- i) do badań erozji pod działaniem pionowego, skoncentrowanego strumienia wody próbki o wymiarach 200 x 200 x 100 mm.

Stwierdzono, że badane grunty pobierane z poziomu 88,9 – 94,0 m n.p.m. są łąkami trzeciorzędowymi o uziarnieniu odpowiadającemu łu pylastym i łu, zawierającymi 50-75 % frakcji łuwej i 25-35 % frakcji pyłowej. Próby pobrane na rzędnej 96,6 m n.p.m. odpowiadały uziarnieniem glinie pylastej zwięzłej. Wilgotność naturalna pobranego materiału wynosiła od 17,8 do 30,0 %, a gęstość objętościowa od 1,74 do 2,13 gcm<sup>-3</sup>. Gęstość objętościowa szkieletu gruntowego wahała się w przedziale 1,52 – 1,8 gcm<sup>-3</sup>, granica plastyczności wynosiła 20,7-22,1 %, a granica płynności 41,3-56,6 %. W przypadku rozmakania próbki doprowadzone do stanu powietrznie suchego wykazały bardzo dużą podatność na rozmakanie i rozpadły się całkowicie po 27-50 minutach, natomiast badania próbek w stanie naturalnym przerwano po 30 dniach, ponieważ nie zaobserwowano zmiany objętości próbek. Badania wpływu wilgotności początkowej pozwoliły na stwierdzenie, że:

- przy wilgotności 0 % (próbka wysuszona w temp. 105 °C i wystudzona do temp. pokojowej) proces rozpadu następuje gwałtownie w czasie od 1 do 2 minut,
- w zakresie wilgotności 0 – 3 % proces rozpadu następuje w czasie od 1 do 10 minut,
- w zakresie wilgotności od 5 % do 10 % czas rozpadu trwa 30 – 120 minut,
- w zakresie wilgotności od 12 % do 18 % w czasie 12 – 48 godzin następuje rozpad próbek na kilka części,
- przy wilgotności początkowej próbek od 21,7 % do 24,92 % (wilgotność naturalna) próbki nie uległy rozmakaniu przez 30 dni.

W trakcie badania rozmakania próbki zanurzone w wodzie przez 1370 dni nie wykazały jakiegokolwiek podatności na rozmakanie - nie rozpadły się, a wymiary początkowe próbek nie zmieniły się.



Analiza składu mineralogicznego wskazała na dużą niejednorodność badanego gruntu, a główne minerały ilaste próbki szarej i rdzawo-zielonej charakteryzują odmienne właściwości hydrofilne. Stwierdzono, że ił szary składnikiem głównym minerałem ilastym są kaolinit i illit a minerałami towarzyszącymi mieszanopakietowe struktury illitu – smektytu. W analizowanej próbce stwierdza się obecność domieszek kwarcu. Analiza termiczna potwierdziła niski stopień uwodnienia występujących minerałów ilastych. Powierzchnia właściwa, wynosząca  $38,2 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  wskazuje na przewagę w analizowanej próbce minerałów z grupy kaolinitu. Grunty kaolinitowe są zaliczane do mało hydrofilnych, co przejawia się na ogół niską wilgotnością, słabym pęcznieniem i małą ściśliwością.

W przypadku łu rdzawo-zielonego minerałami akcesorycznymi są illit, kaolinit i chloryt a minerałem towarzyszącym kwarc. Powierzchnia właściwa analizowanej próbki wynosi  $137,7 \text{ m}^2\text{g}^{-1}$  i wynika m. in. ze znacznej domieszki kwarcu oraz prawdopodobnie z okludowania ziaren smektytu przez tlenki żelaza. W składzie łu rdzawo-zielonego 90% minerałów ilastych stanowią minerały z grupy smektytów, które zaliczamy do minerałów silnie hydrofilnych, co przejawia się w ich wysokiej wilgotności, dużym pęcznieniu i dużej ściśliwości.

