



**ŁUKASZ SARNOWSKI<sup>1</sup>, ZBIGNIEW PODGÓRSKI<sup>2</sup>, DARIUSZ BRYKAŁA<sup>3\*</sup>**

<sup>1</sup> Faculty of the Earth Sciences, Nicolaus Copernicus University, Toruń, Poland

<sup>2</sup> Institute of Geography, Kazimierz Wielki University, Bydgoszcz, Poland

<sup>3</sup> Institute of Geography and Spatial Organization, Polish Academy of Sciences, Toruń, Poland

\*corresponding author, D. Brykała, email: darek@geopan.torun.pl

## MODELOWANIE 3D ZASIĘGU I POŁA WIDOKU PRZY WYKORZYSTANIU ZDJĘĆ LOTNICZYCH

### 3D VIEWSHED MODELLING USING AERIAL PHOTOGRAPHS

#### Streszczenie

Artykuł ukazuje możliwość wykorzystania współczesnych i archiwalnych stereoskopowych zdjęć lotniczych w modelowaniu 3D zasięgu i pola widoku. Do identyfikacji elementów struktury krajobrazu modyfikujących zasięg i pole widoku zastosowano numeryczny model pokrycia terenu (DSM). Stworzono go na podstawie zdjęć lotniczych, wykorzystując stację fotogrametryczną DEPHOS. Modelowanie zasięgu widoku oparto o dwa modele pokrycia terenu w zależności od odległości od pozycji obserwatora znajdującego się na drodze. Badając widoczność w małej odległości od obserwatora zastosowano DSM o dużej rozdzielczości, a w dalszej odległości od obserwatora – DSM o mniejszej dokładności, co wydatnie usprawniło przetwarzanie danych i zmniejszyło czas przeprowadzania analiz. Uzyskane wyniki badań potwierdzają konieczność uwzględniania pokrycia terenu w analizie zasięgu i pola widoku, szczególnie zadrzewień i zabudowy. Opisana procedura może być pomocna w ilościowym ustaleniu stopnia zakrycia krajobrazu, a zatem może stanowić jeden z elementów obiektywnej oceny atrakcyjności wizualnej krajobrazu. Pozwala wyodrębnić na potrzeby waloryzacji krajobrazu fragmenty obszaru realnie przez niego postrzegane i oceniane.

#### Abstract

*This article discusses the possibility of using contemporary and archival stereoscopic aerial photographs in 3D viewshed modelling. The digital surface model (DSM) was used to identify the elements of the landscape structure modifying the viewshed. The model was created on the basis of aerial photographs, using the photogrammetric station DEPHOS. The viewshed modelling was based on two models of land cover, depending on the distance from the observer positioned on the road. In order to track visibility at a short distance from the observer, a high-resolution DSM was used, and further away from the observer – a DSM with lower accuracy, which significantly improved data processing and reduced the time of analysis. The obtained test results confirm the necessity of taking into account the surface of the area in viewshed analysis, especially tree stands and buildings. The described procedure may be helpful in quantifying the degree of landscape cover, and thus may be one of the elements of objectively assessing of the visual attractiveness of the landscape. It enables images of the area to be realistically perceived and assessed area for the needs of landscape valorisation.*

**Słowa kluczowe:** zasięg i pole widoku, zdjęcia lotnicze, numeryczny model pokrycia terenu (DSM), GIS

**Key words:** viewshed, aerial photographs, digital surface model (DSM), GIS

## WPROWADZENIE

Dla rzetelności badań percepcji krajobrazu istotne znaczenie ma precyzyjne odwzorowanie obszaru poddawanego analizie. Największych trudności przysparza wyznaczanie granic jednostek krajobrazowych. Od dokładności wykonania tych zadań zależy poprawność całej procedury badawczej. Z kolei, określanie zasięgu i pola widoku oraz wyznaczanie dominant w krajobrazie determinują możliwości jego rangowania – na przykład ocenę atrakcyjności krajobrazu. Ocena taka, jak na to wskazują wyniki badań ankietowych, zależy przede wszystkim od jego atrakcyjności wizualnej (Clay, Daniel, 2000; Pavlikakis, Tsihrintzis, 2006; Petrosillo i in., 2007; Junge i in., 2009; Arabatzis, Grigoroudis, 2010; Rogowski, 2009, 2012; Sarnowski i in., 2016). Zasięg widoku jest jednym z ważniejszych czynników, wpływających na strukturę pola widoku i w konsekwencji na ocenę zmienności krajobrazu (*Best Management Practices...*, 2013; Nutsford i in., 2015). W zmienności krajobrazu można upatrywać wyjaśnienia dużej satysfakcji i zadowolenia oceniających krajobraz (Oliver i in., 1997; Wirtz, Bateson, 1999; Wirtz i in., 2000; Bigné i in., 2005). Z kolei zasięg pola widoku wpływa na atawistyczne poczucie bezpieczeństwa wynikające z orientacji w terenie i kontrolowania otoczenia (Wojciechowski, 1986; Sevenant i Antrop, 2007).

Przyjęcie *Europejskiej Konwencji Krajobrazowej* (*European Landscape Convention*, 2000) pobudziło środowisko naukowe do badań nad jakością krajobrazu. Należy podkreślić, że już sama definicja krajobrazu zawarta w konwencji traktuje krajobraz jako obszar postrzegany przez ludzi. Zatem, wydaje się, że w pełni uzasadniona jest potrzeba wyznaczania granic zasięgu krajobrazu widocznego dla obserwatora, a w dalszej kolejności określanie jakości postrzeganego krajobrazu. Wykorzystanie zdjęć lotniczych w analizach 3D zasięgu i pola widoku otwiera nowe możliwości badawcze.

## CEL BADAŃ

Podstawowym celem artykułu jest wskazanie możliwości wykorzystania, zarówno współczesnych, jak i archiwalnych stereoskopowych zdjęć lotniczych w modelowaniu 3D zasięgu i pola widoku.

Zasięg widoku wyznacza się najczęściej w sposób zautomatyzowany, przy użyciu narzędzi

## INTRODUCTION

For the reliability of landscape perception studies, it is important to accurately reproduce the area being analysed. The greatest challenges are caused by the difficulty of precisely determining the boundaries of landscape units. The accuracy of the entire test procedure depends on the accuracy with which these tasks were carried out. In turn, determining the viewshed and dominants in the landscape makes it possible to quantitatively assess factors such as landscape attractiveness. This kind of assessment, as indicated by the results of the survey, depends primarily on the visual attractiveness of the landscape (Clay, Daniel, 2000; Pavlikakis, Tsihrintzis, 2006; Petrosillo et al., 2007; Junge et al., 2009; Arabatzis, Grigoroudis, 2010; Rogowski, 2009, 2012; Sarnowski et al., 2016). The range of viewing is one of the most important factors affecting the viewshed structure and, consequently, the assessment of landscape variability (*Best Management Practices...*, 2013; Nutsford et al., 2015). Landscape diversity is highly valued by landscape evaluators (Oliver et al., 1997; Wirtz and Bateson, 1999; Wirtz et al., 2000; Bigné et al., 2005). In turn, the scope of viewshed affects the atavistic sense of security resulting from orientation in the terrain and control of the environment (Wojciechowski, 1986; Sevenant, Antrop, 2007).

The adoption of the *European Landscape Convention* (2000) stimulated the scientific community to research landscape quality. It should be emphasised that the very definition of landscape included in the convention treats the landscape as an area perceived by people. Thus, it seems that the need to determine the boundaries of the landscape visible to the observer, as well as the determination of the quality of the perceived landscape, is fully justified. The use of aerial photographs in 3D viewshed analysis opens up new research opportunities.

## AIM OF THE RESEARCH

The main goal of the study is to indicate the possibility of using both contemporary and archival stereoscopic aerial photographs in 3D viewshed modelling.

The viewshed is usually determined in an automated way, using GIS tools based on the digital terrain model (DTM), omitting any elements limiting the view, such as buildings and forests. Due to the

GIS w oparciu o cyfrowy model terenu (DTM), z pominięciem elementów ograniczających widok, jak np. budynki i lasy. W związku z potrzebą identyfikacji elementów struktury krajobrazu modyfikujących zasięg i pole widoku, konieczne było wykorzystanie numerycznego modelu pokrycia terenu (DSM). Najdokładniejsze DSM uzyskuje się dzięki wykorzystaniu naziemnego i lotniczego skaningu laserowego (LiDAR) (por. Orlof, 2017; Piskorski, 2017), bądź stereoskopowych zdjęć lotniczych (por. Murgoitio i in., 2013). Dane z LiDAR pomimo wielu zalet cały czas nie pokrywają całości obszaru Europy i innych obszarów Ziemi. Z kolei, stereoskopowe zdjęcia lotnicze są dostępne dla okresu ostatnich 100 lat. Również rozwój dronów (UAV) i ich upowszechnianie się sprawia, że możliwym stało się wykonywanie stereoskopowych zdjęć lotniczych niemal każdego obszaru. DSM którym posłużono się w badaniach opisanych w niniejszym artykule stworzono na podstawie zdjęć lotniczych, poddanych analizie na stacji fotogrametrycznej DEPHOS.

Wadą opracowania DSM stworzonego na podstawie zdjęć lotniczych są: jego koszt, czasochłonność i pracochłonność. Dlatego, autorzy niniejszego opracowania do badań nad modelowaniem zasięgu widoku wykorzystali dwa modele pokrycia terenu: model o dużej rozdzielczości oraz model o mniejszej dokładności. W zależności od przyjmowanej na potrzeby analizy odległości od obserwatora można zmienić szczegółowość DSM. W artykule przedstawiono optymalną szerokość bufora od drogi, w którego wnętrzu – zgodnie z założeniem – DSM powinien mieć dużą rozdzielczość, a poza nim można korzystać z DSM o mniejszej dokładności. Takie podejście jest stosowane nie tylko w analizach krajobrazu, ale również na przykład w grafice komputerowej, gdzie dla zwiększenia wydajności komputera stosuje się tzw. „level of detail”, czyli poziom szczegółowości zależny od odległości.

