

**ANALIZY PRZESTRZENNE JAKO WSPARCIE  
PROJEKTOWANIA PRZEBIEGU  
INFRASTRUKTURALNYCH OBIEKTÓW LINIOWYCH\***  
SPATIAL ANALYSES ENVIRONMENT AS A SUPPORTING  
TOOL FOR INFRASTRUCTURAL LINEAR  
OBJECT ROUTING

**Wojciech Drzewiecki, Emilia Orzińska, Tomasz Pirowski**

Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska  
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, AGH w Krakowie

**Słowa kluczowe: systemy informacji geograficznej, analizy przestrzenne, projektowanie przebiegu infrastrukturalnych obiektów liniowych**

Key words: geographical information systems, spatial analyses, linear infrastructural object routing

## **Wprowadzenie**

Projektowanie przebiegu inwestycji liniowych stanowi złożony problem planistyczny, wymagający uwzględnienia różnorodnych uwarunkowań i kryteriów: formalnoprawnych, fizjograficznych (w tym konfliktów środowiskowych), ekonomicznych, technicznych, społecznych, a nawet politycznych. Opracowanie koncepcji przestrzennej przebiegu trasy ma miejsce na etapie prac przedprojektowych (studia wstępne, studium wykonalności) dla planowanej inwestycji. Koncepcja opracowywana jest zazwyczaj wariantowo. Poszczególne warianty mają postać wyznaczonych korytarzy, których przebieg nanoszony jest na mapy topograficzne. Prace studialne na tym etapie prowadzone są w oparciu o materiały kartograficzne w skalach od 1:100 000 do 1:25 000. W kolejnym etapie następuje na ogół wielokryterialna analiza poszczególnych korytarzy, stanowiąca podstawę wyboru przebiegów trasy rekomendowanych do opracowania na dalszych etapach prac projektowych. Istotnym elementem tej analizy jest wstępna ocena wpływu tras na środowisko.

Cyfrowe dane przestrzenne, stanowiące źródło informacji fizjograficznych i środowiskowych, mogłyby zostać użyte do wsparcia prac zarówno na etapie opracowania koncepcji przebiegu tras, jak i analizy wielokryterialnej poszczególnych zaproponowanych korytarzy. Wsparciem dla tego typu działań stać się mogą systemy informacji geograficznej (GIS), przez:

---

\* Praca zrealizowana w ramach badań statutowych AGH 11.11.150.949.

- zgromadzenie i łatwy dostęp do różnorodnych informacji przestrzennych o terenie, opracowanych w formie warstw tematycznych, co pozwala na ich wykorzystanie w manualnym procesie trasowania,
- wykorzystanie narzędzi analitycznych pozwalających na półautomatyczne selekcjonowanie terenów optymalnych do prowadzenia tego typu inwestycji.

Zarazem GIS to doskonałe narzędzie do wariantowania inwestycji, z uwzględnieniem różnych grup interesów celem poszukiwania kompromisu.

Podane wyżej rozwiązania wzajemnie się uzupełniają, wręcz stanowią naturalne etapy wykorzystania narzędzi GIS – od budowy niezbędnego zestawu informacji przestrzennych, przez wizualizację bazy danych i pracę na takim zestawie danych, po ewentualne dokonanie próby automatyzacji procesu. W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki badań mających na celu zweryfikowanie powyższych tez poprzez próbę wykorzystania GIS do realizacji hipotetycznego zadania projektowego – automatycznego wyznaczenia koncepcji przebiegu podmiejskiej linii kolejowej na odcinku Kraków-Skała.