Badanie składu pierwiastkowego za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego wykazało zróżnicowanie w zawartości pierwiastków w iłach serii poznańskiej w zależności od ich litotypu. ły zielone wyróżniają się wyższą zawartością chromu, niklu, rubidu, strontu, cynku, wapnia, magnezu, sodu i potasu. ły szare charakteryzują się wyższą zawartością rtęci, cyrkonu, gadolinu, hafnu, lantanu, itru i tytanu, węgla organicznego oraz niższą zawartością żelaza wapnia, magnezu, chromu i wanadu

Ad. 2) Badania modelowe erozji gruntów spoistych pobranych w Malczycach przeprowadzono w laboratorium wodnym w specjalnie skonstruowanym przez Autora stanowiskach badawczych:

- a) korycie hydraulicznym o długości 1,6 m do pomiaru prędkości wywołujących erozję. Składało się ono z komory wstępnej uspokajającej przepływ, prostoliniowego odcinka o przekroju prostokątnym ( $0,2 \text{ m} \times 0,2 \text{ m}$ ), w którym umieszczono próbkę gruntu o miąższości 10 cm oraz osadnika wraz z filtrem. Instalacja umożliwiała uzyskanie prędkości przepływu wody do  $1,5 \text{ ms}^{-1}$ . Badania erozji przeprowadzono w trzech wariantach: bezpośrednio po pobraniu, po 365 dniach namakania i po doprowadzeniu do stanu powietrznie suchego. Pomiar prędkości przepływu wody w korycie badawczym wykonano za pomocą elektronicznego młynka hydrometrycznego 1 cm nad powierzchnią próbki,
- b) stanowisko do badania erozji pod działaniem poziomego, skoncentrowanego strumienia wody. Składało się ono ze zbiornika górnego i zbiornika dolnego połączonych rurociągami z pompami pracującymi w obiegu zamkniętym zapewniającymi zasilanie koryta badawczego o długości  $L = 0,95 \text{ m}$  i prostokątnym przekroju poprzecznym ( $0,2 \text{ m} \times 0,35 \text{ m}$ ),
- c) stanowisko do badania erozji pod działaniem pionowego, skoncentrowanego strumienia wody. Strumień był tworzony przez pompowanie wody ze zbiornika górnego przewodem zakończonym dyszą o średnicy 10,8 mm i uderzał pod kątem  $90^\circ$  w powierzchnię próbki. Dysza była zanurzona na głębokość 50 mm a odległość wylotu dyszy do powierzchni próbki wynosiła 40 mm. Maksymalne prędkości strumienia wynosiły do  $3,5 \text{ ms}^{-1}$ .

Ad. 2a) próbkę w stanie naturalnym umieszczono w korycie i instalację zalano wodą na 24 godziny. Początek erozji zaobserwowano przy prędkości  $0,4 \text{ ms}^{-1}$ , występowała erozja powierzchniowa w postaci obłoku bardzo drobnych cząstek. Od prędkości  $0,4 \text{ ms}^{-1}$  do prędkości  $1,0 \text{ ms}^{-1}$  zaobserwowano erozję masową w postaci porywania drobnych łusek i



agregatów o wymiarach do 1 x 1 x 0,5 cm. Przy prędkości 1,0 ms<sup>-1</sup> na powierzchni próbki zaczęły pojawiać się spękania, po zwiększaniu prędkości przepływu od 1,0 do 1,5 ms<sup>-1</sup> szczeliny poszerzały się i z powierzchni próbki odrywały się duże fragmenty gruntu (od 3 x 3 x 1 cm do 6 x 6 x 2 cm) – nastąpiła erozja gwałtowna. Eksperyment powtórzono dla próbki, którą wstępnie poddano namakaniu przez 365 dni uzyskując podobne wyniki badań. Po zakończeniu eksperymentu zmierzono głębokości rozmycia oraz wykonano krzywe uziarnienia odspojonych fragmentów próbki. Podobne doświadczenie przeprowadzono dla próby wysuszonej do głębokości ok. 5 cm. Początek erozji zaobserwowano przy prędkości 0,1 ms<sup>-1</sup>, porywane były małe agregaty z całej powierzchni próbki. Prędkość zwiększano do wartości 0,34 ms<sup>-1</sup>, przy której erozja dotarła do głębokości 5 cm, czyli warstwy w stanie naturalnym.

