

## **Uwarunkowania geotechniczne i hydrodynamiczne transformacji północnej strefy brzegowej zbiornika Czorsztyn-Niedzica w trakcie jego eksploatacji**

Geotechnical and hydrodynamic conditions of transformation of the north banks of the Czorsztyn-Niedzica reservoir during its life-time

EWA KOZIELSKA-SROKA, PIOTR MICHALSKI, TYMOTEUSZ ZYDRÓN

*Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Inżynierii Wodnej i Geotechniki,  
Al. Mickiewicza 24/28, 30-059 Kraków, kiwig@ur.krakow.pl*

**Abstract.** The paper presents the results of recent research conducted on the north bank of the Czorsztyn reservoir. The aim of the research was to estimate a degree of reservoir banks transformation as a result of abrasion process and accumulation of bottom sediments of the Dunajec river. A detailed analysis considered the influence of geotechnical (slope inclination and geotechnical parameters of soils forming banks) and hydrodynamical (wave, angle of wind-wave run direction and dam up water level) factors on intensity of reservoir banks transformation. Preliminary results of the research on bottom sediments of the Dunajec river conducted at the backwater of the Czorsztyn reservoir are also presented.

**Key words:** abrasion, sediment accumulation, geotechnical conditions

### WSTĘP

Konieczność regulacji stosunków wodnych, ochrony przeciwpowodziowej, retencji wód do celów pitnych, energetycznych i przemysłowych, jak również tworzenie akwenów do celów turystyczno-rekreacyjnych, wymusza budowę sztucznych zbiorników wodnych. Jednym z największych górskich jezior zaporowych wybudowanych w ostatnich latach jest Zbiornik Czorsztyński, utworzony w Kotlinie Nowotarskiej poprzez spiętrzenie wód rzek Białki i Dunajca zaporą w Niedzicy, sąsiadujący w swoim północno-wschodnim obrzeżu z terenem Pienińskiego Parku Narodowego.

Eksploatacja górskich jezior zaporowych ma wpływ na przyrodę ożywioną w bezpośrednim sąsiedztwie zbiornika na skutek zmian mikroklimatu (Witkowski 2007) i warunków hydrologicznych, a także uruchamia procesy geodynamiczne na ich obrzeżu takie jak abrazję brzegów, ruchy masowe (Wacławski 1986; Heliasz 2000; Ziętara 2005; Ilcewicz-Stefaniuk, Stefaniuk 2007) i załadowanie (zamulanie) rejonu cofki, które prowadzą do przeobrażania linii brzegowej i zmian pojemności użytkowej zbiorników.

Abrazja brzegów jest wypadkową oddziaływania szeregu czynników, zarówno natury geologiczno-inżynierskiej jak i hydrodynamicznej. Do czynników geologiczno-inżynierskich można

zaliczyć skład granulometryczny gruntów pierwotnych zboczy zbiornika, ich nachylenie oraz rodzaj pokrycia. Do czynników hydrodynamicznych zalicza się wahania poziomów wody w zbiorniku, wielkość i częstotliwość ich występowania, wysokość falowania i kąt nabiegu fali wiatrowej w stosunku do linii brzegowej. Z uwagi na liczbę i wzajemne nakładanie się na siebie wymienionych wyżej czynników, ich wpływ na tempo i wielkość abrazyj jest trudny do teoretycznego uwzględnienia przy prognozowaniu tego zjawiska. Dlatego konieczne są systematyczne i wieloletnie badania terenowe, aby można było określić tempo i wielkość abrazyj oraz czas potrzebny do ustabilizowania się nowej linii brzegowej.

Drugim czynnikiem powodującym zmiany linii brzegowej jest załadowanie (zamulanie) obszaru cofki. Procesy zamulania dna czaszy oraz akumulacja rumowiska przy ujściu rzek do zbiornika powodują zmniejszenie jego głębokości i powierzchni wodnej, co skutkuje zmniejszeniem pojemności użytkowej zbiornika. Zamulenie dna czaszy jest efektem osadzania się materiału dostarczanego przez rzeki wpływające do zbiornika oraz przez ruchy masowe i splukiwanie, będące skutkiem przede wszystkim procesów abrazyjnych. Proces ten nie powoduje zmian brzegów zbiornika, ale z uwagi na swój bardzo niekorzystny wpływ na warunki jego eksploatacji jest przedmiotem odrębnych studiów i analiz (Dąbkowski i in. 1982; Krzyszkowski, Gądek 2007).

Przedmiotem badań prowadzonych na północnym brzegu zbiornika, będącym częścią Pienińskiego Parku Narodowego, są procesy abrazyjne i związana z nimi przebudowa brzegów zbiornika oraz proces załadowania cofki u ujścia rzeki Dunajec. Badania w ramach pierwszego z podanych tematów prowadzone są od 2003 r., natomiast badania załadowania zbiornika rozpoczęto w 2008 r.

#### OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA ZBIORNIKA CZORSZTYŃSKIEGO

Zespół Zbiorników Wodnych Czorsztyn – Niedzica i Sromowce Wyżne powstał w latach 1975–1997 poprzez spiętrzenie wód Dunajca zapora w Niedzicy (zbiornik główny) i jazem

w Sromowcach Wyżnych (zbiornik wyrównawczy). Zapora ziemna zbiornika głównego ma długość 404 m, wysokość 56 m. Nachylenie skarpy odwodnej wynosi od 1: 3,5 w dolnej części budowli do 1: 2,25 powyżej poziomu 20 m, a jej ubezpieczenie stanowią płyty betonowe. Z kolei nachylenie skarpy odpowietrznej jest zmienne i wynosi od 1: 2,5 do 1: 1,85. Jaz piętrzący w Sromowcach Wyżnych składa się z czterech przęseł, każde o szerokości 12 m. Długość zapory wraz z jazem wynosi 460 m przy maksymalnej wysokości 11 m (Łaniewski 1997).

W zaporze zbiornika głównego zainstalowana jest hydroelektrownia szczytowo-pompowa, dla której zbiornik dolny pełni, oprócz roli zbiornika wyrównawczego, również funkcję rezerwy wodnej, skąd woda w okresach niskiego zapotrzebowania na energię elektryczną, przepompowywana jest do zbiornika głównego.

Utworzony przez zaporę główną Zbiornik Czorsztyński znajduje się na styku trzech pasm górskich: w części północno-zachodniej – Górców, w części północno-wschodniej – Pienin Czorsztyńskich a na południu ogranicza go pasmo Pienin Spiskich. Zbiornik Czorsztyński jest jednym z największych górskich jezior zaporowych w Polsce. Rozciąga się na długości 10,5 km od wsi Dębno do Niedzicy, przy czym powierzchnia zalewu przy normalnym poziomie piętrzenia wynosi 1.120 ha, objętość całkowita 234,5 mln m<sup>3</sup> (Łaniewski 1997), a głębokość zbiornika przy zaporze w Niedzicy sięga ok. 50 m przy normalnym poziomie piętrzenia.

Głównymi dopływami Zbiornika Czorsztyńskiego są rzeki Dunajec i Białka. Jakkolwiek obie rzeki mają swoje źródła w Tatrach, to jednak istotnie różnią się wielkością i charakterem dorzecza, a także związaną z tym ilością rumowiska unoszonego i wlezonego.

Rzeka Białka wypływająca w Tatrach Wysokich ma znacznie mniejsze dorzecze niż Dunajec i doprowadza do zbiornika głównie rumowisko wlezione, złożone z okruchów skał granitowych, niekiedy o znacznych średnicach. Jej wpływ na zamulenie dna czaszy zbiornika jest stosunkowo niewielki.

Rzeka Dunajec, której źródła znajdują się głównie w Tatrach Zachodnich, ma znacznie

większe dorzecze, które prawie w całości znajduje się na obszarze fliszowym. Transportuje ona zarówno rumowisko wleczone jak i unoszone, złożone, zwłaszcza przy ujściu do Zbiornika Czorsztyńskiego, głównie z okruchów skalnych pochodzących z utworów fliszowych, jak i dużą ilość materiału unoszonego, pochodzącego z gruntów gliniasto-pylastych, tworzących nakład nad skalnym podłożem fliszowym. Z tego względu głównym źródłem zamulania dna czaszy jak i załadowania cofki są nanosy Dunajca, tworzące już charakterystyczny cypel przy ujściu rzeki do zbiornika, wyraźnie widoczny przy normalnym poziomie piętrzenia.

Strefę brzegową zbiornika porastają lasy, krzewy, a także łąki i pastwiska. Powierzchniowe warstwy zboczy tworzą grunty spoiste, gliny pylaste, rumosz i żwiry gliniaste oraz zwietrzałe skały. Pod względem litologicznym obszar badań znajduje się w obrębie pienińskiego pasa skałkowego, który wąskim pasem leży pomiędzy fliszem magurskim na północy a fliszem podhalańskim na południu i ciągnie się od okolic Wiednia aż po Marmaroszę w północnej części Rumunii. Na obszarze Polski w pasie skałkowym wyróżniono dwie płaszczowiny: dolną – czorsztyńską i górną – pienińską. Płaszczowina czorsztyńska zbudowana jest głównie z wapieni jurajskich i margli kredowych. Osady tej serii uważa się za utwory stosunkowo płytkiego morza, które występują w skałkach znajdujących się bliżej północnego brzegu strefy skałkowej. Na płaszczowinę czorsztyńską została nasunięta płaszczowina pienińska, która występuje w skałkach leżących bliżej południowego brzegu pasa skałkowego. Charakterystyczne utwory tej serii stanowią wapienie jurajskie i margle kredowe, ale występują również zlepionce z przewarstwieniami krzemionkowo-lupkowymi. Dodatkowo w strefie pienińskiej w okolicach Czorsztyna i Szczawnicy występują skały magmowe intruzyjne (Książkiewicz i in. 1965, Plewa 1999).