## OBSZAR BADAŃ

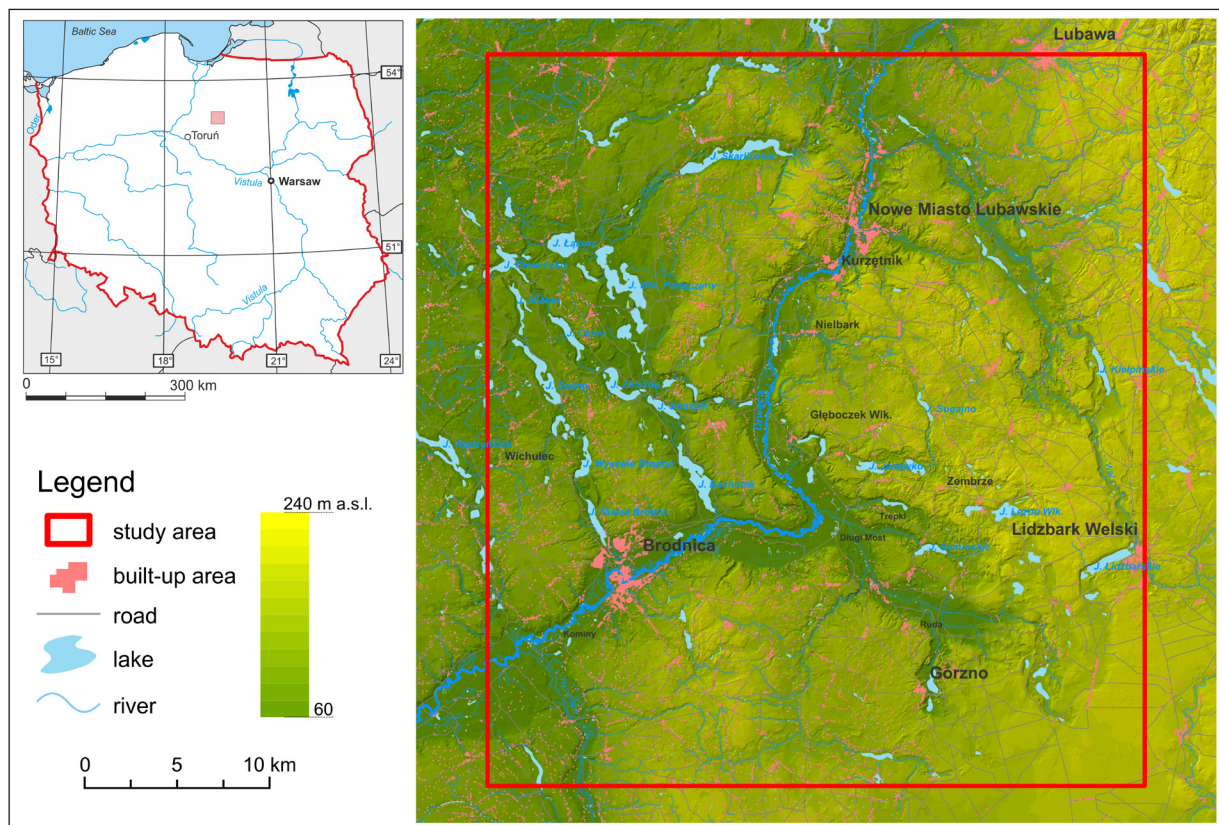
Obszar badawczy, na którym modelowano zasięg i pole widoku, znajduje się na granicy województw: kujawsko-pomorskiego i warmińsko-mazurskiego (ryc. 1). Jego powierzchnia wynosi 800 km<sup>2</sup>. Jest to teren nizinny, położony w strefie krajobrazu młodoglacjalnego, charakteryzującego się znacznym urozmaiceniem rzeźby terenu (Kot, 2015; Kot,

need to identify elements of the landscape structure modifying the viewshed, it was necessary to use the numerical surface model (DSM). The most accurate DSM is obtained through the use of terrestrial and aerial laser scanning (LiDAR) (see Orlof, 2017; Piskorski, 2017), or stereoscopic aerial photographs (see Murgoitio et al., 2013). Data from LiDAR, despite many advantages, does not cover the entire area of Europe and other areas of the Earth. However, stereoscopic aerial photographs are not only available for the last 100 years, but the development of drones (UAV) and their dissemination makes it possible to take stereoscopic aerial images of almost any area. The DSM which was used in the research described in this article was created on the basis of aerial photographs and analysed on the photogrammetric station DEPHOS.

The disadvantages of developing DSM on the basis of aerial photographs include high cost, time consumption and labour intensity. Therefore, the authors of this study used two surface models to study modelling the viewshed: a high resolution model and a less accurate model. Depending on the distance from the observer of the image taken for analysis, the detail of the DSM can be changed. The article presents the optimal width of the buffer from the road, within which – according to the assumption – the DSM should be of high resolution, while the DSM with lower accuracy should be used outside it. This approach is used not only in landscape analyses, but also, for example, in computer graphics, where for computer efficiency the 'level of detail' is adjusted, i.e. the level of detail depending on the distance.

## STUDY AREA

The research area on which the viewshed was modelled is located on the border of the Kujawsko-Pomorskie and Warmińsko-Mazurskie voivodeships (fig. 1). It is a lowland area of 800 km<sup>2</sup>, with a post-glacial landscape of significant terrain diversity (Kot, 2015; Kot, Leśniak, 2017). Differentiation of land elevation in this area amounts 130 m. Its highest value is recorded between the bottom of the Drwęca Valley and the level of moraine plateau. For the most part, it is an agricultural area (about 70%), but there are also large compact forest complexes. In the research area, the largest cities are Brodnica, Lidzbark Weliski, Nowe Miasto Lubawskie, Górzno and Lubawa,



Ryc. 1. Ukształtowanie terenu obszaru badawczego. Źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Landform of the study area. Source: own compilation

Leśniak, 2017). Deniwelacja terenu na tym obszarze wynosi 130 m. Największą wartość osiąga pomiędzy dnem doliny Drwęcy a poziomem wysoczyzny morenowej. W przeważającej większości jest to teren rolniczy (ok. 70 %), ale znajdują się tu również duże zwarte kompleksy leśne. Na obszarze badań największymi miejscowościami są miasta: Brodnica, Lidzbark Welski, Nowe Miasto Lubawskie, Górzno i Lubawa. Liczą one od 1 tys. do 30 tys. mieszkańców. Do analizy studium przypadku wybrano lokalną drogę kołową łączącą miasta Brodnicę i Górzno, wzdłuż której wytypowano losowo punkty obserwacyjne. Dla nich przeprowadzono modelowanie zasięgu i pola widoku. Droga ta przebiega przez obszary o różnym typie użytkowania, przez pola uprawne, lasy, łąki, wsie. Ponadto, przecina ona dwa parki krajobrazowe: Górzniensko-Lidzbarski Park Krajobrazowy i Brodnicki Park Krajobrazowy oraz Obszar Chronionego Krajobrazu Dolina Drwęcy.

the populations of which range from 1,000 to 30,000 residents. For the analysis of the case study, a local road connecting the towns of Brodnica and Górzno was selected, along which observation points were randomly selected. Viewshed modelling was carried out at each of these. This road runs across areas of various types of land use, namely arable fields, forests, meadows and villages. In addition, it crosses two landscape parks: the Górzno-Lidzbark Landscape Park and Brodnica Landscape Park, as well as the Drwęca Valley Protected Landscape Area.

## METODY BADAWCZE

Podstawową metodą badawczą zastosowaną w badaniach prezentowanych w niniejszym artykule jest modelowanie zasięgu i pola widoku na podstawie DSM uzyskanego ze stereoskopowych zdjęć lotniczych. Wykorzystano w tym celu stację fotogrametryczną DEPHOS w wersji 4.12.01 oraz oprogramowanie ArcGIS (moduł: *Spatial Analyst*). Wykorzystując stację fotogrametryczną wykonano pomiary wysokości obiektów wpływających na ograniczenie zasięgu i pola widoku na 77 modelach stereopar zdjęć lotniczych z lat 2009-2010 w skali 1:26 000, wykonanych z wysokości 4000 m kamerą analogową Carl Zeiss D-07745 Jena LC 1015. Zdjęcia zostały przetworzone na wersję cyfrową w rozdzielczości 17622x17021 (wielkość piksela wynosiła ok. 0,8 m). Uzyskane wyniki wysokości względnych zostały zaimportowane do środowiska GIS, gdzie DTM uzyskany z VMap L2 w skali 1:50 000 został wzbogacony o „wypiętrzone” obiekty ograniczające zasięg i pole widoku. Uzyskano w ten sposób DSM.

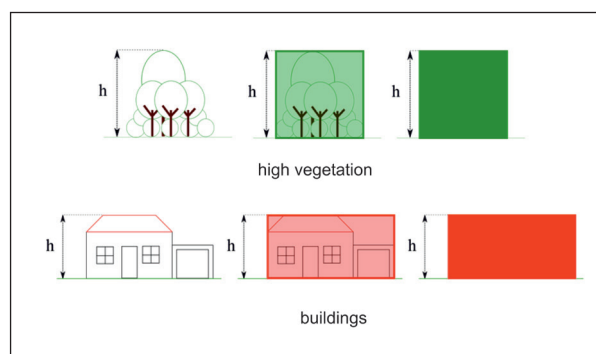
Szczegółowej digitalizacji na ortofotomapie zostały poddane obiekty mogące ograniczać zasięg widoku. Do obiektów tych zaliczono: obiekty architektoniczne (budynki mieszkalne i gospodarcze) oraz lasy, parki i zakrzaczenia (por. Sarnowski i in., 2013; Garnero, Fabrizio, 2015; Krøgli i in., 2015). H.A. Sander i S.M. Manson (2007) zastosowali w badaniach wykorzystujących DSM zuniifikowane wysokości i kształty poligonu dla wszystkich obiektów tego samego typu. Jednak zabudowa mieszkaniowa, jak i parcele leśne, oprócz zróżnicowanego kształtu powierzchni posiadają również różną wysokość. Zróżnicowanie wysokości obiektów związane jest m.in. z przybudówkami, geometrią dachów, a w przypadku roślinności wysokiej – z różnorodnością gatunkową i wiekiem roślin. Autorzy niniejszego artykułu postanowili, z jednej strony uwzględnić w swojej analizie wysokość każdego obiektu, ale z drugiej strony – zuniifikować wysokość pojedynczego obiektu i w konsekwencji nadać mu wysokość o wartości jego najwyższego punktu (ryc. 2). Przyjęcie tego typu uproszczenia wydatnie obniżyło czasochłonność i pracochłonność wykonywanych zadań na stacji fotogrametrycznej. Należy jednak pamiętać, że ma ono wpływ na uszczuplenie pola widoku.

E. Lange (1990) zauważył, że wysokość, z której jest obserwowany teren ma duże znaczenie podczas określania zasięgu i pola widoku. Dlatego też

## RESEARCH METHODS

The basic method used in the research presented in this article is viewshed modelling based on a DSM obtained from stereoscopic aerial photographs. The photogrammetric station DEPHOS version 4.12.01 and the ArcGIS software (*Spatial Analyst* module) were used for this purpose. Using the photogrammetric station, measurements of the height of objects influencing viewshed limitation were carried out on 77 stereopair models of aerial photographs taken in the years 2009-2010, from a height of 4,000 m, with an analogue camera (Carl Zeiss D-07745 Jena LC 1015), at a scale of 1:26,000. The photos were digitised with a resolution of 17,622 x 17,021 (the pixel size was approx. 0.8 m). The obtained results from equivalent heights were imported into the GIS environment, where the DTM obtained from the VMap L2 scale 1:50,000 was enriched with „elevated” objects limiting the viewshed. In this way the DSM was obtained.

Objects that may limit the viewshed were added to the detailed digitisation of the orthophotomap. These objects included architectural structures (residential and commercial buildings) as well as forests, parks and shrubs (cf. Sarnowski et al., 2013; Garnero, Fabrizio, 2015; Krøgli et al., 2015). H.A. Sander and S.M. Manson (2007) used unified polygon heights and shapes in their studies using DSM for all objects of the same type. However, housing developments and forest plots, in addition to the varied shape of the surface, also have different heights. Differences in the heights of objects can be related to building extensions, roof geometry, and in the case of high vegetation, to species diversity and plant age. The authors of this article decided



Ryc. 2. Unifikacja wysokości roślinności wysokiej i budynków do jednej wartości. Źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Shape unification of high vegetation and buildings to one value. Source: own compilation

ustalono w niniejszym opracowaniu stałą wysokość obserwatora wynoszącą 1,7 m. Odpowiada ona przeciętnej wysokości człowieka.

Wyznaczania pola i zasięgu widoku można dokonać wieloma narzędziami (m.in. Batty, 2001; Turner i in., 2001; Llobera, 2003). W niniejszym opracowaniu wykorzystano narzędzie viewshed, gdyż w połączeniu z systemami GIS umożliwia uzyskanie wykresu widoczności (porównaj: Ozimek i in., 2013), pomocnego w pogłębionych badaniach krajobrazu (Miller, 2001).

