

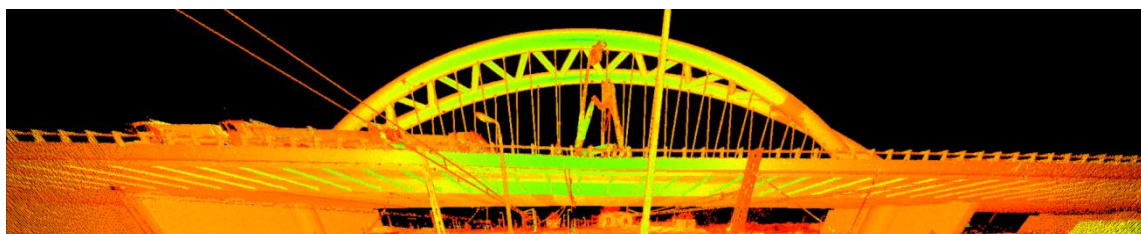
JANOWSKI Artur<sup>1</sup>  
NAGRODZKA-GODYCKA Krystyna<sup>2</sup>  
SZULWIC Jakub<sup>2</sup>  
ZIÓŁKOWSKI Patryk<sup>2</sup>

## Teledetekcyjne badanie konstrukcyjnych elementów żelbetowych z użyciem naziemnego skaningu laserowego

### WSTĘP

Skaning laserowy z użyciem naziemnych skanerów laserowych to współczesne narzędzie pracy wykorzystywane w geodezji, używane w pozyskiwaniu zobrażeń przestrzeni w układzie współrzędnych XYZ. Charakterystyki urządzeń skanujących wskazują, że możliwe do osiągnięcia dokładności oscylują w granicach 2-5 mm błędu. Wielkości te swoiście ograniczają zastosowania skaningu laserowego. Jednak w ramach realizowanych badań z wykorzystaniem standardowego skanera Leica C10 oraz oprogramowania Cyclone i MeshLab, wykazano, że możliwe jest nie tylko skuteczne, ale i ekonomicznie uzasadnione używanie skaningu laserowego w badaniach konstrukcyjnych elementów żelbetowych.

Aktualnie skaning laserowy dołączył do technologii wykorzystywanych w geodezji inżynierskiej. W ramach budownictwa znajduje on zastosowanie w ocenie stanu budowli i pomiarze ugięć elementów konstrukcyjnych m.in. w halach i na przeprawach (mostów, wiaduktów). Autorzy uczestniczyli w badaniach związanych z próbami obciążeniowymi mostu w Gdańsku, przy stadionie PGE Arena, zwizualizowanym na rysunku 1. Jedną z technologii rejestrujących był skaning laserowy wykonany identycznym skanerem jak urządzenie wykorzystane w opisywanym niżej eksperymencie. Analizowane rozwiązania mają pokazać przydatność skaningu laserowego w precyzyjnych analizach geometrii i wytyczenia elementów/obiektów, nawet tak dużych obiektów jak mosty.



Rys. 1. Widok skanu wykorzystanego do rejestracji ugięć przęsła mostu w Gdańsku

W ramach przeprowadzonych doświadczeń w ramach własnych prac badawczych przeanalizowano mechanizmy niszczenia elementów żelbetowych oraz możliwości, jakie niesie za sobą technologia naziemnego skaningu laserowego przy ocenie deformacji i określaniu mechaniki zniszczenia konstrukcji [1-5]. Opisano możliwości i ograniczenia technik laserowych, a także określono przy spełnieniu jakich warunków mogą być stosowane w analizie elementów żelbetowych. Przedstawiono praktyczne metody i procedury, które posłużyć mogą do określania mechaniki zniszczenia belek i pomiaru deformacji. W artykule wskazano niektóre wyniki analiz i wskazano narzędzia, których użycie może być korzystne przy wykonywaniu pomiarów i ocen związanych z wytrzymałością i bezpieczeństwem konstrukcji z betonu. Jako elementy modelowe wybrane zostały belki żelbetowe przygotowane w różnych układach zbrojenia. Prace pomiarowe i rejestrację wykonano w Regionalnym Laboratorium Budownictwa przy Katedrze Konstrukcji Betonowych Wydziału Inżynierii Lądowej i Środowiska Politechniki Gdańskiej. Mechanizmy zniszczenia wymuszono poprzez zginanie i ścinanie. Dane uzyskane podczas badania posłużyły do stworzenia wirtualnego