## Informacje przestrzenne stosowane w procesie planistycznym

Podstawowe materiały, niezbędne do opracowania zbioru wariantów przebiegu trasy, stanowią trzy grupy danych (Basiewicz, 1977, 1982, 1988; Gipps et al., 2001; Manecki et al., 2000; Massel, 2006; SENER S.A., 2008; Sysak, 1982; Towpik, 2009):

- kryteria techniczno-eksploatacyjne inwestycji, kwalifikujące linię do właściwej kategorii z punktu widzenia maksymalnej prędkości, obciążenia, znaczenia linii jako ciągu przewozowego;
- warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać linie kolejowe, przy znanych parametrach techniczno-eksploatacyjnych inwestycji, w tym minimalne promienie łuków poziomych i maksymalne miarodajne pochylenie;
- zbiór informacji o terenie, pozwalający na uwzględnienie przy projektowaniu trasy wymogów sformułowanych w przepisach prawa (Ustawa, 2004; Ustawa, 2001; Ustawa, 2001; Ustawa, 2003; Ustawa, 2005) oraz uwarunkowań i ograniczeń, przede wszystkim natury topograficznej i geologiczno-inżynierskiej; dane te powinny pozwolić również na uwzględnienie uwarunkowań związanych z istniejącymi i planowanymi obiektami infrastruktury oraz przesłanek wynikających z wymogów ochrony środowiska.

Na podstawie wymienionych danych następuje proces projektowy polegający na poszukiwaniu optymalnego wariantu trasy, aż do wskazania wariantu najlepszego wraz z uzasadnieniem.

Stosowane w pracach projektowych dane przestrzenne to:

- mapy topograficzne (na etapie prac przedprojektowych, tj. ustalania punktów stałych trasy, przez które powinna przebiegać trasa projektowanej linii, można się posługiwać mapami topograficznymi o skali 1: 100 000 – 1: 25 000);
- informacje z zakresu geologii inżynierskiej (ogólne zarysy budowy geologicznej, warunków hydrogeologicznych i własności fizyko-mechanicznych podłoża), występowania procesów geodynamicznych, możliwości zaopatrzenia budowanej linii w surowce naturalne, wskazanie terenów wymagających badań szczegółowych;
- dane dotyczące środowiska i istniejącej infrastruktury: występowanie terenów zabagnionych oraz torfowisk, lokalizacja istniejących obiektów infrastruktury (zakładów

przemysłowych, lotnisk, obszarów intensywnej zabudowy, cmentarzy), zagospodarowanie terenu, lokalizacja terenów górniczych i złóż, lokalizacja zbiorników wodnych, obiektów liniowych (rzeki, drogi, linie kolejowe, rurociągi), lasów, stref ochronnych wód, granice Głównych Zbiorników Wód Podziemnych (GZWP), granice obszarów chronionych, położenie obszarów szczególnie atrakcyjnych dla rekreacji, gleb o wysokich wartościach rolniczych, dróg migracji zwierząt, siedlisk o wysokiej różnorodności biologiczne, informacje o przeznaczeniu terenu w planach zagospodarowania przestrzennego.

Stopień szczegółowości niezbędnych danych o terenie nie jest wprost zdefiniowany co do skali i zawartości tematycznej. Na podstawie analizy etapów projektowania można stwierdzić, że studia przedprojektowe wymagają skal od 1: 100 000 do 1: 25 000, przy czym skalą wskazywaną jako wystarczającą i najczęściej stosowaną jest 1: 50 000. Na etapie projektowania wstępnego (wyznaczania wariantów tras) wymagane są, wraz z uściśleniem przebiegu trasy, coraz większe skale. Dla ustalania wstępnego zbioru wariantów tras mogą to być skale 1:50 000 lub 1: 25 000. Dla szczegółowego trasowania wybranego wariantu wymaganą skalą jest 1: 10 000 lub 1: 5000 (w niektórych przypadkach, dla pewnych odcinków trasy, konieczne jest wykonanie planów w skali 1: 2000 lub 1:1000).