## BADANIA ABRAZJI

### *Opis procesu abrazji*

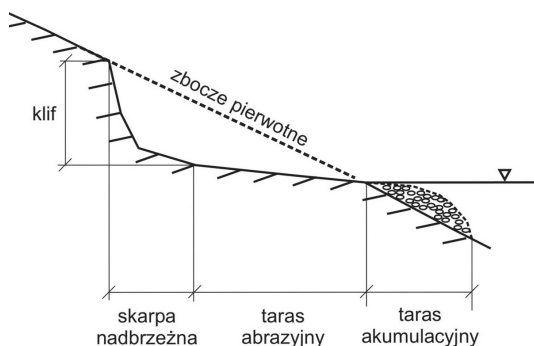
Abrazja, obok załadowania obszaru cofki, jest jednym z dwóch głównych czynników, powo-

dujących transformację brzegów zbiorników wodnych. Proces ten stanowi jedną z form erozji wodnej i polega na ścieraniu wierzchniej warstwy podłoża przez luźny materiał przemieszczany prądami i falami wodnymi. Proces abrazji jest wspomagany przez wymywanie cząstek i agregatów gruntowych na skutek działania prądów i falowania wody. Siły fizycznego oddziaływania wody przekraczają siły wzajemnego powiązania cząstek gruntu i powodują odrywanie i przemieszczanie ziaren i cząstek gruntu.

Procesowi abrazji towarzyszy akumulacja wymytego materiału, najczęściej w strefie przyboju, co prowadzi do jej spłylenia i zamulania czaszy zbiornika. Proces sedymentacji następuje, gdy siły ciężkości działające na cząstki gruntu są większe od sił wymuszających ich ruch. W procesie sedymentacji następuje segregacja materiału gruntowego i cząstki grubsze osadzają się w pobliżu linii brzegowej, a drobniejsze frakcje opadają na dno w głębi zbiornika. Przemieszczające się rumowisko powoduje zmiany w budowie profilu brzegowego.

Można wyróżnić dwa zasadnicze typy profilu brzegu zbiorników wodnych po ich przebudowie, wywołanej procesami abrazji: abrazyjny i abrazyjno-akumulacyjny. Najczęściej obserwowanym na analizowanym odcinku Zbiornika Czorsztyńskiego typ przeobrażonego brzegu ma charakter abrazyjno-akumulacyjny (Ryc. 1).

Dla takiego schematu taras abrazyjny przyjmuje często postać plaży, której nachylenie w kierunku zwierciadła wody zależy od rodzaju tworzącego ją materiału, a głównie od zawartości



**Ryc. 1.** Elementy składowe abrazyjnego profilu brzegowego. Composition elements of an abrasion bank profile.

frakcji grubych. Poniżej, już pod wodą, tworzy się taras akumulacyjny, gdzie osadza się materiał wyerodowany z obrzeża.

#### *Czynniki mające wpływ na procesy abrazyjne*

Jak wspomniano powyżej proces abrazyjny uzależniony jest od warunków hydrodynamicznych i geotechnicznych występujących w strefie brzegowej zbiorników wodnych. Do warunków hydrodynamicznych zaliczamy zmiany poziomów wody w zbiorniku i częstość ich występowania, wielkość i kierunek nabiegu fali wiatrowej w stosunku do linii brzegowej oraz prądy wodne, które mogą być skierowane ku brzegowi, przydenne odbrzegowe i wzdłużne przybrzegowe. Do cech geotechnicznych, mających wpływ na przebieg procesu abrazji, należy przede wszystkim skład granulometryczny gruntów strefy brzegowej, a zwłaszcza proporcje procentowej zawartości frakcji drobnych (pyłowej, ilowej i piaskowej), łatwo wymywanych w stosunku do frakcji żwirowej i kamienistej, trudniej ulegających rozmyciu i przemieszczeniu. Nachylenie zbocza pierwotnego ma również istotny wpływ na formowanie się brzegu abrazyjnego i im jest ono większe, tym większa jest wysokość klifu abrazyjnego.

#### *Opis i metodyka prac badawczych*

Jak widać z powyższego, znaczna liczba czynników mających wpływ na przeobrażenia brzegu pod wpływem procesów abrazyjnych i ich wzajemne nakładanie się na siebie, uniemożliwia w praktyce precyzyjne określenie wpływu każdego z nich z osobna na przebieg procesu abrazyjnego czy to na drodze teoretycznej czy też poprzez obserwacje terenowe. Jedynym sposobem pozwalającym na ściśle określenie wpływu poszczególnych czynników na proces abrazji jest wielkoskalowe badanie modelowe w laboratoriach hydrotechnicznych, które są kosztowne i nie zawsze możliwe do wykonania, choćby ze względu na odwzorowanie proporcji uziarnienia gruntu-wielkość fali.

Biorąc powyższe pod uwagę zdecydowano się na przeprowadzenie długofalowych badań terenowych z uwzględnieniem takich czynników

jak: nachylenie zboczy pierwotnych, cechy geotechniczne materiału budującego brzeg, wielkość falowania i kierunku nabiegu fali wiatrowej oraz – w ograniczonym zakresie – zmiany poziomów wody w zbiorniku. Autorzy mieli tu pełną świadomość, że interpretacja otrzymanych wyników może dać tylko przybliżone zależności z uwagi na nakładanie się wymienionych wyżej czynników na siebie.

Dla realizacji tego celu na obrzeżu zbiornika wytypowano i zastabilizowano w sumie sześć profili badawczych rozmieszczonych tak, aby uwzględnić zróżnicowane nachylenie zboczy pierwotnych i różne zawartości frakcji grubych w stosunku do frakcji drobnych na poszczególnych przekrojach badawczych. Obrzeże podzielono na dwa odcinki, przy czym pierwszy wyznaczono w pobliżu zapory, gdzie nachylenie zboczy było mniejsze (od  $16^\circ$  do  $30^\circ$ ) i na którym zastabilizowano cztery profile (I–IV), a drugi w obrębie Wzgórza Wapiennik, gdzie nachylenie zbocza było większe (wynosiło  $31$ – $36^\circ$ ) i gdzie zastabilizowano dwa przekroje (W1–1, W2–2).

W profilach o największym nachyleniu zbocza pierwotnego zawartość frakcji grubych w materiale gruntowym z tarasu abrazyjnego była większa niż w przekrojach o nachyleniu mniejszym. Część obrzeża, będąca przedmiotem badań, ze względu na swoje usytuowanie w stosunku do podłużnej osi zbiornika, była narażona w największym stopniu na działanie fali, gdyż długość nabiegu i wielkość fali wiatrowej jest tu największa w stosunku do pozostałej części zbiornika. Rozmieszczenie przekrojów badawczych przedstawiano na rycinie 2.

Na wyznaczonych i zastabilizowanych profilach prowadzono od 2003 r. coroczne szczegółowe pomiary geodezyjne, w oparciu o które wyznaczano każdorazowo dokładny przekrój profilu brzegowego, z którego można było odczytać nachylenie tarasu abrazyjnego, wysokość i wielkość cofania się krawędzi klifu abrazyjnego. Równocześnie w oparciu o badania laboratoryjne określono parametry geotechniczne gruntów, tworzących skarpy abrazyjne oraz zmytych do zbiornika w wyniku abrazji, a w oparciu o badania polowe oznaczono współczynnik filtracji gruntów



**Ryc. 2.** Lokalizacja przekrojów badawczych (T. Zydroń i in. 2010).  
Location of test cross-sections.

tworzących zbocza naturalne w rejonie przekrojów I-I i II-II.

#### BADANIA ZAŁADOWYWANIA OBSZARU COFKI

##### *Opis procesu załadowania*

Rzeki wpływające do zbiorników wodnych transportują rumowisko, które osadza się w dnie czaszy oraz przy ujściu rzeki do zbiornika, tworząc obszar delty. Obszar załadowany w miarę upływu czasu powiększa się, zmieniając w rejonie cofki linię brzegową, co powoduje zmniejszenie powierzchni zalewu i spłylenie, a tym samym zmniejszenie objętości użytkowej zbiornika. Szybkość i wielkość załadowania zależy od ilości rumowiska unoszonego i wlezonego przez rzekę, zwłaszcza w okresach przyborów. Znajomość szybkości załadowania i rodzaju gruntów, jakie tam się osadzają, ma z jednej strony znaczenie dla prognozowania tego procesu (niekorzystnego z punktu widzenia eksploatacji zbiornika), jak i określenia możliwości wykorzystania tych gruntów do celów

inżynierskich (Kozielska-Sroka E., Chęć M. 2009) jak ma to miejsce np. na Zbiorniku Dobczyckim, gdzie grunt eksploatowany z cofki znajduje zastosowanie w budownictwie drogowym.

