

**MONITOROWANIE ZMIAN UKSZTAŁTOWANIA POWIERZCHNI
TERENU SPOWODOWANYCH EROZJĄ WODNĄ Z WYKORZYSTANIEM
NAZIEMNEGO SKANOWANIA LASEROWEGO**

**MONITORING LAND SURFACE CHANGES CAUSED BY SOIL WATER
EROSION WITH TERRESTRIAL LASER SCANNING**

Magdalena Niemiec, Grzegorz Józków, Andrzej Borkowski

Institut Geodezji i Geoinformatyki, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu

SŁOWA KLUCZOWE: teledetekcja, naziemny skaning laserowy, erozja wodna gleb, NMT

STRESZCZENIE: Erozja wodna to proces polegający na stopniowym niszczeniu przez wodę wierzchniej, a czasem też głębszych warstw gleby poprzez wymywanie cząstek glebowych i składników mineralnych oraz ich transport. W Polsce, jak i w innych krajach europejskich, zjawisko to stanowi podstawowy czynnik obniżający jakość gleb i powodujący ich degradację. Istotę tego problemu podkreśla m.in. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego (Parlament Europejski, 2006), zobowiązująca państwa członkowskie do identyfikacji, na odpowiednim szczeblu, obszarów na których występują procesy erozyjne, bądź istnieje możliwość ich wystąpienia w przyszłości. W pracy podjęto problem monitorowania zjawiska erozji w sensie ilościowym – z wykorzystaniem techniki naziemnego skanowania laserowego. Obiekt badawczy obejmuje użytkowane rolniczo gleby lessowe położone na obszarze Wzgórz Trzebnickich. W pracy przedstawiono koncepcję oraz wyniki wstępnych badań terenowych, opracowane dane z naziemnego skaningu laserowego w postaci numerycznego modelu terenu wraz z ilościową oceną transportowanej masy gleby. Ponadto, wskazano kierunek dalszych prac oraz możliwości wykorzystania skaningu laserowego do monitorowania zmian ukształtowania powierzchni terenu spowodowanych erozją wodną oraz do weryfikacji stosowanych modeli teoretycznych erozji wodnej.

1. WSTĘP

Erozja wodna gleb jest zjawiskiem niszczenia wierzchniej warstwy gleby w skutek wymywania i przemieszczania jej cząstek przez wody opadowe (Lal, 2001). Negatywne skutki erozji wodnej uwidaczniają się głównie w gospodarce rolnej. W szczególności na

skutek zmywania wierzchniej warstwy ornej i wymywania składników pokarmowych z gleby następuje zmniejszenie się jakości i wysokości plonów. Rozwój przejmujących wody okresowe lub epizodyczne dolin suchych pociąga za sobą również systematyczne zmniejszanie się powierzchni użytków rolnych. Efekty erozji wodnej widoczne są również na terenach nie użytkowanych rolniczo. Wzrost sedymentacji rzecznej powoduje zamulenie zbiorników wodnych, a zwiększony spływ powierzchniowy jest bezpośrednią przyczyną wzrostu zagrożenia powodziowego.

Potrzeba monitorowania zjawiska erozji wodnej wyrażona została w licznych aktach prawnych, od uchwał na krajowych szczeblach gminnych, po dyrektywy Parlamentu Europejskiego (Parlament Europejski, 2006). Wobec zagrożenia degradacją gleb użytkowanych rolniczo państwa członkowskie UE zostały zobowiązane m.in. do zidentyfikowania oraz określenia zasięgu obszarów zagrożonych erozją, spadkiem materii organicznej lub takich, na których może wystąpić osuwanie się ziemi.

W klasyfikacji procesów erozyjnych możemy wyróżnić m.in.: procesy powierzchniowe, będące odpowiednikiem procesów spłukiwania i spływania, których dostrzegalnymi objawami są różnych rozmiarów bruzdy występujące po opadach deszczowych czy podczas tajania śniegów oraz liniowe, wywołane stopniowym pogłębianiem się żłobin i przekształcaniu w formy o charakterze dolin suchych.

