

## ZASTOSOWANIE METODY NAZIEMNEGO SKANINGU LASEROWEGO DO OCENY GEODYNAMIKI WYBRZEŻA NA PRZYKŁADZIE KLIFU JASTRZĘBIEJ GÓRY

### TERRESTRIAL LASER SCANNING APPLICATION FOR COASTAL GEODYNAMICS ASSESSMENT: THE CASE OF JASTRZĘBIA GÓRA CLIFF

REGINA KRAMARSKA<sup>1</sup>, JERZY FRYDEL<sup>1</sup>, WOJCIECH JEGLIŃSKI<sup>1</sup>

**Abstrakt.** Od 2010 r. w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym jest wdrażana technologia naziemnego skaningu laserowego do monitorowania procesów geodynamicznych zachodzących na klifowych odcinkach polskiego brzegu Bałtyku. Przedstawiono metodę wykonania pomiarów za pomocą impulsowego skanera laserowego *Riegl VZ-400* oraz analizę danych na przykładzie klifu Jastrzębiej Góry. Pomiaru poszczególnych odcinków klifu, wykonywane od kwietnia 2010 do marca 2011 r., wykazały zróżnicowane tempo erozji. Zachodni segment masywnej zabudowy zbocza uległ odkłuciu od ściany klifu i przesunięciu o prawie 1 m w pionie i około 1,2 m w kierunku morza. Czynne osuwisko w centralnej części badanego odcinka spowodowało cofnięcie brzegu o około 10 m i ubytek mas ziemnych o ponad 4000 m<sup>3</sup>. We wschodniej części odcinka, na makroskopowo stabilnym koluwium, stwierdzono przesunięcia drzewostanu o około 1 m. Uzyskane wyniki są początkiem bazy danych morfometrycznych pozyskanych metodą naziemnego skaningu laserowego.

**Słowa kluczowe:** naziemny skaning laserowy, erozja brzegu, osuwiska, klif Jastrzębiej Góry.

**Abstract.** Since 2010, the Polish Geological Institute – National Research Institute has implemented the use of Terrestrial Laser Scanning (TLS) for geodynamical processes monitoring of backshore parts of the Polish coastal zone. This article describes the methodology of TLS surveying, using *Riegl VZ-400* ground-based laser scanner. The analyzed data originates from Jastrzębia Góra cliff. Coastal surveying, launched in April 2010 (ended in March 2011), showed diverse erosion rates. Western part of the Massive Cliff Stabilization System had split from the cliff face and advanced *ca.* 1.2 m seawards, together with nearly 1 m vertical displacement. An active landslide in the central coast section, caused shore retreat by 10 m and land loss of 4000 m<sup>3</sup>. In the eastern part, within the macroscopically stable colluvium, a shift of the forest stand of approximately 1 m was detected. The obtained data forms the basis of the morphometric database acquired by TLS.

**Key words:** terrestrial laser scanning, coastal erosion, landslides, Jastrzębia Góra cliff.

### WSTĘP

Długoletnie obserwacje i wyniki badań jednoznacznie wskazują, że obszar lądowy strefy brzegowej południowego Bałtyku podlega niekorzystnym procesom erozji, których skutkiem jest cofanie się linii brzegowej i ubytek obszaru lądowego naszego kraju. W ostatnich latach problem ten

zyskuje na znaczeniu, szczególnie w świetle scenariuszy ocieplania klimatu, czego oczywistym skutkiem będzie dalsze podniesienie się poziomu oceanu światowego. Z tego powodu w przyszłości możemy się spodziewać nasilenia zjawisk wywołanych abrazją brzegu morskiego oraz wzro-

<sup>1</sup> Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Oddział Geologii Morza, ul. Kościarska 5, 80–328 Gdańsk; regina.kramarska@pgi.gov.pl, jerzy.frydel@pgi.gov.pl, wojciech.jegliński@pgi.gov.pl

stu liczby i skali ruchów masowych ziemi na klifowych odcinkach brzegu.

Zasadniczo występowanie ruchów masowych kojarzone jest z rejonami górskimi i bywa często bagatelizowane w odniesieniu do strefy brzegowej Bałtyku. Jednak w obrębie wybrzeży klifowych osuwiska występują licznie, co z kolei wpływa na intensyfikację tempa erozji brzegu morskiego i stanowi realne zagrożenie dla infrastruktury zlokalizowanej na jego zapleczu.

Dotychczasowa metodyka badania dynamiki klifów była oparta na fotogrametrii wykorzystującej tradycyjne pomiary geodezyjne oraz naziemne zdjęcia terenu (Kłoda, Subotowicz, 1981 i in.) lub zdjęcia lotnicze i obrazy satelitarne (m.in. Furmańczyk, 1994). Analiza porównawcza uzyskiwanych tą drogą map, planów sytuacyjnych i profili pozwalała wnioskować o tempie zachodzących zmian.

## CHARAKTERYSTYKA OBSZARU BADAŃ

Badaniami został objęty fragment klifu o długości 450 m, położony między 133,90 i 134,55 km wybrzeża (fig. 1). Wysokość skarpy sięga tu prawie 32 m n.p.m. Na całym badanym odcinku istnieje opaska brzegowa zbudowana z gabionów (kosze z siatki drucianej wypełnione kamieniami). W zachodniej części brzeg dodatkowo jest zabudowany maszyną konstrukcją sięgającą korony klifu.