##### *Opis i metodyka prac badawczych*

W 2008 r. rozpoczęto badania na cyplu tworzącym się przy ujściu Dunajca do zbiornika. Badania przewidziane są na wiele lat, mają na celu określenie szybkości, kształtu i wielkości tworzenia się obszaru załadowanego powyżej poziomu normalnego piętrzenia oraz rodzaju gruntów osadzonych w tym obszarze. Badania polegają na corocznych obmiarach geodezyjnych w planie tworzącego się cypla, grubości tworzących go osadów i określaniu parametrów geotechnicznych gruntów osadzonych na cyplu (powyżej pierwotnego dna rzeki).

W tym celu w pierwszej kolejności wydzielono charakterystyczny przekrój wzdłuż cypla znajdującego się na lewym brzegu zbiornika (Ryc. 3), gdzie w kilku punktach wykonano odkrywki do



**Ryc. 3.** Lokalizacja przekroji i punktów badawczych w rejonie cofki wód Dunajca.  
Location of cross sections and investigation open-pits in the Dunajec backwater area.

głębokości odpowiadającej położeniu stropu otczaków (pierwotne dno rzeki), a próbki osadów pobierano do badań laboratoryjnych.

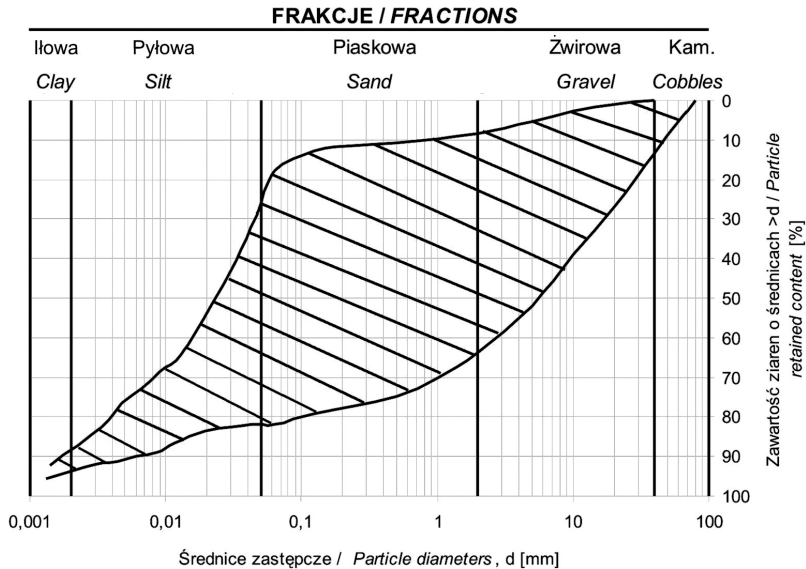
#### *Charakterystyka geotechniczna gruntów strefy brzegowej zbiornika i rejonu załadowania*

Badania cech geotechnicznych przeprowadzono na gruntach tworzących skarpy abrazyjne, zalegających u podnóża tych skarpy w obrębie tarasu abrazyjnego, zakumulowanych w strefie brzegowej zbiornika oraz naniesionych przez rzekę Dunajec w obszarze załadowania rejonu cofki. Zbiorcze zestawienie otrzymanych podstawowych parametrów geotechnicznych przedstawione jest w tabeli I, natomiast krzywe uziarnienia gruntów pochodzących z wybranych fragmentów przekrojów abrazyjnych przedstawiono na rysunkach 4–6, a uziarnienie gruntów z rejonu cofki zbiornika zilustrowano na rysunku 7.

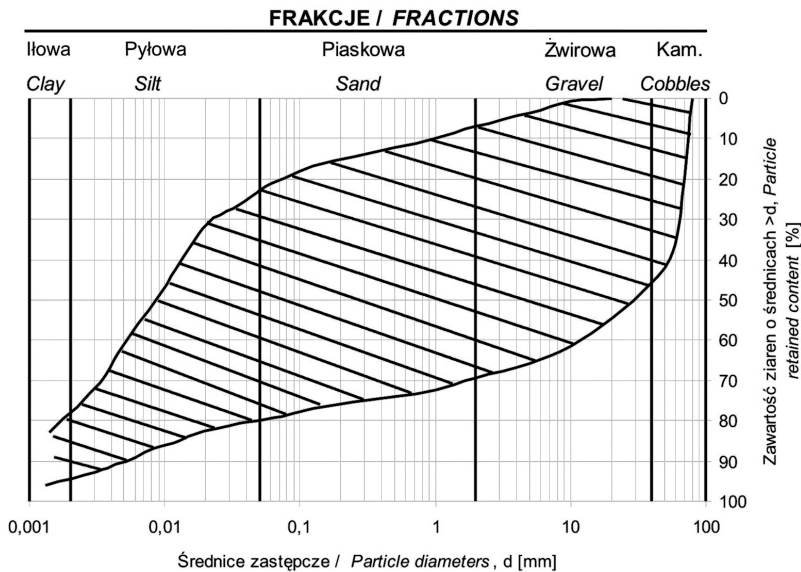
Parametrem wiodącym w ocenie własności gruntów w sensie geotechnicznym jest jego skład uziarnienia, gdyż pozostałe cechy geotechniczne

są pochodną tego parametru. Analiza składu uziarnienia pozwala z jednej strony sklasyfikować rodzaje materiału zalegającego w wyżej wymienionych rejonach a z drugiej strony ocenić wpływ procesów abrazyjnych na zmiany tego składu w zależności od miejsca zalegania.

Grunty zalegające w skarpach nadbrzeża to głównie żwiry i rumosze zaglinione (Tab. I, Ryc. 4–5), przy czym zawartość frakcji drobnych, tj. ilowej i pyłowej, jest dość znaczna i dochodzi do kilkudziesięciu procent. Proces denudacji powoduje wymywanie głównie frakcji drobnych, co znajduje swoje odzwierciedlenie w składzie uziarnienia materiału zalegającego u podnóża klifów abrazyjnych (Ryc. 6), gdzie zawartość frakcji drobnych ulega znacznemu zmniejszeniu (do kilku procent), natomiast zawartość frakcji kamienistej i żwirowej jest istotnie większa w porównaniu z materiałem budującym skarpy nadbrzeżne. Z kolei skład uziarnienia materiału zakumulowanego w dennej strefie przybrzeżnej (Tab. I) charakteryzuje się dużą zawartością frakcji drobnych, sięgającą kilkudziesięciu procent. Należy jeszcze



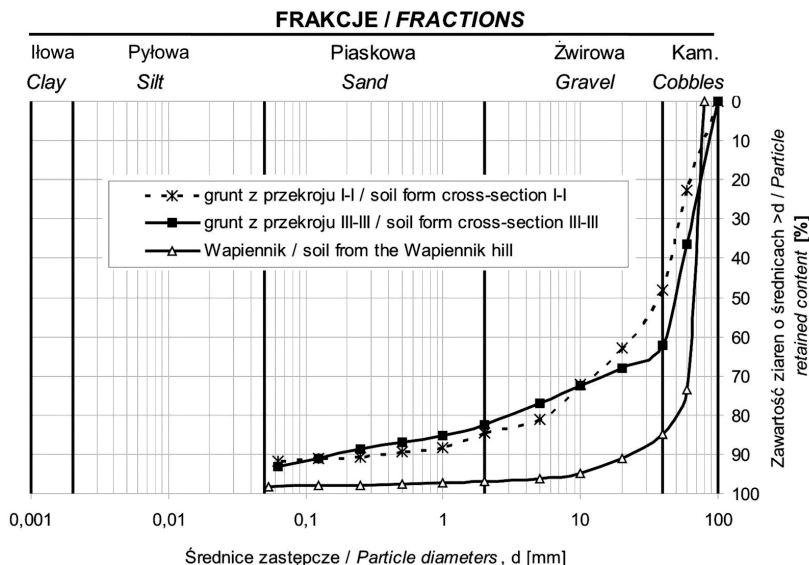
**Ryc. 4.** Zakres uziarnienia gruntów obrzeża w sąsiedztwie zapory.  
Range of granulation of soils in the proximity of the dam.



