Litologiczny wskaźnik przemieszczeń materiału skalnego jako element oceny podatności stoków na osuwanie

Marcin Wódka[1]

Lithological displacement index as an element of landslide susceptibility assessment. Prz. Geol., 70: 695–700; doi: 10.7306/2022.23

A b s t r a c t. The use of multi-temporal LIDAR data in the study of landslides gives many possibilities. The increasing-over-time availability of ALS data encouraged research on development of landslides using Differential Digital Terrain Models. An important passive factor that determines the development of landslides (especially in the Carpathians) is lithology. The author propose a new lithological displacement index, that dscribes the volume of displaced ground (m^3) per area of 1 m^2 of a given lithological unit. The example of the test area of Rożnowskie Lake has shown that lithological displacement index can assess the landslide susceptibility, which is variable and depends on the amount of rainfall. During periods of heavy rainfall, large volumes of displaced rock masses were recorded in the thick-bedded formations. In dry periods, the trend is reversed.

Keywords: *lithological displacement index, landslide, DTM, multi-temporal LIDAR*

Badania osuwisk z wykorzystaniem numerycznych modeli powierzchni terenu (NMT) wygenerowanych na podstawie danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS) są powszechne na świecie od ok. 20 lat (Jaboyedoff i in., 2012). Od kilku lat, również w Polsce, jest zauważalna coraz lepsza dostępność danych ALS z różnych okresów, co pozwala na tworzenie różnicowych modeli powierzchni terenu (RMT). Na poprawę dostępności danych ALS w Polsce znacząco wpłynął projekt pt. *Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami* (ISOK) oraz nowsze naloty zlecane przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii (GUGiK). Niektóre ośrodki naukowe zlecają wykonanie lotniczego skaningu laserowego na własne potrzeby badawcze. Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy (PIG-PIB) od 2018 r. zleca wykonanie takich nalotów na potrzeby badań osuwisk w rejonie Jeziora Rożnowskiego. Są to tereny silnie dotknięte przez tzw. katastrofę osuwiskową, która miała miejsce na obszarze Karpat w 2010 r., na skutek długotrwałych i intensywnych opadów deszczu.