Ad. 2b) na podstawie wykonanych badań stwierdzono, że;

- początek erozji zaobserwowano przy prędkości wody na wylocie z dyszy wynoszącym 2,0 ms<sup>-1</sup>; przy stopniowym zwiększaniu prędkości erozja nie postępuje w sposób narastający, cząstka po cząstce,
- przy prędkości powyżej 2,0 ms<sup>-1</sup> pojawiają się spękania i po osłabieniu struktury następuje odrywanie fragmentów o wymiarach od 1x1 cm; przy wzroście prędkości do ok. 3,5 ms<sup>-1</sup> odrywają się większe fragmenty o wymiarach 10 x 10 cm.

Ad. 2c) na podstawie przeprowadzonego doświadczenia stwierdzono, że:

- maksymalna głębokość nie została zaobserwowana w osi strumienia, po zakończeniu doświadczenia w osi strumienia znajdował się ił szary posiadający dużą odporność na rozmywanie, maksymalna głębokość rozmycia w tym punkcie wyniosła 1,9 cm,
- ze szczelin została wymyta otulina, zbudowana się z łu rdzawo-zielonego,
- z rejonu, gdzie uzyskano głębokość maksymalną, odrywały się duże fragmenty łu szarego po naruszeniu lub usunięciu przez strumień otuliny.

Podczas autorskich badań laboratoryjnych z pobranych próbek gruntu wyodrębniono dwa rodzaje łów o skrajnie odmiennych właściwościach hydrofilnych. Materiałem dominującym jest ił szary, zbudowany z kaolinitu (50 %), illitu (30 %) i minerałów mieszanopakietowych (20 %). Grunty kaolinitowe zaliczane są do gruntów mało hydrofilnych charakteryzujących się dużą spoistością, słabym pęcznieniem i małą ściśliwością, illit i minerały mieszanopakietowe wykazują niewielką zdolność do pęcznienia. Drugim materiałem jest ił rdzawo-zielony w którym 90% minerałów ilastych stanowią minerały z grupy smektytów (montmorillonit). Montmorillonity należy zaliczyć do minerałów silnie hydrofilnych, co przejawia się w ich wysokiej wilgotności, dużym pęcznieniu i dużej ściśliwości.

Jeżeli „otulinę” łu szarego stanowi ił rdzawo-zielony to na skutek przepływu wody materiał ten pęcznieje, jest wymywany i to może powodować powstawanie szczelin i płaszczyzn osłabienia gruntu.

Przeprowadzone przez Autora badania erozji gruntów spoistych w korycie hydraulicznym wykazały, że erozja masowa badanego gruntu (ły z dolnego stanowisko Malczyce) była obserwowana już od prędkości 0,4 ms<sup>-1</sup> w postaci porywania drobnych łusek i agregatów o wymiarach do 1 x 1 x 0,5 cm. Przy prędkościach wyższych najpierw zaczęły pojawiać się na powierzchni spękania, a po zwiększeniu prędkości ponad 1,0 ms<sup>-1</sup> z powierzchni próbki odrywały się duże fragmenty gruntu (od 3 x 3 x 1 cm do 6 x 6 x 2 cm) – nastąpiła erozja gwałtowna. Takie prędkości przydenne występują w naturze, w przekroju Malczyce, przy przepływach większych od  $Q=500 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .

W badaniach przeprowadzonych przez Autora nie zaobserwowano procesu rozmakania przy czasie eksperymentu dłuższym niż trzy lata. Z badań własnych wynika, że



skład mineralny a zatem takie cechy jak ciśnienie pęcznienia i udział minerałów ilastych są głównymi czynnikami wpływającymi na przebieg procesu erozji w iłach trzeciorzędowych zawierających 50-75% frakcji iłowej i 25-35% frakcji pyłowej.

Badania laboratoryjne, w których określono wartości prędkości wywołujące erozje należy uznać za ważne osiągnięcie.