Dotychczasowo w monitorowaniu zjawiska erozji powierzchniowej i liniowej wykorzystywano głównie specjalistyczne pomiary terenowe stosowane przez gleboznawców. Korzysta się również z modeli erozyjnych umożliwiających oszacowanie strat glebowych wywołanych tymi procesami. Ponadto stosowane są tradycyjne pomiary geodezyjne oraz nowe metody pomiarowe – zwłaszcza zdalne, takie jak zdjęcia lotnicze, obrazy satelitarne oraz, w ostatnim czasie, naziemny skaniny laserowy (Schmid *et al.*, 2004).

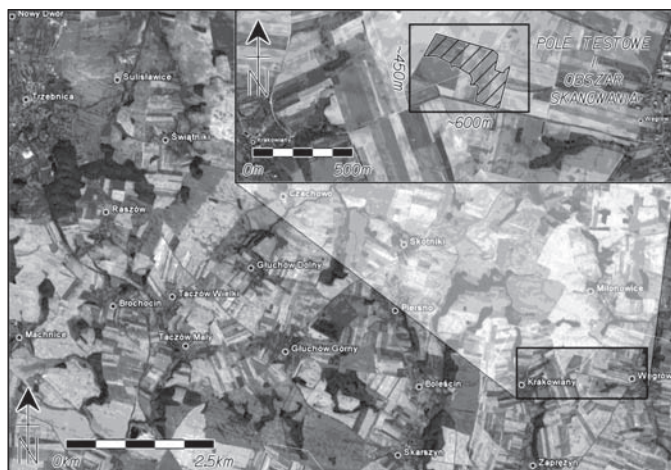
Celem podjętych prac jest weryfikacja możliwości i zakresu wykorzystania naziemnego skaniny laserowego do monitorowania zjawiska erozji liniowej. W pracy przedstawiono koncepcję badań oraz wstępne wyniki.

2. OBIEKT BADAWCZY

Obiekt badawczy położony jest na rozciągających się na północ od Wrocławia Wzgórzach Trzebnickich. Stanowią one środkową część Wału Trzebnickiego zamykającego od strony północnej Nizinę Śląską. Tereny te charakteryzują się silnym pofalowaniem, a swą rzeźbę zawdzięczają głównie zlodowaceniowi środkowopolskiemu oraz ostatniemu zlodowaceniowi bałtyckiemu. Ważnym procesem rzeźbotwórczym dla tego obszaru była akumulacja eoliczno-denudacyjna lessów, które obecnie pokrywają nie tylko Wzgórze Trzebnickie, ale również obszary sąsiadujące, np. Równinę Wrocławską.

Badania prowadzono na południowych stokach Wzgórz Trzebnickich w zlewni cieków Mielnica. Wybrany teren charakteryzuje się dominującą przewagą użytków rolnych oraz urozmaiconą rzeźbą. Gleby występujące na tym obszarze to głównie gleby pyłowe (utwory lessowe), które w sposób szczególnie narażone są na procesy degradacji – zwłaszcza erozję wodną (Niemiec, 2009). Obszar objęty badaniami znajduje się na południo-

wych stokach Wzgórz, charakteryzujących się największym stopniem akumulacji lessów oraz dosyć dużymi deniwelacjami terenu, sięgającymi 70 m. Powyższe uwarunkowania powodują nasilenie zjawiska erozji wodnej gleb na tym terenie. Do szczegółowych badań wytypowano fragment pola uprawnego znajdującego się na granicy powiatów: wrocławskiego (gmina Długołęka) i trzebnickiego (gmina Zawonia), leżącego po północnej stronie drogi gminnej łączącej wsie Krakowiany i Węgrów (Rys. 1). Wymiary pola testowego to około $600\text{ m} \times 450\text{ m}$. Na wybranym obiekcie zaobserwowano zmiany erozyjne w postaci żłobin, wypłukanych przez wody opadowe (Rys. 2, Rys. 3) oraz obszary, w których nastąpiła akumulacja niesionego przez wodę materiału glebowego.



Rys. 1. Lokalizacja pola testowego i obszaru skanowania, podkład zdjęciowy (Google, 2009).



Rys. 2. Fragment pola testowego ze żłobiną erozyjną (fot. G. Józków).