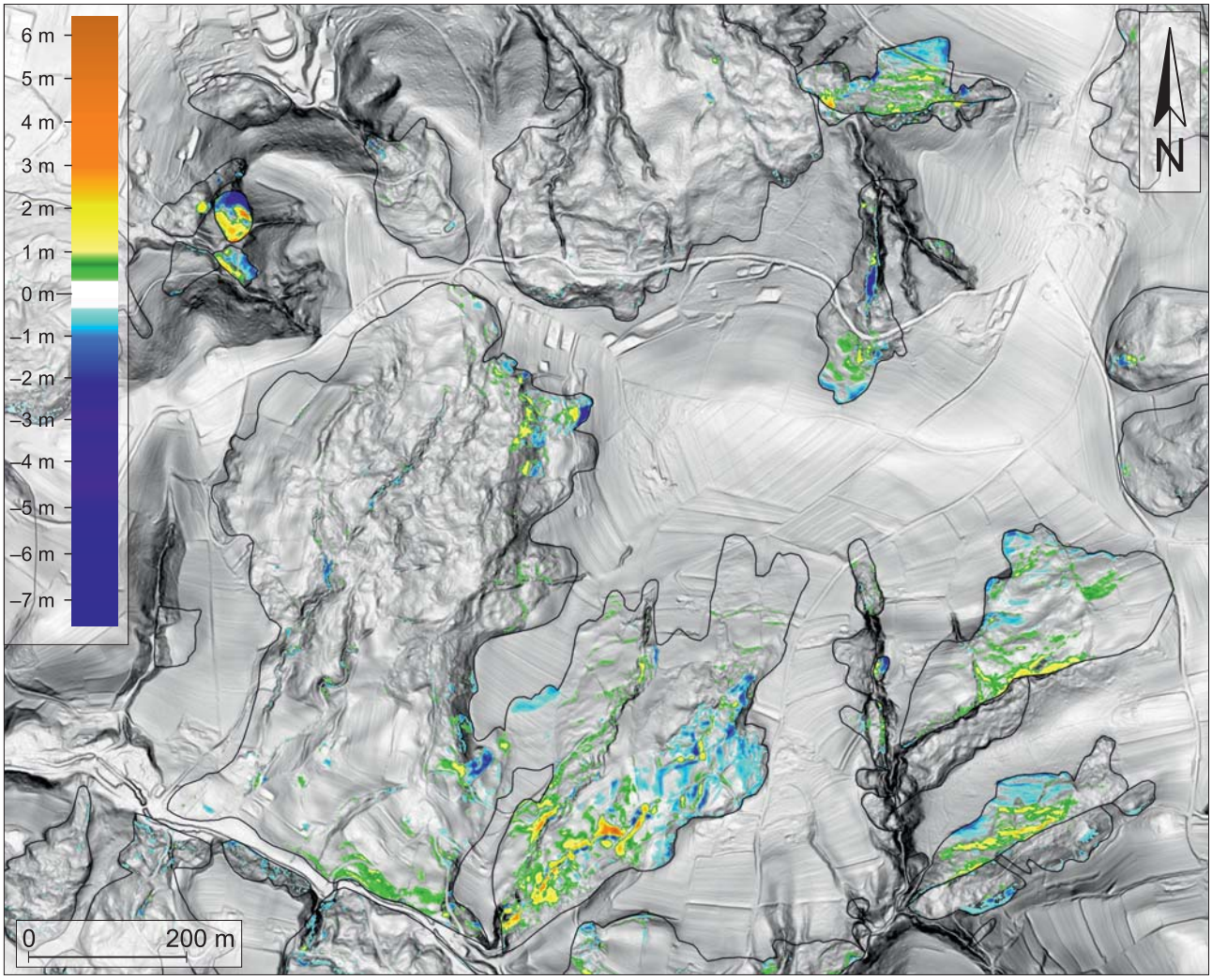
RMT

Różnicowe modele powierzchni terenu (RMT) można wykonać na podstawie danych ALS pozyskanych z tego samego obszaru, w ustalonych okresach. Obrazują one różnice wysokościowe pomiędzy wygenerowanymi NMT, jakie powstały pomiędzy nalotami (Borkowski i in., 2012) (ryc. 1). Pozwala to na ocenę zmian dynamiki przemieszczeń oraz monitorowanie aktywności osuwisk. Analizy osuwisk z wykorzystaniem różnicowych modeli terenu z danych ALS przeprowadzano w wielu miejscach na świecie, m.in. w zachodniej części Oregonu w USA (Burns i in., 2010; Marshall, 2016), w rejonie Sedrun w Szwajcarii (Allemand i in., 2011), w północnych Apeninach (Daehne, Corsini, 2012), w Montaguto we Włoszech (Ventura i in., 2013), w południowo-zachodniej Kanadzie (Lato i in., 2014), w południowo-zachodniej Słowenii (Verbovsek i in., 2017) czy w rejonie Zanesville w stanie Ohio w USA (Mora i in., 2018). Dotychczasowe badania osuwisk z wykorzystaniem RMT w Polsce ograniczały się do wybranych rejonów, dla których wykonano dodatkowe naloty ALS, m.in. dla osuwiska w Kłodnem (Wójcik i in., 2012; Wojciechowski i in., 2013; Perski i in., 2014), w Szczepanowicach (Karwacki, Wojciechowski, 2014), w Jastrzębiej Górze (Kamiński, Zientara, 2017), terenów wokół Jeziora Rożnowskiego (Wojciechowski, Wójcik, 2015; Wódka 2020a; b, 2022) oraz obszaru Krakowa (Kamieniarz, 2021). We wszystkich tych pracach RMT były z sukcesem wykorzystywane do badania zmian dynamiki przemieszczeń osuwiskowych oraz do oceny przyczyn współczesnych uaktywnień osuwisk.

LITOLOGIA JAKO ISTOTNY CZYNNIK PASYWNY WPŁYWAJĄCY NA ROZWÓJ OSUWISK

Podatność osuwiskowa stoków, szczególnie w rejonach takich jak Karpaty, gdzie wśród ruchów masowych przeważają głębokie zsuwy rotacyjne, translacyjne, a najczęściej złożone, jest w dużej mierze zależna od litologii. Obok tektoniki jest ona najczęściej wymienianym elementem wśród czynników pasywnych warunkujących rozwój osuwisk (m.in. Ziętara, 1974; Bober, 1984; Bober, Zabuski, 1993; Wójcik, Zimnal, 1996; Wójcik, 1997; Ozimkowski i in., 2010; Kamiński, 2012; Mrozek, 2013; Wojciechowski, Wójcik, 2015; Rycio, 2018). W literaturze wielokrotnie podkreślano zależności między opadami, a rozwojem osuwisk na stokach o zróżnicowanej budowie litologicznej (m.in. Starkel, 1996; Gil, 1997). Litologia po części warunkuje też typy przemieszczeń grawitacyjnych (Zabuski i in., 1999; Margielewski, 2004). W iłach, łupkach czy w drobnorytmicznym fliszu dominują zsuwy rotacyjne, natomiast w sztywnych piaskowcach przemieszczenia mają często charakter złożony, zależny od anizotropii tektonicznej (Thiel, 1980; Margielewski, 2001). Istotne znaczenie litologii podłoża w rozwoju osuwisk potwierdzają też badania podatności osuwiskowej, w których

[1] Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Centrum Geozagrożeń, ul. Skrzatów 1, 31-560 Kraków; marcin.wodka@pgi.gov.pl; ORCID: 0000-0003-1591-3980



Ryc. 1. Model różnicowy (2013–2010) północnego fragmentu obszaru badań (rejon Gródka nad Dunajcem)
Fig. 1. Differential Digital Terrain Model (2013–2010) of the northern part of the study area (Gródek nad Dunajcem region)

jako jeden z czynników warunkujących rozwój osuwisk przyjęto obecność granic litologicznych (Długosz, 2011; Wódka, 2022). Wszystkie te przesłanki powodują, że litologię należy uznać za ważny czynnik warunkujący rozwój osuwisk.

WSKAŹNIK PRZEMIESZCZEŃ

Wygenerowanie RMT umożliwia obliczenie objętości przestrzeni między porównywanymi NMT, czyli objętości wszelkich deformacji terenu zarejestrowanych na RMT, powstałych w okresie między nalotami ALS. Po odfiltrowaniu różnic, które są wynikiem działalności antropogenicznej, obliczenia można wykonać dla powierzchni wyznaczonych osuwisk. Obliczone wartości nie określają objętości przemieszczonych koluwiów w okresie między nalotami ALS, ale wskazują skalę zmian jakie zaszły na powierzchni terenu w wyniku ruchów masowych. W przypadku zsuwów translacyjnych, spływów lub obrywów obliczone wartości mogą być zbliżone do rzeczywistej objętości przemieszczonego koluwium. W przypadku głębszych osuwisk typu zsuw rotacyjny lub złożony objętość przemieszczonej masy koluwialnej może być nawet kilkadziesiąt razy większa niż objętość deformacji powierzchniowych obliczonych na RMT.