Integralną częścią pracy jest sposób na zatrzymanie erozji poniżej stopnia wodnego w Malczycach. Analizowane są dwa scenariusze:

Na podstawie analizy dostępnych materiałów oraz badań własnych, rysują się dwa podstawowe scenariusze dające odpowiedź na pytanie, jak zabezpieczyć dno Odry poniżej stopnia Malczyce przed erozją:

a) scenariusz I – zachowawczy, polegający na powstrzymaniu erozji poniżej Malczyc poprzez zabiegi ograniczające degradację dna i prace regulacyjne, dla uzyskania III klasy drogi wodnej,

b) scenariusz II – rozwojowy, polegający na budowie kolejnych stopni piętrzących. Uzyskanie drogi wodnej IV klasy o znaczeniu międzynarodowym oraz połączenie z Dunajem.

Realizacja wybranego scenariusza pociąga za sobą konsekwencje dla środowiska, w tym co zauważa Autor prowadzi do zmian morfologii koryta. Z jednej strony planowane jest przystosowanie Odrzańskiej Drogi Wodnej do osiągnięcia klasy żeglowności Va i włączenie jej w europejską sieć dróg wodnych klasy E. Wymaga to wybudowania kolejnych stopni poniżej Malczyc; stopnia wodnego Lubiąż (km 308+500) co zapewni głębokości tranzytowe w zakresie 4,5 - 6,0 m; stopnia wodnego Ścinawa w km 330+700 rzeki - głębokości tranzytowe od 2,8 do 5,0. Z drugiej strony zmniejszą się wyraźnie prędkości w części korytowej rzeki co przełoży się na mniejsze wartości naprężeń stycznych na dnie. Natomiast w miejscach odsłoniętych iłów może nastąpić przyspieszona erozja - miejsca takie powinny być monitorowane i w razie zauważonej erozji, należy je zastabilizować narzutem materiałem dennym o granulacji zapewniającej warunki stabilności dna.

Autor słusznie zwraca uwagę również na wpływ morfologii koryta na tereny przyległe, gdzie w ciągu 60-lat wytworzyły się ekosystemy dostosowane do nowych warunków hydrologicznych. Biorąc pod uwagę postulaty przyrodników Autor formułuje zalecenia aby podnoszenie dna odbywało się stopniowo, np. co 0,3 m w odstępach czasowych 5-10 lat wraz z monitoringiem efektów takich zabiegów na procesy fluwialne w korycie i zmiany środowiskowe w dolinie rzecznej.

W świetle katastrofy ekologicznej na Odrze w 2022 r. Autor stawia uzasadnione pytanie o przyszłość Odry analizując szereg czynników, tj. obecny stan wykorzystania Odry jako drogi wodnej, który jest niski, zachowanie wartości przyrodniczych obszarów od wód zależnych, a tam gdzie to możliwe o przywrócenie jej naturalnego charakteru. Autor jako uzasadnione wskazuje, że racjonalnym rozwiązaniem byłoby zastosowanie „scenariusza I”, co nie wyklucza realizacji w przyszłości „scenariusza II”, biorąc pod uwagę, że oba scenariusze spełniają warunki środowiskowe zawarte w „Ocenie oddziaływania na środowisko stopnia wodnego Malczyce”.

### **Uwagi ogólne i szczegółowe**

Szeroki zakres badań spowodował, że niektóre z omawianych zagadnień wyjaśnione są skrótowo a inne uznane mogą być za dyskusyjne:

- str. 15; „Na proces erozji bocznej składają się zwykle następujące elementy: a) erozja brzegu przy dnie koryta, b) obryw brzegów, c) wymywanie pojedynczych ziaren, d)