W kolejnym etapie analizy pola widoku wokół obserwatora wykorzystano ideę skali widoku (Arnot, Grant, 1981; de Floriani, Magillo, 1997). Autorzy niniejszego opracowania postanowili sprawdzić możliwość wykorzystania w jednej analizie wykresu widoczności dwóch połączonych ze sobą opracowań DSM o różnej dokładności (skali kartograficznej) i pochodzących z różnych źródeł. W najbliższym otoczeniu od obserwatora należy wykorzystywać DSM o wysokiej rozdzielczości. Zatem, przetestowano w jakiej odległości od obserwatora możliwe jest wykorzystanie bardziej zgeneralizowanych DSM, dostępnych np. w bazie danych VMap L2. Analizę przeprowadzono w różnych strefach w pasie 2 km od obserwatora na 13-kilometrowym fragmencie drogi pomiędzy Górzniem a miejscowością Brzozie (TA2, ryc. 3). Analiza dotyczyła następujących buforów od obserwatora znajdującego się na drodze: bufor 100 m, bufor 250 m, bufor 500 m, bufor 1000 m i bufor 2000 m (ryc. 4). Dla każdego z buforów obliczono procentowy udział obszaru widocznego z drogi. Dzięki tym działaniom można było wyznaczyć szerokość bufora, w którym dane o wysokiej rozdzielczości dotyczące zabudowy i roślinności wysokiej mają największy wpływ na ograniczenie zasięgu i pola widoku.

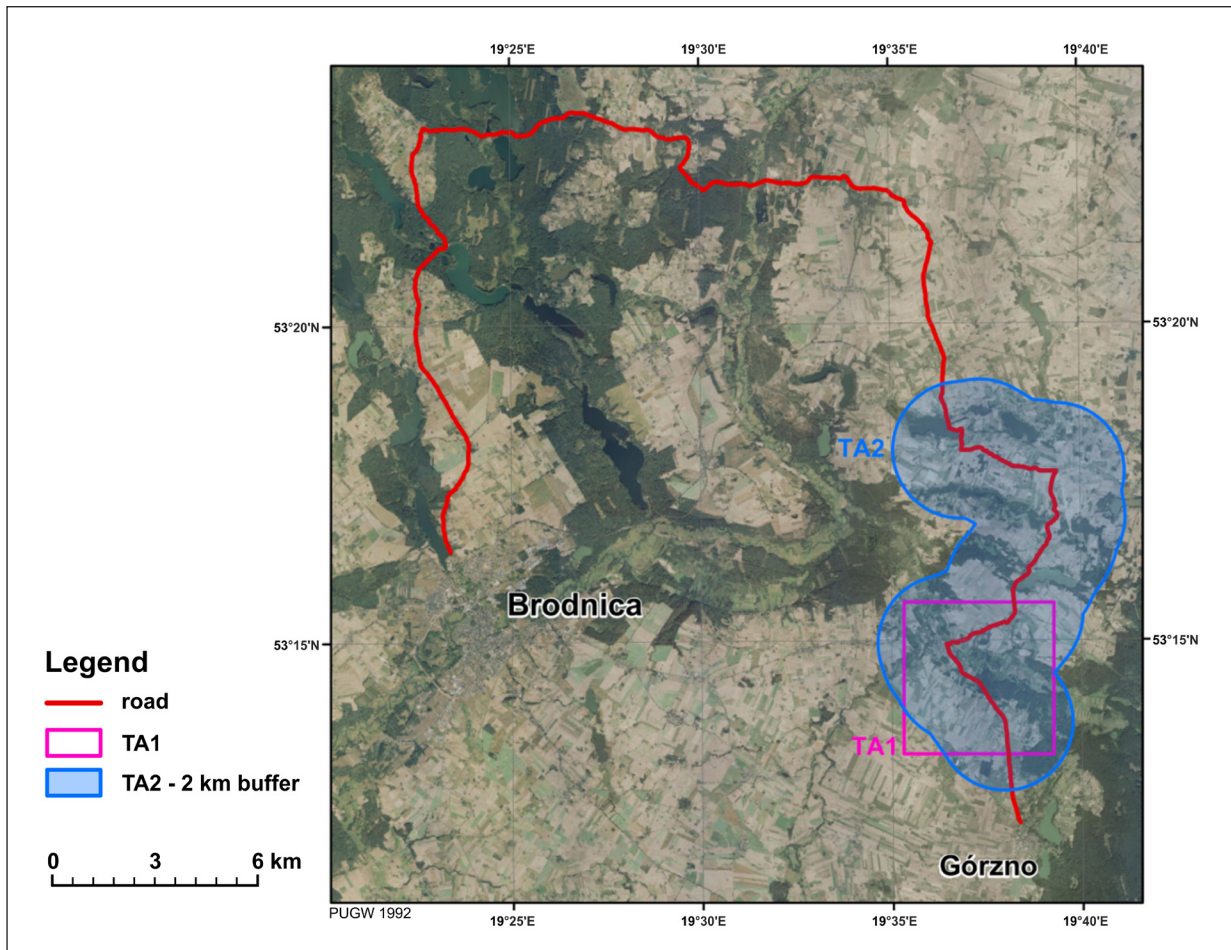
Wypracowana w toku powyższych działań procedura, dotycząca rozdzielczości DSM, posłużyła do określenia zasięgu i pola widoku dla całego analizowanego obszaru badań (ryc. 1 i 3) z drogi lokalnej pomiędzy Górzniem a Brodnicą. Wygenerowany model zasięgu i pola widoku w końcowym etapie poddano weryfikacji na podstawie zdjęć naziemnych wykonanych w terenie (Palmer, Hoffman, 2001). Fotografie o charakterze panoram pełnych (360°) wykonane dla punktów referencyjnych pozwoliły na ocenę dokładności modelowania.

to include the height of each object in the analysis, but also to unify the height of a single object and, consequently, allocate it the height based on its highest point value (fig. 2). The adoption of this type of simplification greatly reduced the time-consuming and labour-intensive nature of the tasks performed at the photogrammetric station. However, it should be remembered that this procedure had an impact on viewshed depletion.

E. Lange (1990) noted that the height from which the terrain is observed is of great importance when determining the viewshed. Therefore, a constant observer height of 1.7 m was established in this study. This corresponds to the average human height.

Viewshed determination can be conducted with many tools (incl. Batty, 2001; Turner et al., 2001; Llobera, 2003). This report uses the viewshed tool, because in combination with GIS systems, it enables a visibility graph to be obtained (cf. Ozimek et al., 2013), which is helpful in in-depth landscape studies (Miller, 2001).

In the next stage of the analysis of the viewshed around the observer, the concept of the view scale was used (Arnot, Grant, 1981; de Floriani, Magillo, 1997). The authors of this study decided to investigate the possibility of including two interconnected DSM studies with different levels of accuracy (cartographic scale) and coming from different sources in one analysis of the visibility graph. In the immediate vicinity of the observer, a high resolution DSM should be used. Thus, the distance from the observer at which it was possible to use a more generalised DSM, available for example in the VMap L2 database, was investigated. The analysis was carried out in various sections of the 2-km zone from the observer along a 13-km road stretch between Górzno and Brzozie (TA2, fig. 3). The analysis concerned the following buffers from the observer located on the road: 100-m, 250-m, 500-m, 1,000-m and 2,000-m (fig. 4). For each of the buffers, the percentage of the area visible from the road was calculated. These actions made it possible to determine the width of the buffer in which high resolution data on buildings and high vegetation have the greatest impact on limiting the viewshed.

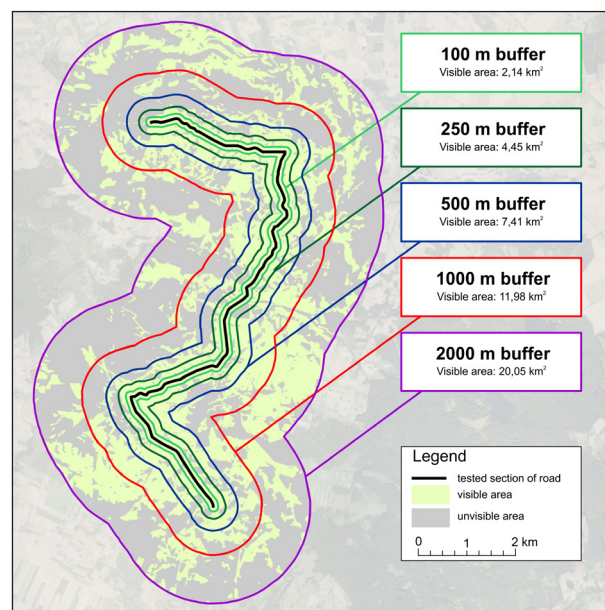


Ryc. 3. Ortofotomapa obszaru badawczego wraz z lokalizacją drogi pomiędzy Brodnicą a Górzniem, dla której modelowano zasięg i pole widoku. Objaśnienia: TA<sub>1</sub> – obszar testowy, dla którego przeprowadzono analizę zamiany DTM na DSM przy wykorzystaniu VMap L2 i zdjęć lotniczych; TA<sub>2</sub> – obszar testowy, obejmujący teren w buforze 2 km od drogi, dla którego analizowano optymalny stopień szczegółowości DSM. Źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Orthophotomap of the study area along with the location of the road between Brodnica and Górzno, for which the viewshed was modelled. Explanation: TA<sub>1</sub> – test area for which the DTM to DSM substitution analysis was performed using VMap L2 and aerial photographs; TA<sub>2</sub> – test area, covering the 2-km buffer from the road, for which the optimal detail level of the DSM was analysed. Source: own compilation

Ryc. 4. Analiza wielkości pola widoku w buforze 2 000 km od obserwatora znajdującego się na 13-kilometrowym odcinku drogi pomiędzy Górzniem a Brzoziem. Źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Analysis of the viewshed in the 2-km buffer from the observer located on the 13-km section of the road between Górzno and Brzozie. Source: own compilation