Ten najdalej na północ wysunięty skrawek polskiego lądu jest kształtowany zarówno w wyniku abrazji morskiej, jak również intensywnych procesów osuwiskowych związanych ze strukturą geologiczną klifu i z warunkami hydrogeologicznymi.

Budowa geologiczna klifu z czasu przed zabezpieczeniem zbocza przed abrazją wykazuje znaczne zróżnicowanie

Obecnie jest upowszechniana teledetekcyjna metoda skaningu laserowego LiDAR (*Light Distance And Ranging*) umożliwiająca analizę zmian na podstawie zbiorów współrzędnych punktów w przestrzeni trójwymiarowej. W pierwszej kolejności technologia ta znalazła zastosowanie do wykonywania zdalnych pomiarów powierzchni terenu z pokładu jednostek latających (ALS – *Airborne Laser Scanning*). Obecnie dostępne są również urządzenia naziemne (TLS – *Terrestrial Laser Scanning*), wykonujące pomiary w sposób stacjonarny, jak i mobilnie.

Od 2010 r. metoda naziemnego skaningu laserowego jest wdrażana w Państwowym Instytucie Geologicznym – Państwowym Instytucie Badawczym do badań procesów geodynamicznych zachodzących w obrębie brzegu morskiego. Klif Jastrzębiej Góry jest jednym z rejonów poddanych obserwacjom i pomiarom tą metodą.

(fig. 2). W profilu zostały rozpoznane trzy różnowiekowe poziomy gliny zwałowej, którym towarzyszą ropy, piaski i piaski pylaste (Zaleszkiewicz i in., 2000).

Na skanowanym odcinku (133,9–134,55 km) od poziomu plaży do wysokości około 10 m występują ropy limnoglacialne. W części zachodniej osady te zazębiają się z piaskami pylastymi spoczywającymi częściowo na glinie zwałowej. Wyższa część zbocza jest zbudowana z serii gliniastych o miąższości od kilku do około 20 m. Na odcinku od 133,88 do 134,08 km glina tworzy dość jednolitą warstwę. W pozostałej, zachodniej części klifu w glinie występuje seria piaszczysta o miąższości do 10 m, której towarzyszy cienkie przewarstwienie piasków. Na odcinku masywnej zabudowy piaski spoczywają bezpośrednio na ropy i piaskach pyła-

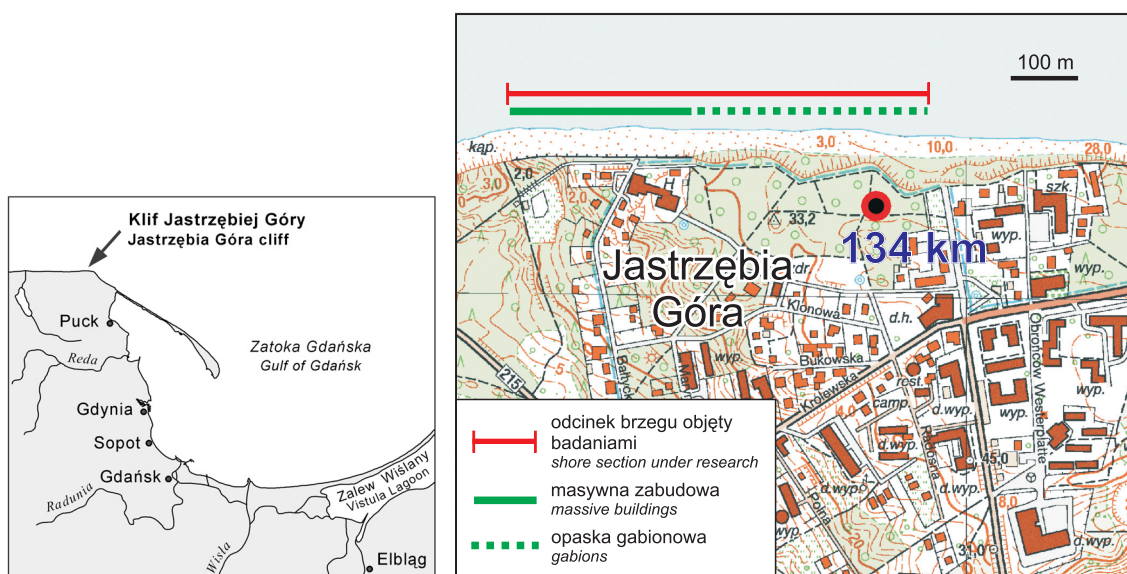
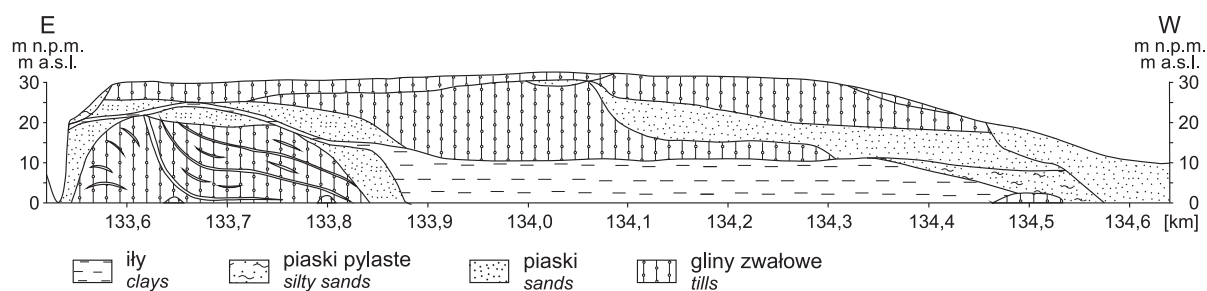