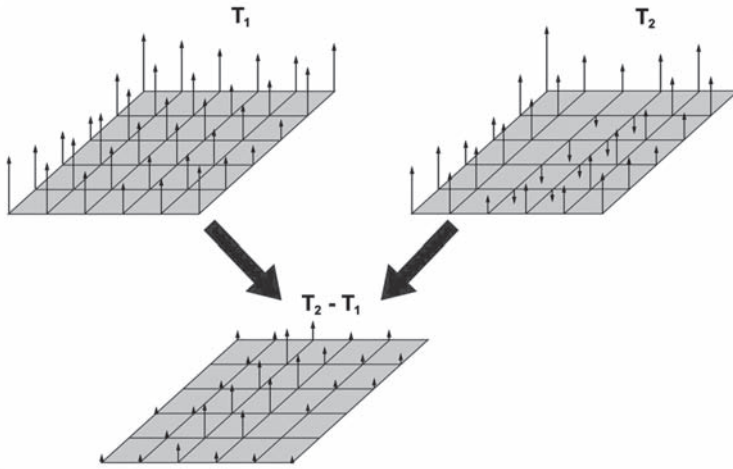


Rys. 3. Typowa żłobina erozyjna na obszarze badawczym (fot. G. Józków).

Z racji prowadzonej na wybranym polu testowym uprawy, konieczne było wytypowanie terminu badań, w którym liniowe formy erozyjne będą mogły być wyraźnie zaobserwowane. Badania terenowe wykonano wczesną wiosną (koniec marca) 2009 roku. Termin ten wybrano ze względu na fakt, iż w tym okresie pokrywa śnieżna zniknęła całkowicie z pól, a topniejące śniegi uformowały liniowe formy erozyjne. W wybranym terminie nie było również na polu żadnej uprawy oraz nie rozpoczęły się jeszcze prace agrotechniczne, zatem powierzchnia pola testowego i formy erozyjne obserwowane mogły być w dogodny sposób.

3. KONCEPCJA WYKORZYSTANIA SKANINGU NAZIEMNEGO (METODY BADAWCZE)

Koncepcję wykorzystania naziemnego skanowania laserowego w badaniach erozyjnych przedstawiono na rysunku (Rys. 4). Opiera się ona na wykonaniu skanowania obszaru zagrożonego procesami erozji wodnej gleb w kolejnych momentach czasowych T_i , zwłaszcza w okresach nasilenia zjawiska erozji liniowej, np. po ulewnych deszczach, czy w czasie wiosennych roztopów. Następnie budowane są Numeryczne Modele Terenu (NMT) dla kolejnych momentów czasu T_i . Obserwacja zmian ukształtowania powierzch-



Rys. 4. Koncepcja różnicowego NMT.

ni terenu wywołanych zjawiskami erozyjnymi możliwa jest na podstawie modelu różnicowego NMT_i – NMT_{i+1}.

Na podstawie modelu różnicowego możliwe jest obliczenie objętości mas transportowanych w interwale czasu ΔT , z obszaru $(n \cdot \Delta) \times (m \cdot \Delta)$,

$$V = \Delta \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m h_{ij} \quad (1)$$

gdzie:

Δ – wielkość oczka siatki modelu,

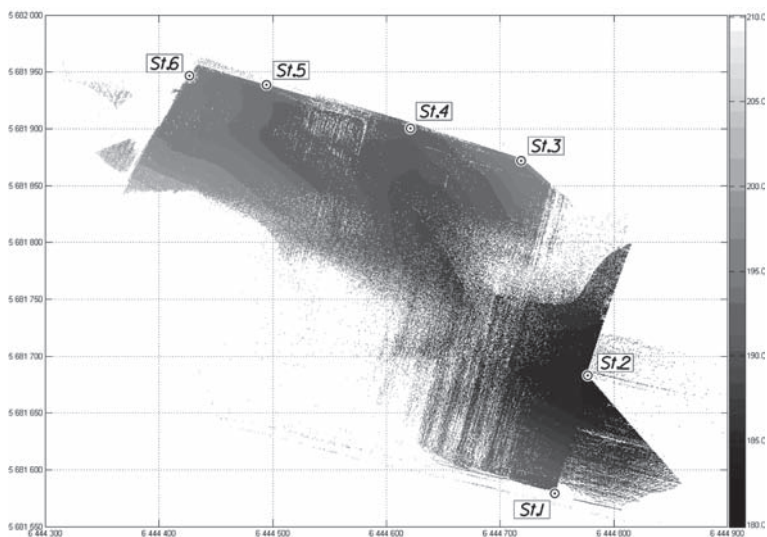
h_{ij} – różnica wysokości w kolejnych punktach siatki o liczbie kolumn i i wierszy odpowiednio m i n .