- akumulacja osadów wyerodowanych.”. Rozwinięcia wymaga stwierdzenie, że na proces erozji składa się akumulacja osadów,
- str. 15; „Krytyczne naprężenie ścinające zależy przede wszystkim od rodzaju materiału tworzącego dno koryta rzeki”. Jakie parametry materiały dennego należy rozumieć pod pojęciem „rodzaj materiału”,
  - str. 24, wzór na natężenie erozji dna spoistego dla jednorodnej warstwy namułu E w dalszej części pracy nie został wykorzystany,
  - str. 25; brak oznaczenia  $\tau_h$ ,
  - str. 25, 2 wd; „h – głębokość wody 1,5m”; we wzorze na naprężenia styczne występuje promień hydrauliczny, w przypadku rzek zastępowany jest on głębokością, której wartość jest wartością zmienną,
  - str. 26, pkt. 2; czy nie istnieje sprzeczność w zdaniach „Wraz ze wzrostem zawartości piasku w gruncie, tempo erozji maleje” oraz „Zaobserwowano również, że osady z dużym udziałem cząstek piasku i mułu, lub z soczewkami piasku lub mułu są bardziej podatne na erozję niż jednorodna glina”,
  - str. 31, sformułowanie „Proces przyspieszonej erozji gruntów spoistych ... jest wywołany bezpośrednim działaniem na nie płynącej wody o prędkości wywołującej krytyczne naprężenia ścinające”, powinno być „Proces przyspieszonej erozji gruntów spoistych ... jest wywołany bezpośrednim działaniem na nie płynącej wody o prędkości wywołującej naprężenia styczne przekraczające krytyczne naprężenia ścinające”,
  - str. 38; zdanie „Przeobrażenia naturalnych koryt rzecznych w okresie historycznym są mało zauważalne” stoi w sprzeczności z opisem zmian dna koryta Odry,
  - str. 55 oraz 60; przytoczone w maszynopisie daty 2006 oraz 2003-2007 niejednoznacznie wskazują na okres poboru prób, prowadzonych badań właściwości fizycznych czy pomiarów laboratoryjnych rozmycia próbek gruntu. Czytelnik może oczekiwać precyzyjnych dat dot. w/w zagadnień.
  - str. 57; w tabeli 2 zestawiono parametry fizyczne próbek, których wartości nie są tożsame z opisem w tekście, np. „wilgotność naturalna pobranego materiału wynosiła od 17,8 do 30,0%” podczas gdy w tabeli podano wartości 23,78% oraz 26,75 %,
  - str. 59, ryc. 21; przebieg zjawiska może być opisany równaniem  $w=f(t)$  co nie zostało zaprezentowane w pracy,
  - str. 69, 12 wd; Autor słusznie zwraca uwagę na dokładność pomiarów lecz lakonicznie stwierdza „Niska zawartość pierwiastka powoduje jednak powstanie dość dużego błędu standardowego” zadawalając się ogólnym opisem,
  - str. 74; w opisie stanowiska badawczego brak jest informacji o wartości spadku koryta pomiarowego,
  - str. 76-77; w czasie pomiarów uzyskano wartości prędkości odpowiadające kolejnym etapom przebiegu erozji łąw, w tym jej początkowi co dawało Autorowi niepowtarzalną okazję do obliczenia wartości krytycznych naprężeń stycznych, a której w pracy nie zaprezentowano,
  - str. 100; do obliczeń stabilności dna przyjęto przepływ  $Q_{10\%}$ . Czym podyktowane było takie podejście i jakie naprężenie będą towarzyszyły przepływowi katastrofalnym,
  - str. 103, stwierdzono, że „dla uziarnienia rzędu  $d_{50} = 4,0-7,5$  mm oraz natężenia fali  $Q = 900 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , na dnie koryta utworzy się warstwa obrukowania o wielkości ziarna ok. 26 mm.” Jakie procesy będą towarzyszyły powstaniu warstwy obrukowania i wytworzeniu się równowagi hydrodynamicznej w świetle krzywej uziarnienia materiału dennego zaprezentowanej na ryc. 44,