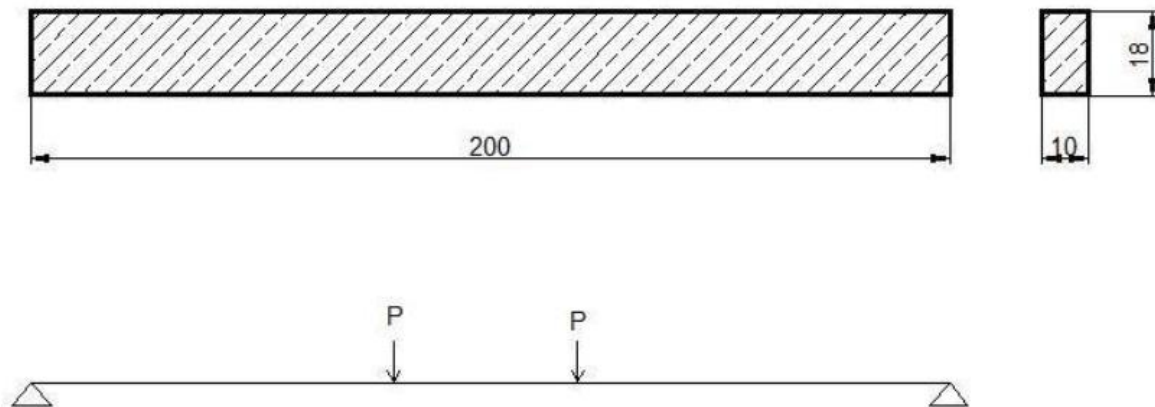
<sup>1</sup> Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, ul. Oczapowskiego 19c/11, 10-719 Olsztyn

<sup>2</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

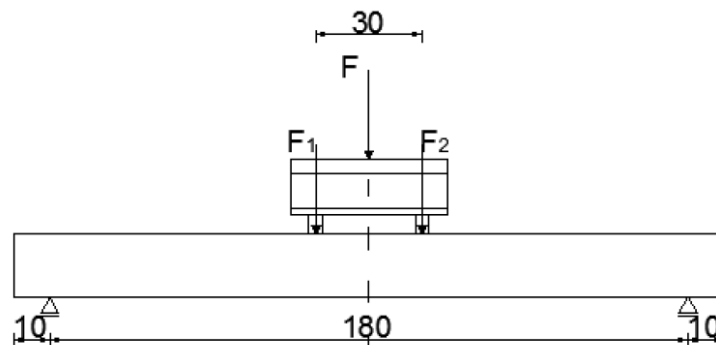
modelu belki żelbetowej, a następnie określenia jej deformacji w czasie. Na podstawie przeprowadzonych analiz rozszerzono potencjalne płaszczyzny zastosowania skaningu naziemnego przy pomiarach elementów żelbetowych.

## 1 GEOMETRIA I ZBROJENIE BADANYCH BELEK

Przygotowano trzy belki żelbetowe – B1, B2, B3 – o odmiennym stopniu zbrojenia, tj. takim, ażeby wymusić zaistnienie, z góry określonego, różnego dla każdej belki mechanizmu zniszczenia [6]. Założono, że dwie belki – B1, B2 – mają zostać zniszczone poprzez wyczerpanie nośności na zginanie, kolejno ze względu na beton i ze względu na stal. Trzecia belka – B3 – powinna ulec zniszczeniu poprzez wyczerpanie nośności na ścinanie. Chcąc uzyskać założone rezultaty dla belek B1 i B2 posłużono się zmiennym stopniem zbrojenia w strefie zginanej. Z kolei w belce B3 zastosowano silne zbrojenie w strefie zginanej, natomiast niewystarczającą ilość strzemion, aby wymusić mechanizm zniszczenia poprzez ścinanie. Do przygotowania belek użyto betonu klasy C25/30 i stali zbrojeniowej klasy A-IIIIN. Schematyczny wygląd belki przedstawiono na rysunku 2, a sposób przyłożenia obciążeń na rysunkach 3 i 4.