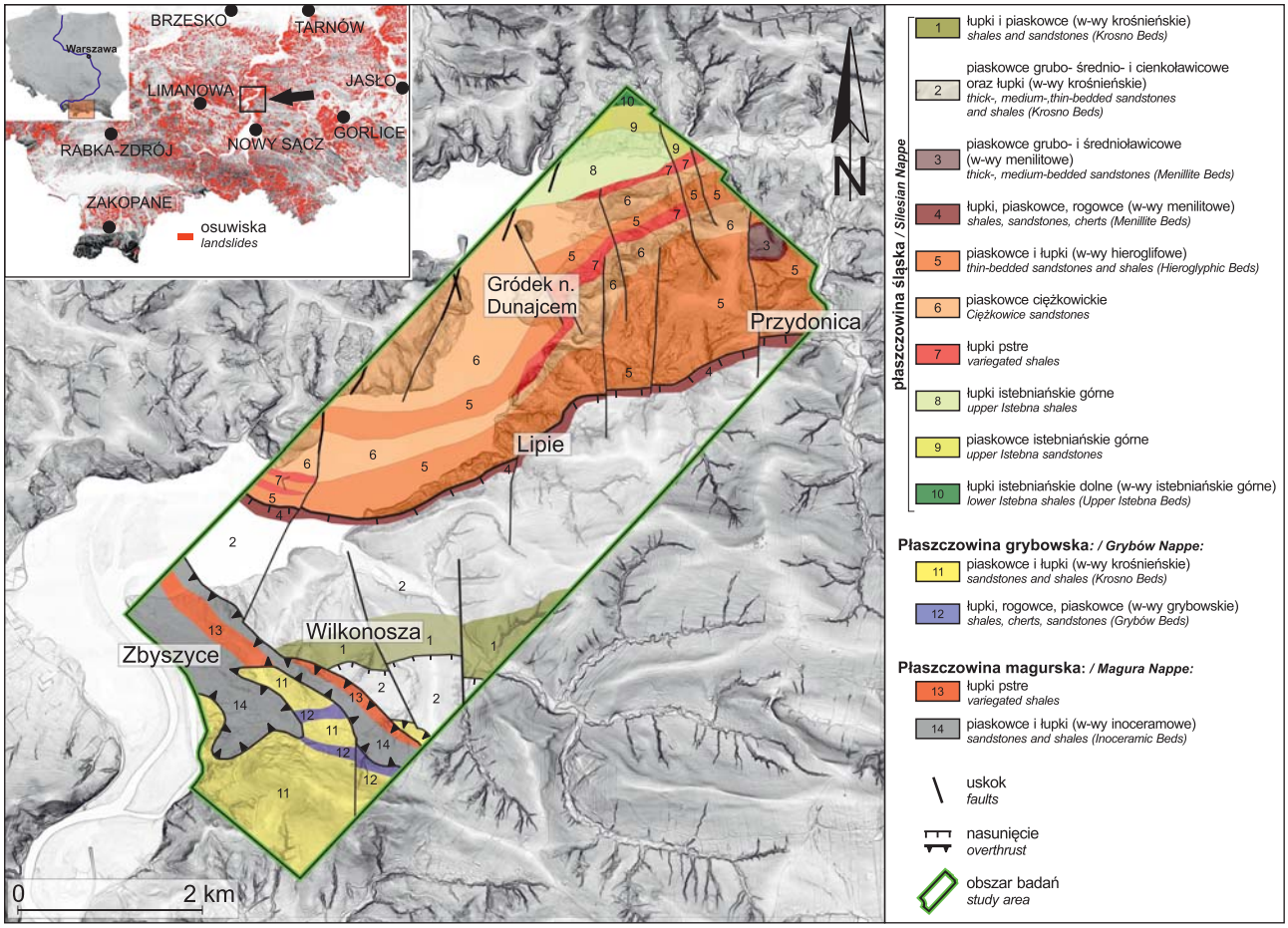
Mając na uwadze, że jednym z ważniejszych czynników pasywnych warunkujących rozwój osuwisk jest litologia, obliczenia objętości deformacji warto zastosować dla wychodni danego wydzielenia litologicznego. Dzięki temu możliwe jest obliczenie wartości, którą autor proponuje nazwać litologicznym wskaźnikiem przemieszczeń W_d. Oblicza się go wg wzoru:

$$W_d = \frac{\Sigma|V_d|}{S} \quad \left[\frac{m^3}{m^2}\right]$$

gdzie:
V_d – suma objętości przemieszczeń powierzchniowych w obrębie osuwisk w danym wydzieleniu (zarówno obniżeń, jak i wypiętrzeń);
S – powierzchnia danego wydzielenia litologicznego objęta nalotem, z wyłączeniem den dolin rzecznych.

