



Jacek Sztubecki<sup>1</sup>



Maria Mrówczyńska<sup>2</sup>

### OBSERWACJE DEFORMACJI ZABYTKOWEJ BUDOWLI HYDROTECHNICZNEJ – INTEGRACJA METOD I OPRACOWAŃ



Ireneusz Wyczałek<sup>1</sup>



Małgorzata Sztubecka<sup>1</sup>

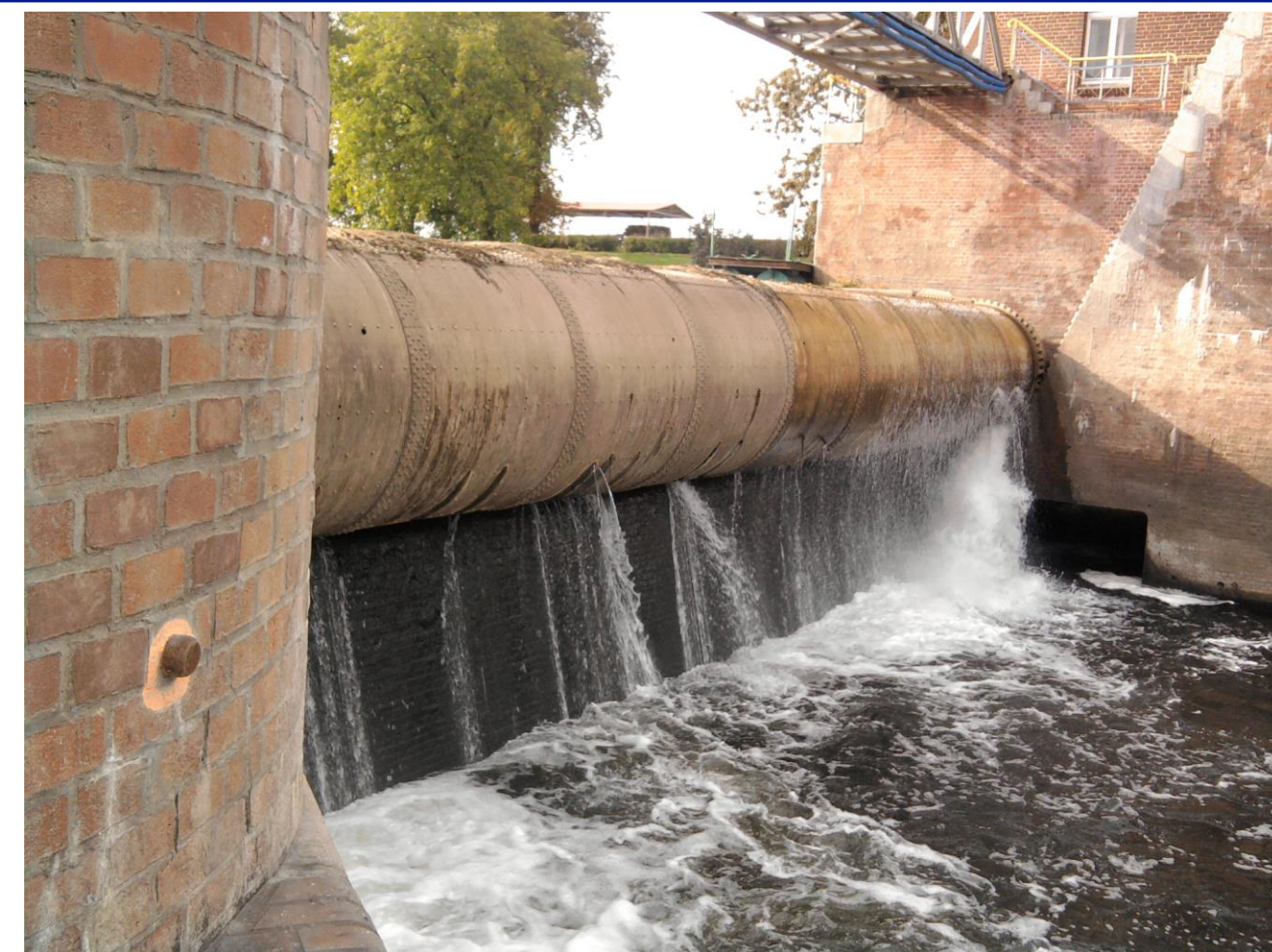
<sup>1</sup> Politechnika Bydgoska; Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, jaceksz@pbs.edu.pl; Ireneusz.Wyczałek@pbs.edu.pl; sztubecka@pbs.edu.pl  
<sup>2</sup> Uniwersytet Zielonogórski; Instytut Budownictwa, M.Mrowczyńska@ib.uz.zgora.pl

