

*Tymoteusz Zydroń\**, *Ewa Kozielska-Sroka\**, *Piotr Michalski\*\**,  
*Damian Dryś\*\*\**, *Edyta Kruk\*\*\*\**, *Magdalena Płonka\*\*\*\**

## BADANIA POSTĘPU PROCESU ABRAZJI BRZEGÓW ZBIORNIKA CZORSZTYN-NIEDZICA

---

### 1. Wstęp

Abrazja stanowi ważny proces geodynamiczny prowadzący do przeobrażania linii brzegowej rejonów nadmorskich i dużych zbiorników wodnych, a jako główną przyczynę tego procesu wymienia się fizyczne oddziaływanie wody, które przejawia się w postaci falowania, prądów przybrzeżnych oraz zmienności poziomów wody w zbiorniku. Proces ten jest najczęściej rozpatrywany w odniesieniu do problematyki niszczenia brzegów morskich, niemniej jest on również obserwowany w trakcie eksploatacji zbiorników zaporowych [1, 2, 7]. W efekcie działania procesu abrazji z obrębu brzegów znajdujących się zasięgu falowania wynoszony jest materiał organiczny oraz mineralny. Z jednej strony skutkiem tego procesu jest zamulanie zbiornika wyerodowanym materiałem, a z drugiej strony następuje cofanie się linii brzegowej w głąb ładu oraz podcinanie brzegów zbiornika, co w wielu przypadkach jest przyczyną uruchamiania procesów osuwiskowych [8]. Rozpatrując wymienione skutki działania procesu abrazji można stwierdzić, że mają one duże znaczenia praktyczne dla gospodarki wodnej.

### 2. Charakterystyka obiektu badań

Zbiornik wodny Czorsztyn-Niedzica powstał w latach 1975–1997 dzięki spiętrzeniu wód Dunajca zaporą ziemną. Położony jest we wschodniej części Kotliny Nowotarskiej i stanowi jedno z największych sztucznych jezior w Polsce. Rozciąga się na długości 10,5 km od

---

\* Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki, Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

\*\* emerytowany pracownik, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

\*\*\* absolwent, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

\*\*\*\* student, Uniwersytet Rolniczy, Kraków

wsi Dębno do Niedzicy, a jego pojemność całkowita wynosi 234,5 mln m<sup>3</sup>. Głębokość zbiornika w okolicach zapory w Niedzicy wynosi ok. 50 metrów, wynosząc średnio przy maksymalnym poziomie piętrzenia ok. 17,6 m. Z kolei długość linii brzegowej wynosi 29,7 km.

Badaniami objęto fragment brzegu przylegającego do Pienińskiego Parku Narodowego, w kierunku północnym i północno-zachodnim od czoła zapory. Okrywą zboczy stanowią tu lasy, krzewy, a także łąki i pastwiska. Stoki łagodne tworzą grunty spoiste, gliny pylaste, rumosz i żwiry gliniaste oraz materiał zwietrzelinowy. Pod względem tektonicznym obszar badań znajduje się obrębie Pienińskiego Pasa Skalkowego, który wąskim pasem leżącym pomiędzy fliszem magurskim na północy a fliszem podhalańskim na południu ciągnie się od okolic Wiednia aż po Marmaroszę (północna Rumunia). Obszar ten stanowi najbardziej skomplikowaną jednostkę tektoniczną Karpat. Na obszarze Polski w pasie skalkowym wyróżniono dwie płaszczowiny: dolną czorsztyńską i górną pienińską. Płaszczowina czorsztyńska zbudowana jest głównie z wapieni jurajskich i margli kredowych. Na płaszczowinę czorsztyńską została nasunięta płaszczowina pienińska, która również jest zbudowana z wapieni jurajskich i margli kredowych, ale zawiera także zlepieńce z przewarstwieniami krzemionkowo-lupkowymi. Dodatkowo w strefie pienińskiej w okolicach Czorsztyna i Szczawnicy występują skały magmowe intruzywne [3, 4].