Przeprowadzona analiza – dotycząca niezbędnego zakresu informacji w procesie określania koncepcji przestrzennych tras linii kolejowych, dla uwzględnienia wymagań prawnych oraz uwarunkowań i ograniczeń projektowych – pozwala na sformułowanie następujących wniosków i rekomendacji odnośnie możliwości wykorzystania cyfrowych danych przestrzennych:

1. Zakres tematyczny danych przestrzennych powinien zapewnić możliwość uwzględnienia w procesie opracowania koncepcji przestrzennej trasy wymogów stawianych przez przepisy prawa.
2. Dodatkowo dane te powinny umożliwić uwzględnienie uwarunkowań i ograniczeń projektowych związanych z topografią (w tym rzeźbą terenu i rozmieszczeniem w przestrzeni istniejących obiektów infrastruktury) oraz warunkami geologicznymi i hydrogeologicznymi.
3. Przydatne byłyby również dane przestrzenne dostarczające informacji potrzebnych dla uwzględnienia wymagań ochrony środowiska i rozwoju zrównoważonego, zarówno na etapie wyznaczania trasy korytarza, jak i następującej później na etapie ich analizy wielokryterialnej, wstępnej oceny wpływu na środowisko.
4. Rekomendowany poziom dokładności przestrzennej przestrzennych danych cyfrowych określono na poziomie dokładności skali 1: 50 000. Rekomendując poziom dokładności przestrzennej danych należy wziąć pod uwagę zarówno obecną praktykę postępowania na etapie prac przedprojektowych, jak i przyjętą w Polsce koncepcję tworzenia zasobów infrastruktury informacji przestrzennej. Opracowanie koncepcji przestrzennych tras linii kolejowych prowadzone jest na etapie studiów przedprojektowych, z wykorzystaniem materiałów kartograficznych w skalach od 1: 100 000 do 1: 25 000. W tym zakresie skal mieści się poziom dokładności przyjęty dla tworzenia krajowych baz tematycznych, wynoszący 1: 50 000.
5. Wymagania dotyczące aktualności danych należy zróżnicować w zależności od ich wartości informacyjnej i przeznaczenia w procesie tworzenia koncepcji przestrzennych tras. Najwyższym (bieżącym) poziomem aktualności cechować muszą się dane dostarczające informacji, których uwzględnienie wynika bezpośrednio z przepisów obowiązującego prawa. Poziom aktualności pozostałych danych determinowany jest tempem zmian opisywanej przez nie informacji.

Wymagania dotyczące rekomendowanego zakresu tematycznego oraz poziomu aktualności danych przestrzennych potrzebnych w procesie opracowania koncepcji przestrzennej tras linii kolejowych zestawiono w tabeli 1. Dla wymagań odnośnie aktualności przyjęto skalę: bieżąca, wysoka (do 5 lat), średnia (do 10 lat), niska. Podane w tabeli odnośniki do podstaw prawnych zostały uszczegółowione w bibliografii.

**Tabela 1.** Rekomendowany zakres tematyczny oraz poziom aktualności danych przestrzennych dla potrzeb opracowania koncepcji przestrzennych tras linii kolejowych

Rodzaj informacji	Wymagana aktualność	Uwagi	Akty prawne wprowadzające wymóg uwzględnienia określonych obiektów przestrzennych. Sposób wykorzystania w opracowaniu koncepcji przestrzennej linii kolejowej
1	2	3	4
Granice parków narodowych, rezerwatów przyrody i obszarów Natura 2000	bieżąca		Ustawa o ochronie przyrody (2004)
Lokalizacja pomników przyrody, stanowisk dokumentacyjnych, użytków ekologicznych, zespołów przyrodniczo-krajobrazowych	bieżąca	1	
Występowanie chronionych gatunków zwierząt, roślin i grzybów i ich stref ochrony	bieżąca		
Obszary bezpośredniego zagrożenia powodzią	bieżąca		Ustawa Prawo wodne (2001)
Obszary potencjalnego zagrożenia powodzią	bieżąca	1	
Tereny ochrony bezpośredniej ujęć wód podziemnych i powierzchniowych	bieżąca		
Tereny ochrony pośredniej ujęć wód podziemnych i powierzchniowych	bieżąca	1	
Obszary ochronne zbiorników wód śródlądowych	bieżąca	2	
Obszary stref ochronnych urządzeń pomiarowych służb państwowych	bieżąca		
Lokalizacja zakładów stwarzających zagrożenie wystąpienia poważnych awarii	bieżąca	3	Ustawa Prawo ochrony środowiska (2001)
Obszary ciche wyznaczone w trybie art. 118 b ustawy Prawo ochrony środowiska	bieżąca		
Granice strefy ochronnej "A" uzdrowisk	bieżąca		Ustawa o lecznictwie uzdrowiskowym, uzdrowiskach i obszarach ochrony uzdrowiskowej oraz o gminach uzdrowiskowych (2005) Rozporządzenie Ministra w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (2007)
Granice terenów szpitali, terenów zabudowy mieszkaniowej jednorodzinnej, terenów zabudowy związanej ze stałym lub czasowym pobytem dzieci i młodzieży, terenów domów opieki społecznej, terenów zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej i zamieszkania zbiorowego, terenów rekreacyjno-wypoczynkowych, terenów mieszkalno-usługowych	bieżąca	4	Rozporządzenie Ministra w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (2007)