#### WPROWADZENIE

Oszacowanie zmian zachodzących w obiektach zabytkowych wymaga odpowiednich metod pomiarowych i metod przetwarzania wyników danych eksperymentalnych. Obiekty hydrotechniczne poprzez ich kontakt z powierzchnią wody, w zależności od zastosowanego materiału (beton i stal), podlegają czynnikom niszczącym i wpływom podobnym do większości innych konstrukcji budowlanych. Diagnostyka zmian zachodzących we wspomnianych konstrukcjach oparta jest na zastosowaniu odpowiednich technik pomiarowych dostosowanych do obiektu hydrotechnicznego i warunków jego eksploatacji. Można zatem zastosować wybrane metody geodezyjne wyznaczania przemieszczeń i odkształceń – poligonizację, pomiary sieci kąto-liniowych, niwelację, naziemny skaning laserowy, fotogrametrię czy obserwacje kamerą termowizyjną; po metody pomiarów względnych, bazujące na szczelinomierzach, inklinometrach, tensometrach... W pracy skupiono się na odniesieniu wyników pomiarów geometrycznych walca stalowego zabytkowego jazu Czersko Polskie w Bydgoszczy.

#### OBSZAR BADAWCZY

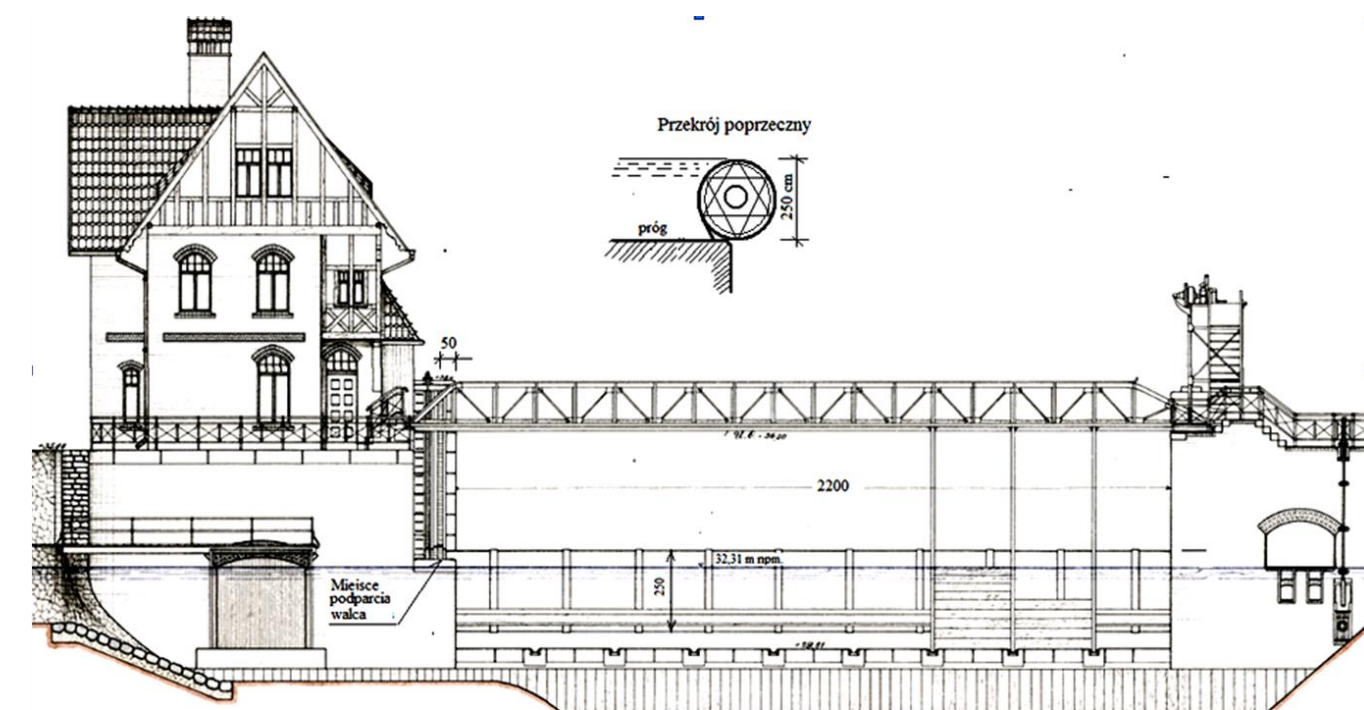
Jaz walcowy Czersko Polskie jest budowlą piętrzącą wykonaną z elementów stalowych, betonowych oraz murenych opartych na jednym wspólnym fundamencie (rys. 1). Znajduje się w rejonie ujścia Brdy do Wisły w Bydgoszczy. Wybudowano go na początku XX wieku. Zasadniczym elementem stanowiącym zamknięcie jazu jest stalowy walec o długości ponad 23 m i średnicy 2,5 m. Walec jest oparty na skrajnych przyczółkach jazu. Badania obejmują stalowy walec będący (rys. 2).