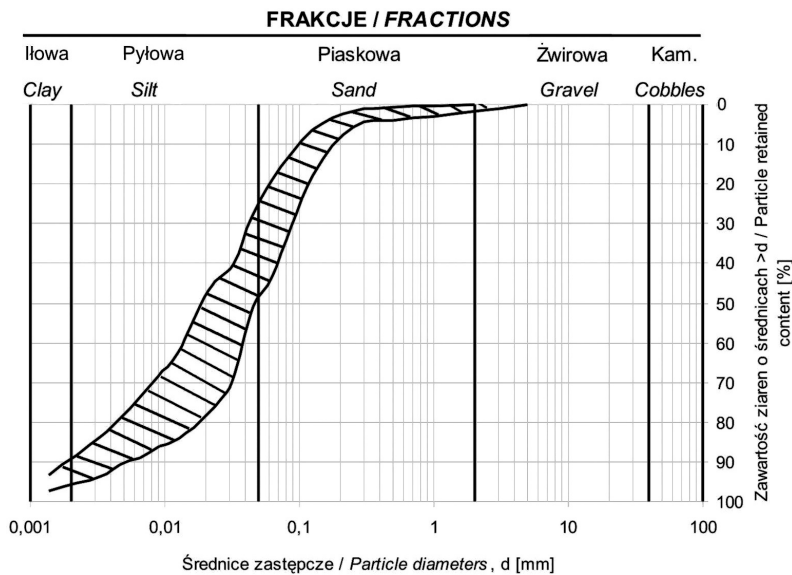
**Ryc. 5.** Zakres uziarnienia gruntów obrzeża w rejonie Wapiennika.  
Range of granulation of soils from the Wapiennik hill.

zwrócić uwagę na duże zróżnicowanie zawartości frakcji w poszczególnych przekrojach, co ma wpływ na różne nachylenia tarasu abrazyjnego (plaży) zależnie od zawartości i wielkości frakcji kamienistej.

Materiał zakumulowany na cyplu jest typowo drobnoziarnisty, gdyż w składzie uziarnienia w ogóle nie stwierdzono frakcji kamienistej i żwirowej, natomiast dominują w nim frakcje piaskowa i pyłowa (Ryc. 7).



**Ryc. 6.** Wykresy uziarnienia materiału tarasu abrazyjnego.  
Granulation curves for the material from abrasion terrace.



**Ryc. 7.** Zakres uziarnienia gruntów наносów rzeki Dunajec w cofce zbiornika.  
Range of granulation of the Dunajec river alluvium in the reservoir backwater.

Badania połowe współczynnika filtracji skarp nadbrzeżnych dały w wyniku wartości rzędu  $10^{-6}$ – $10^{-5}$  m/s, co ma znaczenie przy ustalaniu dopuszczalnych prędkości obniżania poziomów wody w zbiorniku, by nie dopuścić do powstania

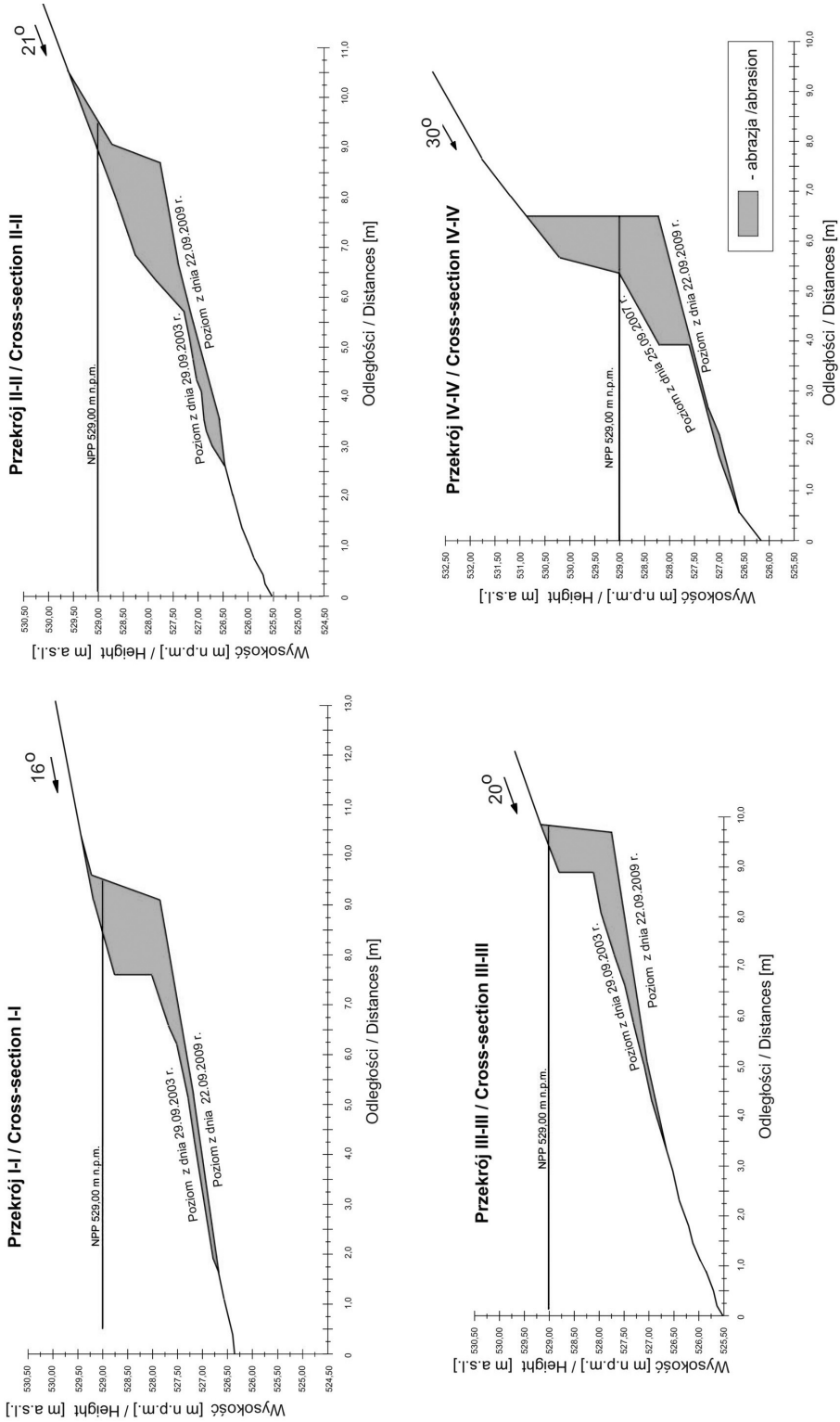
ciśnienia sphywowego na zboczach, zagrażającego stabilności stoków. Współczynnik filtracji materiału zakumulowanego w strefie przybrzeżnej i na obszarze cofki jest znacznie niższy, rzędu  $10^{-9}$ – $10^{-8}$  m/s, co wynika z wysokiej zawartości



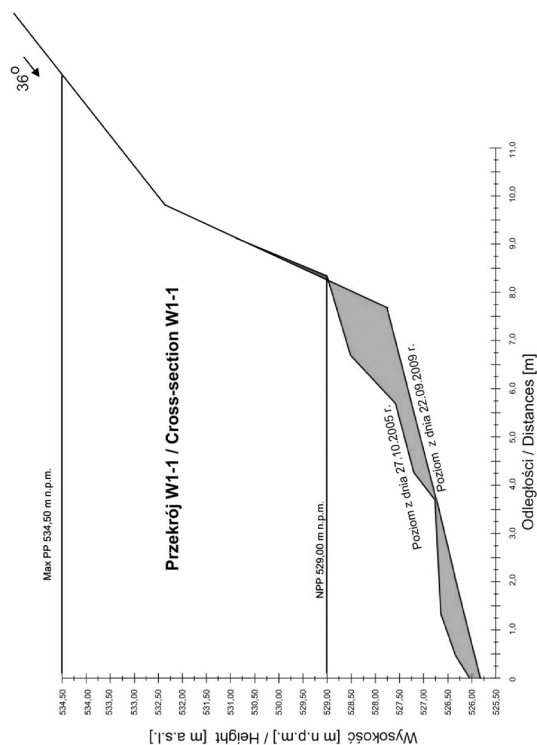
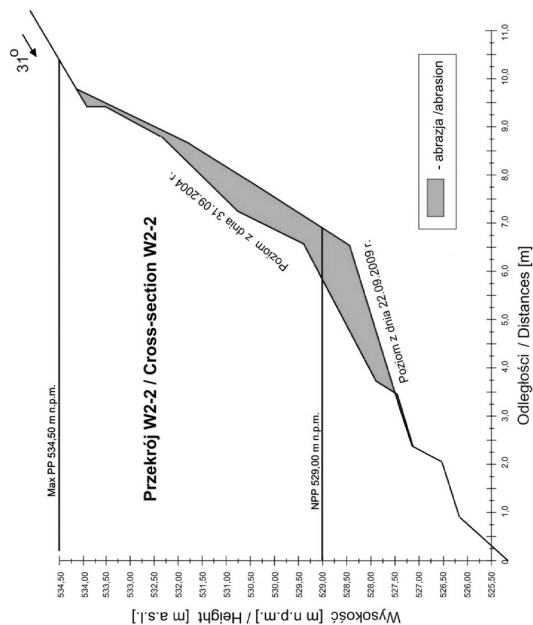
**Tabela 1.** Właściwości geotechniczne gruntów tworzących obrzeże Jeziora Czorszyńskiego i osadów dennych. Geotechnical properties of soils forming banks of the Czorszyn reservoir and bottom sediments.