LITOLOGICZNY WSKAŹNIK PRZEMIESZCZEŃ W REJONIE JEZIORA ROŻNOWSKIEGO

Obszar wokół Jeziora Rożnowskiego charakteryzuje się skomplikowaną budową geologiczną. Przeważająca część badanego terenu jest zbudowana ze skał reprezentujących płaszczowinę śląską (ryc. 2). W południowej czę-



Ryc. 2. Uproszczona mapa geologiczna obszaru badań (na podstawie: Burtan, Skoczylas-Ciszewskiej, 1964; Cieszkowskiego i in., 1987; Burtan i in., 1991; Cieszkowskiego, 1992; zmieniona)
Fig. 2. Geological map of the study area (after: Burtan, Skoczylas-Ciszewska, 1964; Cieszkowski et al., 1987; Burtan et al., 1991; Cieszkowski, 1992; modified)

ści na płaszczowinę śląską jest nasunięta płaszczowina grybowska, na którą z kolei nasunęła się płaszczowina magurska. Znaczna część obszaru badań jest zbudowana z utworów piaskowcowo-łupkowych warstw krośnieńskich. Duży udział mają również cienkoławicowe piaskowce i łupki warstw hieroglifowych, odsłaniające się w rejonie Przydonicy i Gródka nad Dunajcem, oraz piaskowce ciężkowickie. Przez środkową część obszaru badań przebiega lokalne nasunięcie Przydonicy (Burtan i in., 1991), w którym utwory warstw menilitowych nasuwają się na warstwy hieroglifowe (ryc. 2).

METODYKA

Obliczenia litologicznego wskaźnika przemieszczeń w rejonie Jeziora Rożnowskiego wykonano dla dwóch okresów. Pierwszy z nich (2010–2013) objął katastrofalne opady, które miały miejsce na przełomie maja i czerwca 2010 r. Według danych Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW) z pobliskiej stacji pomiarowej w Limanowej spadło wtedy ponad 380 mm deszczu w ciągu 20 dni. Drugi okres (2013–2018) charakteryzował się znacznie mniejszymi sumami opadów, które miesięcznie nie przekraczały 120 mm. Do obliczeń wykorzystano zasięgi wydzieleń litologicznych ze *Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski w skali 1 : 50 000* (Cieszkowski i in., 1987; Burtan i in., 1991), dane o zasięgu osuwisk z bazy danych SOPO uzupełnione o badania własne oraz:

– NMT o rozdzielczości 1 m utworzony z danych ALS z 2010 r., pozyskanych na zlecenie Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu (Borkowski i in., 2011; Wojciechowski i in., 2012) o średniej gęstości punktów laserowych 7 pkt/m^2. Wykonane naloty objęły południowo-wschodni fragment badanego obszaru;

– NMT o rozdzielczości 1 m wykonany na potrzeby projektu ISOK, wykorzystujący dane z 2011 r. (północna część obszaru badań) oraz 2013 r. (południowa część obszaru badań) o średniej gęstości 4 pkt/m^2, choć w rejonie niektórych osuwisk zagęszczenie punktów dochodziło do 9/m^2 (np. rejon osuwiska w Zbyszycach);

– NMT o rozdzielczości 1 m wykonany z danych ALS z 2018 r., pozyskanych na zlecenie PIG-PIB. Skanowanie wykonano ze średnią rozdzielczością odpowiednio 8 pkt/m^2.

Za pomocą modułu Combine/Compare Terrain Layers programu Global Mapper wygenerowano modele różnicowe. Na podstawie obserwacji „fałszywych" przemieszczeń widocznych na terenach płaskich znajdujących się poza zasięgiem osuwisk (takich jak drogi asfaltowe, pola i łąki) przyjęto średnią dokładność modeli różnicowych i zwizualizowano tylko te przemieszczenia, których wartości pionowe przekraczały 0,32 m. Następnie RMT przycięto do granic osuwisk. Dla każdego z osuwisk przeprowadzono analizę przemieszczeń, eliminując zmiany, które zaszły na skutek działalności antropogenicznej, erozji i akumulacji rzecznej lub są wynikiem różnic w jakości danych ALS. Do analizy niejednoznacznych zmian terenu wykorzystano NMT z danego okresu, historyczne zdjęcia lotnicze dostęp-

ne w aplikacji Google Earth Pro oraz informacje zawarte w kartach rejestracyjnych osuwisk. Zmiany związane z działalnością człowieka na obrazie różnicowym często przyjmują kanciaste i prostokątne kształty (nasypy, wkopy). W związku z tworzeniem NMT przy użyciu interpolacji punktów metodą modelu trójkątowego TIN, w miejscach o niskim zagęszczeniu punktów NMT może być mniej wyraźny i przyjmować kształt „trójkątów". Obszary takie, wraz z miejscami, gdzie jeden z modeli zawiera braki lub pojedyncze, nienaturalnie „szpiczaste" wyniesienia terenu, wynikające prawdopodobnie ze złej klasyfikacji pojedynczych punktów, również wyeliminowano z RMT. Podczas eliminacji błędów z RMT warto również zwrócić uwagę na skarpy zalesionych i zakrzewionych osuwisk. Wartości dodatnie zwizualizowane na RMT (wyniesienia skarp) są z reguły błędem i mogą wynikać ze złego odfiltrowania danych na skutek wykonywania nalotów w różnym okresie wegetacji roślin. W takim przypadku punkty uznane za grunt mogą być punktami odbitymi od gęstej roślinności.

WYNIKI BADAŃ

Po uzyskaniu obrazu zmian wysokościowych związanych z ruchami masowymi obliczono litologiczny wskaźnik przemieszczeń, którego wartości dla poszczególnych wydzieleń przedstawiono w tabeli 1.