Rys. 2. Widok stalowego walca, głównego elementu jazu Czersko Polskie w Bydgoszczy

W trakcie badań konstrukcji walca wykonano:

- przegląd konstrukcji walca w tym wejście do wnętrza i ocena stopnia korozji elementów wewnętrznych,
- pomiary geodezyjne osiowości i skrócenia walca,
- pomiar stopnia grubości płaszcz walca.



Rys. 1. Przekrój podłużny jazu Czersko Polskie w Bydgoszczy

#### DANE I METODY

##### DANE

Pomiaramy obrotowy walec. Jest on wykonany z 22 blach o grubości 14 mm połączonych nitami. Na obu końcach walca umieszczono obwodowe zębaki służące do podnoszenia walca przy pomocy mechanizmu łańcuchowego. W początkowej fazie obserwacji geometrii walca wykonano pomiary grubości blachy poszycia na powierzchni, która nie ma kontaktu z wodą, na powierzchni kontaktu z wodą oraz w obrębie dna walca przy zamkniętym jazu. Zmierzone także grubość dna przy zamkniętym jazu. Jednak było to możliwe jedynie w paśmie przypołożym.

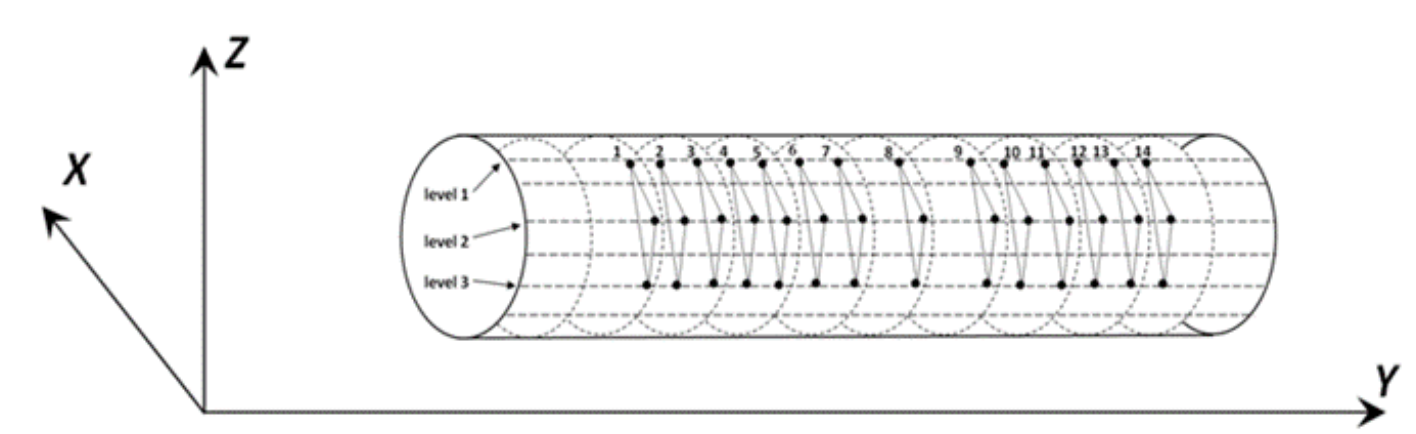
Ze względu na utrudnioną dostępność do powłoki walca, tylko od strony wody dolnej, w trakcie pomiaru geodezyjnego obserwowano wybrane punkty w postaci nitów położonych w trzech rzędach (rys. 3).