### 3. Zakres i metodyka prac badawczych

Zbiorniki czorsztyński jest stosunkowo młodym obiektem i dlatego rozpoczęte w 2003 roku pomiary pozwoliły na określenie zmiany linii brzegowej w początkowym okresie jego eksploatacji, kiedy postęp procesu abrazji jest zwykle największy. Dla określenia jakościowej i ilościowej oceny przebiegu procesu abrazji wykonywane były pomiary geodezyjne na sześciu reprezentatywnych przekrojach badawczych znajdujących się w pobliżu zapory ziemnej (rys. 1), które ze względu na swe położenie były w największym stopniu narażone na oddziaływanie fal wód zbiornika gdyż długość nabiegu fali wiatrowej jest tu największa. Cztery przekroje, oznaczone w pracy I-IV, zlokalizowano w bezpośrednim sąsiedztwie zapo-



Rys. 1. Lokalizacja przekroji badawczych

ry od strony Pienińskiego Parku Narodowego, natomiast pozostałe dwa przekroje (W1–W2) usytuowano w okolicach wzgórza Wapiennik.

W ramach programu badań prowadzonych na zbiorniku w latach 2003–2008 podjęto próbę określenia wpływu falowania, zmian poziomów piętrzenia, geometrii profilu brzegowego oraz rodzaju gruntów tworzących przyległe zbocza na proces przeobrażania fragmentu nieubezpieczonej linii brzegowej zbiornika.

## 4. Wyniki badań i ich analiza

### 4.1. Ogólna charakterystyka badanych skarp abrazyjnych

Obserwacje terenowe wykazały, że w okresie badań od 2003 do 2008 nastąpiła istotna przebudowa profilu w analizowanym fragmencie brzegu zbiornika (rys. 2). W obrębie przekrojów od I–I do III–III (rys. 3) znajdujących się w pobliżu zapory widoczne jest pokrywanie się krawędzi tarasu abrazyjnego z hipotetycznym przebiegiem pierwotnej linii brzegowej, co pozwala stwierdzić, że w rejonie zasięgu pomiarów przekroju nie stwierdza się występowania tarasu akumulacyjnego, a zatem można scharakteryzować te przekroje jako wyraźnie abrazyjne. Na przekrojach tych widoczny jest również wyraźny klif brzegu, wykształcony w formie pionowej ściany o wysokości przekraczającej 1 m. Nieco inny charakter zmian kształtu skarpy ma przekrój IV–IV, gdzie w obrębie podnóża skarpy abrazyjnej można wyróżnić wyraźny taras akumulacyjny. Skarpa abrazyjna posiada wyraźnie większą wysokość, ale mniejsze nachylenie w stosunku do przekroi I–III. Przekroje pomiarowe zlokalizowane w obrębie wzgórza Wapiennik (rys. 4) charakteryzują się znacznie większą złożonością kształtu skarp abrazyjnych. Wynika to zapewne z faktu, iż przy znacznym nachyleniu skarpy nadbrzeżnej następuje powolne podcinanie podstawy klifu podczas falowania. W wyniku działania tego procesu następuje obsuwanie się niewielkich warstw (partii) gruntu, które tworzą w ten sposób tarasy o zróżnicowanym kształcie i wielkości. Stąd też na tak ukształ-