W okresie 2010–2013 największym współczynnikiem przemieszczeń charakteryzowały się stoki zbudowane z utworów cienkoławicowych, głównie fliszu łupkowo-piaskowcowego. Na uwagę zasługuje wysoka wartość wskaźnika obliczonego dla gruboławicowych piaskowców ciężkowickich. W badanym rejonie utwory te tworzą dwa poziomy pomiędzy łupkami pstrymi (Cieszkowski, 1992). Dociążenie piaskowców przez infiltrującą wodę może powodować uruchomienie zsuwów rozwiniętych na podścielających je łupkach pstrych, co ze względu na masywną strukturę piaskowców prowadzi do wielkoskalowych deformacji. Dodatkowo, ze względu na większą frakcję ziaren oraz mniej zbitą strukturę niż np. piaskowce magurskie, średnio i gruboziarniste, piaskowce ciężkowickie są stosunkowo łatwo przepuszczalne oraz łatwo nasiąkliwe.

Litologiczny wskaźnik przemieszczeń obliczony dla okresu 2013–2018, pomimo dłuższego okresu porównawczego, jest znacznie niższy. Podobnie jak w pierwszym okresie największe wartości uzyskano dla stoków zbudowanych z fliszu drobnorytmicznego. W tym okresie piaskowce ciężkowickie, podobnie jak inne utwory gruboławicowe charakteryzowały się znacznie niższym współczynnikiem przemieszczeń.

Wyniki jednoznacznie wskazują na wysoką podatność na przemieszczenia warstw hieroglifowych płaszczowiny śląskiej. Na uwagę zasługuje fakt wyraźnej zmiany pozycji utworów gruboławicowych w zależności od okresu, a właściwie od intensywności opadów w danym okresie. Co ciekawe, szersze badania dynamiki rozwoju osuwisk w rejonie Jeziora Rożnowskiego (Wódka, 2022) pokazały, że po katastrofie osuwiskowej największą tendencję do poszerzania granic, miały osuwiska rozwinięte w utworach gruboławicowych (m.in. piaskowcach ciężkowickich), odwrotny trend miał miejsce w okresach późniejszych, w których sumy opadów były znacznie niższe.

DYSKUSJA

Metody pozyskiwania danych ALS, jak wiele nowoczesnych metod, z biegiem lat stają się tańsze i bardziej dostępne. Zachęca to do badań rozwoju osuwisk na dużych obszarach z wykorzystaniem RMT. Przy tego rodzaju badaniach, szczególnie w Karpatach, warto wykorzystać litologiczny wskaźnik przemieszczeń. Określa on ile m^3 przemieszczonych gruntów przypada na m^2 danego wydzielenia litologicznego. Litologia ma istotny wpływ na rozwój

Tab. 1. Porównanie wskaźnika przemieszczeń dla dwóch okresów
Table 1. Comparison of displacement index for two periods

Wydzielenie ***Lithological unit***	**Wskaźnik przemieszczeń 2010–2011/2013 (ranking)** ***Displacement index 2010–2011/2013 (ranking)***	**Wskaźnik przemieszczeń 2011/2013–2018 (ranking)** ***Displacement index 2011/2013–2018 (ranking)***
Piaskowce i łupki warstwy hieroglifowe (śl) *Sandstones and shales – Hieroglyphic Beds (śl)*	0,072 (1)	0,036 (1)
Łupki z wkładkami piaskowców – łupki górne warstw istebniańskie górne (śl) *Upper Istebna shales (śl)*	0,057 (2)	0,03 (2)
Piaskowce i łupki – piaskowce ciężkowickie (śl) *Ciężkowice sandstones (śl)*	0,054 (3)	0,014 (8)
Piaskowce i łupki – warstwy inoceramowe (m) *Sandstones and shales – Inoceramus Beds (m)*	0,048 (4)	0,02 (6)
Łupki, piaskowce, rogowce, margle, zlepieńce – warstwy menilitowe (śl) *Shales, sandstones, cherts – Menillite Beds (śl)*	0,046 (5)	0,025 (4)
Piaskowce i łupki warstwy krośnieńskie (g) *Sandstones and shales – Krosno Beds (g)*	0,042 (6)	0,02 (6)
Łupki pstre (śl) *Variegated shales (śl)*	0,034 (7)	0,026 (3)
Łupki pstre (m) *Variegated shales (m)*	0,025 (8)	0,021 (5)
Piaskowce i łupki warstwy krośnieńskie (śl) *Sandstones and shales – Krosno Beds (śl)*	0,015 (9)	0,001 (10)
Łupki, rogowce, piaskowce warstwy grybowskie (g) *Shales, cherts, sandstones – Grybów Beds (g)*	0,013 (10)	0,005 (9)
Łupki i piaskowce warstwy krośnieńskie (śl) *Shales and sandstones – Krosno Beds (śl)*	0,011 (11)	0,001 (10)

m – płaszczowina magurska / *Magura Nappe*; śl – płaszczowina śląska / *Silesian Nappe*; g – płaszczowina grybowska / *Grybów Nappe*

osuwisk karpackich, dlatego litologiczny wskaźnik przemieszczeń stanowi swego rodzaju element oceny podatności stoków na osuwanie. Pozwala on stwierdzić na ile podatne na deformacje jest dane wydzielenie litologiczne.