## WYNIKI BADAŃ

### Stworzenie modelu DSM

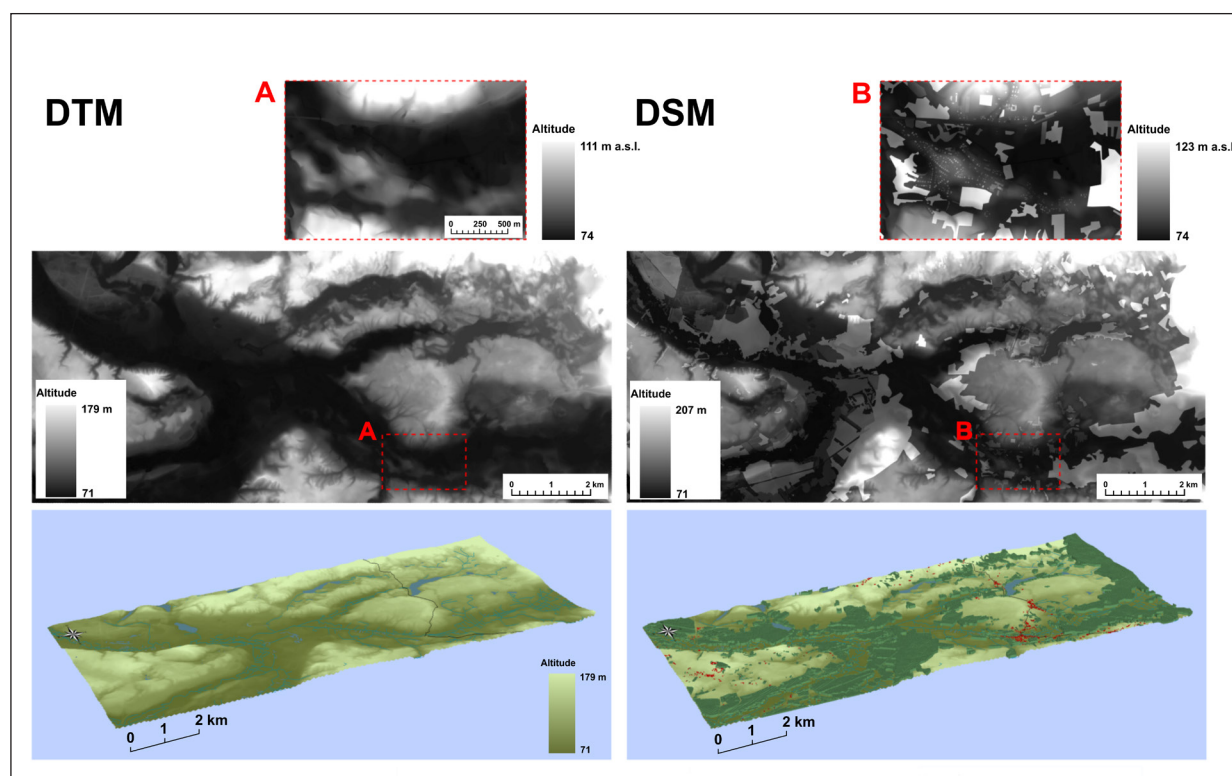
Na podstawie ortofotomapy obszaru badawczego, (ryc. 3) dokonano digitalizacji kształtu oraz pomiarów wysokości 4752 budynków i 1153 parceli leśnych. Uzyskane parametry pozwoliły na „wypiętrzenie” z DTM obiektów, które ograniczają zasięg i pole widoku (ryc. 5). Lasy są rozmieszczone głównie w NE i SW części badanego obszaru oraz w dolinie Drwęcy, przecinającej go z N na SW. Średnia wielkość obszaru zajętego przez jedną parcelę leśną wynosiła 10 km<sup>2</sup>. Ich wysokości względne zawierały się w przedziale od 15 m do 40 m. 83% wszystkich zdigitalizowanych budynków znajdowało się w bliskiej odległości (do 100 m) od analizowanej drogi. Ich wysokości zawierają się w przedziale od 2 do 15 m, a średnio 10 m. Taki przykład rozmieszczenia i wielkości budynków jest charakterystyczny dla wiejskich obszarów północnej Polski. W porównaniu do wyjściowej wersji DTM obszar, na którym zmodyfikowano parametry wysokościowe parceli leśnych i budynków wynosił 75 km<sup>2</sup> (50% całości obszaru TA1).

The DSM resolution procedure developed in the course of the above activities was used to determine the viewshed for the entire research area (figs 1 and 3) from the local road between Górzno and Brodnica. In the final stage of the research, the generated viewshed model was verified on the basis of terrestrial images taken in the field (Palmer, Hoffman, 2001). Full panoramic photographs (360°) taken at reference points allowed us to assess the accuracy of modelling.

## RESEARCH RESULTS

### Creating a DSM model

On the basis of the orthophotomap of the research area (fig. 3), the shape and height measurements of 4,752 buildings and 1,153 forest plots were digitised. The obtained parameters allowed objects from the DTM to be „raised”, which limited the viewshed (fig. 5). Forests are mainly located in the NE and SW part of the studied area as well as in the Drwęca valley, which crosses it from N to SW. The average size of the area occupied by one forest plot was



Ryc. 5. Różnice pomiędzy DTM (A) a DSM (B) na rastrze i w wizualizacji 3D. Źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Differences between DTM (A) and DSM (B) on the raster and in 3D visualisation. Source: own compilation



### Analiza optymalnego zasięgu szczegółowego modelu DSM

W kolejnym etapie przeprowadzono modelowanie zasięgu pola widoku na DSM. Wyróżniono 5 pasów (buforów) wzdłuż analizowanego odcinka drogi w obszarze TA2 (ryc. 4). Dla każdego z wyróżnionych buforów obliczono procentowy udział obszaru widocznego. Na podstawie analizy wielkości odsetka pola widoku przyjęto, że szczegółową digitalizację zabudowy i lasu należy przeprowadzić dla bufora, w którym zasięg pola widoku stanowi więcej niż 50% jego obszaru. W tym bowiem przypadku uzyskanie DSM o wysokiej rozdzielczości jest optymalne, z punktu widzenia nakładu pracy i uzyskanych efektów. Stwierdzono, że wskazany wymóg spełniają bufony o szerokości do 500 m (tab. 1).

### Zasięg i pole widoku w oparciu o optymalne założenia procesu modelowania na DSM

W analizie wykresu widoczności wygenerowany DSM składał się z dwóch części:

- w buforze do 500 m od obserwatora dane pozyskano pracując na stacji fotogrametrycznej. W skład danych wchodziły: DTM, budynki (zabudowa mieszkaniowa i gospodarcza) oraz roślinność wysoka. Kształty obiektów zdigitalizowano na ortofotomapie zachowując dla każdego z nich indywidualną wysokość,
- na obszarze poza buforem 500 m zastosowano numeryczny model terenu DTM z „wypiętrzonymi” lasami, których kształty zostały przeniesione z VMap L2 a wysokości zostały nadane arbitralnie (średnia wysokość lasów zmierzonych w buforze do 500 m od drogi wynosiła 30 m) dla wszystkich lasów.

Maksymalny uzyskany zasięg widoku (teoretycznie maksymalną odległość możliwą do zaobserwowania) dla obserwatora znajdującego się na analizowanej drodze wynosił 13 km. Stwierdzono, że wraz ze wzrostem odległości od obserwatora znajdującego się na drodze maleje powierzchnia obszaru widocznego dla obserwatora (pola widoku). Jest to wynikiem zwiększania się liczby obiektów ograniczających zasięg widoku (tab. 2). Dla strefy obejmującej teren w odległości do ok. 700 m od drogi odsetek widocznego obszaru wynosi ok. 50%, a dla strefy do 2500 m spada do wartości 29%.

Uzyskany obraz obszaru widocznego dla obserwatora (ryc. 6) stanowi sumę pól widoku dla wszystkich analizowanych punktów obserwacyjnych rozmieszczonych co 500 m wzdłuż drogi.

10 km<sup>2</sup>. Their relative heights ranged from 15 m to 40 m. 83% of all digitised buildings were within a close range (up to 100 m) of the analysed road. Their heights ranged from 2 to 15 m, with an average of 10 m. This example of the distribution and size of buildings is characteristic of rural areas in Northern Poland. Compared to the original DTM version, the area on which the altitude parameters of forest plots and buildings were modified was 75 km<sup>2</sup> (50% of the entire TA1 area).

### Analysis of the optimal range of the detailed DSM model

In the next stage, modelling of the viewshed coverage into a DSM was carried out. There were five belts (buffers) along the analysed section of the road in the TA2 area (fig. 4). For each of the selected buffers, the percentage of visible area was calculated.

Tab. 1. Wielkość pola widoku w buforach obszaru TA2

Tab. 1. Viewshed size in the buffers of the TA2 area

Buffer		Viewshed	
radius [m]	surface area [km <sup>2</sup> ]	km <sup>2</sup>	%
100	2.64	2.14	81
250	6.66	4.45	67
500	13.50	7.41	55
1000	27.96	11.98	43
2000	60.27	20.05	33

Źródło: opracowanie własne

Source: own compilation

On the basis of this viewshed percentage, it was assumed that a detailed digitalisation of the buildings and the forest should be carried out for a buffer in which the viewshed is over 50% of its area, therefore obtaining a high-resolution DSM was optimal from the point of view of the workload and the effects obtained. It was found that the indicated requirements were met by buffers up to 500 m wide (tab. 1).

### Viewshed based on the optimal assumptions of the DSM modelling process

In the visibility graph analysis, the generated DSM consisted of two parts:

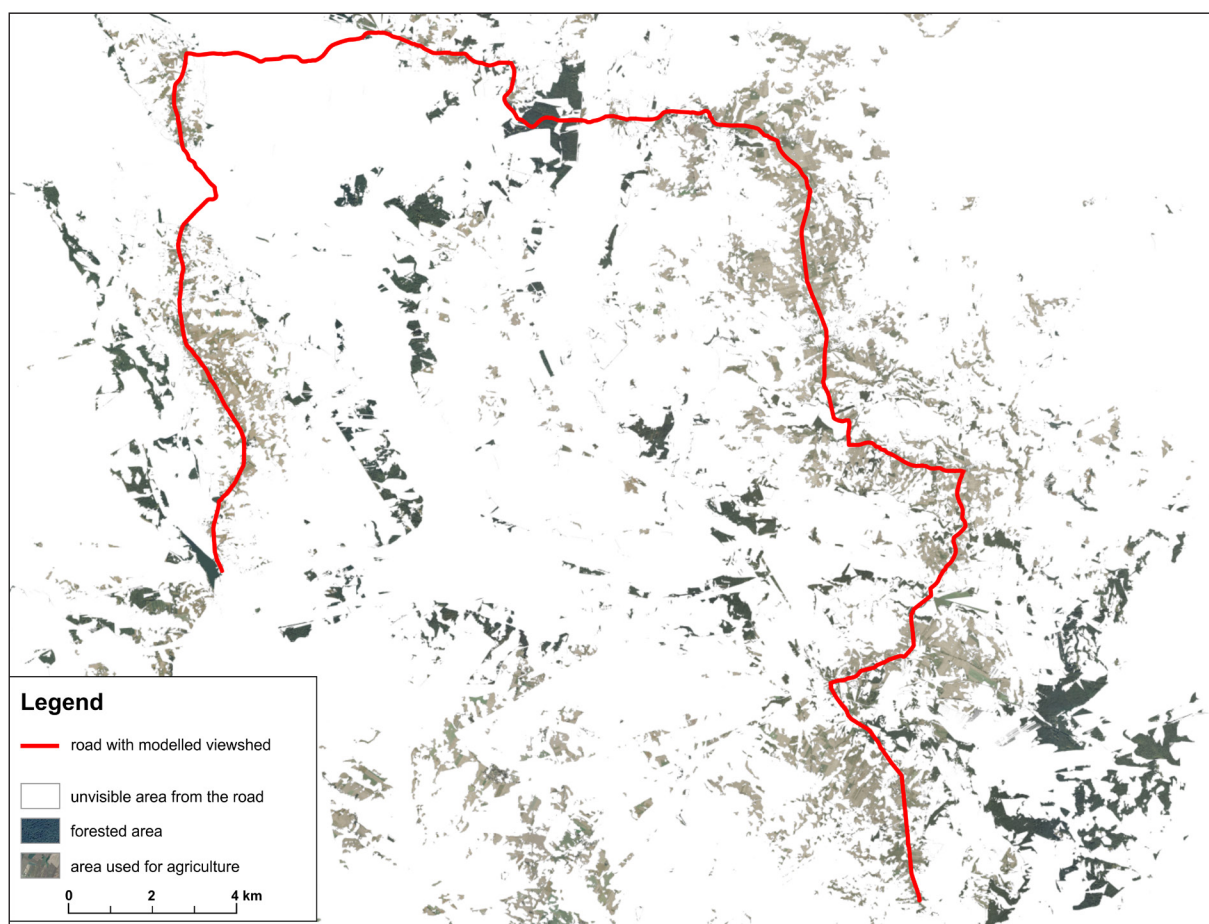
- in the buffer up to 500 m from the observer, the data was obtained while working on a photogrammetric station. The data included the DTM, buildings (residential and commercial) and high vegetation. The shapes of the objects

Zwraca uwagę znaczna fragmentacja terenu widocznego dla obserwatora<sup>1</sup>. Oprócz ukształtowania terenu, głównymi czynnikami bezpośrednio wpływającymi na ograniczenie zasięgu pola widoku i jego fragmentację są uwzględnione w procesie modelowania budynki i kompleksy leśne. Zauważono różny sposób oddziaływania tych obiektów na ograniczanie pola widoku w zależności od ich odległości od obserwatora. Budynki rozmieszczone w dalszej odległości od analizowanej drogi w zasadzie nie wpływały w sposób istotny na ograniczenie zasięgu i pola widoku terenów rolniczych, podczas gdy położone w bliskim sąsiedztwie – znacznie ograniczały zasięg widoku i powodowały fragmentację pola widoku. Efekt jest potęgowany na terenach o zwartej

were digitised on the orthophotomap, keeping individual height for each of them.