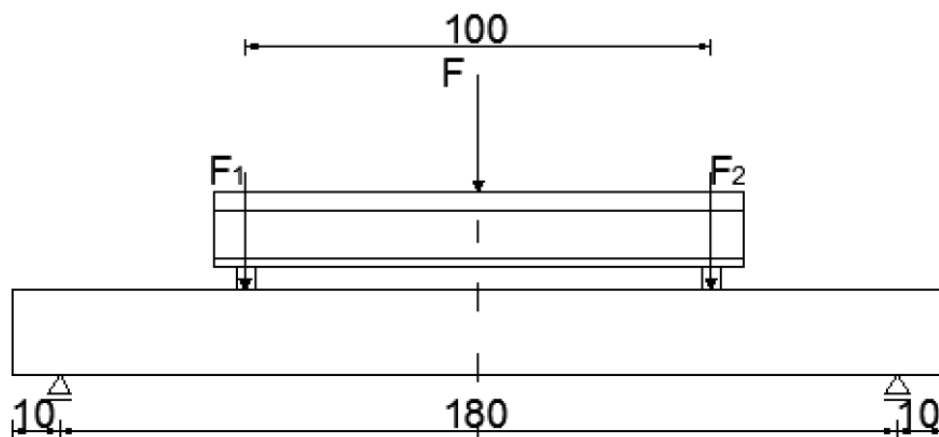
Rys. 2. Schemat przekroju podłużnego i poprzecznego belki (rysunek górny) oraz schemat statyczny belki (rysunek dolny)



Rys. 3. Rysunek koncepcyjny z nałożonym schematem statycznym belki B1 i B2

Po zabetonowaniu belka pozostawała w spoczynku, aż do osiągnięcia pełnej wytrzymałości. Przed zabetonowaniem do szkieletu zbrojenia każdej z belek przymocowano szereg tensometrów elektrooporowych. Tensometry połączono przewodami, które następnie wyprowadzono w taki sposób, ażeby po zabetonowaniu uzyskać do nich pełen dostęp. Przewody te w późniejszym etapie zostały przylutowane do płytek drukowanych, a te z kolei połączą układ z komputerem posiadającym oprogramowanie dedykowane do pomiarów odkształceń stali. Rozwiązanie to pozwoliło dodatkowo weryfikować uzyskiwane wyniki z pomiarów teledetekcyjnych (skaningu i fotogrametrii).





Rys. 4. Rysunek koncepcyjny z nałożonym schematem statycznym belki B3

Tab.1. Przyrost siły w przebiegu badania dla belek B1, B2 i B3.

Symbol	Etap 1 [kN]	Etap 2 [kN]	Etap 3 [kN]	Etap 4 [kN]	Etap 5 [kN]	Etap 6 [kN]	Etap 7 [kN]	Etap 8 [kN]
Belka B1	0	10	30	40	<u>50</u>	70	90	<b>100</b>
Belka B2	0	10	<u>20</u>	30	37	<b>38</b>		
Belka B3	0	10	30	<u>50</u>	70	90	<b>140,7</b>	

Legenda: (**140,7** – siła niszcząca/50 – siła rysująca).

## 2 METODY ANALIZY SKANÓW

W analizach wykorzystano standardowy program dedykowany przez producenta do obróbki danych ze skanera LeicaScanStation C-10 tj. oprogramowanie Cyclone oraz program MeshLab, który należy do oprogramowania typu *open-source*, z zastrzeżeniem zasad General Public License (GPL).

Wskazano narzędzia przydatne w ocenie i weryfikacji stanu elementów żelbetowych, także w analizach rzeczywistych konstrukcji terenowych lub prefabrykatów w miejscu ich użytkowania lub tworzenia.