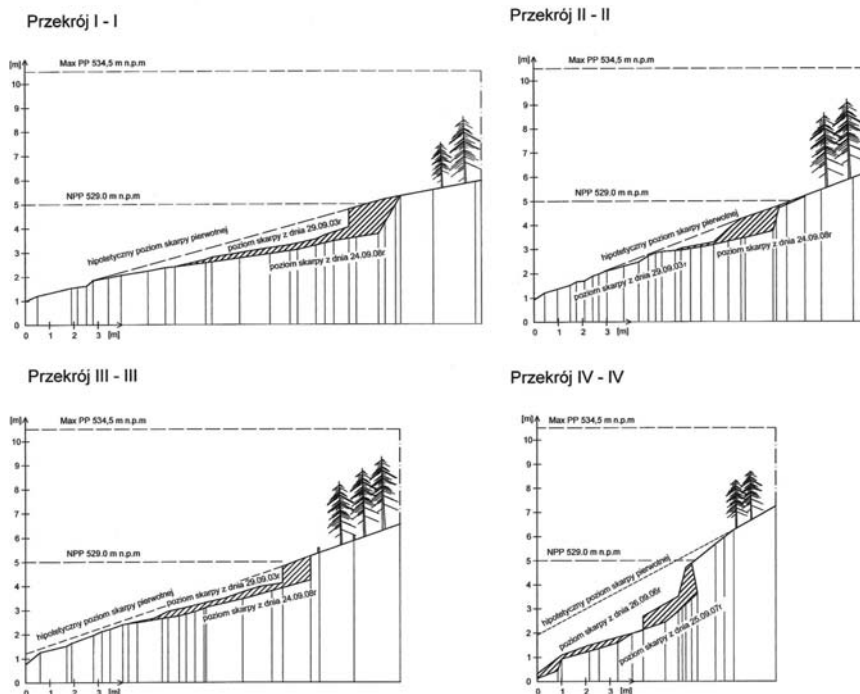


Rys. 2. Fragment obrzeża zbiornika w rejonie przekrojów I–I, II–II i III–III

towanym brzegu trudno jest określić jednoznacznie, w jaki sposób przebiega i jak kształtuje się podstawa tarasu abrazyjnego. Górna krawędź klifu brzegowego na tych przekrojach sięga znacznie powyżej normalnego poziomu piętrzenia.

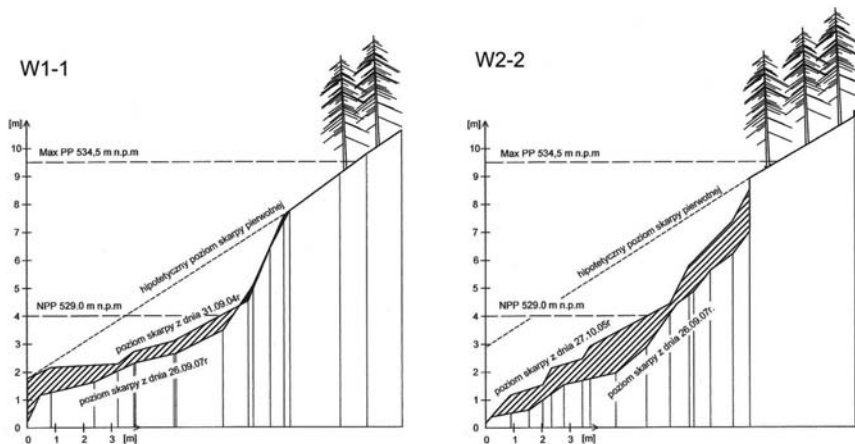
## 4.2. Ilościowa ocena przebiegu procesu abrazji

Obserwacje terenowe i opis jakościowy zmian kształtu analizowanych skarp zbiornika znajdują odzwierciedlenie w wynikach obliczeń wielkości materiału gruntowego poddanego przemieszczeniu w obrębie analizowanych fragmentów skarp, które zestawiono w tabelach 1 oraz 2. W obliczeniach nie uwzględniono przekroju IV–IV znajdującego się w pobliżu zapory ze względu na niepełną dokumentację wyników pomiarów geodezyjnych. Procesowi abrazji towarzyszy proces akumulacji materiału składowanego u podnóża klifu abrazyjnego. Należy jednak zauważyć, że ilość materiału wyerodowanego w procesie abrazji znacznie przewyższa wielkość materiału zakumulowanego u podnóża skarp wytworzonych klifów abrazyjnych, co oznacza, że część mas ziemnych stanowiących różnicę pomiędzy abrazją a akumulacją uległa przemieszczeniu w głąb zbiornika. W przekrojach zlokalizowanych na skarpach w pobliżu zapory wielkość abrazji określona w rocznych interwałach czasowych mieściła się w zakresie 0,63–0,93 m<sup>3</sup> w przeliczeniu na 1 m długości brzegu. Większą inten-