Na dokładność i rozdzielczość modelu różnicowego większy wpływ ma model o mniejszej rozdzielczości i gorszej dokładności. Dlatego też w celu zapewnienia najlepszych rezultatów badań modele wykonane w poszczególnych momentach czasu T_i powinny mieć jednakową rozdzielczość oraz dokładność. Przenosząc tę regułę na modele wykonane z danych naziemnego skaningu laserowego można sformułować założenia, że skanowanie najlepiej wykonywać skanerem tego samego typu lub o bardzo podobnych parametrach. Pod pojęciem podobnych parametrów należy rozumieć głównie te mające wpływ na dokładność, rozdzielczość i zasięg pomiaru. Jeżeli dane są połączeniem chmur punktów dla kilku stanowisk, wówczas skanowania należałoby prowadzić z tych samych stanowisk. Nie mniej ważnym jest również zastosowanie dla wszystkich NMT tego samego modelu interpolacyjnego.

Stanowiska skanowania ważne są również ze względu na możliwość nadania georeferencji numerycznym modelom terenu. Najlepszym rozwiązaniem staje się zatem wykorzystanie punktów poziomej osnowy geodezyjnej jako stanowisk skanera.

4. PRACE TERENOWE I WYNIKI BADAŃ

Na obszarze pola testowego (Rys. 1) założono osnowę pomiarową (Rys. 5). Punkty osnowy zostały zlokalizowane głównie w takich miejscach, które zapewniały dogodne skanowanie liniowych form erozyyjnych znajdujących się w pobliżu północnej krawędzi pola testowego. Starano się wybrać miejsca, które zapewniałyby również jak największą trwałość znaków, co umożliwi w przyszłości kolejne skanowania.



Rys. 5. Osnowa pomiarowa (St.1 – St. 6) na tle chmury punktów.

Współrzędne XYH założonych punktów osnowy pomierzone zostały techniką GPS-RTK (poprawki NAWGEO systemu ASG-EUPOS) z wykorzystaniem odbiornika Trimble R6. W ten sposób wyznaczone zostały współrzędne płaskie w Państwowym Układzie Współrzędnych Geodezyjnych 2000 (strefa 6) oraz wysokości w układzie Kronsztad 86 (odbiornik posiadał wbudowany model geoidy). Ze względu na zbyt duże błędy uzyskanych techniką GPS-RTK współrzędnych XY punktów (około 3 cm), zdecydowano się pomierzyć sieć kątowno-liniową opartą o punkty założonej osnowy pomiarowej. Utworzoną sieć pomierzono tachimetrem Leica Tc407 i dowiązano do istniejącej osnowy państwowej. W następstwie ścisłego wyrównania sieci otrzymano ostateczne współrzędne płaskie punktów osnowy. Wyznaczenie współrzędnych w PUWG 2000 i dowiązanie sieci do osnowy państwowej pozwoli na wznowienie osnowy geodezyjnej i dalsze badania nawet w przypadku zniszczenia wszystkich jej punktów. Z racji niedostępności państwowej osnowy wysokościowej w najbliższym sąsiedztwie badanego obiektu, zdecydowano wykorzystać trwale zastabilizowany punkt osnowy poziomej jako

reper roboczy. Pomierzoną techniką GPS-RTK wysokość tego repera uznano za stałą, a następnie dokonano pomiaru i wyrównania zamkniętego ciągu niwelacyjnego uzyskując ostateczne wysokości punktów.

Tab. 1. Wybrane parametry skanera Trimble GX (Trimble, 2009).