### 2.1 Metoda translacji sfer

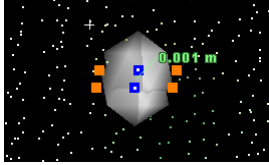
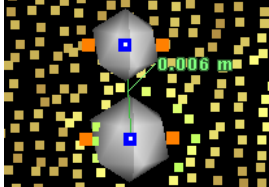
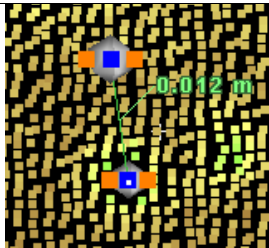
Metoda ta polega na zamianie wirtualnego odwzorowania fizycznych znaczników w postaci graficznych obiektów sferycznych. W dużym uproszczeniu sprowadza się do zaznaczeniu punktu charakterystycznego, w naszym przypadku krążka o średnicy 6 mm umieszczonego na powierzchni belki (lub innego elementu poddanego analizie). Po dokonaniu rejestracji (w wyniku skanowania i fotorejestracji) następuje jego odwzorowanie dla kolejnych etapów obciążenia belki w stałym (wspólnym dla kolejnych etapów obciążeń) układzie współrzędnych, w postaci siatki wielokątowej (zbudowanej z prymitywów) aproksymującej sferę. Następnie następuje przeniesienie tej siatki (sfery) do tożsamego układu współrzędnych z kolejnych pomiarów. Zanim jednak sfera zostanie przetransformowana do nowego układu, należy pamiętać o tym, aby w układzie po zmianie w analogiczny sposób aproksymować sferę dla przemieszczonego, w wyniku działania sił obciążenia, elementu. Różnica współrzędnych środków sfer przy kolejnych przemieszczeniach jest wektorem identyfikowanym jako translacja sfer. Ważne, że w metodzie tej jako wartości wynikowej nie uzyskujemy jedynie przesunięcia pionowego, w porównaniu do tradycyjnych metod pomiaru, ale także możemy zidentyfikować i zwymiarować delikatne zmiany położenia znacznika w obu

kierunkach poziomych. Metoda zilustrowana została na przykładzie zmian geometrii belki B3 na rysunku 5 i przedstawiona w opracowaniach autorskich [4, 5].



Rys. 5. Sygnalizowane punkty wykorzystane w metodzie translacji sfer. Obraz na skanie pozyskany w ramach eksperymentu

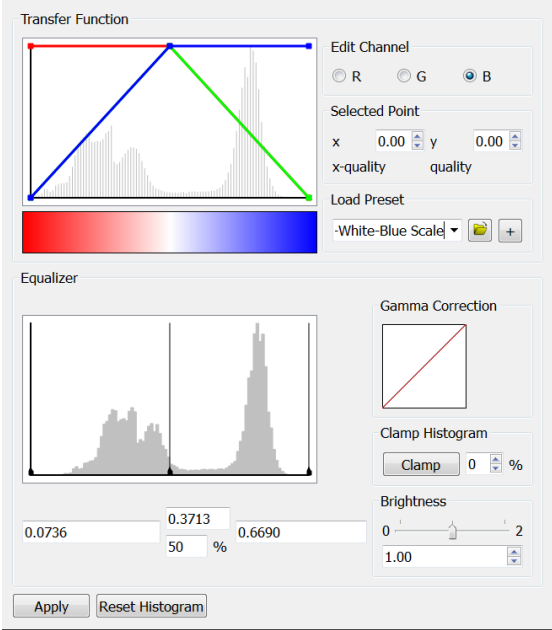
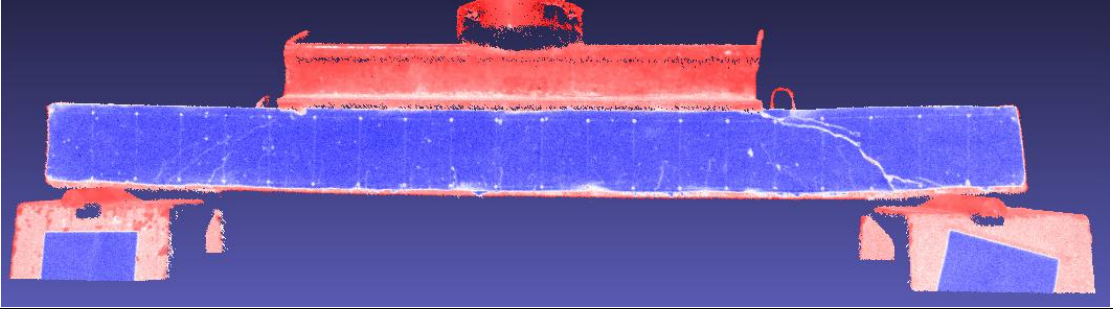
Tab.2. Analiza porównawcza wyników eksperymentalnych z wynikami uzyskanymi ze skaningu laserowego (dla zobrazowania podano tylko wybrane etapy – epoki pomiarowe).