Parametry geotechniczne Geotechnical parameters	Symbol Symbol	Jednostka Unit	Grundy ze skarp obrzeża – przekroje przy zaporze Soils from bank- slopes profiles in the proximity of the dam	Grunt ze wzgórza Wapiennik Soils from Wapiennik hill	Grundy z tarasu abrazyjnego Soils from abra- sion terrace	Osady dennie zakumulowane w strefie przybrzeżnej* Bottom sediments accumulated on the inshore zone*	Nanosy rzeki Dunajec w cołce zbiornika Alluvium of the Dunajec river in the backwater of the reservoir
Zawartość frakcji / Fraction content:							
– kamienistej / cobbles	$f_k$	–	0–17	0–49	23–84	–	–
– żwirowej / gravel	$f_z$	%	8–50	7–38	13–46	9	–
– piaskowej / sand	$f_p$	–	7–18	7–21	1–11	42	23–66
– pyłowej / silt	$f_{pz}$	–	12–61	15–56	1–8	34	31–72
– ilowej / clay	$f_i$	–	6–10	6–21	–	15	4–10
Rodzaj gruntu wg PN-86/B-02480 Type of soil according to PN-86/B-02480	–	–	KRg – Pog	$G_{rz}$ –Żg	KR, Ż	G	Pg-G <sub>rz</sub>
Gęstość właściwa Specific density	$\rho_s$	$g \cdot cm^{-3}$	2,68–2,69	2,76–2,79	–	2,71	2,63–2,68
Granica plastyczności plastic limit	$W_p$	%	19,8–24,4	21,8–25,1	–	26,5	21,1–33,5
Granica płynności liquid limit	$W_L$	%	40,5–50,4	38,3–57,2	–	43,6	41,9–57,7
Wskaźnik plastyczności plasticity index	$I_p$	[–]	19,6–26,0	16,7–32,6	–	12,1	7,0–25,5
Zawartość CaCO <sub>3</sub> CaCO <sub>3</sub> content	–	%	–	–	–	3–5	>3
Zawartość części organicznych organic matter content	$I_{om}$	%	–	–	–	5,46	3,2–4,5
Wilgotność optymalna optimum moisture content	$W_{opt}$	%	12,4–17,5	16,3–20,5	–	15,8	20–25,2
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu gruntowego Maximum dry density	$\rho_{ds}$	$g \cdot cm^{-3}$	1,71–1,98	1,66–1,79	–	1,71	1,48–1,65
Współczynnik filtracji permeability coefficients:							
	$k_{10}$	$m \cdot s^{-1}$	$1,6 \cdot 10^{-6} - 2,9 \cdot 10^{-5}$	–	–	$8,2 \cdot 10^{-9}$	$1,6 - 3,1 \cdot 10^{-8}$
			–	–	–	$5,9 \cdot 10^{-9}$	
			–	–	–	$6,0 \cdot 10^{-9}$	$3,6 \cdot 10^{-9}$

\* według Kozielska-Sroka i Chęć [2009]



**Ryc. 8.** Zmiany kształtu skarpy w obrębie przekrojów znajdujących się w pobliżu zapory ziemnej.  
 Transformations of an abrasion slope on the bank in the proximity of the earth dam.



frakcji drobnych. Parametr ten ma znaczenie przy określaniu ewentualnej przydatności gruntów osadzonych w zbiorniku w przypadku ich eksploatacji do celów inżynierskich.

#### TRANSFORMACJA BRZEGÓW ZBIORNIKA

##### *Przebudowa brzegu spowodowana procesami abrazyjnymi i jego uwarunkowania*

Badania przebudowy brzegów, jak wspomniano we wstępie, prowadzono na dwóch odcinkach. Pierwszy, zlokalizowany na północno-wschodnim brzegu w pobliżu zapory (Ryc. 2), ograniczony był przekrojami I–I i IV–IV i miał długość 131 m, natomiast drugi, zlokalizowany w rejonie wzgórza Wapiennik, gdzie brzeg jest najbardziej stromy, ograniczony był przekrojami W–1 i W–2 oddalonymi od siebie o 16 m. We wszystkich profilach badawczych prowadzono szczegółowe pomiary zmian w poziomie i w pionie otrzymując dokładne przekroje w każdym z profili.

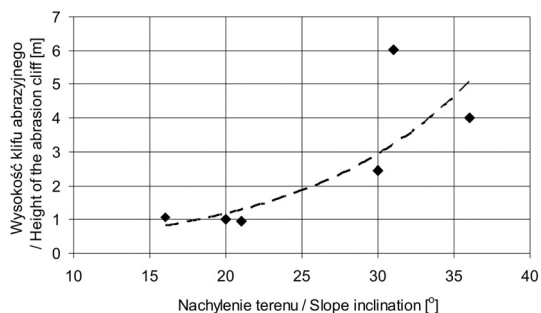
Na rysunkach 8–9 pokazane są przekroje badawcze, na których uwidocznione są zmiany kształtu brzegów w okresie od 2003 do 2009 roku. Fotografie 1–3 przedstawiają widok na wybrane przekroje badawcze.

W oparciu o wykonane przekroje przeanalizowano przebudowę brzegu na poszczególnych profilach. Analiza ta obejmowała ocenę zmian wysokości klifu i wielkość cofania się jego krawędzi w głąb łądu, nachylenia tarasu abrazyjnego i wielkość ubytku materiału zmytego przez proces abrazji do zbiornika w badanym okresie. Wykazano ponadto związek pomiędzy poziomami wody w zbiorniku, a ilością wyerodowanego materiału.

Analiza danych otrzymanych z pomiarów pokazuje wyraźną zależność wysokości klifu abrazyjnego od nachylenia zbocza pierwotnego, podobnie jak wielkość cofania się krawędzi klifu. Zależności te pokazane są na wykresach na rycinach 10 i 11.

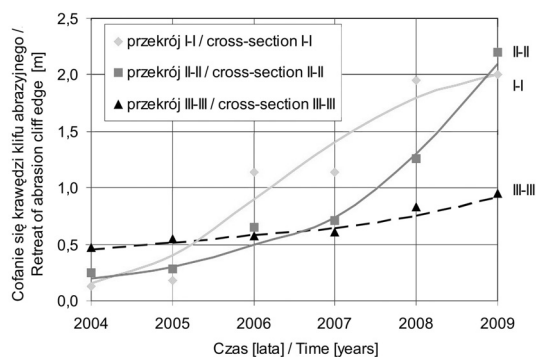


**Ryc. 9.** Zmiany kształtu skarpy w obrębie przekrojów znajdujących się w pobliżu wzgórza Wapiennik. Transformations of an abrasion slope on the bank in the Wapiennik hill area.



**Ryc. 10.** Zależność wysokości klifu abrazyjnego od nachylenia zbocza pierwotnego (T. Zydroń i in. 2010).

Relationship between the height of abrasion cliff and inclination of the original slope.



**Ryc. 11.** Zależność cofania się krawędzi klifu abrazyjnego od nachylenia zbocza pierwotnego.

Relationship between the retreat of abrasion cliff edge and original slope inclination in time.

Wysokość klifu abrazyjnego (Ryc. 10) szybko wzrasta wraz z wielkością nachylenia zbocza pierwotnego i w rejonie zboczy o nachyleniu 16–21° wynosi 1–2 m, natomiast w rejonie zboczy o nachyleniu ponad 35° dochodzi do wartości 5–6 m (rejon wzgórza Wapiennik). Wielkość cofania się krawędzi klifu w czasie (Ryc. 11), określona na przekrojach I–I do III–III, rośnie wraz z czasem i w okresie 2004–2009 osiągnęła wartość 1–2 m, przy czym im mniejsze jest



**Fot. 1.** Widok obrzeża zbiornika w rejonie przekrojów I–I i II–II.

A view of the reservoir bank in the cross-section I–I and II–II area.



**Fot. 2.** Fragment brzegu w rejonie przekroju III–III. (Fot. Bartosiewicz 2003)  
The fragment of bank in the cross-section III–III area. (Phot. Bartosiewicz 2003)



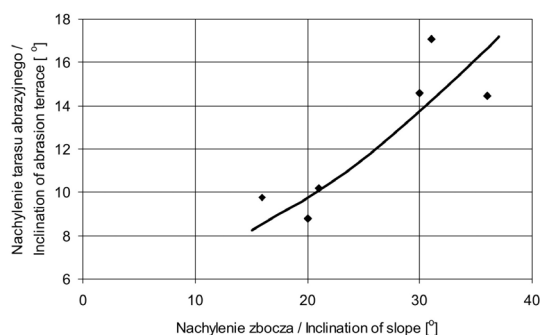
**Fot. 3.** Fragment brzegu w rejonie Wzgórza Wapiennik. (Fot. Dryś 2005)  
The fragment of bank in the Wapiennik hill area. (Phot. Dryś 2005)

nachylenie zbocza, tym wielkość cofnięcia się krawędzi klifu jest większa.

Na profilach W1–1 i W2–2, gdzie nachylenie zbocza pierwotnego jest największe, nie stwierdzono w okresie 2004–2009 cofnięcia się krawędzi klifu, gdyż prawdopodobnie wystąpił tu już stan równowagi związany ze zbliżaniem się krawędzi klifu do poziomu maksymalnego piętrzenia.