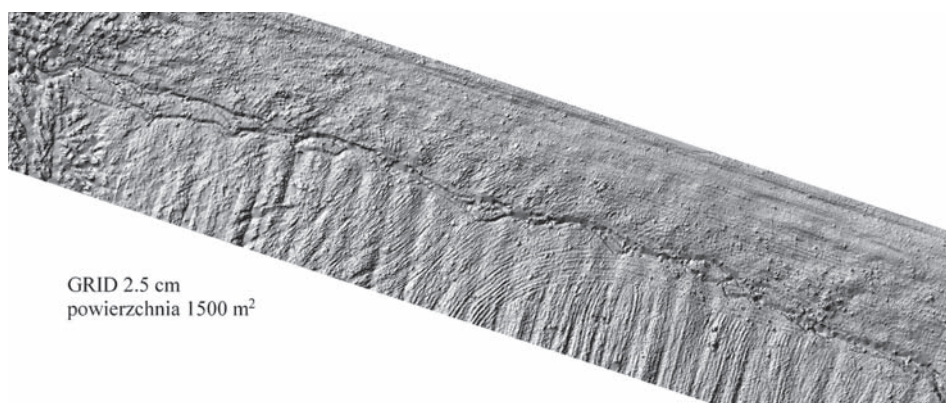
Typ lasera, długość fali (barwa)	impulsowy, 532 nm (zielony)
Pole widzenia	poziomo: 360° pionowo: 60°
Zasięg skanowania	do 350 m, standardowo 150 ÷ 200 m
Prędkość skanowania	do 5000 punktów na sekundę
Dokładność wyznaczenia pozycji punktu	12 mm @ 100 m
Dokładność wyznaczenia odległości	7 mm @ 100 m
Maksymalna rozdzielczość skanowania	poziomo: 200 000 linii @ 360° pionowo: 65 536 linii @ 60°
Obrazowanie cyfrowe	kolorowe wideo (768 × 576 pix.), zoom 5x

Skanowanie wykonano skanerem Trimble GX (parametry skanera przedstawia Tab. 1) z 6 stanowisk, a odstęp pomiędzy punktami skaningu położonymi w odległości 50 m od skanera, ustawiono na 4 cm. Sumarycznie zarejestrowano około $8.6 \cdot 10^6$ punktów (Rys. 5). Dla każdego stanowiska skanowania nad najbliższym punktem osnowy centrowano tarczę orientującą. Na żadnym stanowisku współrzędne punktów orientujących wyznaczone przez skaner nie różniły się od współrzędnych katalogowych tych punktów o więcej niż 10 mm. Można zatem uznać, że współrzędne punktów osnowy i skanowania wyznaczone zostały prawidłowo. Dodatkową zaletą takiego podejścia jest fakt, że każdy punkt skaningu posiada współrzędne w tym samym układzie, zatem możliwe było połączenie 6 chmur punktów w jedną całość bez wykorzystania specjalnego oprogramowania służącego do wzajemnego wpasowania skanów.

Etapem następującym po połączeniu danych ze wszystkich stanowisk była filtracja danych w celu usunięcia punktów nie będących odbiciem plamki lasera od powierzchni terenu – zaobserwowano występowanie tzw. *ghost points*. Na podstawie danych skaningu laserowego zbudowano dwa NMT: jeden nie uwzględniający zmian ukształtowania powierzchni terenu związanych z zachodzącym zjawiskiem erozji liniowej, a drugi z wyraźnie zaznaczonymi żłobinami erozyjnymi (Rys. 6). Ze względu na początkową fazę, planowanych na kilka lat badań i wykonanie tylko jednego pomiaru, oba modele terenu utworzone zostały na podstawie tylko jednego skanowania. NMT pozbawiony żłobin erozyjnych utworzony został z chmury punktów, z której manualnie usunięto punkty tworzące liniowe formy erozyjne. Wysokości modelu w miejscach, z których usunięto punkty, wyinterpolowane zostały na podstawie pozostałych punktów sąsiednich. Do interpolacji

NMT wykorzystano własne algorytmy wykorzystujące metodę aktywnych powierzchni (Borkowski, Jóźków, 2008).

Na podstawie różnicowego NMT (rozdzielczość przestrzenna 2.5 cm) wymodelowana została forma erozyjna w postaci żłobiny. Obliczono również ilość wymytego materiału glebowego, długość żłobiny i powierzchnię, którą zajmowała. Uzyskano następujące wartości: długość żłobiny 60 m, powierzchnia 60 m², ilość wymytego materiału glebowego 1.2 m³. Docelowo różnicowy NMT budowany będzie na podstawie danych z różnych sesji pomiarowych wykonanych minimum dwa razy w roku: wczesną wiosną i późną jesienią oraz dodatkowo po ulewnych deszczach. Na tej podstawie możliwe będzie określenie ilości materiału glebowego zarówno wymytego, jak również zdeponowanego.



Rys. 6. NMT z widoczną liniową formą erozyjną.

5. PODSUMOWANIE

Na obszarze Wzgórz Trzebnickich występują podatne na erozję wodną gleby lessowe. Zajmują one zwłaszcza tereny użytkowane rolniczo, dlatego monitorowanie zjawisk erozyjnych ma bardzo duże znaczenie ze względu na ich wpływ na degradację gleb.