**Rys. 3.** Zmiany kształtu skarpy w obrębie przekrojów od I–I do IV–IV znajdujących się w pobliżu zapory ziemnej

sywność tego procesu (od 0,98 do 2,63 m<sup>3</sup>/mb) stwierdzono w przekrojach znajdujących się przy wzgórzu Wapiennik gdzie nachylenie stoku było największe.



Rys. 4. Zmiany kształtu skarpy w obrębie przekrojów znajdujących się w pobliżu wzgórza Wapiennik

TABELA 1

**Zestawienie ilościowe intensywności procesu abrazji i akumulacji w przekrojach znajdujących się przy zaporze**

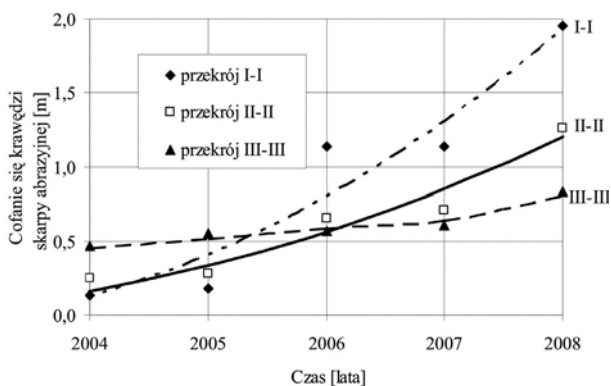
Lata	Nr przekroju	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]		Objętość pomiędzy przekrojami [m <sup>3</sup> ]		Wartość sumaryczna na odcinku brzegu [m <sup>3</sup> ]		Objętość na 1 mb brzegu [m <sup>3</sup> /mb]	
		abrazja	akumulacja	abrazja	akumulacja	abrazja	akumulacja	abrazja	akumulacja
2003-2004	I-I	0,14	0,72	29,16	19,44	53,57	22,91	0,63	0,27
	II-II	0,94	0,00						
	III-III	0,61	0,22						
2004-2005	I-I	0,94	0,00	52,38	0,00	73,80	4,73	0,86	0,06
	II-II	1,00	0,00						
	III-III	0,36	0,30	21,42	4,73				
2005-2006	I-I	0,96	0,24	42,12	22,41	64,33	31,70	0,75	0,37
	II-II	0,60	0,59						
	III-III	0,81	0,00	22,21	9,29				
2006-2007	I-I	1,41	0,00	46,71	8,91	62,78	15,68	0,73	0,18
	II-II	0,32	0,33						
	III-III	0,70	0,10	16,07	6,77				
2007-2008	I-I	1,97	0,00	62,64	7,29	79,49	13,28	0,93	0,16
	II-II	0,35	0,27						
	III-III	0,72	0,11	16,85	5,99				

TABELA 2

**Zestawienie ilościowe intensywności procesu abrazji i akumulacji przy wzgórzu Wapiennik**

Lata	Nr przekroju	Powierzchnia [m <sup>2</sup> ]		Objętość pomiędzy przekrojami [m <sup>3</sup> ]		Objętość na 1 mb brzegu [m <sup>3</sup> /mb]	
		abrazja	akumulacja	abrazja	akumulacja	abrazja	akumulacja
2005–2006	W 1–1	0,63	0,77	15,60	12,24	0,98	0,77
	W 2–2	1,32	0,76				
2006–2007	W 1–1	4,31	0,23	42,00	9,28	2,63	0,58
	W 2–2	0,94	0,93				