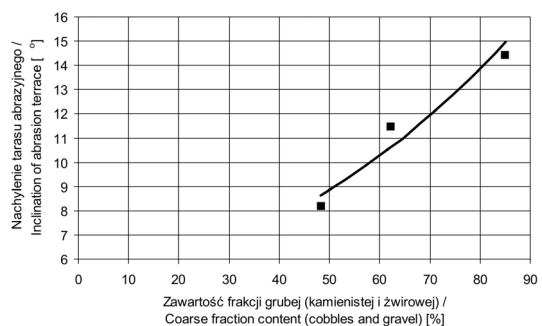
Nachylenie tarasu abrazyjnego (plaży) zależy wyraźnie także od nachylenia stoku pierwotnego i ta zależność pokazana jest na rysunku 12. Powyższa zależność nakłada się ponadto na zawartość frakcji grubych (Ryc. 13), gdzie wyraźnie widać, że nachylenie tarasu abrazyjnego wzrasta wraz z zawartością frakcji grubszych od  $\phi$  2,0 mm.

Do istotnych czynników, wpływających na postęp procesu abrazyji, jest oddziaływanie wód



**Ryc. 12.** Zależność nachylenia tarasu abrazyjnego od nachylenia zbocza pierwotnego.

Relationship between inclination of original slope and inclination of abrasion terrace.



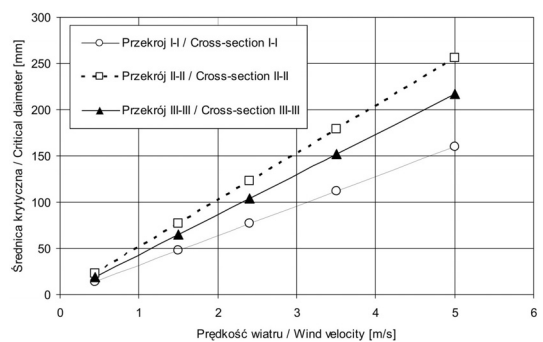
**Ryc. 13.** Zależność nachylenia tarasu abrazyjnego od zawartości ziaren frakcji grubych.

Relationship between inclination of abrasion terrace and coarse fraction content.

na przyległy brzeg. Oddziaływanie to objawia się poprzez falowanie, które powoduje rozmywanie gruntów brzegu.

Wpływ fali wiatrowej przeanalizowano w oparciu o wysokość fali i kąt jej nabiegu w stosunku do stycznej analizowanego odcinka brzegu. Wysokość fali wiatrowej obliczono zakładając różne prędkości wiatru, przy czym założono, że jej wysokość nie powinna przekraczać 0,5 m, co odpowiada granicznej wysokości fali obserwowanej przez pracowników zapory w Niedzicy. Obliczenia parametrów fali wykonano zgodnie z wzorami przedstawionymi w pracy Sobczaka (1975) dla fali w strefie przybojowej, której parametry odpowiadają fali głębokowodnej.

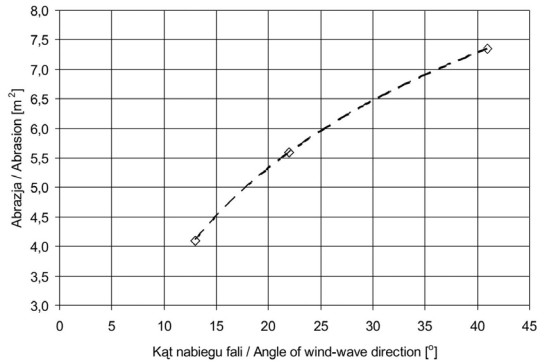
Z kolei w oparciu o obliczone wysokości fali, wielkości kąta nabiegu fali na brzeg oraz nachylenie terenu określono średnice krytyczne gruntów według wzoru Kurłowicza (Waclawski 1986). Parametr ten odpowiada maksymalnemu wymiarowi ziarna podatnego na proces rozmywania przez fale rozbijające się o brzeg. Na rysunku 14 przedstawiono zależność wielkości średnic krytycznych od prędkości wiatru. Z przedstawionych



**Ryc. 14.** Wpływ prędkości wiatru na wartości krytycznej średnicy ziaren.

Influence of wind velocity on the value of critical diameter of soil particle.

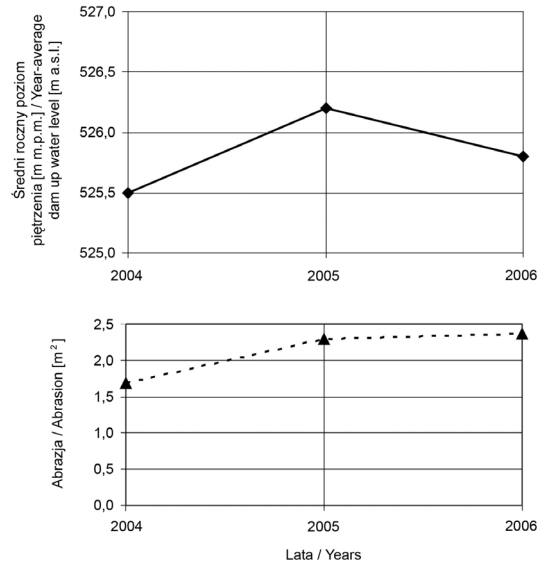
danych wynika, że wraz ze wzrostem prędkości wiatru zwiększa się liniowo wielkość średnicy krytycznej, co oznacza, że większa część materiału gruntowego będzie podatna na wymywanie. Zależnie od składu uziarnienia, im większa zawartość w danym przekroju ziaren powyżej średnicy krytycznej, tym podatność na wymywanie będzie mniejsza.



**Ryc. 15.** Wpływ kąta nabiegu fali wiatrowej na wielkość abrazyji w przekrojach od I-I do III-III w okresie 2003–2009.  
Influence of angle of wind-wave run direction on abrasion effect in cross-sections I-I – III-III over the period 2003–2009.

Wpływ kąta nabiegu fali wiatrowej na wielkość wyerodowanego materiału ilustruje wykres (Ryc. 15), z którego wynika, że im kąt nabiegu jest większy, tym wielkość abrazyji wzrasta, przy czym można przewidywać, że maksymalnie destrukcyjne oddziaływanie falowania na brzeg będzie miało miejsce przy prostopadłym kierunku nabiegu fali.

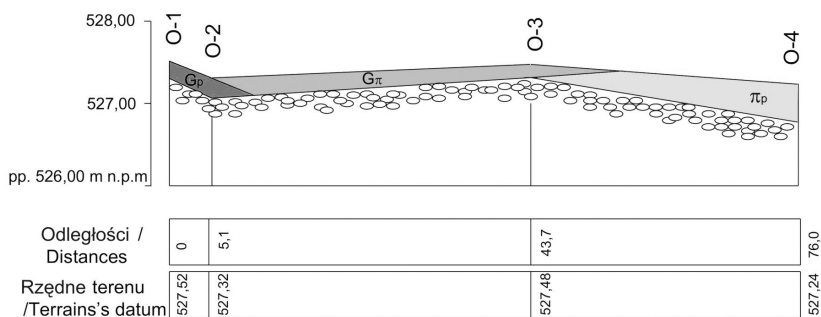
Z kolei zasięg oddziaływania falowania związany jest ze zmianami poziomu piętrzenia wody na zbiorniku. Na rycinie 16 przedstawiono zależność pomiędzy wartościami abrazyji w obrębie przekrojów od I-I do III-III, a średnimi poziomami wody w zbiorniku w okresie rocznym przed pomiarami geodezyjnymi. Z przedstawionych zależności wynika, że dla okresu obserwacyjnego 2004–2005 wielkość abrazyji rosła wraz ze



**Ryc. 16.** Zależność wielkości abrazyji od średniego poziomu piętrzenia wody w zbiorniku (T. Zydroń i in. 2010).  
Relationship between abrasion effect and year-round average dam water level.

zwiększaniem się średniego poziomu piętrzenia. Należy zwrócić uwagę, że w analizowanym okresie średnie wielkości piętrzenia są co najmniej 2,5 m poniżej normalnego poziomu piętrzenia, niemniej przy tej wysokości zasięg oddziaływania wody obejmuje poziom tarasów abrazyjnych, a dodatkowo po uwzględnieniu zasięgu oddziaływania fal sięga on podstaw klifów.

W oparciu o coroczne pomiary geodezyjne skarp abrazyjnych można było obliczyć kubaturę materiału wyerodowanego w rocznych



**Ryc. 17.** Uogólniony przekrój geotechniczny przez warstwę наносów w lewobrzeżnej części cofki zbiornika.  
Generalized cross-section across the alluvium layer in the left-bank of the reservoir backwater.

**Tabela II.** Obliczenie objętości mas gruntu wyerodowanego na odcinku brzegu pomiędzy przekrojami I-I i III-III. Calculations of soil volumes eroded from the bank fragment between cross-sections I-I and III-III.