Wdrożenie obliczeń objętości zagłębień i wypiętrzeń w badaniach podatności osuwiskowej ma istotne znaczenie i umożliwia wskazanie nowych problemów, których nie można byłoby określić za pomocą stosunków powierzchniowych (np. obliczając stosunek powierzchni uaktywnionych fragmentów osuwisk do powierzchni wydzielenia litologicznego). W przypadku stref aktywnych o takiej samej powierzchni, znajdujących się na dwóch różnych osuwiskach, może mieć miejsce następująca sytuacja: na pierwszym osuwisku wystąpią niewielkie deformacje powodujące pęknięcia kilku budynków, podczas gdy na dru gim osuwisku dojdzie do całkowitego zawalenia się wszystkich budynków w obrębie aktywnej strefy. Mimo tych samych powierzchni uaktywnień, w przypadku drugim nastąpi wzrost litologicznego wskaźnika przemieszczeń.

Obliczony wskaźnik przemieszczeń dla rejonu Jeziora Rożnowskiego pozwolił stwierdzić, że podatność stoków na deformacje w wyniku osuwania jest zmienna i w dużej mierze zależna od ilości opadów atmosferycznych. Te same stoki mogą okazać się bardziej lub mniej podatne na przemieszczenia od innych, w zależności od ilości i intensywności opadów. W przypadku tego regionu po wystąpieniu katastrofalnych opadów bardzo podatne na przemieszczenia okazały się stoki zbudowane z piaskowców ciężkowickich, podczas gdy w okresach suchszych utwory te nie miały istotnego znaczenia. Bez względu na okres najbardziej podatne na przemieszczenia okazały się natomiast utwory warstw hieroglifowych płaszczowiny śląskiej. Wysoka podatność tych utworów obliczona na podstawie wskaźnika litologicznego jest zgodna z obserwacjami Wojciechowskiego i Pyrca (2016), którzy obliczyli podatność osuwiskową dla tego rejonu metodą Weight of Evidence (Bonham-Carter i in., 1989), uwzględniając czynniki takie jak: nachylenie stoków, odległość od dyslokacji tektonicznych, kierunek ekspozycji, litologia i akumulacja spływu. Wynikiem obliczeń była mapa, na której najbardziej podatne obszary obejmowały stoki zbudowane z warstw hieroglifowych.

W trakcie obliczeń objętości powierzchniowych przemieszczeń mas skalnych uwagę zwraca zróżnicowany bilans obniżeń i wypiętrzeń w obrębie jednego wydzielenia litologicznego. Dla większości wydzieleń objętość obniżeń była nieco większa od objętości wypiętrzeń lub wartości te były zbliżone. Odwrotny trend obserwowano w piaskowcach i łupkach warstw inoceramowych, warstwach menilitowych, piaskowcach i łupkach warstw krośnieńskich i łupkach pstrych płaszczowiny śląskiej. Dla okresu 2013–2018, oprócz wyżej wymienionych, wyższą sumą objętości wypiętrzeń charakteryzowały się łupki górne warstw istebniańskich górnych płaszczowiny śląskiej. Zróżnicowany bilans obniżeń i wypiętrzeń jest związany z różnymi mechanizmami rozwoju poszczególnych osuwisk, a co za tym idzie z różnym typem osuwisk. Można przypuszczać, że niektóre zsuwy translacyjne będą charakteryzować się większym wypiętrzeniem terenu w dolnej części niż obniżeniem w rejonie skarpy. Należy mieć na uwadze, że RMT daje możliwość prześledzenia tylko przemieszczeń powierzchniowych, a nie przemieszczeń całego materiału koluwialnego. Kolejną przyczyną różnic między wartościami objętości wypiętrzeń i obniżeń jest fakt, że osuwiska często wykraczają poza granicę jednego wydzielenia litologicznego. W takim przypadku strefa odkucia może znajdować się np. w warstwach menilitowych, a strefa akumulacji w warstwach hieroglifowych. Najbardziej narażone na zróżnicowane wartości są wydzielenia, których wychodnie są powszechne, ale zajmują niewielkie powierzchnie. W przypadku rejonu Jeziora Rożnowskiego były to np. łupki pstre, występujące w wąskich „pasach", w których różnica między wypiętrzeniami a obniżeniami była blisko dwukrotna.

WNIOSKI

Litologiczny wskaźnik przemieszczeń jest istotnym elementem uzupełniającym ocenę zagrożeń osuwiskowych, przydatnym zwłaszcza na dużych obszarach o zróżnicowanym podłożu litologicznym.

Podatność stoków na osuwanie jest zmienna i zależna od ilości opadów. Litologiczny wskaźnik przemieszczeń pozwala ocenić, które wydzielenie jest najbardziej podatne na przemieszczenia powierzchniowe i w jakich warunkach. Na jego podstawie można przewidzieć dynamikę rozwoju osuwisk na stokach o różnym podłożu litologicznym w zależności od ilości opadów atmosferycznych.

Wykorzystanie zarówno RMT, jak i litologicznego wskaźnika przemieszczeń w badaniu osuwisk pozwala na ocenę współczesnej podatności osuwiskowej związanej z obecnie panującymi warunkami klimatycznymi.

W rejonie Jeziora Rożnowskiego najbardziej podatne na deformacje osuwiskowe są stoki zbudowane z warstw hieroglifowych oraz łupków górnych warstw istebniańskich górnych. W przypadku wystąpienia katastrofalnych opadów za zagrożone należy uznać stoki zbudowane z piaskowców ciężkowickich i to w tych utworach należy spodziewać się największych wartości przemieszczeń (choć obejmujących mniejsze obszary).

Autor składa podziękowania recenzentom dr. hab. Pawłowi Dobakowi oraz dr. Zbigniewowi Perskiemu za poświęcony czas oraz cenne sugestie i wskazówki, które wpłynęły na ostateczną wersję artykułu.