- str. 105; ryc. 47; czy i ewentualnie jak zmieni się przebieg zależności głębokości krytycznej od średnicy rumowiska po uwzględnieniu efektu klinowania się ziaren,
- str. 109; Autor stwierdza, że miejsca przyspieszonej erozji należy „zastabilizować narzutem piaszczystym o granulacji  $d_i = 30 \text{ mm}$ ”. O ile z koncepcja stabilizacji dna nie budzi wątpliwości o tyle pojawiają się pytanie czy to jest właściwy materiał,
- str. 112; pkt. 1; przedstawiona hipoteza została w maszynopisie wcześniej, na stronie 31 przytoczona w innej postaci. Ponieważ odnosi się do tego samego procesu nie zmienia to ogólnej zasady, że po przekroczeniu naprężeń krytycznych następuje ruch cząstek materiału dennego. Innowacją jest stwierdzenie czy ten proces w przypadku gruntów spoistych poprzedzony jest innymi procesami fizycznymi lub chemicznymi,
- Autor formułuje hipotezę (str. 31), która na stronie 112 nazwana jest tezą. Stosowanie wymiennie tych sformułowań nie jest uprawnione,
- str. 112, pkt. 2; Doprecyzowania wymaga stwierdzenie, że „Pionowy rozkład naprężeń nie jest liniowy i jest zmienny w zależności od panujących warunków hydrodynamicznych”. Ze wzoru na naprężenia styczne (str. 25, 100) wynika, że naprężenia są funkcją ciężaru właściwego wody, spadku hydraulicznego oraz promienia hydraulicznego (głębokości wody),
- str. 112, pkt. 2; trudno się jednoznacznie się zgodzić ze sformułowaniem, że w warunkach przepływów katastrofalnych, nawet w przypadku, tzw. podpartych stopni” prędkości przepływu wody na dolnych stanowisku budowli są małe i nie może wystąpić przekroczenie warunków wywołujących erozję na dolnym stanowisku,
- W trakcie badań wykonano pomiary podłoża przed rozpoczęciem badań (str. 56, 61) a następnie wykonano badania próbek gruntu w trzech układach hydraulicznych; a) przepływający strumień wody działający na próbkę, b) wysokoenergetyczny strumień wody (jet) działający poziomo oraz c) jet działający pionowo. W każdym z tych przypadków doprowadzono do erozji masowej, której efektem były fragmenty materiału odspojone od próbek. W przypadku a) fragmenty odspojonego materiału poddano analizie składu granulometrycznego a wyniki zaprezentowano na ryc. 32 (str. 78). W pozostałych przypadkach nie wykonano analizy odspojonego materiału. Wyjaśnienia wymaga więc sposób interpretacji wyników, które doprowadziły do potwierdzenia przyjętej hipotezy.

Drobne błędy edytorskie zauważone w tekście:

- str. 6, 14 wg; jest „a na długości przepływa przez Polskę”, powinno być, np. „a na znacznej długości przepływa przez Polskę”,
- str. 6; powtórzenie „... na odcinku o długości ok. 179 km tworzy granicę pomiędzy Polską i Niemcami.” oraz „Na odcinku blisko 180 km Odra stanowi granicę państwową pomiędzy Polską a Niemcami.”,
- str. 6, 5 wd; jest „i długości 510 km. Odra Dolna ...”, powinno być „i długości 510 km oraz Odra Dolna ...”,
- str. 6, 2 wd, styl „Odcinek Odry Środkowej, który jest przedmiotem badań, stanowi stopień Brzeg Dolny km 281,7 i Malczyce (Rzeczyca) km 300.”,
- str. 7, 2 wg; styl „... gdzie obok naturalnych procesów ... działają zjawiska ....”,
- str. 10, 13 wg; jest „niska”, powinno być „niską”,
- str. 10, 4 wd; jest „pozadawane”, powinno być „posadowione”,
- str. 19, 1 wg; jest „szczegółowo”, powinno być „które szczegółowo”,
- str. 20, „Odrze środkowej”, „Odrze Środkowej”,
- str. 26, pkt. 3; jest „wzrasta”, powinno być „wzrastają”,
- str. 33, jest „szósty”, powinno być „siódmy”,
- str. 36, Ryc. 6, brak legendy,