Epoka pomiarowa	Siła [kN]	Ugięcie [mm]	Ugięcie wg pomiarów na modelu [mm]	Różnica wartości ugięcia [mm]	Widok w obszarze ModelSpace
2	30	1,81	1,00	+0,81	
5	90	5,89	6,00	-0,11	
6	140,7	X	12	X	

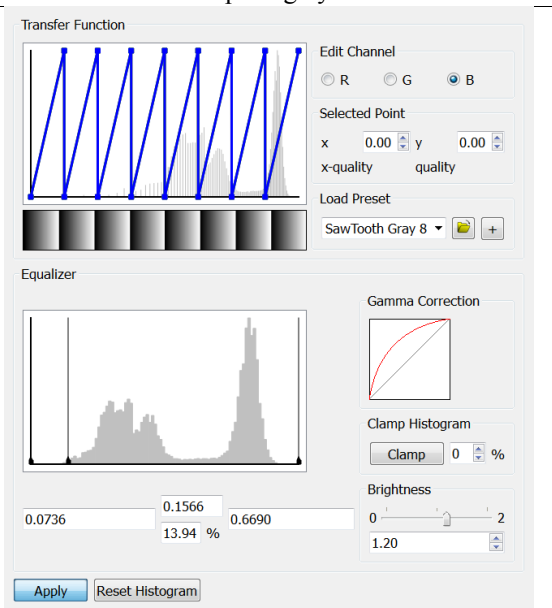
## 2.2 Mapowanie kolorów – ColorMapping

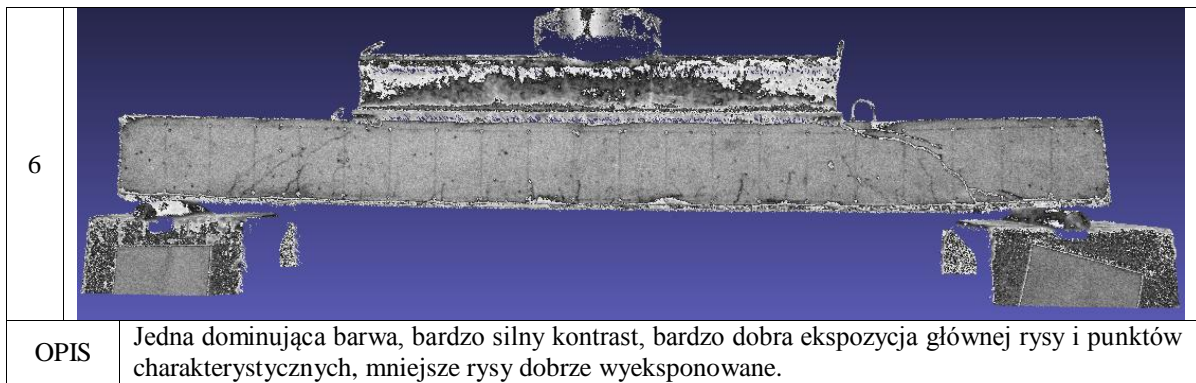
Po wykonaniu wstępnej selekcji zdecydowano się na użycie programu MeshLab, włoskiej firmy Visual Computing Lab. Program jest w pełni darmowy i może być w przyszłości dowolnie modyfikowany, a także rozwijany przez samych użytkowników. Silnik programu oparty jest na bibliotece VCG (ang. *Visualization and Computer Graphics*). Przedstawiono i porównano wybrane reguły narzędzia ColorMapping, które zastosowano w programie MeshLab. Dodatkowo wyselekcjonowano te reguły, które najwierniej oddają faktyczny obraz zniszczenia belki.

Tab.3. Przebieg zniszczenia belki B3 w programie MeshLab – reguła: Red-White-Blue Scale.

Nazwa reguły		Opis reguły	
Red-White-Blue Scale			
Nr pomiaru	Widok		
6			
OPIS	Wąski zakres barw, silny kontrast, bardzo dobra ekspozycja głównej rysy i punktów charakterystycznych, dobra widoczność pomniejszych rys.		

Tab.4. Przebieg zniszczenia belki B3 w programie MeshLab – reguła: SawTooth Gray 8.