Rok Year	Nr przekroju Cross-section No.	Powierzchnia abrazji Abrasion area	Odległość pomiędzy przekrojami Distance between cross-sections	Abrazja pomiędzy przekrojami Abrasion between cross-sections	Abrazja – wartość sumaryczna Abrasion – total value	Wartość jednostkowa Unit value
		[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /mb]
2003	I-I	0,14	54,0	29,2	53,6	0,63
	II-II	0,94	31,5	24,4		
	III-III	0,61				
2004	I-I	0,94	54,0	52,4	73,8	0,86
	II-II	1,00	31,5	21,4		
	III-III	0,36				
2005	I-I	0,96	54,0	42,1	64,3	0,75
	II-II	0,60	31,5	22,2		
	III-III	0,81				
2006	I-I	1,41	54,0	46,7	62,8	0,73
	II-II	0,32	31,5	16,1		
	III-III	0,70				
2007	I-I	1,97	54,0	62,6	79,5	0,93
	II-II	0,35	31,5	16,9		
	III-III	0,72				
2008	I-I	1,00	54,0	41,6	53,6	0,63
	II-II	0,54	31,5	12,0		
	III-III	0,22				
2009	I-I	0,93	54,0	75,1	114,9	1,34
	II-II	1,85	31,5	39,8		
	III-III	0,68				
					średnia roczna / average per year	0,84

interwałach czasowych. Obliczenia takie wykonano na odcinku brzegu pomiędzy przekrojami I-I i III-III oraz pomiędzy W1-1 i W2-2 w rejonie wzgórza Wapiennik (Tab. II i III). Wyniki obliczeń pokazują wyraźną zależność pomiędzy nachyleniem stoku naturalnego a ilością wyerodowanego materiału w procesach abrazyjnych. Na odcinku brzegu, gdzie nachylenie stoku mieściło się w granicach 16–21°, średnia roczna objętość wyerodowanego materiału wynosiła 0,84 m<sup>3</sup>/mb brzegu, a na odcinku (wzgórze Wapiennik), gdzie nachylenie stoku jest znacznie wyższe (31–36°), średnia roczna objętość wyerodowanego materiału

jest również znacznie większa i wynosi 2,1 m<sup>3</sup>/mb brzegu.

#### *Przebudowa brzegu wynikająca z procesu załadowania*

Badania załadowania zbiornika rozpoczęto we wrześniu 2008 r. u ujścia Dunajca w miejscowości Dębno, gdzie utworzył się już typowy stożek napływowo. W ramach badań wytyczono i zastabilizowano przekroje badawcze (Ryc. 3), wykonano odkrywki, skąd pobrano próbki do badań laboratoryjnych, na których podstawie



**Tabela III.** Obliczenie objętości mas gruntu wyerodowanego pomiędzy przekrojami W1-1 i W2-2 w rejonie wzgórza Wapiennik.

Calculations of soil volumes eroded between cross-sections W1-1 and W2-2 in the Wapiennik hill area.

Rok Year	Nr przekroju Cross-section No.	Powierzchnia abrazji Abrasion area	Odległość pomiędzy przekrojami Distance between cross-sections	Abrazja – wartość sumaryczna Abrasion – total value	Wartość jednostkowa Unit value
		[m <sup>2</sup> ]	[m]	[m <sup>3</sup> ]	[m <sup>3</sup> /mb]
2005	W 1 – 1	0,63	16,0	15,6	0,98
	W 2 – 2	1,32			
2006	W 1 – 1	4,31	16,0	42,0	2,63
	W 2 – 2	0,94			
2007	W 1 – 1	3,61	16,0	89,6	5,60
	W 2 – 2	7,59			
2008–2009	W 1 – 1	1,28	16,0	20,8	1,30
	W 2 – 2	1,32			
średnia roczna average per year					2,1

**Tabela IV.** Zestawienie wyników badań podstawowych parametrów geotechnicznych наносów.  
The list of test results of basic geotechnical parameters of alluvium.

Nr przekroju odkrywk No. of cross- section open-pit	Głębokość poboru próbek Depth of sampling	Rodzaj gruntu wg PN-86/B-02480 Type of soil according to PN- 86/B-02480	Granica plastycz- ności Plastic limit	Granica płynności Liquid limit	Wilgotność optymalna Optimum moisture content	Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu Max. dry density	Straty prażenia Ignition losses
	[m]		[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]
O-1	0,20	G <sub>p</sub>	33,5	51,6	22,7	1,55	4,5
O-2	0,25	G <sub>p</sub>	32,2	57,7	25,2	1,48	4,5
O-3	0,15	G <sub>π</sub>	33,5	40,5	20,0	1,57	3,4
O-5	0,35	P <sub>g</sub>	33,0	41,9	22,1	1,57	3,3
	0,35–0,9	π <sub>p</sub>	21,1	42,7	22,9	1,65	3,8
O-4	0,45	π <sub>p</sub>	24,1	44,2	20,9	1,62	3,2

oznaczono parametry geotechniczne zgodnie z PN-88/B-04481. Zgeneralizowane wartości zamieszczono są w tabeli I, natomiast szczegółowe wyniki badań własności geotechnicznych osadów zawiera tabela IV.

Dodatkowo do celów inżynierskich wykonano badania wodoprzepuszczalności przy wskaźniku zagęszczenia  $I_S=0,92$  oraz  $I_S=1,00$ . Dla danego zakresu zagęszczenia uzyskano wartości współczynnika filtracji w zakresie od około  $10^{-9}$  do

$10^{-7}$  m/s wykazując zależność, że im wyższe zagęszczenie gruntu, tym współczynnik filtracji niższy. W oparciu o przeprowadzone badania wykonano profil geotechniczny wzdłuż osi podłużnej cypla, przedstawiony na rycinie 17.

Pomierzone dotychczas grubości наносów na utworzonym cyplu (Ryc. 3) wahają się w przedziale od 0,15 m do ponad 1 m i tworzą je wyłącznie grunty drobnoziarniste, a zatem złożone są prawie wyłącznie z rumowiska unoszonego. Grubość

warstwy osadów rośnie wraz z odległością od miejsca wpływu rzeki do zbiornika, co zapewne wynika z obniżania się pierwotnego dna rzeki. Należy mieć na uwadze, że zbiornik funkcjonuje od 1997 roku, a zatem akumulacja osadów w tym miejscu trwa już 13 lat.

#### PODSUMOWANIE

Ogólnie można stwierdzić, że eksploatacja Zbiornika Czorsztyńskiego powoduje transformację jego brzegów w wyniku zachodzących tam procesów abrazji jak i załadowania.

Systematycznie prowadzone od 2003 roku prace badawcze wykazują, że największy proces niszczenia brzegów zbiornika dotyczy jego północnych nieubezpieczonych brzegów stanowiących część Pienińskiego Parku Narodowego. Natomiast procesy załadowania zbiornika zachodzą w rejonie cofki u ujścia rzeki Dunajec, przy czym badania te rozpoczęte zostały stosunkowo niedawno (2008 r.) i dlatego zamieszczone w niniejszym artykule wnioski należy traktować jako wstępne.

Procesy abrazji brzegów są wypadkową oddziaływania szeregu czynników, zarówno natury geologiczno-inżynierskiej jak i hydrodynamicznej, stąd ocena ich wpływu na szybkość postępu i wielkość abrazji jest trudna do teoretycznego uwzględnienia ich w prognozowaniu tego zjawiska.

Odnosnie wpływu czynników geologiczno-inżynierskich, takich jak parametry geotechniczne gruntów oraz nachylenie zboczy na procesy abrazyjne, stwierdzono, że:

- Grunty tworzące skarpy nadbrzeżne zbiornika stanowią materiały zwietrzelinowe podłoża skalnego, które sklasyfikowano jako rumosze gliniaste, żwiry gliniaste i pospółki gliniaste, charakteryzujące się zmienną zawartością frakcji grubych i drobnych w poszczególnych przekrojach badawczych, skąd biorą się różnicowania w podatności na abrazję. Generalnie posiadają niską wodoprzepuszczalność i zawartość części organicznych w granicach 3–5%.

- Procesy abrazji powodują zmiany kształtu brzegu, przejawiające się w postaci wytworzenia klifu abrazyjnego, u podnóża którego formuje się taras abrazyjny (plaża).

- Wysokość klifu i szybkość jego cofania się w głąb brzegu zależy od nachylenia skarpy pierwotnej i wraz ze wzrostem jej nachylenia wysokość klifu rośnie, a szybkość jego cofania maleje. Nachylenia zboczy pierwotnych na badanych odcinkach są zróżnicowane i zawierają się w przedziale 13–36°.

- Nachylenie tarasu abrazyjnego (plaży) zależy od nachylenia i uziarnienia materiału budującego zbocze pierwotne. Większe nachylenie zbocza oraz większa procentowa zawartość frakcji kamienistej i żwirowej w materiale go budującym wpływa w efekcie na formowanie bardziej stromej plaży abrazyjnej.

Odnosnie wpływu czynników hydrodynamicznych, takich jak wysokość fali wiatrowej i kąt jej nabiegu oraz zmiany poziomu wody na procesy abrazji stwierdzono, że mają one, w połączeniu ze składem uziarnienia gruntów obrzeża, podstawowy wpływ na intensywność przebiegu procesów abrazji. Falowanie i zmiany poziomu wody powodują bowiem wymywanie drobnych cząstek gruntu i odprowadzanie ich do zbiornika:

- Stopień podatności na wymywanie zależy od wielkości średnicy krytycznej ziaren i cząstek gruntu, która rośnie wraz z prędkością wiatru i tym samym wielkością fali. Im większa prędkość wiatru, tym większa średnica krytyczna i tym samym większa część masy gruntu jest podatna na wymywanie.