Objawem postępu analizowanego procesu abrazji jest zmiana kształtu skarp położonych bezpośrednio nad strefą falowania wód w zbiorniku, której mierzalnym efektem jest cofanie się krawędzi skarp abrazyjnych i zmiana ich wysokości. Na rysunku 5 przedstawiono wielkość cofania się krawędzi skarp klifów abrazyjnych w przekrojach położonych w pobliżu zapory ziemnej. W analizowanym okresie wyniosła ona maksymalnie do 2 m. Wraz z cofaniem się krawędzi skarp nastąpiło podniesienie wysokości klifu abrazyjnego o około 0,5 m. W przypadku przekrojów znajdujących się przy wzgórzu Wapiennik nie stwierdzono cofania się i zmian rzędnych wysokościowych krawędzi skarp abrazyjnych, co wynikało z faktu, że znajdują się one w obu przekrojach znacznie powyżej normalnego poziomu piętrzenia wody w zbiorniku i prawie zgodnie z maksymalną rzędną piętrzenia.



Rys. 5. Postęp cofania się skarpy klifów abrazyjnych

#### 4.3. Wpływ geometrii brzegu na procesy abrazyjne

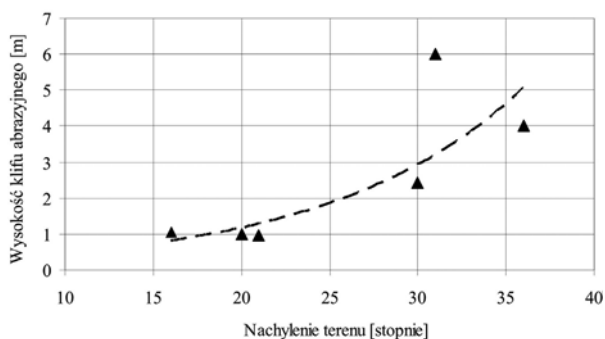
W efekcie przeobrażania zboczy poddanych procesowi abrazji wykształciły się tarasy abrazyjne, których nachylenie jest znacznie mniejsze niż nachylenie zbocza powyżej tarasu (tab. 3).

Analizując otrzymane zależności można zauważyć prawidłowość, że im większe jest nachylenie zbocza, tym większe jest również nachylenie skarpy abrazyjnej. Podobna zależność odnosi się również do relacji pomiędzy nachyleniem zbocza pierwotnego, a wysokością wytworzonych klifów abrazyjnych (rys. 6) i stanowi przyczynę intensyfikacji procesu abrazji. Większe nachylenie brzegów wpływa bowiem na zwiększenie szybkości przebiegu abrazji, a z kolei wzrost wysokości klifu brzegowego prowadzi do wzrostu objętości wyerodowanego materiału. Można zauważyć też prawidłowość, że szybkość i wielkość cofania się klifu abrazyjnego zależy także od nachylenia zbocza pierwotnego i im jest ono większe tym wielkość cofania się krawędzi jest mniejsza (rys. 7).

TABELA 3

**Zestawienie tabelaryczne nachylenia pierwotnego zbocza, nachylenia skarpy abrazyjnych oraz wysokości klifów abrazyjnych**

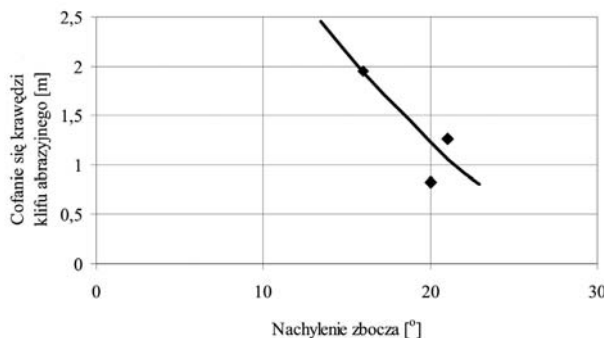
Nr przekroju	Nachylenie zbocza [°]	Nachylenie skarpy abrazyjnej [°]	Wysokość klifu abrazyjnego [°]
I-I	16	9	1,07
II-II	21	10	0,95
III-III	20	14	1,00
IV-IV	30	19	2,44
W 1-1	36	19,5	4,01
W 2-2	31	24	6,02