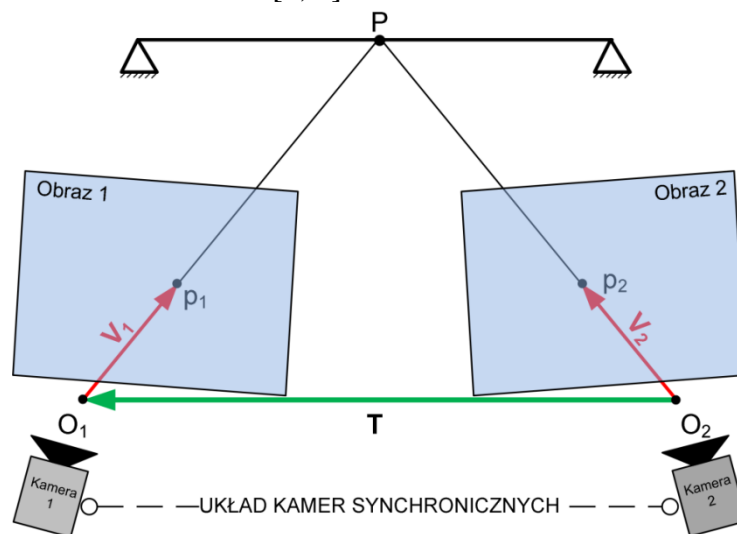
Nazwa reguły		Opis reguły	
SawTooth Gray 8			
Nr pomiaru	Widok		



Analizę wykonano w celu znalezienia optymalnej reguły do określenia rzeczywistego stanu zarysowania. Zestawione dane pochodzą z badania belki B3, która uległa zniszczeniu poprzez ścinanie. Dane zawierające geometrię belki B3 wyeksportowano z programu Leica Cyclone w formacie pliku .PTX, a następnie zaimportowano do programu MeshLab. Poniżej zestawiono parę reguł, które wytypowano w celu możliwie najlepszego wyeksponowania stanu zarysowania.

### 3 WERYFIKACJA WYNIKÓW POMIARÓW

Do oceny wyników pomiarów uzyskanych ze skaningu laserowego wykorzystano sprawdzone metody fotogrametrii cyfrowej. Wykorzystanie fotogrametrii sprowadza się do użycia stereopary zdjęć synchronicznych (wykonanych jednocześnie), na których z dwóch punktów przestrzeni (środków rzutów reprezentowanych przez obiektywy aparatów, czyli punktów  $O_1$  i  $O_2$ ) rejestrowany jest obraz belki poddawanej postępującemu obciążaniu (Rysunek 6). Metodologię i zasady przedstawiono w opracowaniach autorskich [1, 7].



Rys. 6. Schemat synchronicznej rejestracji fotograficznej elementu żelbetowego

### WNIOSKI

Głównym celem pracy było określenie, czy skaningu laserowego umożliwia ocenę deformacji i przewidywanie mechanizmów niszczenia zginanej belki żelbetowej. Tezę, że metoda naziemnego skaningu laserowego umożliwia ocenę deformacji i przewidywanie mechanizmu zniszczenia można uznać za prawdziwą, jednakże przy pewnych założeniach wstępnych. Trzeba zwrócić szczególną uwagę na szczególne warunki i ograniczenia technologii skanowania laserowego w tego typu analizie. Określenie owych warunków pozwoliło nie tylko potwierdzić tę tezę, ale jednocześnie określić strefę potencjalnych zastosowań naziemnego skaningu laserowego w diagnostyce elementów żelbetowych.

Skanowany obiekt jak i skaner muszą znajdować się w jednym układzie współrzędnych, jako, że badane elementy, np. rysy, są elementami mikroskalowymi, niedopuszczalne jest stosowanie