Fig. 1. Lokalizacja obszaru badań

Location of the investigation area



**Fig. 2.** Obraz geologiczny ściany klifu z czasu przed zabudową masywną konstrukcją chroniącą zbocze (wg Zaleszkiewicza i in., 2000)

Geological picture of the cliff face before installing the Massive Cliff Stabilization System (according to Zaleszkiewicz *et al.*, 2000)

stych. We wschodniej części klifu, poza skanowanym rejonem, budowę geologiczną zbocza komplikują zaburzenia glacictektoniczne serii gliniastej. Iły występują tu w postaci cienkiej warstwy wśród osadów piaszczystych przykrytych najmłodszą gliną zwałową (fig. 2).

W zboczu klifu liczne są wysięki wód gruntowych. Zjawisko to oraz występowanie nieprzepuszczalnej warstwy ilów plastycznych są głównymi naturalnymi czynnikami, które decydują o rozwoju osuwisk.

Klif Jastrzębiej Góry przez wiele lat był poligonem badawczym dla oceny procesów litodynamicznych zachodzących na brzegu oraz oceny stateczności zbocza (Subotowicz, 1982). Dane historyczne i wyniki wieloletnich pomiarów świadczą o dużej aktywności klifu, chociaż proces erozji i cofania się brzegu jest zmienny w czasie, szczególnie intensywny podczas silnych wozbrań sztormowych. Od 1875 do 1937 r. brzeg między Jastrzębią Górą a Rozewiem cofnął się o 90 m, tj.

w tempie 1,4 m/rok (Majewski i in., 1983). Według Subotowicza (1982, 1991, 2000) na odcinku 133,535–134,545 km brzegu średnia szybkość cofania się progu abrazyjnego w latach 1971–1975 wynosiła 0,45 m/rok, a ilość zabradowanego materiału była szacowana na około 3 tys. m<sup>3</sup>/rok. W latach 1977–1990 tempo abrazyji zostało określone na 0,9 m/rok, a w okresie 1992–1997 osiągnęło 1,2 m/rok, przy czym w latach 1987–1992 było najwyższe i wynosiło 1,6 m/rok.

Niszczenie infrastruktury na koronie klifu oraz zagrożenie dla domów tam usytuowanych spowodowały podjęcie przez Urząd Morski w Gdyni decyzji o zabezpieczeniu brzegu. W latach 1994–1997 na odcinku około 1 km została zbudowana opaska składająca się z gabionów, a w 2000 r. wzniesiono wysoką masywną konstrukcję dla dodatkowego zabezpieczenia zachodniego odcinka klifu (fig. 3). Budowla składa się z czterech stopni zabezpieczonych od strony zewnętrznej blokami gruntu zbrojonego geosiatkami (Wer-



**Fig. 3.** Masywna zabudowa zachodniego odcinka klifu Jastrzębiej Góry (fot. P. Domaradzki, 2004 r.)

Massive Cliff Stabilization System in Jastrzębia Góra  
(photo by P. Domaradzki, 2004)

no, 2002; Frankowski i in., 2009). Między obudową skarpy a gruntem rodzimym zastosowano system drenażowy sięgający od korony klifu do opaski gabionowej.

Zabezpieczenie brzegu opaską gabionową nie wyeliminowało aktywności procesów osuwiskowych, które rozwi-

jają się w bezpośrednim sąsiedztwie masywnej zabudowy klifu, po jej wschodniej stronie. W ostatnim czasie, po około 10 latach eksploatacji, również ta zabudowa brzegu wykazuje przemieszczenia.

## METODYKA

Przedmiotem naziemnego skanowania laserowego był cały odcinek klifu Jastrzębiej Góry zabudowany opaską gabionową. Prace były wykonywane z wykorzystaniem impulsowego skanera laserowego *Riegl VZ-400* (fig. 4), który charakteryzuje się następującymi parametrami technicznymi:

- maksymalna prędkość skanowania: 125 tys. pomiarów na sekundę;
- dokładność wyznaczania kątów: 0,0024°;
- dokładność wyznaczania odległości: 3 mm;
- maksymalny zasięg skanowania: 500 m ( $\rho \geq 80\%$ ), 160 m ( $\rho \geq 10\%$ ), zależny od współczynnika odbicia powierzchni;
- minimalna odległość skanowania: 1,5 m.

Skaner *VZ-400* jest wyposażony w panel kontrolny oraz zintegrowaną pamięć, które tworzą autonomiczny system sterowania pracą urządzenia i rejestracji danych pomiarowych. W skład zestawu wchodzi również skalibrowana kamera fotograficzna *Nikon D700* służąca do automatycznej rejestracji wysokorozdzielczych zdjęć badanego obiektu.