- in the area outside the 500-m buffer, the DTM included „raised” forests, the shapes of which were transferred from VMap L2 and the heights of which were arbitrarily set (the average height of forests measured in the buffer up to 500 m from the road was 30 m) for all forests.

The maximum viewshed obtained (theoretically the maximum observable distance) for the observer located on the analysed road was 13 km. It was found that as the distance from the observer on the road increased, the surface area visible to the observer (viewshed) decreased. That was the result of



Ryc. 6. Obszar widoczny z drogi pomiędzy Górzniem a Brodnicą na podkładzie ortofotomapy. Źródło: opracowanie własne  
Fig. 6. The area visible from the road between Górzno and Brodnica on the base of orthophotomap. Source: own compilation

<sup>1</sup> Pod tym pojęciem zwykle rozumie się rozdrobnienie pola widoku, jego podział na mniejsze części. Większy wpływ na fragmentację widocznego obszaru mają struktury ażurowe (drzewa w sezonie bezlistnym, ale też nieregularne sylwety koron drzew i krzewów) niż zwarte bryły architektoniczne. W niniejszym opracowaniu elementy pokrycia terenu ujednolicono do postaci figur geometrycznych.

the increasing number of objects limiting the view range (tab. 2). For the zone covering the area at a distance of about 700 m from the road, the percentage of visible area was approx. 50%, while for the zone up to 2500 m it dropped to 29%.

zabudowie (wsie). Zasięg i pole widoku w zdecydowanie największym stopniu były zredukowane przez „ścianę lasu”, i są pochodną jej odległości od drogi. Obszary leśne stanowiły widoczną treść pola widoku tylko jeśli znajdowały się w formach dolinnych rozcinających wysoczyznę morenową (np. w dolinie Drwęcy, w obrębie rynien subglacialnych), a punkt obserwacyjny znajdował się w strefie krawędziowej wysoczyzny.

The obtained image of the area visible to the observer (fig. 6) was the sum of the viewsheds for all the analysed observation points located every 500 m along the road. Significant fragmentation of the terrain visible to the observer is worth noting<sup>1</sup>. In addition to the terrain, the main factors directly affecting the viewshed limitation view and its fragmentation were buildings and forest complexes included in the modelling process. These objects dif-

**Tab. 2.** Wielkość powierzchni pola widoku względem różnych odległości od drogi pomiędzy Brodnicą a Górzniem  
*Tab. 2. Viewshed size relative to different distances from the Brodnica-Górzno road*

Distance from the road [m]	200	400	600	800	1000	1200	1400	1600	2000	2500	3000	4000	5000
Viewshed size [%]	70	59	52	47	44	41	38	36	33	29	26	21	18

Źródło: opracowanie własne

Source: own compilation

### Weryfikacja zasięgu i pola widoku w oparciu o fotografie panoramiczne

Model pokrycia terenu (z uprzednio zastosowanymi optymalizacjami) zweryfikowano wykorzystując fotografie wykonane w terenie. Fotografie – panoramy pełne (360°) – pochodziły z wybranych punktów referencyjnych zlokalizowanych na badanej drodze. Uprzednio wygenerowany model viewsheds połączono z podkładem ortofotomapy i dla każdego z wyznaczonych punktów referencyjnych porównano treść pola widoku z treścią fotografii panoramicznych (por. Brabyn i Mark, 2011; Pardo-García i Mérida-Rodríguez, 2017). Na podstawie identyfikacji obiektów terenowych na obu źródłach dokonano oceny dokładności i precyzji przeprowadzonej analizy.

Wyniki z przeprowadzonej analizy porównawczej stanowią potwierdzenie poprawności modelowania zasięgu i pola widoku na podstawie DSM uzyskanego ze zdjęć lotniczych. Stwierdzono, że w przypadku występowania przeszkód terenowych w sąsiedztwie punktów referencyjnych zmniejsza się pole widoku. Stopień redukcji pola widoku zależy między innymi od odległości od obserwatora przeszkody terenowej lub orograficznej (ryc. 7). Na przykład, jeśli ściana lasu znajduje się w bezpośrednim sąsiedztwie drogi, następuje nawet całkowite zredukowanie zasięgu i pola widoku dla punktów referencyjnych położonych na tym odcinku (por. Poudyal i in., 2010). W ten sposób fragmenty drogi przebiegającej przez zwarte kompleksy leśne stają się korytarzami wytyczonymi przez ściany lasu.

ferently impacted the viewshed limitation depending on their distance from the observer. Buildings located further away from the analysed road did not significantly limit the viewshed of agricultural areas, while those located in close proximity significantly limited the view range and caused viewshed fragmentation. The effect was intensified in the areas with compact buildings (villages). The viewsheds were, to a large extent, reduced by the „wall of the forest”, and were directly related to its distance from the road. Forest areas were visible only if they were in the valleys cutting through the moraine plateau (e.g. in the Drwęca valley and within subglacial channels), and the observation point was located on the edge zone of the plateau.

### Viewshed verification based on panoramic photographs

The digital surface model (with previously applied optimisations) was verified using photographs taken in the field. Photographs – full panoramas (360°) – were taken at the selected reference points located along the examined road. The previously generated viewshed model was combined with the orthophotomap foundation and, for each of the

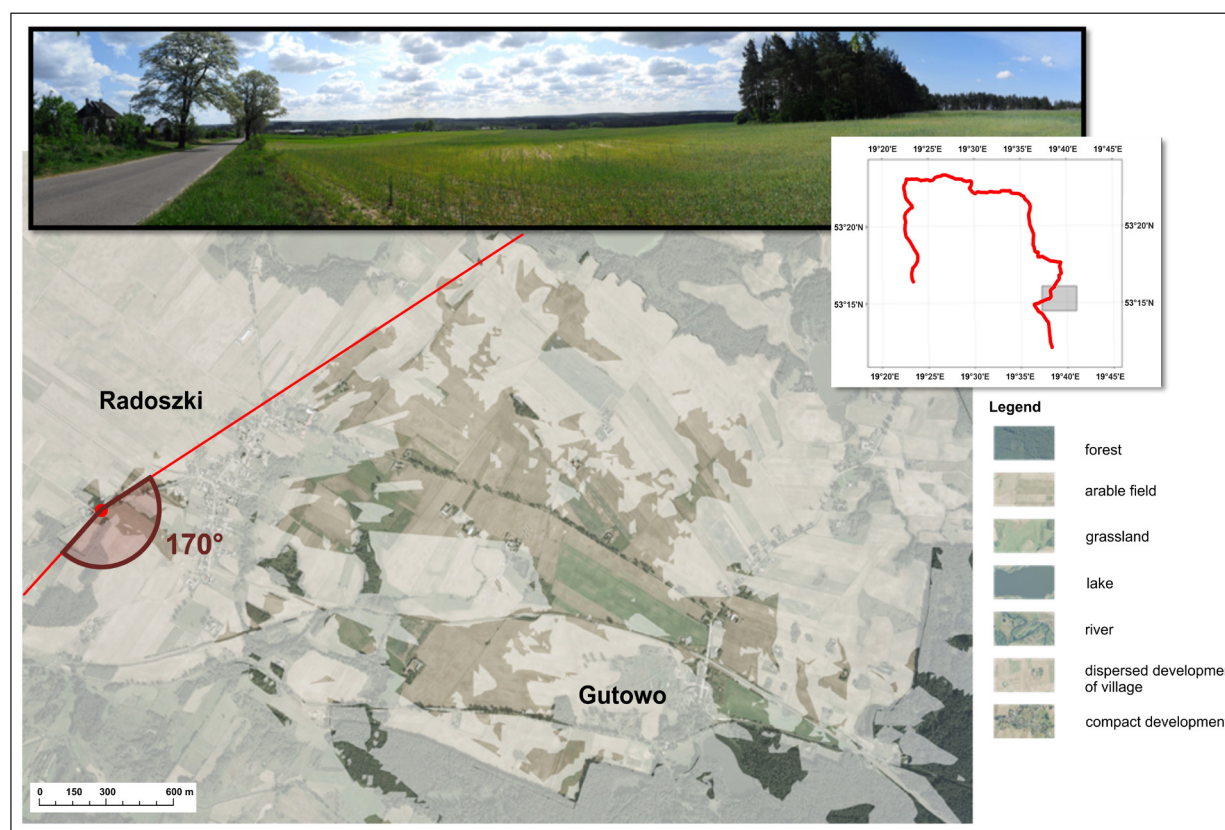
<sup>1</sup> This term is usually understood as the viewshed fragmentation, its division into smaller parts. Openwork structures (trees during the leafless season, but also irregular crowns of trees and shrubs) have a greater impact on the fragmentation of the visible area than compact architectural bodies. In the paper, land cover elements were unified to the form of simple geometrical figures.

## DYSKUSJA

Badania nad wyznaczaniem zasięgu i pola widoku mają różne ukierunkowania. Jedne skupiają się na aspektach ekonomicznych takich jak wartość gruntów (Hernández i in., 2004; Bishop i in., 2004; Poudyal i in., 2010) inne odnoszą się w szerokim zakresie do poprawy algorytmów oprogramowania wyznaczania zasięgu i pola widoku (Fisher, 1993; de Floriani, Magillo, 1997; Lee, Stucky, 1998; Kim i in., 2004; Bartie i in., 2010; Domingo-Santos i in., 2011; Chamberlain, Meitner, 2013; Yu i in., 2016). Wiele publikacji poświęcono również lokalizacji odnawialnych źródeł energii (*Best Management Practices...*, 2013; Ladenburg i in., 2013; Depellegrin i in., 2014; Klouček i in., 2015), archeologii (Sevenant, Antrop, 2007; de Montis, Caschili, 2012; Ogburn, 2006; Supernant, 2014). Czasami w literaturze przedmiotu można odnaleźć nietypowe zastosowanie analiz wykresu widoczności, np. w badaniach geofizycznych (Cooper, 2005). Autorzy niniejszej publikacji skupili się jednak na innym aspekcie, mianowicie na próbie

designated reference points, the viewshed content was compared with the content of the panoramic photographs (cf. Brabyn, Mark, 2011; Pardo-García, Mérida-Rodríguez, 2017). Identification of field objects based on both sources was used for the assessment of the accuracy and precision of the conducted analysis.

The results of the comparative analysis confirmed the correctness of the viewshed modelling based on the DSM obtained from aerial photographs. It was found that in the case of obstacles in the vicinity of reference points, the viewshed was reduced. The degree of the viewshed reduction depended, among other things, on the distance from the observer of the terrain and terrain obstacle (fig. 7). For example, if the forest wall was in the immediate vicinity of the road, the viewshed for the reference points located in this road section could be totally eliminated (cf. Poudyal et al., 2010). In this way, fragments of the road running through dense forest complexes become corridors marked out by the walls of the forest.