- str. 37, Ryc. 7, wskazane oznaczenie przekroju A-A na mapie,
- str. 39, jest „ryc. 11”, powinno być „ryc. 10”,
- str. 44, Ryc. 12, brak skali,
- str. 45, Ryc. 13, brak skali,
- str. 45, Ryc. 14, na rycinie wyróżniono przepływ  $Q=340 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$  – wskazanie byłoby odniesienie tego przepływu do hipotetycznych wartości przepływu,
- str. 49, 11 wg; w powołaniu literatury za dużo znaków interpunkcji,
- str. 51, Ryc. 18, brak skali,
- str. 74, 2 wd; jest „za”, powinno być „z”
- str. 74, 1 wd; jest „obywało”, powinno być „odbywało”
- str. 79; jest „Badanie procesu erozji przeprowadzono w laboratoryjnym ...”, powinno być „Badanie procesu erozji przeprowadzono w laboratorium ...”,
- str. 84, Ryc. 38a, brak legendy (czerwona linia),
- str. 96, 14 wg; jest „powstrzymanie”, powinno być „powstrzymaniu”,
- str. 100, 6 wg; jest „ $Q_c$ ”, powinno być „ $\theta_c$ ”,
- str. 104; powtórzenie wzoru,
- str. 104; jednostki spoza układu SI,
- str. 114, 2 wd; jest „na negatywnego oddziaływania”, powinno być „na negatywne oddziaływanie”,
- brak znaków interpunkcyjnych i spacji, przykładowo; str. 7, 8 wg; str. 20, 2 wg; str. 63, 2 wd „38,2m2/g”.

Zagadnienia wymagające doprecyzowania, skróty myślowe oraz uwagi do układu pracy:

- str. 7, 8 wg; „Wówczas Odrę łatwiej było przekroczyć niż przepłynąć”,
- str. 8, 10 wd; „Rozpoczęto studia nad żeglowaniem Odry”,
- str. 20, 9 wg; „były tematyką rozprawy Mokwy (2002)”,
- str. 20, „Początkiem ruchu rumowiska wielofrakcyjnego Odry zajmował się Bartnik (1992).” W pracy habilitacyjnej Prof. Wojciech Bartnik prezentował badania warunków początku ruchu rumowiska wlezonego na potoku Targaniczanka oraz Rabie, Dunajcu i Wisłoce,
- str. 30; poza celem wymienionym w punkcie pkt. 1.5 sformulowano cel, który obejmuje także zagadnienie „powstrzymania erozji na odcinku Odry swobodnie płynącej poniżej stopnia Malczyce”, a który został sformuowany na stronie 34.
- str. 41; opis rycin; w pierwszej kolejności ryc. 10 (str. 39) a następnie ryc. 9; podobnie ryc. 8 (str. 42 po ryc. 9),
- brak powołania w tekście ryc. 2, 5, 6, 11, 17, 18, 21, 34, 35a-c, 38, 42-44 oraz fot. 3-5, 7-19,
- str. 46, 9 wd; „Temu zagadnieniu erozji poświęcono główną uwagę w rozprawie”
- str. 50; „Jednak lokalizacji stopnia w km 300,4 obroniło się.”
- str. 77, ryc. 31; opis ryciny „dołu rozmycia”,
- str. 80; „W pokazanym miejscu ...”,
- str. 89; rozdział 4 prezentuje analizę wyników uzyskanych przez Autora w trakcie badań. W tej części pracy prowadzone jest porównanie wyników z wynikami uzyskanymi przez innych autorów skupiając się jednak na pracach pracowników macierzystej uczelni co sprawia, że tytuł rozdziału „Dyskusja otrzymanych wyników” jest przyjęty z dużym marginesem.



Autor rozpatruje w swojej dysertacji szerokie i złożone zagadnienie związane z erozją gruntów spoistych poniżej budowli piętrzących na przykładzie stopni wodnych Brzeg Dolny i Malczyce. Zdaniem recenzenta jest to znacząca wartość tematu badawczego tej rozprawy. Przeprowadzono w sposób poprawny analizę źródeł i istniejącej literatury w tym zakresie. Autor zaprojektował i wykonał pracochłonne pomiary terenowe i badania laboratoryjne, a zbudowane stanowiska badawcze w laboratorium hydraulicznym pozwoliły na wykonanie pracochłonnych badań. Zauważone liczne błędy edytorskie nie wpływają na końcową ocenę merytoryczną pracy.