Orientację bezwzględną urządzenia zapewnia odbiornik *GPS-RTK R8* firmy *Trimble* wykorzystujący w czasie

rzeczywistym poprawki różnicowe systemu ASG-EUPOS. W celu zwiększenia precyzji pomiarów ośrodek obliczeniowy systemu ASG-EUPOS automatycznie zakłada, blisko miejsca wykonywania pomiarów, 3 wirtualne stacje referencyjne (VRS – *Virtual Reference Station*), w odniesieniu do których przesyłane są poprawki do pracującego urządzenia GPS. Pozwala to osiągnąć dokładność (pionową i poziomą) pomiaru RTK rzędu 1 cm.

Zbieranie danych skaningowych następowało w pięciu oddzielnych etapach. W trzech pierwszych seriach pomiarowych, wykonanych 30 kwietnia i 30 lipca 2010 r. oraz 18 listopada 2010 r., pozyskano dane z odcinka wybrzeża chronionego wyłącznie opaską gabionową, z wyłączeniem fragmentu zabezpieczonego masywną zabudową. Pierwsze pomiary całkowicie zabudowanej skarpy wykonano 26 listopada 2010 r., natomiast 22 marca 2011 r. zeskanowano obszar osuwiska przylegającego od wschodu do budowli hydrotechnicznej oraz samą budowlę.

Wszystkie badania terenowe przeprowadzono w dwuosobowych zespołach specjalistów Oddziału Geologii Morza PIG – PIB pod kierunkiem Jerzego Frydla. W doborze



Fig. 4. Skaner laserowy *Riegl VZ-400* w trakcie skanowania osuwiska na klifie Jastrzębiej Góry (fot. J. Frydel)

The *Riegl VZ-400* LiDAR during scanning the landslide within the Jastrzębia Góra cliff (photo by J. Frydel)

stanowisk pomiarowych kierowano się uzyskaniem maksymalnego wynikowego pokrycia terenu, odpowiedniego zagęszczenia punktów, dostępnością sygnału GPS, jak również bezpieczeństwem osób prowadzących pomiary. Odzworowanie terenu odbywało się przy braku opadów, niewielkich prędkościach wiatru i dodatniej temperaturze. Czas skanowania z jednej pozycji wynosił przeważnie około 10 min. W zależności od morfologii terenu i stopnia pokrycia roślinnością, kompletny obraz danego obiektu uzyskiwano na podstawie kilkunastu pozycji skanowania.

Do przetworzenia danych pomiarowych wykorzystano dedykowane oprogramowanie RiSCAN PRO firmy Riegl,

które w zakresie obróbki chmur punktów umożliwia ich rejestrację, łączenie, klasyfikację, wizualizację, eksport, pomiary i analizy przestrzenne oraz modelowanie 3D. Precyzyjne łączenie chmur punktów, bez konieczności stosowania znaczników kontrolnych, było możliwe dzięki zaimplementowanej w oprogramowaniu RiSCAN PRO unikatowej metodzie o nazwie *Multi-Station Adjustment*. W wyniku modelowania sporządzono numeryczne modele terenu (NMT, *Digital Surface Models*) zbudowane z nieregularnej siatki trójkątów. Operacje na modelach 3D umożliwiły wykonanie analiz różnicowych i obliczenia objętości przemieszczonych mas ziemnych.

## WYNIKI POMIARÓW I OBSERWACJI

Analiza geodynamiki klifu, oparta na danych skanowania laserowego, przetworzonych na numeryczne modele terenu (NMT) i przekroje poprzeczne została przeprowadzona odrębnie dla trzech części badanego klifu: wschodniej ze śladami intensywne w przeszłości ruchów masowych, środkowej z aktywnym w trakcie badań osuwiskiem oraz zachodniej zabudowanej maszyną konstrukcją ochronną. Podejście to zostało podyktowane różną częstotliwością skanowania poszczególnych odcinków, opisaną w poprzednim rozdziale.

Dla środkowej części badanego odcinka klifu pozyskano dotychczas największą liczbę danych, umożliwiającą ocenę sezonowych zmian w prawie rocznym okresie.

Osuwisko, będące zasadniczym elementem tej części klifu, jest rozwinięte w klasyczny sposób i ma charakterystyczne dla tej formy elementy morfologiczne, tj. skarpe główną, skarpy wtórne, koluwium z poprzecznymi szczelinami i nie-

wielkim zbiornikiem wód powierzchniowych, podmokłości oraz dobrze wykształcone czoło. Jęzor osuwiska przekracza opaskę gabionową i sięga w strefę przyboju, podlegając okresowo intensywnej abrazji.