LITERATURA

ALLEMAND P., DELACOURT Ch., GASPERINI D., KASPERSKI J., POTHERAT P. 2011 – Thirty Years of Evolution of the Sedrun Landslide (Swisserland) from Multitemporal Orthorectified Aerial Images, Differential Digital Terrain Models and Field Data. Inter. J. Remote Sens. Appl., 5: 30–36.

BOBER L. 1984 – Rejony osuwiskowe w polskich Karpatach fliszowych i ich związek z budową geologiczną regionu. Biul. Inst. Geol., 340: 115–158.

BOBER L., ZABUSKI L. 1993 – Flysch slope classification from viewpoint of the landslide prediction. [W]: Anafnostopoulos A. i in. (red.), Geotechnical Engineering of Hard Soils – Soft Rocks. Proceedings of an International Symposium under the auspices of the International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, the International Association of Engineering Geology and International Society for Rock Mechanics, 20–23 September 1993, Athens, Greece: 1065–1072.

BONHAM-CARTER G.F., AGTERBERG F.P., WRIGHT D.F. 1989 – Weights of Evidence Modeling: A New Approach to Mapping Mineral Potential. [W]: Agterberg F.P., Bonham-Carter G.F. (red.), Statistical Applications in the Earth Sciences. Canad. Govern. Publ. Centre, Ottawa: 171–183

BORKOWSKI A., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WÓJCIK A. 2012 – LiDAR and SAR Data Application for Landslide Study In Carpathians Region (Southern Poland). Proceedings of the XXII Congress of the International Society of Photogrammetry and Remote Sensing. Melbourne, 25 August–1 September 2012.