cd. tabeli 1

1	2	3	4
Zabytki wpisane do rejestru zabytków	bieżąca		Ustawa o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami (2003)
Granice parków kulturowych	bieżąca	1	
Drogi migracji zwierząt	bieżąca		Ustawa Prawo ochrony środowiska (2001)
Ukształtowanie powierzchni terenu	średnia		Informacje podstawowe
Zarys budowy geologicznej	niska		
Informacje z zakresu geologii inżynierskiej dotyczące właściwości podłoża (warunków gruntowych)	średnia		
Informacje z zakresu hydrogeologii i głębokości występowania wód gruntowych	wysoka		
Lokalizacja zbiorników wodnych, rzek i kanałów	bieżąca		
Informacje o zagospodarowaniu (sposobie użytkowania) terenu w tym lokalizacji istniejących obiektów infrastruktury	wysoka		
Obszary występowania szkód górniczych	wysoka		
Tereny zabagnione, podmokłe i torfowiska	średnia		Informacje uzupełniające. Cel: omijanie obszarów występowania szkód górniczych
Informacje o występowaniu surowców naturalnych, które mogłyby zostać wykorzystane do budowy linii (piaski gruboziarniste, żwiry, kruszywo, itp.)	niska		Informacje uzupełniające. Cel: lokalizacja tras w pobliżu miejsc możliwych ukopów (eksploatacji)
Tereny górnicze	wysoka		Informacje uzupełniające. Cel: omijanie obszarów prowadzenia działalności górniczej
Złóża	średnia		Informacje uzupełniające. Cel: minimalizacja konfliktów z obszarami potencjalnej eksploatacji
Granice Głównych Zbiorników Wód Podziemnych oraz ich obszarów ochrony	niska		Informacje uzupełniające. Cel: ochrona zasobów wód podziemnych
Obszary szczególnie atrakcyjne dla rekreacji	średnia		Informacje uzupełniające. Cel: minimalizacja konfliktów społecznych
Gleby o wysokich wartościach rolniczych	niska		Informacje uzupełniające. Cel: minimalizacja wpływu na grunty o najwyższej jakości rolniczej
Siedliska o wysokiej różnorodności biologicznej	średnia		Informacje uzupełniające. Cel: minimalizacja oddziaływania na przyrodę
Informacje dotyczące występowania lasów (zwłaszcza lasów o dużej powierzchni, wysokim stopniu naturalności oraz lasów ochronnych)	średnia		
Lokalizacja parków krajobrazowych i obszarów chronionego krajobrazu	wysoka		

1 – ustanowione zakazy mogą nie powodować ograniczeń w aspekcie lokalizacji linii kolejowych, 2 – dotychczas nie ustanowiono tego typu zakazów, 3 – dotyczy lokalizacji linii kolejowych o znaczeniu państwowym, 4 – w przypadku istnienia planu zagospodarowania przestrzennego obowiązują granice terenów wyznaczone w planie zagospodarowania.