Rys. 3. Poziomy nit na powłoce walca

##### METODY

Grubość powłoki otrzymano wykonując pomiar aparatem ultradźwiękowym. Pomiary punktów kontrolowanych wykonano metodą przestrzennego kąto-łukowego wycięcia w przód. Do realizacji pomiaru wykorzystano tachimetr elektroniczny. Ze względu na utrudnioną dostępność do powłoki walca, tylko od strony wody dolnej, w trakcie pomiaru geodezyjnego obserwowano wybrane punkty w postaci nitów położonych w trzech rzędach (rys. 3).



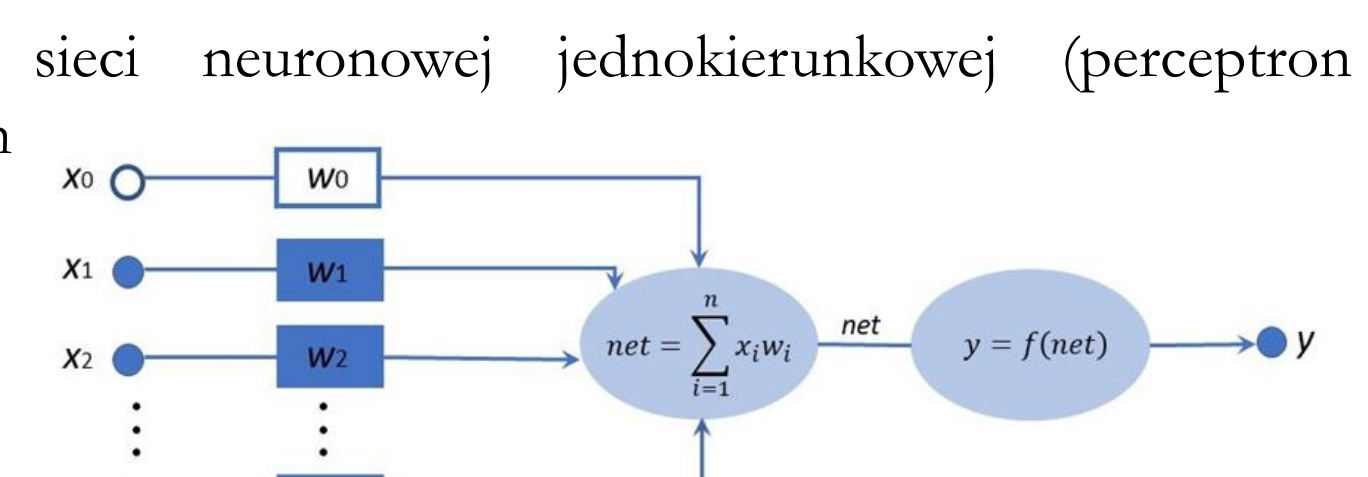
Rys. 4. Widok walca z zaznaczonymi trójkątami punktów

splywu wody po konstrukcji. Udało się również określić odkształcenie powierzchni walca wzdłuż linii nitów dla poziomów 1, 2, 3.

Do predykcji przemieszczeń wykorzystano model sieci neuronowej jednokierunkowej (perceptron wielowarstwowy), która składała się z neuronów opisanych sigmoidalną funkcją aktywacji (rys. 5).

Zaproponowane podejście pozwala na odwzorowanie zależności przyczynowo-skutkowych pomiędzy danymi wejściowymi  $x_i$ , a zbiorem wyjściowym  $y_j$ .

Rys. 5. Model sieci neuronowej jednokierunkowej



#### REZULTATY

##### UPROSZCZONE SPRAWDZENIE WYMAGANEJ ŚREDNICY WALCA

Bazując na wykonanych pomiarach można w uproszczeniu ocenić czy obecna średnica walca D, jest wystarczająca do przejścia działających obciążeń.