dowiązań na sygnały lokujące. Dowiązania na sygnały lokujące, samo w sobie generuje mikro przesunięcia, które przy pomiarach makroskalowych są nieistotne, natomiast przy określaniu deformacji i przebiegu zarysowania są znaczące. Dlatego też pozycja skanera względem obiektu nie może się zmieniać, przez cały przebieg pomiarów. Przemieszczenie w trakcie badań wypoziomowanego urządzenia, spowoduje konieczność powtórzenia badań. Ze względu na falowy charakter światła, czyli medium, dzięki któremu pozyskujemy dane, musimy zapewnić czyste pole widoczności. Należy usunąć wszystkie przeszkody znajdujące się pomiędzy obiektem, a skanerem. Kolor biały lepiej odbija światło widzialne, a także zapewnia lepszy kontrast pomiędzy powierzchnią boczną belki i powstałą rysą. Dlatego też zaleca się pobiałkowanie skanowanej powierzchni elementu przed rozpoczęciem badań. Dodatkowo na potrzeby analizy geometrii należy oznaczyć graficznie lub umieścić na powierzchni skanowanego obiektu punkty charakterystyczne. Do analizy autorzy użyli metalowe krążki o średnicy 6mm rozmieszczone w równych dziesięcio-centymetrowych odstępach, na bocznej płaszczyźnie belki. Bardzo istotne jest uzyskanie możliwie jak największej gęstości chmury punktów. Gęstość chmury punktów zależy od rozdzielczości skanowania, którą zadajemy podczas konfiguracji skanera przed rozpoczęciem pomiarów.

Po przeprowadzeniu dokładnych analiz na bazie pozyskanego materiału stwierdzono, że zarysowanie, które jednoznacznie wskazywałoby na zaistnienie określonej mechaniki zniszczenia można zauważyć jedynie w stadium przedkrytycznym, czyli tuż przed zniszczeniem. Dlatego też skaning będzie idealnym narzędziem do archiwizacji stanu zarysowania w fazie przedkrytycznej i pokrytycznej, pozwalającym określić dokładny przebieg rys, w tym ich długość i pochylenie. Stosując naziemny skaning laserowy przy tworzeniu dokumentacji po katastrofach i awariach, będziemy w stanie uzyskać, w pełni trójwymiarowe, szczegółowe odwzorowanie konstrukcji. Skaning laserowy jako metoda niezwykle szybka, mogłaby być szczególnie ważna, jeżeli zniszczoną konstrukcję należałoby szybko zdemontować, lub podjąć natychmiastową naprawę awarii. Ciekawej płaszczyzny zastosowań technik laserowych możemy doszukać się w kontroli jakości prefabrykatów. Zarówno prefabrykowanych elementów konstrukcyjnych, jak i prefabrykowanych elementów architektonicznych. W opracowaniach autorskich wykazano, że poprzez analizę histogramów barw można precyzyjnie określić moment zniszczenia lub uszkodzenia belki. Możliwość analizy rozkładu barwy z tekstur pozwoliłaby też na dokładne określenie uzyskanej barwy elementu, a także ilości, charakterystyki i położenia potencjalnych skaz lub uszkodzeń.

Naziemny skaning laserowy jest dobrym narzędziem do analizy deformacji elementów żelbetowych, jego przewagą w stosunku do typowych mechanicznych sposobów pomiaru elementów, jest kompleksowość uzyskanych wyników. Jako produkt finalny postprocessing'u w programach dedykowanych, uzyskujemy kompletny trójwymiarowy model. W celu usprawnienia procesu analizy przemieszczeń została opracowana metoda translacji sfer [4, 5]. Maksymalny uzyskany błąd tej metody to 2mm. Natomiast stosując metodę selektywnego wygaszania, szczegółowo opisaną w opracowaniach autorskich, będziemy w stanie określić przestrzenną obwiednie deformacji. Obwiednia deformacji wyeksportowana do programów służących do analizy strukturalnej pozwoli nałożyć rzeczywiste odwzorowanie deformacji obiektu na dany model deformacji uzyskany w toku obliczeń analitycznych, co dostarcza kompleksowe narzędzie do weryfikowania założeń teoretycznych z badaniami eksperymentalnymi.

Metody zasygnalizowane w artykule – skaning i fotogrametria synchroniczna – mogą być użyte jako konkurencyjne lub wspomagające do powszechnie używanych metod pomiarowych wykorzystywanych np. w budownictwie komunikacyjnym. Szczególne znaczenie metod wydaje się być przypisane do prac związanych z badaniem wytrzymałości w tym odbiorem budowli komunikacyjnych na etapie ukończenia budowy i prób obciążeniowych.

### **Streszczenie**

*Współczesna technologia naziemnego skaningu laserowego (TLS) z użyciem skanerów geodezyjnych o zasięgu większym niż 50 metrów pozwala na pomiar geometrii elementów konstrukcyjnych z dokładnością bliską 1 mm. Autorzy, w oparciu o badania laboratoryjne i doświadczenia własne, prezentują rozwiązanie pozwalające na wstępną ocenę belek żelbetowych jako podstawowych elementów konstrukcyjnych budowli typu*



mosty, wiadukty, budynki wielkopowierzchniowe.