W okresie wiosenno-letnim (maj–lipiec) 2010 r. dynamika zmian była niewielka. Profil skarpy głównej prawie nie zmienił się, widoczne przesunięcia odnoszą się do powierzchni koluwium i czoła osuwiska (fig. 5). Różnicowy model terenu, sporządzony poprzez porównanie morfometrii osuwiska z dwóch cykli pomiarowych, ukazuje zmiany, jakie zaszły we wszystkich punktach obszaru objętego zdjęciem skaningowym (fig. 6). Położenie powierzchni koluwium zmieniło się w ciągu trzech miesięcy w przedziale od –2 do 2 m, generalnie jednak uległo dość równomiernemu obniżeniu o około 0,5 m. Wysunięcie jęzora osuwiska na plażę o 8 m dalej w stosunku do pozycji odnotowanej w ostatnim dniu kwietnia spowodowało podniesienie terenu przy czołe

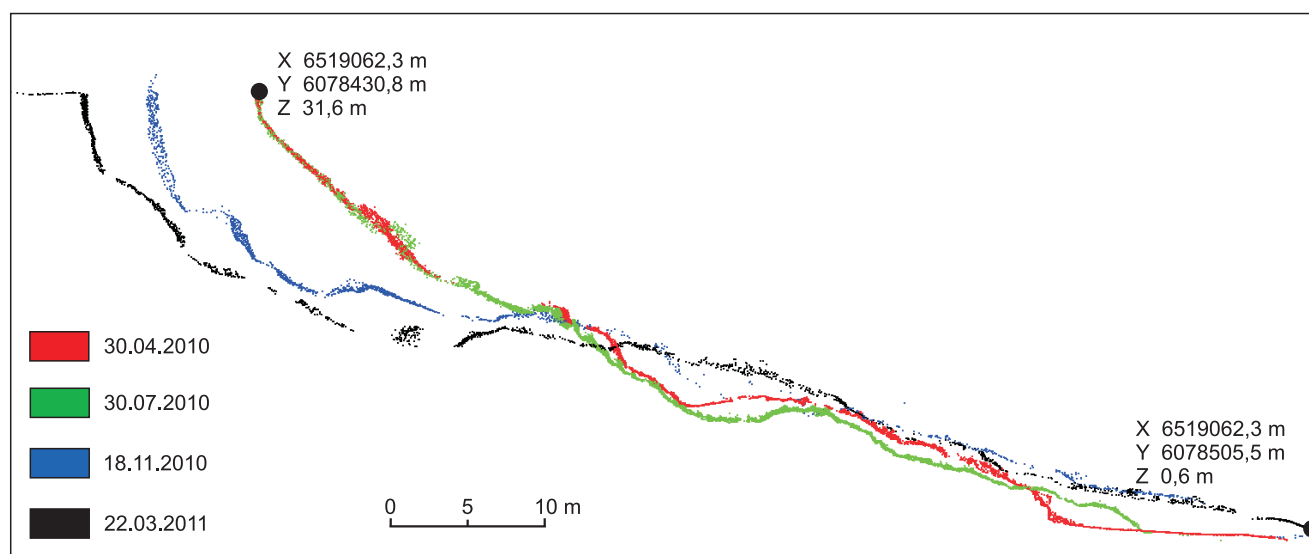
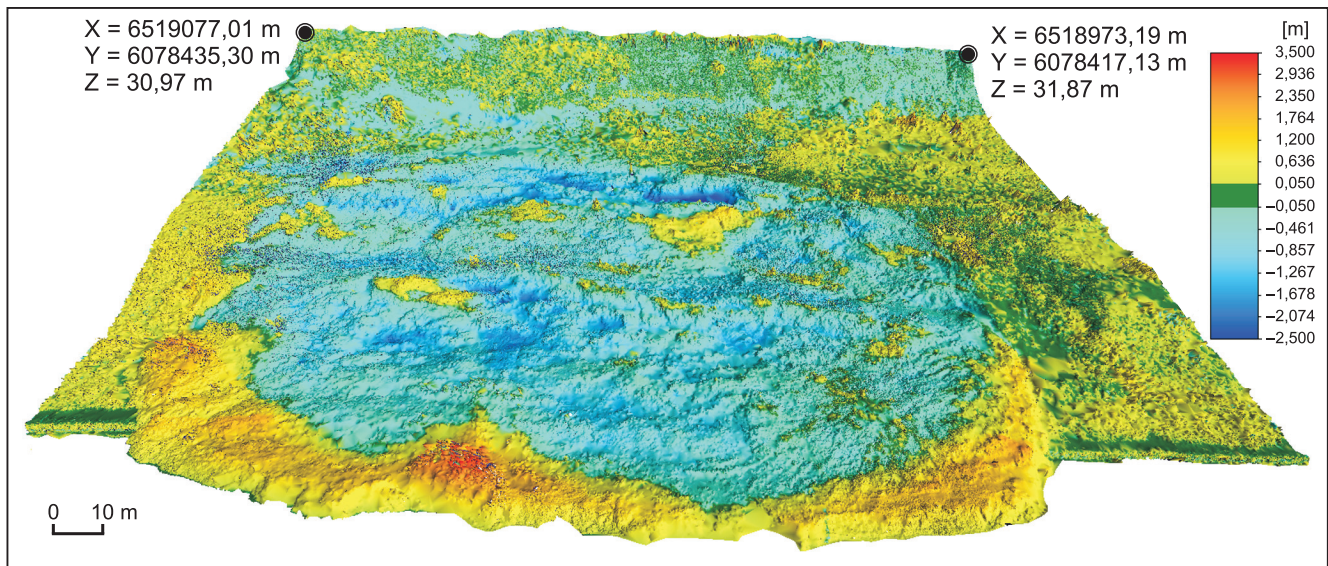


Fig. 5. Profile poprzeczne na podstawie chmur punktów obrazujące rozwój osuwiska w środkowej części klifu od 30.04.2010 do 18.11.2010 r. i 22.03.2011 r.