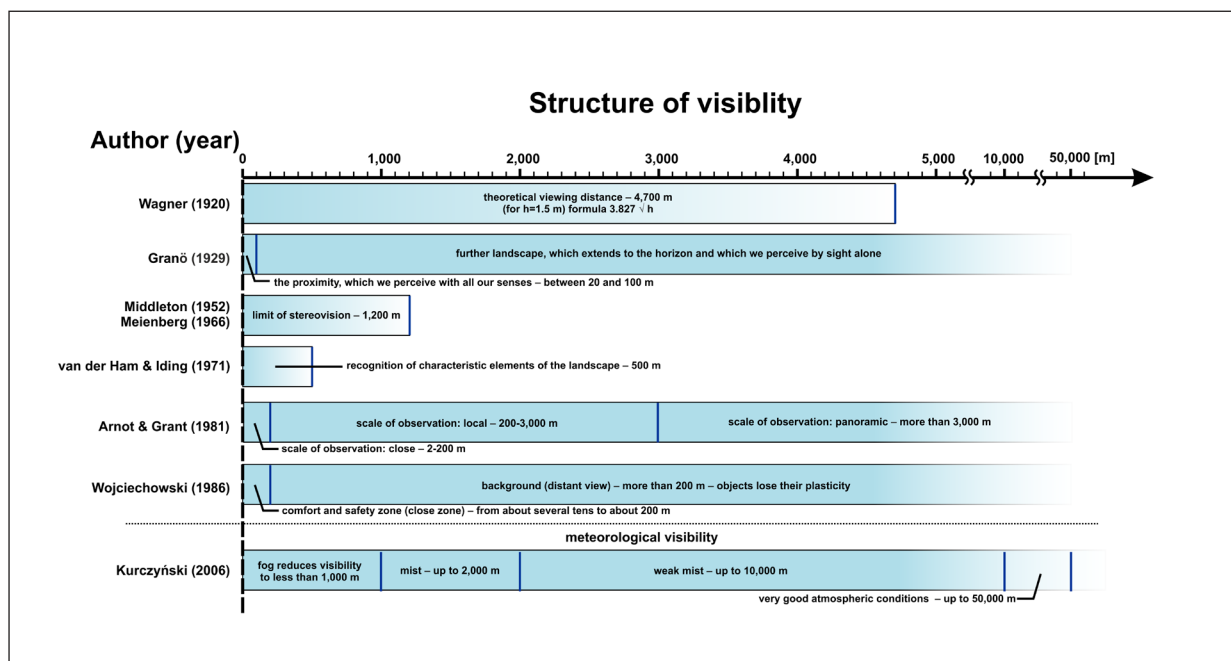


**Ryc. 7.** Przykład weryfikacji zasięgu i pola widoku uzyskanego na DSM za pomocą zdjęcia panoramicznego, gdy w bliskim sąsiedztwie obserwatora znajduje się przestrzeń otwarta ograniczona na drugim planie ścianą lasu. **Źródło:** opracowanie własne  
**Fig. 7.** Example of viewshed verification obtained on the DSM by means of a panoramic photograph, when there is an open space limited in the background by the forest wall in the vicinity of the observer. **Source:** own compilation

połączenia pozyskanych ze stacji fotogrametrycznej danych o dużej rozdzielczości, których uzyskanie jest czasochłonne i pracochłonne, z danymi w dużej mierze zgeneralizowanymi i uśrednionymi z VMap L2. Połączenie źródeł danych do stworzenia DSM z jednej strony miało na celu wyznaczenie dokładnego modelu zasięgu i pola widoku, natomiast z drugiej zoptymalizować proces modelowania. Oczywiście wydaje się stwierdzenie, że obiekty znajdujące się bliżej obserwatora przysłaniają dalszy plan i to właśnie one mają największe znaczenie dla wyniku modelowania zasięgu i pola widoku (Lange, 1990; Nutsford i in., 2015). Przeanalizowano dotychczasowe ustalenia na temat struktury zasięgu pola widoku (ryc. 8). Bez wątplenia, najwyższy stopień szczegółowości opracowania DSM powinien dotyczyć obszaru do ok. 1200 m od obserwatora. Wielkość ta jest związana z maksymalnym zasięgiem możliwości obserwacji stereoskopowej przez człowieka (Meienberg, 1966; Middleton, 1952). Z kolei odległość 500 m od obserwatora pozwala rozróżnić charakterystyczne cechy elementów krajobrazu (van der Ham, Iding, 1971). Na tej podstawie można wysnuć tezę, że jeśli z dużą dokładnością wyznaczy się kształty i wysokości obiektów znajdujących się w odległości do 500 m od obserwatora, to realniej zostaną zawężone pole i zasięg widoku na modelu 3D.

## DISCUSSION

Research on viewshed determination focuses on different aspects of the subject. Some focus on economic aspects, such as land value (Hernández et al., 2004; Bishop et al., 2004; Poudyal et al., 2010), while others relate broadly to improving software algorithms for viewshed delimitation (Fisher, 1993; de Florian, Magillo, 1997; Lee, Stucky, 1998; Kim et al., 2004; Bartie et al., 2010; Domingo-Santos et al., 2011; Chamberlain, Meitner, 2013; Yu et al., 2016). Many publications also focus on the location of renewable energy sources (*Best Management Practices...*, 2013; Ladenburg et al., 2013; Depellegrin et al., 2014; Klouček et al., 2015) and archaeology (Sevenant, Antrop, 2007; de Montis, Caschili, 2012; Ogburn, 2006; Supernant, 2014). Sometimes specialist literature deals with unusual applications of visibility graph analysis, e.g. in geophysical research (Cooper, 2005). The authors of this publication, however, focused on another aspect, namely the attempt to combine high-resolution data obtained from the photogrammetric station, which is time-consuming and labour-intensive, with the largely generalised and averaged data from the VMap L2. The combination of data sources to create a DSM was intended to determine the exact viewshed model, while also optimising the modelling process.



Ryc. 8. Struktura pola widoku w świetle wybranych opracowań badawczych. Źródło: opracowanie własne

Fig. 8. Visibility structure in the light of the selected research studies. Source: own compilation

Jeżeli na obszarach otwartych wokół obserwatora nie znajdują się obiekty mogące ograniczyć pole i zasięg widoku, to obserwowany obszar wraz z odległością ulega rozmyciu, zamazaniu. Na ten efekt ma wpływ wiele czynników związanych z postrzeganiem obrazu przez człowieka oraz z wpływem na ten proces czynników przyrodniczych, m.in.: stanem przejrzystości powietrza, porą dnia, porą roku itp. (Bell, 2004; Nijhuis, 2011; *Best Management Practices...*, 2013; Garnero, Fabrizio, 2015). Na takiej podstawie można założyć, że dokładność kształtów i wysokości obiektów położonych w dużej odległości od obserwatora mają mniejsze znaczenie.

Przedstawiona w artykule procedura badawcza łączy w sobie przemyślenia i wnioski autorów z wcześniejszych prac zawierających wyniki analizy wykresów widoczności. Uwzględnia ona zabudowę i roślinność wysoką jako główne elementy krajobrazu ograniczające obserwatorowi pole i zasięg widoku (Lange, 1990; Yang i in., 2007; Liu i in., 2010). Następnie na DSM wyznaczono bufor wokół obserwatora, w którym powinny znaleźć się dane o wysokiej rozdzielczości (de Floriani i in., 1994; de Floriani, Magillo, 1997), które mają największy wpływ na postrzeganie struktury krajobrazu. Poza granicą 500 m od obserwatora możliwe jest korzystanie z modelu DSM o zmniejszonej rozdzielczości. Uzyskany wynik jest zbliżony z rezultatami badań podziału pola widoku przedstawionymi w literaturze (Granö, 1929; Meienberg, 1966; Middleton, 1952; van der Ham, Iding, 1971; Arnot, Grant, 1981; Wojciechowski, 1986).

Dokładność analizy wykresów widoczności w głównej mierze zależy od rozdzielczości danych (czyli od dokładności pozyskanego DSM) jakie zostaną wprowadzone do modelu. Powstaje pytanie: Czy opłacalne jest czasochłonne i pracochłonne zdobywanie danych o indywidualnych wysokościach poszczególnych obiektów (Sander, Manson, 2007)? Rozdzielczość DSM powinna zależeć przede wszystkim od przeznaczenia – jakim celom dany model ma służyć. Modele przeznaczone dla potrzeb wojska, czy służb ochrony, pomimo dużej czasochłonności i pracochłonności muszą być bardzo dokładne, a koszty ich pozyskiwania nie mają znaczenia, ponieważ dobro ogółu zapewniane przez te służby jest nie do oszacowania. Inwestycje o znacznych kosztach (np. farmy wiatrowe, wieżowce) i przewidziane na długi czas eksploatacji również powinny posiadać takie analizy lecz tu koszty są istotną kwestią w dyskusji

It is obvious that the objects closer to the observer obscure the background and that they are the most important for the result of the viewshed modelling (Lange, 1990; Nutsford et al., 2015). Previous findings on the structure of the viewshed scope were analysed (fig. 8). Undoubtedly, the highest level of detail of the DSM study should concern the area up to approx. 1200 m from the observer. This distance is associated with the maximum range of human stereoscopic observation (Meienberg, 1966; Middleton, 1952). In turn, at a distance of 500 m the observer is able to distinguish characteristic features of the landscape elements (van der Ham, Iding, 1971). On this basis, one can draw the conclusion that, if the shapes and heights of objects located within 500 m from the observer are determined with high accuracy, the viewshed on the 3D model will be narrowed.

If in the open areas there are no objects around the observer that can limit the viewshed, then the observed area becomes blurred with increasing distance. This effect is influenced by many factors related to the perception of images by humans and the impact of natural factors on the process, including air transparency, time of day, season, etc. (Bell, 2004; Nijhuis, 2011; *Best Management Practices...*, 2013; Garnero, Fabrizio, 2015). On this basis, it can be assumed that the accuracy of shapes and heights of objects located a long distance from the observer are of lesser importance.

The research procedure presented in the article combined the thoughts and conclusions of the authors from previous studies containing the results of the analysis of visibility graphs. It took into account buildings and high vegetation as the main elements of the landscape limiting the observer's viewshed (Lange, 1990; Yang et al., 2007; Liu et al., 2010). The buffer around the observer was then designated on the DSM. It should include high resolution data (de Floriani et al., 1994; de Floriani, Magillo, 1997), which has the greatest impact on the perception of the landscape structure. Outside the 500-m limit from the observer, it was possible to use the DSM model with reduced resolution. The obtained results coincided with the results of other viewshed tests presented in literature (Granö, 1929; Meienberg, 1966; Middleton, 1952; van der Ham, Iding, 1971; Arnot, Grant, 1981; Wojciechowski, 1986).

The accuracy of the visibility graph analysis depends mainly on the resolution of the data (i.e. on the accuracy of the acquired DSM) that is to be included in the model. The question arises whether

między inwestorem a lokalną społecznością. Natomiast zadania planistyczne mające na celu weryfikację kilku alternatywnych inwestycji powinny być realizowane w oparciu o niskie koszty finansowe i krótki czas realizacji. Z tego punktu widzenia, istotnym i uzasadnionym działaniem wydaje się łączenie dokładności pracochłonnych i czasochłonnych analiz z wynikami ogólniejszych analiz w celu obniżenia kosztów i skrócenia czasu realizacji zadania.