W pracy przedstawiono koncepcję wykorzystania naziemnego skaningu laserowego do monitorowania zjawiska erozji liniowej oraz wstępne wyniki. Koncepcja ta polega na budowie szeregu czasowego numerycznych modeli, opisującego zmiany ukształtowania powierzchni terenu. Założeniem do tego jest wykonywanie skanowania z jednolitej osnowy geodezyjnej. Wstępne wyniki pokazują, że skaningu laserowego może zastąpić tradycyjne metody, wykorzystywane do określenia ilościowego intensywności zjawiska erozji powierzchniowej, a zwłaszcza liniowej.

Dalsze prace badawcze prowadzone będą na obiekcie w korelacji ze zjawiskami atmosferycznymi skutkującymi występowaniem bądź nasileniem zjawiska erozji. Ponadto, do rozwiązania pozostaje problem oceny dokładności zbudowanego różnicowego NMT

oraz obliczonej na jego podstawie ilości zerodowanego materiału glebowego. Otrzymane wyniki ilościowe posłużą do modelowania zjawiska erozji oraz do weryfikacji teoretycznych modeli erozyjnych.

6. LITERATURA

Borkowski A., Jóźków G., 2008. Aproksymacja powierzchni terenu na podstawie danych lotniczego skaningu laserowego z wykorzystaniem modelu aktywnych powierzchni. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 18a, s. 21-30.

Google, 2009: <http://earth.google.com/>

Lal R., 2001. Soil degradation by erosion. *Land Degradation & Development*, 12(6), s. 519-539.

Niemiec M., 2009. Satellite remote sensing for water erosion assessment. *Annals of Geomatics*, Vol. VII(2), s. 99-106.

Parlament Europejski, 2006. Wniosek dotyczący dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady ustanawiającej ramy dla ochrony gleby oraz zmieniającej dyrektywę 2004/35/WE, przedstawiony przez Komisję Wspólnot Europejskich; Bruksela, 22.9.2006 KOM(2006) 232; wersja ostateczna 2006/0086(COD).

Schmid T., Schack-Kirchner H., Hildebrand E., 2004. A case study of terrestrial laser scanning in erosion research: calculation of roughness indices and volume balance at a logged forest site. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XXXVI– 8/W2, s. 114-118.

Trimble, 2009: <http://www.trimble.com>

Obliczenia wykonano w systemie MATLAB, licencja nr 101979, grant obliczeniowy Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego.

MONITORING LAND SURFACE CHANGES CAUSED BY SOIL WATER EROSION WITH TERRESTRIAL LASER SCANNING

KEY WORDS: remote sensing, terrestrial laser scanning, soil water erosion, DTM

SUMMARY: Soil erosion is the process of systematic soil degradation through the action of an erosive agent. In the case of water erosion, the agent is water, which detaches and transports soil material and rinses minerals and nutrients causing soil depletion. This process causes serious economic problems, not only in Poland, but also in other European countries. Due to this fact, the problem of soil erosion by water is identified e.g. in EU directives which oblige EU member states to identify and delineate eroded areas or regions where the risk of soil erosion occurrence in the future is high. This study focuses on the quantitative monitoring of eroded lands using a technique for terrestrial laser scanning. The area under study is the agricultural region of the Trzebnickie Hills, covered with erosion-

sensitive loess soils. TLS data were acquired using a Trimble GX laser scanner in the test area (600 m × 450 m) which is mainly occupied by agricultural fields. The study design envisages building a differential Digital Terrain Model (DTM) based on two point clouds acquired within a certain time span. The resulting DTM provides information about the changes in topography resulting from the process of soil erosion by water. The study shows the preliminary results of the site research – DTMs modelled from laser scanning data with an estimate of soil loss. In addition, the future possibilities for using laser scanning in research on monitoring surface change are outlined.

mgr inż. Magdalena Niemiec
magdalena.niemiec@igig.up.wroc.pl
telefon: +48 71 3201952

mgr inż. Grzegorz Józków
grzegorz.jozkow@igig.up.wroc.pl
telefon: +48 71 3201951

dr hab. inż. Andrzej Borkowski, prof. nadzw.
andrzej.borkowski@igig.up.wroc.pl
telefon: +48 71 3205609