Cross-sections through the point clouds showing landslide development in the middle part of the cliff from 30.04.2010 to 18.11.2010 and on 22.03.2011



**Fig. 6. Model różnicowy klifowego fragmentu nadbrzeża w rejonie Jastrzębiej Góry, obrazujący rozwój osuwiska od 30.04.2010 do 30.07.2010**

Differential DTM showing landslide development in Jastrzębia Góra from 30.04.2010 to 18.11.2010

osuwiska o około 2 m w stosunku do pierwotnego poziomu plaży.

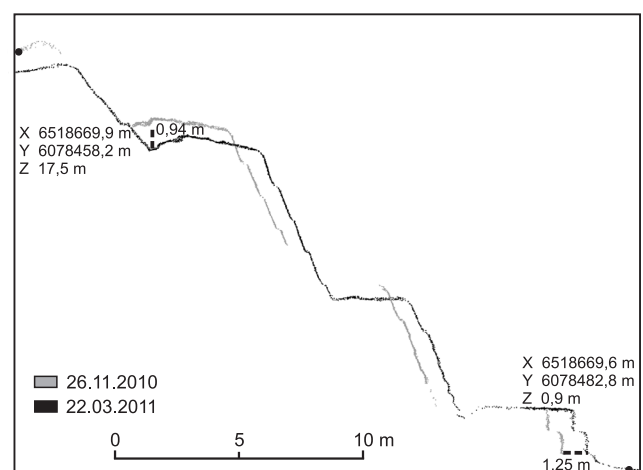
Bilans objętości mas ziemnych oszacowany z modelu różnicowego wykazał ubytek materiału na skutek abrazji w ilości 700 m<sup>3</sup>. Wielkość tę należy uznać za pokaźną, biorąc pod uwagę okres obserwacji przypadający na sezon bez większych spiętrzeń sztormowych, kiedy koluwium nie podlega szybkiemu usuwaniu przez fale morskie.

Większe zmiany w profilu osuwiska nastąpiły w kolejnym okresie, między końcem lipca a 18 listopada (fig. 5). Nisza osuwiskowa obniżyła się miejscami o ponad 10 m i wyraźnie zarysowała się wtórna skarpa. Koluwium zostało przemieszczone w znacznym stopniu na plażę. Z porównania NMT wynika, że ubytek materiału z obszaru o powierzchni 1,2 ha wyniósł około 3500 m<sup>3</sup>. Proces cofania się skarpy głównej i pogłębiania niszy osuwiskowej postępował sukcesywnie w zimowych miesiącach skutkując zmianami morfologii koluwium i przesuwaniem czoła w kierunku morza. Erodowana krawędź klifu w ciągu 8 miesięcy (od lipca 2010 do marca 2011 r.) cofnęła się o około 10 m.

Masywna, wielopoziomowa zabudowa klifu na długości około 200 m, chroniąca skutecznie brzeg przez dekadę, od 2010 r. wykazuje odkształcenia skrajnie zachodniej części konstrukcji. Dwukrotne pomiary, wykonane jesienią 2010 i wiosną 2011 r., wykazały odkłuwanie segmentu zabudowy od ściany klifu i przesunięcie o około 1,2 m w kierunku morza wraz z osunięciem o prawie 1 m w pionie (fig. 7). Numeryczne modele terenu, skonstruowane na podstawie skaningu laserowego, nie wykazały różnic świadczących o ruchu pozostałej części budowli.

Wschodnia część badanego odcinka brzegu w okresie badań nie wykazywała widocznych makroskopowo zmian. Koluwium, które powstało w wyniku intensywnych proce-

sów osuwiskowych zachodzących tu w minionych latach, w znacznej części było porośnięte roślinnością, w tym drzewami, które osunęły się po zboczu wraz z gruntem. Dwukrotne pomiary, w odstępie nieco ponad półrocznym, nie ujawniły widocznych zmian w głębszych partiach niszy osuwiskowej i koronie klifu. Jednakże analiza chmury punktów przed odfiltrowaniem szaty roślinnej wykazała przesunięcia drzewostanu o prawie 1,3 m (fig. 8). Wskazuje to jednoznacznie na przesuwanie koluwium w kierunku morza,



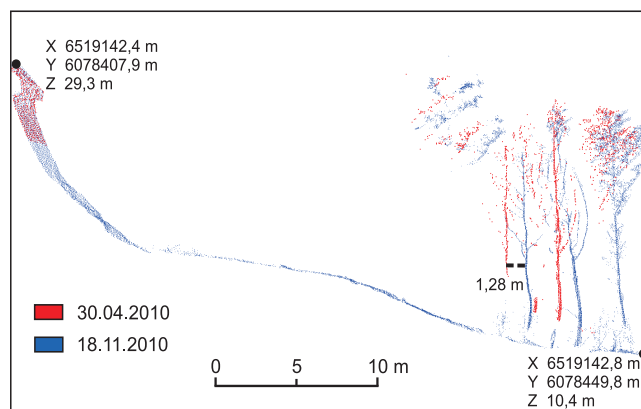
**Fig. 7. Profil poprzeczny zachodniego segmentu masywnej zabudowy klifu na podstawie NMT obrazujący zmiany od 26.11. 2010 do 22.03.2011 r.**