**Rys. 6.** Zależność wysokości klifu abrazyjnego od nachylenia zbocza nad skarpią abrazyjną

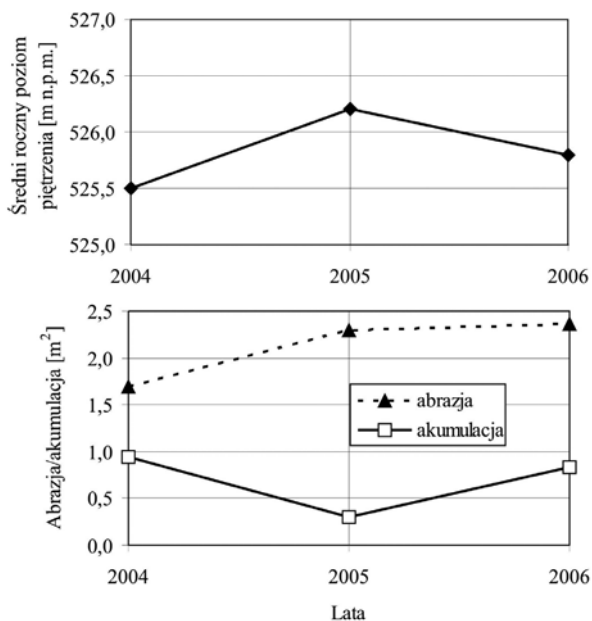
#### 4.4. Wpływ poziomów wody w zbiorniku i falowania na przebieg procesu abrazji

Jednym z istotnych czynników wpływających na postęp procesu abrazji jest oddziaływanie wód zbiornika na przyległy brzeg. Oddziaływanie to objawia się poprzez falowanie, które powoduje rozmywanie gruntów brzegu. Z kolei zasięg oddziaływania falowania



**Rys. 7.** Zależność cofania się krawędzi klifu abrazyjnego od nachylenia zbocza nad skarpią abrazyjną

związany jest ze zmianami poziomu piętrzenia wody na zbiorniku. Na rysunku 8 przedstawiono zależność pomiędzy wartościami abrazji i akumulacji w obrębie przekrojów I–III, a średnimi poziomami wody w zbiorniku w okresie rocznym poprzedzającym pomiary geodezyjne. Z przedstawionych danych wynika, że wraz ze wzrostem średniego rocznego poziomu wody w zbiorniku zmniejsza się ilość akumulowanego materiału w obrębie analizowanych przekrojów. Natomiast dla okresu obserwacyjnego 2004–2005 stwierdzono, że im wyższy poziom piętrzenia tym większa wartość wyerodowanego materiału. Należy tutaj zwrócić uwagę, że w analizowanym okresie średnie wielkości piętrzenia są co najmniej



**Rys. 8.** Zależność wielkości abrazji i akumulacji od średniego poziomu piętrzenia wody w zbiorniku



2,5 m poniżej normalnego poziomu piętrzenia, niemniej przy tej wysokości zasięg oddziaływania wody ma miejsce w obrębie tarasów abrazyjnych (rys. 1, 2, 3), a uwzględniając zasięg oddziaływania fal sięga on podstaw klifów.

Niepodważalny wpływ na zjawisko abrazji ma falowanie wody, wywołane ruchem mas powietrza. Do obliczeń przyjęto najbardziej niekorzystny wariant zakładając, że parametry fali w strefie przybojowej są równe parametrom fali głębokowodnej [6]:

$$2h = 0,03W\sqrt{H}\sqrt[4]{\log(D+1)} \quad (1)$$

$$2l = 10(2h) \quad (2)$$

gdzie:

- $2h$  — wysokość fali wiatrowej, m,
- $2l$  — długość fali wiatrowej, m,
- $W$  — prędkość wiatru w kierunku brzegu,  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,
- $H$  — głębokość zbiornika, m,
- $D$  — długość rozbiegu fali, km.