Zastosowanie metody łączenia danych o różnej rozdzielczości może być przydatne podczas prac z naziemnym skanowaniem laserowym. Skaner laserowy ograniczony jest swoim zasięgiem działania (do 6 km co uniemożliwia wyznaczenie zasięgu widoku). Zasięg widoku jest czynnikiem istotnie wpływającym na jakość krajobrazu poprzez wpływ na pole widoku i ilość planów. Wiadomo również, że zwiększanie zasięgu skanera naziemnego i jego rozdzielczości wydłuża czas oczekiwania na pozyskanie chmury punktów. Tak więc podczas korzystania z tego typu narzędzi równie istotną kwestią staje się optymalizacja odległości pomiędzy punktami obserwacyjnymi i wielkość bufora danych o dużej rozdzielczości (por. Zhao i in., 2013).

Również w skaningu lotniczym można znaleźć zastosowanie dla łączenia danych o różnych rozdzielczościach. Także skaningu lotniczego posiada bardzo duże i obciążające komputery chmury punktów co w efekcie nie pozwala na wykonywanie analiz dla większych obszarów. Zastosowanie danych o dużej rozdzielczości tylko wokół najbliższego otoczenia obserwatora, a dalej zastosowanie danych zgeneralizowanych, pozwoli na szybsze przeprowadzenie analiz wykresu widoczności.

## WNIOSKI

Zdjęcia lotnicze stanowią dobre źródło do tworzenia DSM, które mogą być wykorzystane w analizach zasięgu i pola widoku. Zaproponowane przez autorów procedury mogą być stosowane nie tylko na dostępnych danych fotogrametrycznych, ale również podczas pozyskiwania danych ze skaningu laserowego. Ponadto, w badaniach nad ewolucją krajobrazu mają szansę stać się podstawowym źródłem pomocnym w jego rekonstrukcji oraz próbie ustalenia etapów formowania się krajobrazu, zwłaszcza wskutek antropopresji (por. Ogburn, 2006; Supernant, 2014). Zatem rozszerzają się

the time-consuming and labour-intensive acquisition of data on the individual heights of individual objects is worthwhile (Sander, Manson, 2007). The DSM resolution should depend primarily on the purpose a given model should serve. Models intended for the needs of the army or security services, in spite of their highly time-consuming and labour-intensive nature, must be very accurate. As a result, the cost of acquiring them is irrelevant, because of the general good provided by these services. Investments with significant costs (e.g. wind farms, skyscrapers) and planned for a long period of operation should also carry out similarly detailed analyses. In this case, the costs are an important issue in the discussion between the investor and the local community. However, planning tasks aimed at verifying several alternative investments should be implemented on the basis of low financial costs and short implementation times. From this point of view, combining the accuracy of labour-intensive and time-consuming analyses with the results of more general analyses seems to be an important and justified action in some cases, in order to reduce costs and shorten the time of task completion.

The use of the method of combining data of different resolutions may be useful when working with terrestrial laser scanning. A laser scanner is limited by its range of operation (up to 6 km) which makes the viewshed determination impossible. The view range is a factor that significantly affects the quality of the landscape by affecting the viewshed and the number of plans. It is also well-known that increasing the range of the terrestrial scanner and its resolution extends the waiting time to acquire a point cloud. Thus, when using this type of tool, the optimisation of the distance between observation points and the size of the high-resolution data buffer becomes equally important (cf. Zhao et al., 2013).

Moreover, aerial scanning has applications for combining data of different resolutions. Also, airborne scanning has very large point clouds, putting strain on computers, which, in effect, prevents analyses from being performed for larger areas. The use of high-resolution data only around the immediate surroundings of the observer, and the subsequent use of generalised data, will allow faster analysis of the visibility graph.

perspektywy wykorzystania zdjęć lotniczych (archiwalnych stereopar) z zasobów CODGiK do porównań historycznych.

Metodologia łączenia danych o różnej rozdzielczości zaproponowana w niniejszym opracowaniu pozwala wyznaczyć zasięg i pole widoku na podstawie modelu DSM. Jednocześnie usprawnia przetwarzanie danych i skraca czas przeprowadzania analiz.

Uzyskane wyniki badań potwierdzają konieczność uwzględniania w analizie zasięgu i pola widoku – pokrycia terenu, zwłaszcza obszarów leśnych i zabudowy, gdyż to właśnie one najsilniej fragmentują pole widoku. Ich znaczenie maleje wraz ze wzrostem odległości od obserwatora. Kompleksy leśne w większym stopniu niż obiekty architektoniczne decydują o zasięgu widoku. Zlokalizowane w małej od odległości od drogi przyczyniają się do niemal całkowitego zredukowania zasięgu widoku (porównaj: Nita, Myga-Piątek, 2012). Prócz elementów pokrycia terenu, samo jego ukształtowanie ma istotny wpływ na zasięg i pole widoku z danego punktu obserwacyjnego. W obszarze o mocno zróżnicowanej rzeźbie wpływ budynków, zadrzewień i zakrzewień jest stosunkowo mały, podczas gdy na terenie płaskim – bywa dominujący.

Dzięki przeprowadzonym analizom wykazano możliwości ilościowego ustalenia stopnia zakrycia krajobrazu, co może być jednym z elementów obiektywnej oceny atrakcyjności krajobrazu. Procedura pozwala wyodrębnić na potrzeby waloryzacji krajobrazu fragmenty obszaru widoczne dla obserwatora, a zatem realnie przez niego postrzegane i oceniane.

## PODZIĘKOWANIA

Część wyników zaprezentowanych badań została uzyskana dzięki realizacji grantu finansowanego przez Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu – grant nr 1699-G/2013: “Rola pokrycia terenu w procesie modelowania 3D zasięgu i pola widoku w krajobrazie młodogłacjalnym”. Badania były częściowo wsparte przez fundusz badawczy Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy – Grant BS/2016/K2 – “Ewolucja i mechanizm zmian krajobrazu pod wpływem działalności człowieka”.

## CONCLUSIONS

Aerial photographs are a good source for creating DSM, which can be used in viewshed analysis. The procedures proposed by the authors can be applied not only to the available photogrammetric data, but also when acquiring data from laser scanning. In addition, in studies of landscape evolution, they could aid in digital reconstruction and attempts to determine the stages of landscape formation, especially as a result of anthropogenic stress (cf. Ogburn, 2006; Supernant, 2014). Therefore, the potential applications of using aerial photographs (archival stereopairs) from the CODGiK resources for historical comparisons are expanding.

The methodology of combining data of different resolutions proposed in this study allows the viewshed based on the DSM to be determined. At the same time, it improves data processing and reduces the time spent conducting analyses.

The obtained results confirm the necessity of including terrain cover in the viewshed analysis; this especially applies to forest areas and buildings, as they are the factors that most strongly fragment the viewshed. Their significance decreases as the distance from the observer increases. Forest complexes limit the view range to a greater extent than architectural objects. If located at a short distance from the road, they may almost completely block the view range (cf. Nita, Myga-Piątek, 2012). In addition to surface elements, its very shape has a significant impact on the viewshed from a given observation point. In an area of heavily diversified relief, the influence of buildings, tree stands and shrubs is relatively small, while in flat terrain it is sometimes dominant.

Due to the analyses carried out, the possibility of quantifying the extent of landscape surface was demonstrated, which may be one of the elements of an objective assessment of the attractiveness of the landscape. The procedure allows fragments of the area visible to the observer to be extracted for landscape valorisation, and thus perceiving and assessing it in a realistic way.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Part of the results of the presented research was obtained thanks to the grant financed by the Nicolaus Copernicus University in Toruń, Grant



no. 1699-G/2013: "The role of land cover in the 3D viewshed modelling process in the young glacial landscape zone". The research was partially supported by the research fund of the Kazimierz Wielki University in Bydgoszcz, Grant BS/2016/K2: "Evolution and mechanism of landscape changes under the influence of human activity".

## REFERENCES

- Arabatzis G., Grigoroudis E., 2010: Visitors' satisfaction, perceptions and gap analysis: The case of Dadia-Lefkimi-Soufliou National Park. *Forest Policy and Economics*, 12 (3): 163-172. <http://dx.doi.org/10.1016/j.forpol.2009.09.008>.
- Arnot R.H., Grant K., 1981: The application of a method of terrain analysis to functional land capability assessment and aesthetic landscape appreciation. *Landscape Planning*, 8 (3): 269-300. [http://dx.doi.org/10.1016/0304-3924\(81\)90017-4](http://dx.doi.org/10.1016/0304-3924(81)90017-4).
- Bartie P., Reitsma F., Kingham S., Mills S., 2010: Advancing visibility modelling algorithms for urban environments. *Computers, Environment and Urban Systems*, 34 (6): 518-531. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2010.06.002>.
- Batty M., 2001: Exploring isovist fields: space and shape in architectural and urban morphology. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28 (1): 123-150. <http://dx.doi.org/10.1068/b2725>.
- Bell S., 2004: *Elements of Visual Design in the Landscape*, 2nd Edition, Spon Press, London-New York.
- Best Management Practices for Reducing Visual Impacts of Renewable Energy Facilities on BLM-Administered Lands, 2013: United States Department of the Interior. Bureau of Land Management, Cheyenne, Wyoming.
- Bigné J.E., Andreu L., Gnoth J., 2005: The theme park experience: An analysis of pleasure, arousal and satisfaction. *Tourism Management*, 26 (6): 833-844. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tourman.2004.05.006>.
- Bishop I.D., Lange E., Mahbulul A.M., 2004: Estimation of the influence of view components on high-rise apartment pricing using a public survey and GIS modeling, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 31 (3): 439-452. <http://dx.doi.org/10.1068/b3042>.
- Brabyn L., Mark D.M., 2011: Using viewsheds, GIS, and a landscape classification to tag landscape photographs. *Applied Geography*, 31 (3): 1115-1122. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2011.03.003>.
- Chamberlain B.C., Meitner M.J., 2013: A route-based visibility analysis for landscape management. *Landscape and Urban Planning*, 111 (1): 13-24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.12.004>.
- Clay G.R., Daniel T.C., 2000: Scenic landscape assessment: the effects of land management jurisdiction on public perception of scenic beauty. *Landscape and Urban Planning*, 49 (1-2): 1-13. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046\(00\)00055-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046(00)00055-4).
- Cooper G.R.J., 2005: Analysing potential field data using visibility. *Computers & Geosciences*, 31 (7): 877-881. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2005.03.002>.
- de Floriani L., Magillo P., 1997: Visibility computations on hierarchical triangulated terrain models. *GeoInformatica*, 1 (3): 219-250. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1009708413602>.
- de Floriani L., Marzano L., Puppo P.E., 1994: Line-of-sight communication on terrain models. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8 (4): 329-342. <http://dx.doi.org/10.1080/02693799408902004>.
- de Montis A., Caschili S., 2012: Nuraghes and landscape planning: Coupling viewshed with complex network analysis. *Landscape and Urban Planning*, 105 (3): 315-324. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.01.005>.
- Depellegrin D., Blažauskas N., Egarter-Vigl L., 2014: An integrated visual impact assessment model for offshore windfarm development. *Ocean & Coastal Management*, 98: 95-110. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2014.05.019>.