Cross-section of the western segment of the Massive Cliff Stabilization System based on DTM, illustrating the changes from 26.11.2010 to 22.03.2011

**Fig. 8. Profile poprzeczne na podstawie chmur punktów obrazujące przesunięcia drzewostanu wraz z kolumium we wschodniej części klifu**

Cross-sections based on the point cloud data, illustrating displacement of the forest stand within the colluvium, in the eastern part of the cliff

a tempo tego procesu jest zależne od intensywności abrazyj i podcinania czoła pozornie stabilnego osuwiska. Proces ten w przyszłości może być intensywniejszy i z pewnością doprowadzi do pogłębienia niszy osuwiskowej i kolejnego cofnięcia korony klifu.



## PODSUMOWANIE I UWAGI KOŃCOWE

Technologia skaningu laserowego znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach nauki i techniki. Szybkie wykonanie wysokorozdzielczych i precyzyjnych pomiarów geodezyjnych z bezpiecznej odległości ma szczególne znaczenie w przypadku obiektów potencjalnie zagrażających bezpieczeństwu lub trudno dostępnych. Naziemny skaningu laserowy jest z powodzeniem stosowany w badaniach geologicznych, zwłaszcza w monitoringu geozagrożeń. Publikacje dotyczące wykorzystania tej metody do monitoringu wulkanów, skutków trzęsień ziemi, osiadania terenów kopalnianych, osuwisk i erozji brzegu pojawiają się od początku bieżącego stulecia (m.in. Rowlands i in., 2003; Bitelli i in., 2004; Siefko, Hack, 2004; Buckley i in., 2008). Od 2000 r. metoda ta jest powszechnie stosowana w monitoringu aktywnych osuwisk erodowanego wybrzeża Wielkiej Brytanii, prowadzonym przez brytyjską służbę geologiczną (m.in. Poulton i in., 2006; Hobbs i in., 2010).

Badanie geozagrożeń jest również ustawowym obowiązkiem PIG – PIB jako państwowej służby geologicznej, zgodnie z wchodzącą w życie 1 stycznia 2012 r. nową ustawą prawo geologiczne i górnicze, a naziemny skaningu laserowy staje się standardową metodą w monitorowaniu erozji brzegu morskiego oraz osuwisk na klifach i w innych rejonach kraju.

Uzyskane wyniki skanowania klifu Jastrzębiej Góry pozwalają zaklasyfikować TLS jako użyteczną metodę pomiarów, pozwalającą na szybkie pozyskiwanie danych o morfologii zboczy i bilansie przemieszczanych mas ziemnych. Dzięki precyzji pomiarów jest możliwe wczesne wykrywanie nawet niewielkich zmian, co w przypadku ruchów masowych daje możliwość zapobiegania niebezpieczeństwu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku już istniejącej zabudowy na zapleczu klifu lub w planowaniu zagospodarowania strefy nadbrzeża.

Oczywistą zaletą metody skaningu laserowego jest powtarzalność pomiarów i łatwość tworzenia baz danych przestrzennych. Możliwość integracji z istniejącymi wynikami pomiarów fotogrametrycznych, uzyskanych na podstawie analizy zdjęć naziemnych i lotniczych, zapewnia ciągłość obserwacji w długim czasie.

Pracę wykonano w ramach badań statutowych PIG – PIB nr: 61.2706.1001.00.

Autorzy składają serdeczne podziękowania Panom Lesławowi Milowi i Leszkowi Zaleszkiewiczowi za udział w pracach terenowych.

## LITERATURA

- BITELLI G., DUBBINI M., ZANUTTA A., 2004 — Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry techniques to monitor landslide bodies. *Proceedings of XX ISPRS Congress*: 246–251.
- BUCKLEY S.J., HOWELL J.A., ENGE H.D., KURTZ T.H., 2008 — Terrestrial laser scanning in geology: data acquisition, processing and accuracy considerations. *Jour. Geol. Soc., London*, **165**: 625–638.
- FRANKOWSKI Z., GRANICZNY M., JUSZKIEWICZ-BEDNARCZYK B., KRAMARSKA R., PRUSZAK R., PRZEZDZIECKI P., SZMYTKIEWICZ M., WERNO M., ZACHOWICZ J., 2009 — Zasady dokumentowania geologiczno-inżynierskich warunków posadowienia obiektów budownictwa morskiego i zabezpieczeń brzegu morskiego. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
- FURMAŃCZYK K., 1994 — Współczesny rozwój strefy brzegowej morza bezplywowego w świetle badań teledetekcyjnych południowych wybrzeży Bałtyku. *Rozpr. Stud.*, **161**. Wyd. Uniw. Szczecińskiego, Szczecin.
- HOBBS P., GIBSON A., JONES L., POULTON C., JENKINS G., PEARSON S., FREEBOROUGH K., 2010 — Monitoring coastal change using terrestrial LIDAR. *Geol. Soc., London, Spec. Publ.*, **345**: 117–127.
- KŁODA P., SUBOTOWICZ W., 1981 — Fotogrametryczny pomiar w badaniach brzegu morskiego. *W: Mat. Sesji Nauk.* „Geolo-