W większości opracowań przy obliczeniu wysokości fali zaleca się przyjmowanie długości rozbiegu i prędkości wiatru w kierunku prostopadłym do linii brzegowej, jednak biorąc pod uwagę niszczące działanie fali, kąt padania fali na brzeg nie ma takiego znaczenia. Chcąc uzyskać największą wartość jej wysokości przyjęto najdłuższy możliwy rozbieg z kierunku WNW, który odpowiada w przybliżeniu kierunkowi najdłuższego rozbiegu fali dla przekrojów w pierwszym rejonie badawczym i wynosi 8,3 km. Do obliczeń przyjęto różne prędkości wiatru, a także średnie prędkości wiatru w rejonie zbiornika pozyskane z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej O/Kraków. Głębokość wody w zbiorniku ma wpływ na ruch prądów wodnych w jego czaszy i została przyjęta orientacyjnie na 12 m. Wartość ta jest wyraźnie mniejsza od średniej głębokości zbiornika (17,6 m) przy maksymalnym poziomie piętrzenia. Wyniki obliczeń wykazały, że przy średniej prędkości wiatru wysokość fali wynosi 5 cm, co praktycznie nie powinno mieć wpływu na przebieg procesu abrazji. Z kolei wysokość fali obliczona dla prędkości wiatru 20 m/s wyniosła ponad 2 m, co wydaje się wartością nierealną. Stąd też podczas dalszych obliczeń jako miarodajne parametry fali przyjęto wartości określone przy prędkości wiatru wynoszącej 5 m/s (18 km/h), odpowiadające wysokości fali równej 0,52 m oraz średnie prędkości z analizowanego okresu czasu.

Na podstawie parametrów fali określono średnice krytyczne, charakteryzujące maksymalną średnicę ziaren poddanych rozmywaniu [8]:

$$d_{kr} = 0,48 \frac{\gamma_w}{\gamma_s - \gamma_w} \frac{\sqrt[3]{(2h)^2(2l) \cos \theta}}{m_\beta - m_\gamma} \quad (3)$$

gdzie:

- $d_{kr}$  — średnica krytyczna, m,

- $\gamma_s$  — ciężar objętościowy gruntu w stanie pełnego nasycenia, kN/m<sup>3</sup>,  
 $\gamma_w$  — ciężar objętościowy wody, kN/m<sup>3</sup>,  
 $2h, 2l$  — j.w.,  
 $\theta$  — kąt nabiegu fal na brzeg, °,  
 $m_\beta$  — współczynnik nachylenia powierzchni brzegu,  $m_\beta = \text{ctg } \beta$ ,  
 $m_\gamma$  — współczynnik zależny od kąta stoku naturalnego gruntu znajdującego się pod wodą,  $m_\gamma = \text{ctg } \phi_n$ .

Wartości kąta stoku naturalnego dla utworów budujących skarpy abrazyjne w pobliżu zapory (żwiru zaglinione) przyjęto orientacyjnie równą 40°. Otrzymane wartości średnicy krytycznej odniesiono do składu granulometrycznego gruntów z odpowiednich przekrojów (tab. 4).