Przyjęto:

$l_0 = 23 \text{ m}$  – rozpiętość walca między podporami,

$h = 2,5 \text{ m}$  – wysokość piętrzenia wody,

$g = 12 \text{ mm}$  – grubość płaszcz,

$k = 150 \text{ MPa}$  – dopuszczalne naprężenie dla stali,

$\gamma = 10 \text{ kNm}^3$  – ciężar objętościowy wody

$$D > 0,3 \cdot h \cdot l_0 \cdot (\gamma/g/k)0,5 = 0,3 \cdot 2,5 \cdot 23 \cdot (10/0,012/150000)/2 = 129 \text{ cm} \ll 250 \text{ cm}.$$

Przy obecnej grubości płaszcz średnica walca jest znacznie większa od wymaganej ze względów wytrzymałościowych.

##### OCENA STANU KONSTRUKCJI WALCA

Stan walca ocenia się, jako dobry. Występują liczne punktowe oraz bardziej rozległe ogniska korozji wewnątrz walca zarówno na jego poszyciu jak i elementach przepon. Jednak skorodowane powierzchnie w stosunku do całości konstrukcji są niewielkie. Na zdecydowanych powierzchniach wewnętrznych oraz na dostępnej powierzchni zewnętrznej stan powłok zabezpieczających jest bardzo dobry. Wywołane korozją osłabienia elementów konstrukcji nie mają obecnie wpływu na jej nośność. Obniżają jednak trwałość konstrukcji i będą ulegać postępującemu powiększaniu. Nie zauważono tak znacznych ubytków korozyjnych, aby konieczna była wymiana elementów przepon jak i stężeń podłużnych walca oraz płaszcz.

##### OPRACOWANIE POMIARÓW GEODEZYJNYCH

Badania przemieszczeń walca wykonano wykorzystując metody biegunową i wycięcia kąto-łukowego w przód. Przeprowadzono trzy serie pomiarów w odstępach dwuletnich.

Z przeprowadzonych obliczeń, dla trzech pomiarów kontrolnych, uzyskano:

- przebieg osi walca,
- kąty skrócenia walca,
- deformację powierzchni walca.

Istotnym z punktu widzenia analiz przedstawionych w artykule parametrem jest współrzędna Z przebiegu osi walca. Zmianę tej współrzędnej dla trzech serii pomiarowych przedstawiono w tabeli 1. Wyznaczone z zastosowaniem sieci neuronowej przemieszczenia charakteryzowały się pierwiastkiem błędu średniokwadratowego wynoszącym  $RMSE = \pm 0,6 \text{ mm}$ , jednocześnie różnica pomiędzy wyznaczonym a pomierzonymi przemieszczeniami dla żadnego punktu nie przekroczyła 1 mm. Na rysunku 6 przedstawiono zmiany położenia osi Z (dla pomiaru 3) na tle zmian współrzędnej X w stosunku do położenia punktów kontrolowanych na płaszcz walca.

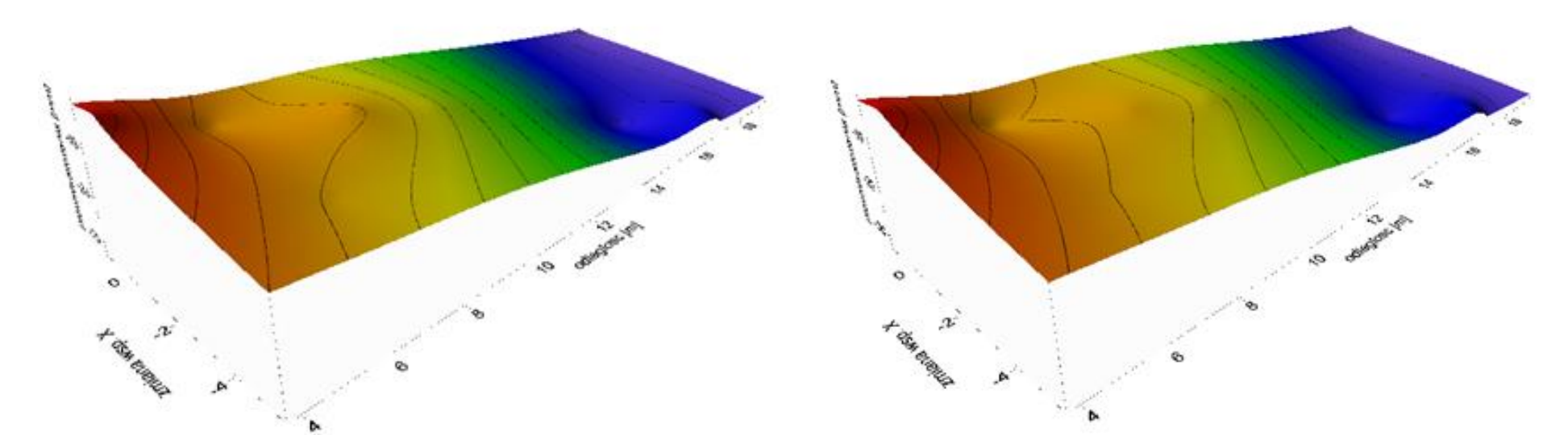
Tab. 1. Zmiana współrzędnej pionowej Z osi walca