- giczno-inżynierskie badania wybrzeża i dna Bałtyku Południowego” (red. W. Subotowicz): 248–257. Gdańsk.
- MAJEWSKI A., DZIADZIUSZKO Z., WIŚNIEWSKA A., 1983 — Monografia powodzi sztormowych 1951–1975. Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- POULTON C.V.L., LEE J.R., HOBBS P.R.N., JONES L., HALL M., 2006 — Preliminary investigation into monitoring coastal erosion using terrestrial laser scanning: case study at Happisburgh, Norfolk. *Bull. Geol. Soc.*, **56**: 45–64.
- ROWLANDS K., JONES L., WHITWORTH M., 2003 — Photographic Feature: Landslide laser scanning: a new look at an old problem. *Quart. Jour. Engineer. Geol.*, **36**: 155–158.
- SIEFKO S., HACK R., 2004 — 3D Terrestrial Laser Scanning as a new field measurement and monitoring technique. *W: Engineering geology for infrastructure planning in Europe* (eds R. Hack, R. Azzam, R. Charlier): 179–189. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- SUBOTOWICZ W., 1982 — Litodynamika brzegów klifowych wybrzeża Polski. Ossolineum PAN, Wrocław–Warszawa–Kra-ków–Gdańsk.
- SUBOTOWICZ W., 1991 — Ochrona brzegu klifowego na odcinku Jastrzębia Góra–Rozewie. *Inżynier. Mors. Geotechn.*, **4**: 143–145.
- SUBOTOWICZ W., 2000 — Badania geodynamiczne klifów w Polsce i problem zabezpieczenia brzegu klifowego w Jastrzębiej Górze. *Inżynier. Mors. Geotechn.*, **5**: 252–257.
- WERNO M., 2002 — Zabezpieczenie zbocza klifu w Jastrzębiej Górze. *W: Geologia regionu Gdańskiego. Przewodnik 73 Zjazdu Pol. Tow. Geol.* (red. J. Zachowicz, R. Kramarska): 67–68. Państw. Inst. Geol., Gdańsk.
- ZALESZKIEWICZ L., MASŁOWSKA M., KOSZKA-MARON D., OLSZAK I., 2000 — Klif w Jastrzębiej Górze. *W: Stratygrafia czwartorzędu i zanik lądolodu na Pojezierzu Kaszubskim. VII Konferencja „Stratygrafia plejstocenu Polski”* (red. S. Uści-nowicz, J. Zachowicz): 117–119. Państw. Inst. Geol., Gdańsk.

## SUMMARY

Since 2010, Polish Geological Institute – National Research Institute has implemented the technique of Terrestrial Laser Scanning in order to monitor geodynamical processes within the backshore part of the Polish coastal zone.

The case of Jastrzębia Góra cliff (133.90–134.55 km) is an example of a coastal zone segment under LiDAR surveillance, led by PGI – NRI. The above-mentioned cliff section is being protected by gabions. Moreover, western part of the cliff is being shielded by the crown-high Massive Cliff Stabilization System (MCSS).

Geological structure of the cliff is very diverse. Three layers of glacial till accompanied by clay, sand and silty sand have been recognized. Numerous groundwater seepages within the slope have been detected. This phenomenon, together with clay layer impermeability are the main cause that triggers landslide development within the cliff.

Field surveying was carried out during five sessions (30.04.2010, 30.07.2010, 18.11.2010, 26.11.2010 and 22.03.2011) using *Riegl VZ-400* laser scanner. Precise spatial location was assured by *Trimble R8* GNSS GPS, taking advantage of ASG-EUPOS differential corrections. Data processing was accomplished using *RiScan PRO – Riegl VZ-400* dedicated software.

Within the analyzed area, based on the terrain characteristics and obtained results, three coast parts have been assigned:

1. The eastern part, protected with low gabion-band, subjected to intense mass loss in the past. During the survey period, retreat of the main scarp was not detected. However, trees displacement of 1.3 m was discovered within the colluvium. It indicates the landslide main body seaward motion. The motion rate of apparently stable landslide foot depends on the intensity of undercutting by the sea.

2. The middle part is a classic landslide. Between May and July 2010 its dynamics was marginal. Small, up to 0.5 m changes, in the landslide surface were detected. Meanwhile, the landslide foot had advanced seawards, over gabion-band, which was unable to stop the land sliding process. Eventually, 2 m thick layer of ground was deployed. Differential analysis had indicated land loss of 700 m<sup>3</sup>. Greater changes occurred during the following 8 months. The main scarp retreated by 10 m. The colluvium advanced further seawards, and land loss due to abrasion has reached 3500 m<sup>3</sup>.

3. The western part includes 200 m long Massive Cliff Stabilization System. Measurements performed on 26.11.2010 and 22.03.2011 revealed a deformation of 50 m long section of western part of the MCSS, which subsided by nearly one meter and advanced seawards by 1.2 m.