- Domingo-Santos J.M., De Villarán R.F., Rapp-Arrarás Í., Corral-Pazos de Provens E., 2011: The visual exposure in forest and rural landscapes: An algorithm and a GIS tool, *Landscape and Urban Planning*, 101 (1): 52-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.11.018>.
- European Landscape Convention, 2000, Council of Europe. Firenze.
- Fisher P.F., 1993: Algorithm and Implementation Uncertainty in Viewshed Analysis. *International Journal of Geographical Information Systems*, 7 (4): 331-347. <http://dx.doi.org/10.1080/02693799308901965>.
- Garnero G., Fabrizio E., 2015: Visibility analysis in urban spaces: a raster-based approach and case studies. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 42 (4): 688-707. <http://dx.doi.org/10.1068/b130119p>.
- Granö J.G., 1929: *Reine Geographie. Eine Methodologische Studie Beleuchtet mit Beispielen aus Finnland und Estland*. Societas Geographica Fenniae, Acta Geographica, 2 (2), Helsinki-Helsingfors.
- Hernández J., García L., Ayuga F., 2004: Assessment of the visual impact made on the landscape by new buildings: a methodology for site selection. *Landscape and Urban Planning*, 68 (1): 15-28. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046\(03\)00116-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046(03)00116-6).
- Junge X., Jacot K.A., Bosshard A., Lindemann-Matthies P., 2009: Swiss people's attitudes towards field margins for biodiversity conservation. *Journal for Nature Conservation*, 17 (3): 150-159. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnc.2008.12.004>.
- Kim Y.H., Rana S., Wise S., 2004: Exploring multiple viewshed analysis using terrain features and optimisation techniques. *Computers & Geosciences*, 30 (9-10): 1019-1032. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2004.07.008>.
- Klouček T., Lagner O., Šimová P., 2015: How does data accuracy influence the reliability of digital viewshed models? A case study with wind turbines. *Applied Geography*, 64: 46-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.09.005>.
- Kot R., 2015: The point bonitation method for evaluating geodiversity: a guide with examples (Polish Lowland). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97 (2): 375-393. <http://dx.doi.org/10.1111/geoa.12079>.
- Kot R., Leśniak K., 2017: Impact of different roughness coefficients applied to relief diversity evaluation: Chełmno Lakeland (Polish Lowland). *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 99 (2): 102-114. <http://dx.doi.org/10.1080/04353676.2017.1286547>.
- Krøgli S.O., Dramstad W.E., Skar B., 2015: World heritage and landscape change – heritage buildings and their changed visibility in the coastal landscape of Vega, Norway. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, 69 (3): 121-134. <http://dx.doi.org/10.1080/00291951.2015.1042910>.
- Kurczyński Z., 2006: *Lotnicze i satelitarne obrazowanie Ziemi. T. 1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa*.
- Ladenburg J., Termansen, M., Hasler, B., 2013: Assessing acceptability of two onshore wind power development schemes: A test of viewshed effects and the cumulative effects of wind turbines. *Energy*, 54: 45-54. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.02.021>.
- Lange E., 1990: Vista management in Acadia National Park. *Landscape and Urban Planning*, 19 (4): 353-376. [http://dx.doi.org/10.1016/0169-2046\(90\)90042-Z](http://dx.doi.org/10.1016/0169-2046(90)90042-Z).
- Lee J., Stucky D., 1998: On applying viewshed analysis for determining least-cost paths on Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science*, 12 (8): 891-905. <http://dx.doi.org/10.1080/136588198241554>.
- Liu L., Zhang L.Q., Ma J.T., Zhang L., Zhang X.M., Xiao Z.Q., Yang L., 2010: An improved line-of-sight method for visibility analysis in 3D complex landscapes. *Science China Information Sciences*, 53 (11): 2185-2194. <http://dx.doi.org/10.1007/s11432-010-4090-x>.
- Llobera M., 2003: Extending GIS-based visual analysis: the concept of visualscapes. *International Journal of Geographical Information Science*, 17 (1): 25-48. <http://doi.org/10.1080/713811741>.
- Meienberg P., 1966: *Die Landnutzungskartierung nach Pan-, Infrarot und Farbluftbildern. Ein Beitrag zur agrargeographischen Luftbildinterpretation und zu den Möglichkeiten der Luftbildphotographie*. Verlag Michael Lassleben, Kallmünz.
- Middleton W.E.K., 1952: *Vision through the Atmosphere*. University of Toronto Press, Toronto.
- Miller D., 2001: A method for estimating changes in the visibility of land cover. *Landscape and Urban Planning*, 54 (1-4): 93-106. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00128-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00128-1).
- Murgoitio J.J., Shrestha R., Glenn N.F., Spaete L.P., 2013: Improved visibility calculations with tree trunk obstruction modeling from aerial LiDAR.

- International Journal of Geographical Information Science, 27 (10): 1865-1883. <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2013.767460>.
- Nijhuis S., 2011: Visual research in landscape architecture [in:] *Exploring the Visual Landscape* (eds.) S. Nijhuis, R. Van Lammeren, F. Van Der Hoeven. *Advances in Physiognomic Landscape Research in the Netherlands. Research in Urbanism Series, 2*, IOS Press, Amsterdam: 103-145. <http://dx.doi.org/10.7480/rius.2.209>.
- Nita J., Myga-Piątek U., 2012: Ocena walorów widokowych drogi S1 [E75] na odcinku Częstochowa-Sosnowiec. *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*, 18: 181-193. [http://www.krajobraz.kulturowy.us.edu.pl/publikacje/artykuly/18.infrastruktura/16-nita\\_myga.pdf](http://www.krajobraz.kulturowy.us.edu.pl/publikacje/artykuly/18.infrastruktura/16-nita_myga.pdf).
- Nutsford D., Reitsma F., Pearson A.L., Kingham S., 2015: Personalising the viewshed: Visibility analysis from the human perspective. *Applied Geography*, 62: 1-7. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.04.004>.
- Ogburn D.E., 2006: Assessing the level of visibility of cultural objects in past landscapes. *Journal of Archaeological Science*, 33 (3): 405-413. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2005.08.005>.
- Oliver R.L., Rust R.T., Varki S., 1997: Customer delight: Foundations, findings, and managerial insight. *Journal of Retailing*, 73 (3): 311-336. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4359\(97\)90021-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4359(97)90021-X).
- Orlof J., 2017: Point cloud based viewshed generation in AutoCAD Civil 3D. *Technical Transactions. Computer Sciences*, 12: 143-155. <http://dx.doi.org/10.4467/2353737XCT.17.215.7758>.
- Ozimek P., Böhm A., Ozimek A., Wańkowicz W., 2013: Planowanie przestrzeni o wysokich walorach krajobrazowych przy użyciu cyfrowych modeli terenu wraz z oceną ekonomiczną. *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej im. Tadeusza Kościuszki*, Kraków.
- Palmer J.F., Hoffman R.E., 2001: Rating reliability and representation validity in scenic landscape assessments. *Landscape and Urban Planning*, 54 (1-4): 149-161. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046\(01\)00133-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-2046(01)00133-5).
- Pardo-García S., Mérida-Rodríguez M., 2017: Measurement of visual parameters of landscape using projections of photographs in GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 61 (Part A): 56-65. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurb.2016.09.005>.
- Pavlikakis G.E., Tsihrintzis V.A., 2006: Perceptions and preferences of the local population in Eastern Macedonia and Thrace National Park in Greece. *Landscape and Urban Planning*, 77 (1-2): 1-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2004.12.008>.
- Petrosillo I., Zurlini G., Corliano M.E., Zaccarelli N., Dadamo M., 2007: Tourist perception of recreational environment and management in a marine protected area. *Landscape and Urban Planning*, 79 (1): 29-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.02.017>.
- Piskorski R., 2017: Analiza widoczności z wykorzystaniem lotniczego skaningu laserowego jako wskaźnik walorów krajobrazowych na przykładzie Kopca Kościuszki w Krakowie. *Mazowsze. Studia Regionalne*, 20: 55-66. <http://dx.doi.org/10.21858/msr.20.04>.
- Poudyal N.C., Hodges D.G., Fenderson J., Tarkington W., 2010: Realizing the Economic Value of a Forested Landscape in a Viewshed. *Southern Journal of Applied Forestry*, 34 (2): 72-78. <http://www.ingentaconnect.com/contentone/saf/sjaf/2010/00000034/00000002/art00003>.
- Rogowski M., 2009: Ocena walorów widokowych szlaków turystycznych na wybranych przykładach z Dolnego Śląska. *Problemy Ekologii Krajobrazu*, 25: 155-163. <http://paek.ukw.edu.pl/pek/index.php/PEK/article/view/1591/1401>.
- Rogowski M., 2012: Ocena atrakcyjności turystycznej szlaków pieszych na wybranych przykładach z Dolnego Śląska. *Bogucki Wydawnictwo Naukowe*, Poznań.
- Sander H.A., Manson S.M., 2007: Heights and locations of artificial structures in viewshed calculation: How close is close enough?. *Landscape and Urban Planning*, 82 (4): 257-270. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2007.03.002>.
- Sarnowski Ł., Brykała D., Podgórski Z., 2013: Visibility analysis in the landscape study using the Digital Photogrammetry 3D System DEPHOS – an example from Poland [in:] *Scientific Technical Report*, 13/04, Deutsches GeoForschungsZentrum, Potsdam, p. 18. <http://doi.org/10.2312/GFZ.b103-13047>.
- Sarnowski Ł., Podgórski Z., Brykała D., 2016: Planning a greenway based on an evaluation of visual landscape attractiveness. *Moravian Geographical Reports*, 24 (3): 55-66. <http://doi.org/10.1515/mgr-2016-0017>.

- Sevenant M., Antrop M., 2007: Settlement models, land use and visibility in rural landscapes: Two case studies in Greece. *Landscape and Urban Planning*, 80 (4): 362-374. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landurbplan.2006.09.004>.
- Supernant K., 2014: Intervisibility and Intravisibility of rock feature sites: a method for testing viewshed within and outside the socio-spatial system of the Lower Fraser River Canyon, British Columbia. *Journal of Archaeological Science*, 50: 497-511. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jas.2014.08.008>.
- Turner A., Doxa M., O'Sullivan D., Penn A., 2001: From isovists to visibility graphs: a methodology for the analysis of architectural space. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 28 (1): 103-121. <http://doi.org/10.1068/b2684>.
- van der Ham R.J.M., Iding J.A., 1971: De landschaps-typologie naar visuele kenmerken. *Methodiek en gebruik*. Department of Landscape Architecture, Wageningen University, Wageningen.
- Wagner H., 1920: *Lehrbuch der Geographie*. Bd. 1, Allgemeine Erdkunde. T. 1, Einleitung – Mathematische Geographie. Hahnsche Buchhandlung, Hannover.
- Wirtz J., Bateson J.E.G., 1999: Consumer Satisfaction with Services: Integrating the Environment Perspective in Services Marketing into the Traditional Disconfirmation Paradigm. *Journal of Business Research*, 44 (1): 55-66. [http://dx.doi.org/10.1016/S0148-2963\(97\)00178-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0148-2963(97)00178-1).
- Wirtz J., Mattila A.S., Tan R.L.P., 2000: The moderating role of target-arousal on the impact of affect on satisfaction – an examination in the context of service experiences. *Journal of Retailing*, 76 (3): 347-365. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4359\(00\)00031-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-4359(00)00031-2).
- Wojciechowski K.H., 1986: *Problemy percepcji i oceny estetycznej krajobrazu*. Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Lublin.
- Yang P.P.Y., Putra S.Y., Li W., 2007: Viewsphere: a GIS-based 3D visibility analysis for urban design evaluation. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 34 (6): 971-992. <http://doi.org/10.1068/b32142>.
- Yu T.X., Xiong L.Y., Cao M., Wang Z.H., Zhang Y.C., Tang G.A., 2016: A new algorithm based on Region Partitioning for Filtering candidate viewpoints of a multiple viewshed. *International Journal of Geographical Information Science*, 30 (11): 2171-2187. <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2016.1163571>.
- Zhao Y., Padmanabhan A., Wang S., 2013: A parallel computing approach to viewshed analysis of large terrain data using graphics processing units. *International Journal of Geographical Information Science*, 27 (2): 363-384. <http://dx.doi.org/10.1080/13658816.2012.692372>.