- Przy wyższych średnich poziomach wody w zbiorniku intensywność abrazji jest większa.

- Działanie hydrodynamiczne falowania zwiększa się wraz ze wzrostem kąta nabiegu i będzie największe przy prostym jej nabiegu w stosunku do linii brzegu, niemniej jednak można z otrzymanych zależności wnioskować, że już przy kącie nabiegu około 45° efekt oddziaływania fali na intensywność procesu abrazji jest znaczący.

- Ilości materiału wyerodowanego zależą nie tylko od czynników wyżej podanych, ale również silnie zależą od nachylenia zbocza pierwotnego, gdyż przy nachyleniach 16–21° średnioroczna kubatura gruntu zmytego do jeziora wynosi 0,84 m<sup>3</sup>/mb brzegu, a przy nachyleniach rzędu 31–36° jest znacznie większa i wynosi 2,1 m<sup>3</sup>/mb brzegu.

Odnosnie procesu zaladowania rejonu cofki stwierdzono, że:

– W efekcie dostarczania przez Dunajec rumowiska unoszonego i wlezonego, w ciągu 13 lat eksploatacji u wlotu rzeki do zbiornika, utworzył się charakterystyczny cypel o długości ponad 200 m przy normalnym poziomie piętrzenia i szerokości około 20–30 m.

– Osady tworzące cypel posiadają aktualnie grubości od 0,15 m do ponad 1 m i utworzone są z gruntów drobnoziarnistych, sklasyfikowanych jako piaski gliniaste, pyły piaszczyste, gliny piaszczyste i gliny pylaste.

Reasumując można stwierdzić, że badania prowadzone dotychczas winny być kontynuowane z zastosowaniem podanej metodyki badawczej dla uzyskania możliwie dokładnego obrazu postępów abrazji i zaladowania, co umożliwi prawidłowe prognozowanie tych procesów. Obserwacje strefy brzegowej w najbardziej stromych odcinkach badanego brzegu wykazały niewielkie szczeliny mogące świadczyć o procesach osuwiskowych. Obserwacje zboczy naturalnych w najbardziej stromych odcinkach brzegu (ponad przekrojami W1-1 i W2-2) wykazały niewielkie szczeliny o układzie poziomym, mogące świadczyć o uruchomieniu procesów osuwiskowych, ale jak dotąd nie stwierdzono tam ruchów masowych mogących zmienić kształt linii brzegowej.

## PIŚMIENICTWO

- Dąbkowski L., Skibiński J., Żbikowski A. 1982. Hydrauliczne podstawy projektów wodnomelioracyjnych. — Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa.
- Heliasz Z., 2000. Dynamiczna ocena geologicznych zagrożeń wywołanych powodzią – na przykładzie Nisy Kłodzkiej, Górnej Soły i Górnego Sanu-Solinki. [W:] Dynamiczna ocena i prognoza geologicznych zagrożeń wywołanych powodzią – na przykładzie Nisy Kłodzkiej, Górnej Soły i Górnego Sanu-Solinki. — Wydawnictwo Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, ss. 169–190.
- Ilcewicz-Stefaniuk D., Stefaniuk M., 2007. Procesy osuwiskowe w dolinie Wisły. — *Geologos*, **11**: 393–399.
- Kozielska-Sroka E., Chęć M., 2009. Właściwości osadów dennych Jeziora Czorsztyńskiego w aspekcie ich wykorzystania w budownictwie ziemnym. — *Górnictwo i Geoinżynieria*, **33**(1): 369–376.
- Krzyszowski M., Gądek W. 2007. Ocena stopnia zamulania zbiornika czorsztyńskiego. — *Gospodarka Wodna*, **8**: 359–361.
- Książkiewicz M., Samsonowicz J., Rühle E. 1965. *Zarys geologii Polski*. — Wydawnictwa Geologiczne, Warszawa.
- Laniewski J. 1997. Czorsztyń. — *Gospodarka Wodna*, **12**: 384–390.
- Plewa M. 1999. *Geologia inżynierska w inżynierii środowiska*. — Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- PN-86/B-02480. *Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów*. — Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa.
- PN-88/B-04481. *Grunty budowlane. Badania próbek gruntu*. Polski Komitet Normalizacji, Miar i Jakości, Warszawa.
- Sobczak J. 1975. *Zapory z materiałów miejscowych*. — Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa, 385 s.
- Wacławski M. 1986. Niektóre zagadnienia abrazji brzegów karpaccich zbiorników wodnych. — *Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. Budownictwo Wodne i Inżynieria Sanitarna*, **37**: 1–105.
- Witkowski Z. 2007. 10 lat rozwoju ZEW Niedzica SA z perspektywy przyrodnika: czy perspektywa czasu pozwala mówić o rozwoju zrównoważonym? — *Gospodarka Wodna*, **8**: 344–347.
- Ziętara T., 2005. Wpływ abrazji na etapy rozwoju osuwisk w strefie brzegowej zbiornika w Dobczycach. [W:] *Materiały Sympozjum Hydrotechnika*. — Śląska Rada Naczelnej Organizacji Technicznej FSNT w Katowicach, ss. 333–340.
- Zydroń T., Kozielska-Sroka E., Michalski P., Dryś D., Kruk E., Płonka M. 2010. Badania postępu procesu abrazji brzegów zbiornika Czorsztyń-Niedzica. — *Górnictwo i Geoinżynieria*, **34**(2): 663–672.

## SUMMARY

The subjects of the research undertaken on the north bank of the reservoir, within the Pieniny National Park, were both the abrasion processes resulting in transformation of reservoir banks as well as accumulation of sediments transported by the Dunajec river in the back-water area.

The research concerning the first topic has been conducted since 2003, whereas the study of the accumulation of bottom sediments in the reservoir started in 2008.

Abrasion is one of the main factors causing transformation of water reservoir bank. This process is a form of water erosion and consist in rubbing off the outer part of the subsoil by the loose material dislocated with water currents and

waves. The most frequent type of transformed bank in the analysed section of the Czorsztyn Reservoir is defined as the abrasion-sedimentation one (Fig. 1).

The transformed reservoir bank of accumulation-abrasion type is most often observed in the analysed part of the Czorsztyn Reservoir. Since 2003, detailed land surveys on selected and fixed profiles have been conducted every year in order to determine a precise bank profile (Fig. 8–9, Phot. 1–3). The profiles showed the inclination of the abrasion terrace, the height and magnitude of retreat at the edge of the abrasion cliff. At the same time, on the basis of laboratory tests, geotechnical parameters of soils forming abrasion slopes as well as those washed away to the reservoir as a result of the abrasion process were determined (Tab. I, Fig. 4–7). The results of the field observations show, that the most frequently observed type of the transformed bank at the analysed section of the Czorsztyn Reservoir is the abrasion-sedimentation type (Fig. 1).

The analysis of data obtained from land surveys shows distinct relationship between the height of the abrasion cliff and the inclination of the original slope, like in the case of the magnitude of retreat of the cliff edge (Fig. 10–11). The results of investigation show, that the inclination of the abrasion terrace (beach) clearly depends also on the original slope inclination. (Fig. 12). Moreover, the above relationship overlaps with the coarse fractions content (Fig. 13), i.e. the inclination of the abrasion terrace increases with the growth of the amount of fractions coarser than  $\phi 2.0$  mm. The significant factor influencing the progress of the abrasion process is the influence of water on the adjacent bank. This influence is manifested by waving, which causes bank soils score. The Figure 14 presents the relationship between the values of critical diameters and the wind velocity.

The value of the critical diameter increases linearly with wind velocity which means, that the majority of the soil material will be susceptible to erosion. The analysis of the influence of the angle of the wind-wave run direction on the volume of the eroded material (Fig. 15) shows that the bigger the angle of the run direction is, the more the magnitude of the abrasion increases. It can be predicted, that the maximally destructive influence of waving on the bank will take place at the perpendicular wind-wave run direction.

In addition, the range of waving influence is linked with changes in water lift level in the reservoir (Fig. 16).—In the observation period 2004–2005, the magnitude of abrasion increased with the increase of the average lifting level. The volume of the material eroded in annual intervals could be calculated on the basis of the yearly land surveys of the abrasion slopes (Tab. II–III).

The results of the calculations show the distinct relationship between the angle of the natural slope and the volume of the material eroded in abrasion processes. The average annual volume of the eroded material was  $0.84 \text{ m}^3$  per a running metre of the bank on the section with the slope inclination ranged  $16\text{--}21^\circ$ . On the section where the slope inclination is much bigger ( $31\text{--}36^\circ$ ) – Wapiennik hill, the average annual volume of the eroded material is also much bigger and equals  $2.1 \text{ m}^3$  per a running metre of the bank.

The research on the sediments accumulation was started in September 2008 at the mouth of the Dunajec in Dębno, where a typical accumulation cone had been already formed (Fig. 17). The tests comprised determination and fixing the tested cross-sections (Fig. 3), making open pits, taking samples for the laboratory tests, on the basis of which the geotechnical parameters were determined according to the standard PN-88/B-04481 (Tab. IV).