**TABELA 4**  
**Określenie podatności skarp brzegu abrazyjnego na rozmywanie**

Parametry	Jednostka	Przekroje		
		I–I	II–II	III–III
Nachylenie skarpy pierwotnej	°	16	21	20
Kąt nabiegu fali	°	41	22	13
Wartość średnicy krytycznej przy prędkości wiatru 5 m/s	mm	160	256	217
Zawartość ziaren o $d \leq d_{kr}$	%	100	100	100
Wartość średnicy krytycznej przy prędkości wiatru 0,45 m/s	mm	14,41	23	19,5
Zawartość ziaren o $d \leq d_{kr}$	%	70	75	72

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że przy już średniej prędkości wiatru wynoszącej 0,45 m/s około 70% materiału skarp tworzonego przez grunty zaklasyfikowane wg [5] jako rumosz gliniasty jest podatne na rozmywanie, natomiast materiał odporny na działanie tego procesu to głównie grubsze ziarna frakcji żwirowej. Biorąc pod uwagę fakt, że materiał tarasów abrazyjnych obszaru wzgórza Wapiennik tworzą okruchy skalne o średnicy zastępczej  $d_{90} = 11$  mm, można stwierdzić, że wyniki obliczeń mają częściowe pokrycie w wynikach obserwacji.

## 5. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji, wyników pomiarów i ich analiz można stwierdzić, że:

- 1) Z uwagi na krótki okres pomiarowy badania abrazyji powinny być kontynuowane zgodnie z dotychczas stosowaną metodyką.

- 2) Wykazano istotny wpływ nachylenia zboczy i uziarnienia materiału na procesy abrazyjne, tj. na wysokość i wielkość cofania się klifu abrazyjnego. Duże nachylenie zboczy sprzyja wykształceniu wysokich klifów abrazyjnych, których krawędź znajduje się znacznie powyżej normalnego poziomu piętrzenia wody w zbiorniku.
- 3) Stwierdzono istotny wpływ nachylenia zbocza pierwotnego na wielkość kubatury materiału wymywanego do zbiornika w procesie abrazji. W przekrojach charakteryzujących się niewielkim nachyleniem zbocza pierwotnego w okresie czasu 2003–2008 wielkość wyerodowanego materiału z obrębu brzegu została oszacowana maksymalnie na  $0,96 \text{ m}^3/\text{mb}$  brzegu. Z kolei wielkość abrazji w rejonie przekrojów o dużym nachyleniu zbocza pierwotnego była większa i wyniosła do  $2,6 \text{ m}^3/\text{mb}$  brzegu.
- 4) Na obecnym etapie badań można prognozować, że proces abrazji będzie postępował aż do osiągnięcia przez krawędź klifu abrazyjnego maksymalnej rzędnej piętrzenia. Dowodzi tego fakt, że w obrębie wzgórza Wapiennik, gdzie zbocze naturalne ma największe nachylenie, krawędź klifu osiągnęła rzędną maksymalnego poziomu piętrzenia i nie wykazuje dalszych zmian.

#### LITERATURA

- [1] *Grobelska H.*: Rozwój strefy brzegowej nizinnego zbiornika wodnego w warunkach dużych wahań stanów wody na przykładzie zbiornika Pakoskiego (Notec Zachodnia). *Nauka, Przyroda, Technologie*, z. 2, 2007, s. 1–10
- [2] *Kostuch R., Maślanka K., Szymacha A.*: Inicjacja abrazji brzegu zbiornika Domaniów. *Acta Agrophysica*. 5 (2), 2005, s. 307–313
- [3] *Książkiewicz M., Samsonowicz J., Rühle E.*: *Zarys geologii Polski*. Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa 1965
- [4] *Plewa M.*: *Geologia inżynierska w inżynierii środowiska*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1999
- [5] PN-86/B-02480 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów
- [6] *Sobczak J.*: *Zapory z materiałów miejscowych*. Państwowe Wydawnictwa Naukowe, 1975
- [7] *Wiejaczka Ł.*: Próba typologii brzegów zbiornika wodnego „Klimkówka”. *Landform Analysis*, 9, 2008, s. 217–221
- [8] *Wacławski M.*: Niektóre zagadnienia abrazji brzegów karpaccich zbiorników wodnych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. Budownictwo Wodne i Inżynieria Sanitarna*, z. 37. Kraków 1986