Przedmiotem artykułu jest analiza możliwości oceny deformacji i mechanizmów niszczenia zginanych belek żelbetowych z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego weryfikowanego metodami fotogrametrycznymi. W artykule przytoczone zostają przykłady modelowania obrazu pozyskanego z naziemnego skaningu laserowego w dostępnych programach dedykowanych do pracy z chmurą punktów. Opisano możliwości i ograniczenia technik laserowych, a także określono przy spełnieniu jakich warunków mogą być stosowane w analizie elementów żelbetowych. Przedstawiono procedury pomiarowe, które posłużyć mogą do określania mechaniki zniszczenia belek i pomiaru deformacji.

## Remote sensing study of structural reinforced concrete elements with the use of terrestrial laser scanning

### Abstract

Modern technology of terrestrial laser scanning (TLS) with the use of geodetic scanners of a range greater than 50 meters allows to measure the geometry of the structural elements with a precision close to 1 mm. The authors, on the basis of laboratory research and own experience present a solution which allows for a preliminary assessment of reinforced concrete beams as the fundamental structural elements of the building as bridges, viaducts, large-buildings.

The subject matter of the article is the analysis of the possibility to assess the deformation and modes of failure in reinforced concrete beams with use of terrestrial laser scanning verified by photogrammetric methods. The article mentions the examples of modelling the image obtained from the terrestrial laser scanning in the available programs dedicated to working with point cloud. There are descriptions of the possibilities and limitations of laser techniques, as well as determination of circumstances that must be met to use it in the analysis of reinforced concrete elements. The article presents the measurement procedures that can be used to determine modes of failure and deformation measurement.

### BIBLIOGRAFIA

1. Janowski A., Nagrodzka-Godycka K., Szulwic J., Ziolkowski P.: Modes of Failure Analysis in Reinforced Concrete Beam Using Laser Scanning and Synchro-Photogrammetry (How to apply optical technologies in the diagnosis of reinforced concrete elements?). Second International Conference on Advances in Civil, Structural and Environmental Engineering – ACSEE 2014, Zurich, Szwajcaria, ISBN 978-1-63248-030-9, 2014. DOI (RG): 10.13140/2.1.3044.2888
2. Nagrodzka-Godycka K., Piotrowski P.: Wpływ ukształtowania zbrojenia i sposobu obciążenia na wsporniki belek w świetle badań eksperymentalnych. Przegląd Budowlany, Vol. 77, 28-32, 2006.
3. Nagrodzka-Godycka, K., Piotrkowski, P.: Experimental study of dapped-end beams subjected to inclined load, ACI Structural Journal, Vol. 109, 2012. DOI: 10.14359/51683489
4. Nagrodzka-Godycka, K., Szulwic, J., Ziółkowski, P.: The method of analysis of damage reinforced concrete beams using terrestrial laser scanning. 14th SGEM GeoConference on Informatics, Geoinformatics and Remote Sensing, www.sgem.org, SGEM2014 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-12-4 / ISSN 1314-2704, 19-25czerwca 2014, Vol. 3, s. 335-342. Albena, Bułgaria, 2014. DOI: 10.5593/SGEM2014/B23/S10.042
5. Ziółkowski P.: analiza możliwości oceny deformacji i mechanizmów niszczenia zginanych belek żelbetowych z wykorzystaniem naziemnego skaningu laserowego. Promotor: Krystyna Nagrodzka-Godycka, Jakub Szulwic. Praca dyplomowa, Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, 2014.
6. Godycki-Ćwirko, T.: Crack morphology in concrete structures, scientific study. No.13, s.149, Białystok, Poland, 1992.
7. Janowski A., Szulwic J.: Synchronic digital stereophotography and photogrammetric analyses in monitoring the flow of liquids in open channels. International Conference “Environmental Engineering” (9th ICEE), Selected Papers, eISSN 2029-7092 / eISBN 978-609-457-640-9, Vilnius Gediminas Technical University, Litwa, 2014. DOI: 10.3846/enviro.2014.079