Zaprezentowane wyniki badań, w szczególności w odniesieniu do:

- identyfikacji danych charakteryzujących obiekt badań i kształtowanie się morfologii koryta w ujęciu historycznym,
- poboru prób o nienaruszonej strukturze na etapie budowy stopni wodnych,
- analizy właściwości fizycznych i chemicznych ilów,
- pomiarów w laboratoryjnych pozwalających określić kolejne etapy przebiegu erozji i określenie prędkości krytycznych,
- zaproponowania scenariuszy zapobiegania powstawianiu wyboju poniżej stopni wodnych oraz zabezpieczeniu dna koryta z uwzględnieniem wymagań środowiskowych

stanowią oryginalny wkład Autora rozprawy w rozwój wiedzy z zakresu inżynierii środowiska będąc przykładem szerokiego podejścia do zmian morfologii koryta rzeki oraz bezpieczeństwa budowli hydrotechnicznych. Sformułowana hipoteza badawcza została zweryfikowana pozytywnie przez Doktoranta pomiarami terenowymi, badaniami laboratoryjnymi i sformułowanymi w pracy wnioskami.

W rozprawie została podjęta próba rozwiązania podstawowego problemu dla praktyki inżynierskiej, tj. erozji dna poniżej budowli piętrzących. Doktorant rozwiązał postawione zagadnienia używając właściwych do tego metod, konsekwentnie je realizując. Prezentowane wyniki są przedstawione w sposób czytelny i zrozumiały co świadczy, że Autor wykazuje się umiejętnością poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników. W analizach stosuje sprzęt pomiarowy o dużej dokładności oraz stanowiska badawcze wykonane na potrzeby analiz erozji gruntów spoistych.

Na uznanie zasługuje również propozycja dalszych prac zmierzających do przeciwdziałania konsekwencjom pogłębiającej się erozji poniżej ostatniego wybudowanego stopnia wodnego. Jednak budowa tylko jednego nowego stopnia nie rozwiązuje problemu pogłębiającej się erozji, jedynie przesuwa go w miejscu i w czasie. Znaczenie pracy wynika z faktu, że stopień wodny Malczyce jest bezpośrednio posadowiony na gruntach ilastych co wymaga szczególnego zabezpieczenia dna poniżej przed przyspieszoną erozją.

## **Podsumowanie**

Pracę doktorską mgr inż. Artura Majchrzaka należy uznać za właściwie zaprogramowane i zrealizowane studium metodyczne analizy erozji gruntów spoistych poniżej budowli piętrzących na przykładzie stopni wodnych Brzeg Dolny i Malczyce. Praca zrealizowana została przy wykorzystaniu istniejących technik pomiarowych i stanowisk badawczych w laboratorium hydrotechnicznym.

Cennym osiągnięciem doktoranta są pomiary w warunkach laboratoryjnych pozwalających określić kolejne etapy przebiegu erozji i określenie prędkości krytycznych. Autor rozprawy przeprowadził pomiary laboratoryjne w kilku wariantach potwierdzając postawioną tezę badawczą wnioskami szczegółowymi co stanowi spełnienie zakładanego celu pracy. Wykazał się przy tym systematycznością i dociekliwością. Wypracowany schemat



postępowania badawczego jest logiczny i spójny z przyjętymi założeniami. Cytowane źródła dobrane są merytorycznie właściwe. Swoja praca udowodnił umiejętności prowadzenia analizy i interpretacji wyników. Wnioski przedstawione w pracy są logiczne. Na podkreślenie zasługuje zaproponowanie scenariuszy zapobiegania powstawianiu wyboju poniżej stopni wodnych oraz zabezpieczeniu dna koryta z uwzględnieniem wymagań środowiskowych.

**Recenzowana praca spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, określone w Ustawie z 14 marca 2003r. o stopniach naukowych oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. 2003 nr 65, poz. 595 z późniejszymi zmianami). Tematyka pracy mieści się w dyscyplinie ochrona i kształtowanie środowiska wchodzącej w zakres dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Wnioskuje więc o przyjęcie i dopuszczenie pracy pt. „Erozja gruntów spoistych poniżej budowli piętrzących na przykładzie stopni wodnych Brzeg Dolny i Malczyce” przygotowanej przez mgr inż. Artura Majchrzaka do publicznej obrony.**

Z poważaniem