BURNS W., COE J.A., KAYA B.S. 2010 – Analysis of Elevation Change Detected from Multi-Temporal LiDAR Surveys in Forested Landslide Terrain in Western Oregon. Environ, Eng. Geosci., 4: 315–341.
BURTAN J., CIESZKOWSKI M., ŚLĄCZKA A., ZUCHIEWICZ W. 1991 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski w skali 1 : 50 000, ark. Męcina (1018). Nar. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
BURTAN J., SKOCZYLAS-CISZEWSKA K. 1964 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Męcina (bez utworów czwartorzędowych) wydanie tymczasowe. Nar. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
CIESZKOWSKI M. 1992 – Strefa Michalczowej – nowa jednostka strefy przedmagurskiej w Zachodnich Karpatach Fliszowych i jej geologiczne otoczenie. Wydaw. AGH, Kraków.
CIESZKOWSKI M., KOSZARSKI A., LESZCZYŃSKI S., MICHALIK M., RADOMSKI A., SZULC J. 1987 – Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski 1 : 50 000, ark. Ciężkowice. Wydaw. Geol., Warszawa.
DAEHNE A., CORSINI A. 2012 – Kinematics of active earthflows revealed by digital image correlation and DEM subtraction techniques applied to multi-temporal LiDAR data. Earth Surf. Processes Landf., 38: 640–654.
DŁUGOSZ M. 2011 – Podatność stoków na osuwanie w polskich Karpatach fliszowych. Pr. Geogr., 230. IGiPZ PAN.
GIL E. 1997 – Meteorological and hydrological conditions of landslides, Polish Flysch Carpathians. Stud. Geomorph. Carpath.-Balcan., 31: 143–157.
JABOYEDOFF M., OPPIKOFER T., ABELLÁN A. i in. 2012 – Use of LIDAR in landslide investigations: a review. Nat. Hazards, 61: 5–28.
KAMIENIARZ S. 2021 – Predykcja zagrożenia osuwiskowego miasta Krakowa z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych i metod geostatystycznych. Rozprawa doktorska. Nar. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
KAMIŃSKI M. 2012 – Mapa podatności osuwiskowej w skali regionalnej – przykłady z doliny Sanu na Pogórzu Dynowskim. Biul. Państw. Inst. Geol., 452: 109–118.
KAMIŃSKI M., ZIENTARA P. 2017 – Geophysical Model and Displacement of Active Landslide – an example from Jastrzębia Góra Cliff (Northen Poland). [W]: Mikoś M., Arbanas Ż, Yin Y., Sassa K. (red.), Advancing Culture of Living with Landslides: Vol. 3. Springer International Publishing, Switzerland.
KARWACKI K., WOJCIECHOWSKI T. 2014 – Ruchy masowe w świetle danych LiDAR. Osuwiska pod Lupą. Geodeta, 10: 26–28.
LATO M.J., HUTCHINSON D.J., GAUTHIER D., EDWARDS T., ONDERCIN M. 2014 – Comparison of airborne laser scanning, terrestrial laser scanning, and terrestrial photogrammetry for mapping differential slope change in mountainous terrain. Canad. Geotech. J., 52: 1–12.
MARGIELEWSKI W. 2001 – O strukturalnych uwarunkowaniach rozwoju głębokich osuwisk – implikacje dla Karpat fliszowych. Prz. Geol., 49 (6): 515–525.
MARGIELEWSKI W. 2004 – Typy przemieszczeń grawitacyjnych mas skalnych w obrębie form osuwiskowych polskich Karpat fliszowych. Prz. Geol., 52 (7): 603–614.
MARSHALL M.S. 2016 – Slope Failure Detection through Multi-temporal Lidar Data and Geotechnical Soils Analysis of the DeepSeated Madrone Landslide, Coast Range, Oregon. Dissertations and Theses. Paper, 2656.
MORA O.E., LENZANO M.G., TOTH Ch.K., GREJNER-BRZEZINSKA D.A., FAYNE J. 2018 – Landslide Change Detection Based on Multi-Temporal Airborne LiDAR-Derived DEMs. Geosciences, 8: 1–19.
MROZEK T. 2013 – Zagrożenie i ryzyko osuwiskowe w rejonie Szymbarku (Beskid Niski). Pr. Państw. Inst. Geol., 199: 5–40.
OZIMKOWSKI W., RUBINKIEWICZ J., ŚMIGIELSKI M., KONON A. 2010 – Metodyka prac analitycznych i kartograficznych w problematyce osuwisk karpackich w Polsce. Wydaw. Liber, Warszawa.
PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T., WÓJCIK A., BORKOWSKI A. 2014 – Monitoring of landslide dynamics with LIDAR, SAR interferometry and photogrammetry case study of Kłodne Landslide, Southern Poland. Proceedings of World Landslide Forum, 3, 2–6 June 2014, Beijing 4: Discussion Session: 200–204.
RYCIO E. 2018 – Geologiczne uwarunkowania rozwoju osuwisk w rejonie Krynicy-Zdroju. Prz. Geol., 66: 294–302.
STARKEL L. 1996 – Geomorphic role of extreme rainfalls in the Polish Carpathians. Stud. Geomorph. Carpath.-Balcan., 30: 31–38.
THIEL K. 1980 – Mechanika skał w inżynierii wodnej. PWN, Warszawa.
VENTURA G., VILARDO G., TERRANOVA C., BELLUCCI SESSA E. 2013 – 4D Monitoring of Active Landslides by Multi-Temporal Airborne LiDAR Data [W]: Margottini C., Canuti P., Sassa K. (red.), Landslide Science and Practice Vol. 2: Early Warning, Instrumentation and Monitoring. Springer Berlin Heidelberg.
VERBOVSEK T., KOCEVAR M., BENKO I., MACEK M., PETKOVSEK A. 2017 – Monitoring of the Stogovce Landslide Slope Movements with Geasense GNSS Probes, SW Slovenia [W]: Mikoś M., Arbanas Ż., Yin Y., Sassa K. (red.), Advancing Culture of Living with Landslides: Vol. 3. Springer International Publishing, Switzerland.
WOJCIECHOWSKI T., BORKOWSKI A., PERSKI Z., WÓJCIK A. 2012 – Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk – przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne). Prz. Geol., 60 (2): 95–102.
WOJCIECHOWSKI T., PERSKI Z., WÓJCIK A., NESCIERUK P., BORKOWSKI A. 2013 – Monitoring of Landslide Dynamics with SAR Interferometry and LiDAR. Case Study of Klodne Landslide (Southern Poland), Living Planet Symposium, Edinburgh, 9–13 September 2013.
WOJCIECHOWSKI T., PYRC R. 2016 – Czynniki wpływające na aktywność osuwisk rejonu Gródka nad Dunajcem w 2010 roku. III Polski Kongres Geologiczny. Mat. konf., 432–434.
WOJCIECHOWSKI T., WÓJCIK A. 2015 – Podatność i zagrożenia osuwiskowe na fragmencie wschodniego obrzeżenia Jeziora Rożnowskiego w świetle analiz różnicowych LIDAR. Ogólnopolska Konferencja O!suwisko 19–22 maja 2015, Wieliczka. Mat. konf., 79–81.
WÓDKA M. 2020a – Ocena aktywności wybranych osuwisk w rejonie Jeziora Rożnowskiego w świetle badań terenowych oraz analiz różnicowych modeli terenu. Prz. Geol., 68 (1): 60–68.
WÓDKA M. 2020b – Uwarunkowania rozwoju osuwisk w rejonie Jeziora Rożnowskiego w świetle danych z lotniczego skaningu laserowego (ALS). Rozprawa doktorska. Nar. Arch. Geol. Państw. Inst. Geol., Warszawa.
WÓDKA M. 2022 – Conditions of landslide development during the last decade in the Rożnów Dam-Lake region (Southern Poland) based on Airborne Laser Scanning (ALS) data analysis. Geol. Quart., 66: 4.
WÓJCIK A. 1997 – Osuwiska w dorzeczu Koszarawy – strukturalne i geomorfologiczne ich uwarunkowania (Karpaty Zachodnie, Beskid Żywiecki). Biul. Państw. Inst. Geol., 376: 5–42.
WÓJCIK A., PERSKI Z., WOJCIECHOWSKI T. 2012 – Kłodne. [W]: Chowaniec J., Wójcik A. (red.), Osuwiska w województwie małopolskim. Atlas – przewodnik. Departament Środowiska, Rolnictwa i Geodezji Urzędu Marszałkowskiego Województwa Małopolskiego, Zespół Geologii, Kraków.
WÓJCIK A., ZIMNAL Z. 1996 – Osuwiska wzdłuż doliny Sanu między Bachórzcem a Rzeczpolem (Karpaty, Pogórze Karpackie). Biul. Państw. Inst. Geol., 374: 71–92.
ZABUSKI L., THIEL K., BOBER L. 1999 – Osuwiska we fliszu Karpat polskich: Geologia, modelowanie, obliczenia stateczności. Wydaw. IBW PAN, Gdańsk.
ZIĘTARA T. 1974 – Rola osuwisk w modelowaniu Pogórza Rożnowskiego (Zachodnie Karpaty fliszowe). Stud. Geomorph. Carpath.-Balcan., 8: 115–133.

Praca wpłynęła do redakcji 13.06.2022 r.
Akceptowano do druku 8.08.2022 r.