Nr trójkąta	$\Delta Z$ [mm]		
	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
1	0,0	0,0	0,0
2	0,7	1,3	-2,8
3	-5,5	-5,7	-9,2
4	-7,4	-7,2	-10,5
5	-8,2	-7,2	-11,0
6	-7,2	-6,8	-9,5
7	-11,3	-10,5	-13,3
8	-17,3	-15,2	-18,5
9	-23,2	-20,5	-25,0
10	-26,0	-23,0	-28,3
11	-25,0	-22,7	-26,3
12	-26,6	-25,3	-29,3
13	-29,0	-26,8	-31,5
14	-29,5	-26,8	-32,5

Rys. 6. Zmiana położenia punktów kontrolowanych:

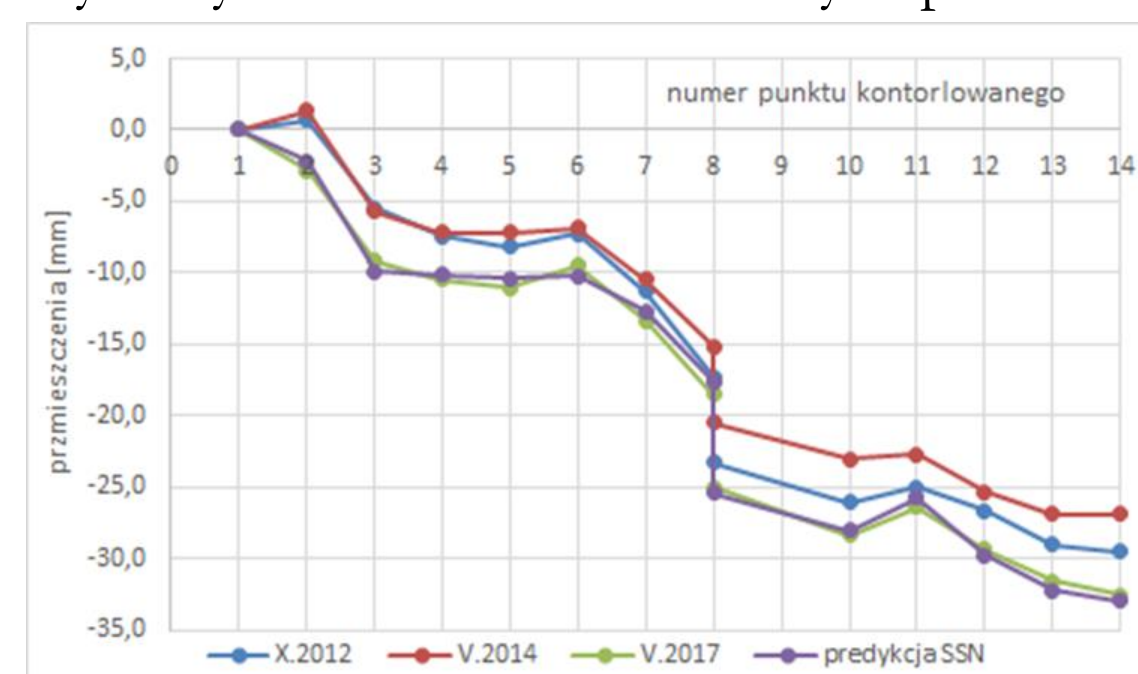
a) pomiar,

b) predykcja z zastosowaniem SSN



Również, jako metodę uczenia sieci neuronowej, wykorzystano metodę propagacji wstecznej błędów bazującą na opisanym wcześniej algorytmie największego spadku z metodą momentu.

Porównanie wyników przemieszczeń dla pomiaru 1 i 2 oraz dla pomiaru nr 3 z wynikami uzyskanymi z wykorzystaniem sieci neuronowych przedstawiono na rys. 7.



Rys. 7. Wykres przemieszczeń punktów kontrolowanych

Rezultaty pomiarów geodezyjnych:

1. Skrócenie konstrukcji

Zaobserwowano skręt konstrukcji walcowej o kierunku odwrotnym do kierunku splywu po niej wody, sumaryczny skręt wyniósł odpowiednio:  $(-0,73^\circ)$  czyli  $(-0,66^\circ)$  co odpowiada przesunięciu o 14 mm po obwodzie walca jazu,

– dla trójkątów znajdujących się w przekrojach na początku elementów walcowych,  $(-0,42^\circ)$  czyli  $(-0,38^\circ)$  co daje 8 mm po obwodzie walca jazu,

– dla trójkątów znajdujących się w przekrojach na końcu elementów walcowych.

Średnia wartość skrótu konstrukcji wynosi  $(-0,57^\circ)$ , czyli  $(-0,51^\circ)$  co daje 11 mm po obwodzie walca jazu.

2. Przebieg osi geometrycznej konstrukcji:

a) zauważa się równomierny spadek konstrukcji walcowej w kierunku północno-zachodnim (w kierunku budynku obsługi jazu), różnica rzędnej pomiędzy skrajnymi pomierzonymi punktami osi geometrycznej wynosi 29,5 mm,

b) zauważa się odchylenie osi geometrycznej konstrukcji walcowej od prostej przechodzącej przez jej punkty początkowy i końcowy w kierunku wody dolnej, maksymalne odchylenie wynosi 6,6 mm,

c) zauważa się odchylenie punktów osi geometrycznej w płaszczyźnie pionowej od prostej łączącej punkty początkowy i końcowy osi, maksymalne zaobserwowane odchylenie wynosi 4,8 mm.

#### WNIOSKI

Zaprezentowano metody pomiarowo-analityczne wykorzystane w badaniach zmian przestrzennych obiektu hydrotechnicznego. Zbudowano również model czynników wpływających na zachowanie się stali. Mimo, że konstrukcja jazu nie pozwalała na swobodny dostęp do całej powierzchni walca, to wybór punktów kontrolowanych i metoda pomiaru pozwoliły na odzwierciedlenie zmian jego położenia przestrzennego. W trakcie pomiarów i obliczeń skorzystano z charakterystycznego sposobu połączenia jego elementów konstrukcyjnych, co okazało się przydatne w procesie wyznaczania jego geometrii. W przeprowadzonych badaniach zastosowano również model sieci neuronowej jednokierunkowej wykorzystany w celu określenia predykcji przemieszczeń osi konstrukcji walca. Uzyskane tą metodą przemieszczenia osi walca porównano z pomierzonymi. Zastosowana metoda wykorzystująca sieci neuronowe pozwoliła na wyznaczenie przemieszczeń osi walca charakteryzujących się pierwiastkiem błędów średniokwadratowego wynoszącym  $RMSE = \pm 0,6 \text{ mm}$ . Różnica pomiędzy wyznaczonymi a pomierzonymi przemieszczeniami nie przekroczyła 1 mm.

Sztuczne sieci neuronowe potwierdziły swoją przydatność do predykcji przemieszczeń obiektów budowlanych, w szczególności obiektów hydrotechnicznych. Mogą one stanowić metodę uzupełniającą dla pomiarów klasycznych, dającą możliwość na dodatkowe analizy zmian przestrzennych tego typu konstrukcji. Dalsze obserwacje i badania będą obejmować modelowanie rozmyte wpływu czynników zewnętrznych na konstrukcję walca, co pozwoli na poszerzenie obserwacji zmian konstrukcji i jest pomocne w przewidywaniu zmian zachodzących w obiekcie. Planuje się także poszerzyć monitoring jazu o pomiar jego geometrii za pomocą skanera.