## Baza danych przestrzennych

Dla potrzeb przeprowadzonego eksperymentu badawczego pozyskano dostępne dla obszaru analiz zbiory danych przestrzennych spełniające przyjęte kryterium dokładnościowe i zawierające informacje potencjalnie przydatne dla potrzeb opracowania koncepcji przestrzennych tras linii kolejowych (tab. 1). W skład utworzonej na potrzeby badań bazy danych weszły:

- baza danych Mapy Wektorowej Poziomu 2 (VMap Level2) (układ współrzędnych PUWG 1992, format ESRI shape),
- dostępne warstwy Bazy Danych Obiektów Topograficznych (TBD) (PUWG 1992, format Access): sieć hydrograficzna, drogowa i kolejowa,
- Numeryczny Model Terenu pochodzący z projektu LPIS (PUWG 1992, format ESRI TIN oraz dane źródłowe zapisane w postaci plików ASCII),
- baza danych Szczegółowej Mapy Geologicznej Polski (PUWG 1992, format ESRI shape),
- baza danych Mapy Geośrodowiskowej Polski (PUWG 1992, format Access),
- baza danych Mapy Hydrogeologicznej Polski (PUWG 1992, format ESRI shape),
- baza HYDRO (baza danych Mapy Hydrograficznej Polski) (PUWG 1992, format MapInfo),
- cyfrowa mapa glebowo-rolnicza w skali 1:25 000 (PUWG 1992, format ESRI shape),
- baza danych o pokryciu i użytkowaniu terenu o szczególności tematycznej odpowiadającej IV poziomowi schematu Corine Land Cover i dokładności przestrzennej odpowiadającej skali 1:25 000<sup>2</sup> (PUWG 1992, format Access),
- ortofotomapy lotnicze i satelitarne (PUWG 1992, różne formaty plików rastrowych) – wykorzystano je do aktualizacji i uszczegółowienia danych topograficznych z VMap-y.

Zgromadzone dane zintegrowano w oprogramowaniu Geomedia Professional. Na potrzeby analiz przestrzennych, wykonywanych w oprogramowaniu Idrisi Andes, wybrane warstwy tematyczne przekształcono również do postaci rastrowej, o rozdzielczości boku kwadratowej komórki 30 m.

Dane, jakie wyodrębniono na potrzeby analiz, zestawiono w mapy tematyczne za pomocą zapytań atrybutowych i algebry map (rys. 1). W ten sposób utworzono ostateczne dziewięć warstw tematycznych, o umownych nazwach: obiekty chronione, komunikacja drogowa, warunki hydrologiczne, numeryczny model terenu, pokrycie terenu, obiekty trudne do usunięcia, kompleksy glebowe, obszary ochrony wód, warunki budowlane.

## Wyznaczenie korytarzy lokalizacyjnych

Opisując przebieg analizy prowadzący do automatycznego wielowariantowego wyznaczenia korytarzy należy wskazać na kilka jej głównych etapów:

**Etap 1.** Celem działań przeprowadzonych w pierwszym etapie analizy było uzyskanie mapy obrazującej wstępnie określoną przydatność terenu dla lokalizacji trasowanego obiektu. Mapę tą uzyskano na drodze analizy wielokryterialnej (ang. *MCE – Multi-Criteria Evalu-*

<sup>2</sup> Baza wytworzona w Katedrze Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska AGH na w ramach projektu badawczego „Badanie zmian przestrzennych struktury użytkowania i funkcji krajobrazu w oparciu o wieloczasowe obrazy teledetekcyjne jako wsparcie dla planowania krajobrazu”, N526 029 32/2621.



ation) przeprowadzonej metodą ważonej kombinacji liniowej (ang. *WLC – Weighted Linear Combination*). W metodzie tej przydatność poszczególnych analizowanych obiektów (komórek rastra) dla rozważanego celu określa się według wzoru (1):

$$S = \sum_{i=1}^n w_i x_i \Pi c_i \quad (1)$$

gdzie:

**S** – przydatność; **w** – waga kryterium; **x** – wartość kryterium po standaryzacji; **n** – liczba kryteriów; **c** – wartość na mapie czynników ograniczających (barier): wynosi 1 dla obszarów, na których realizacja inwestycji jest dopuszczalna i 0 dla obszarów wykluczonych.

W przeprowadzonej analizie określono 13 kryteriów o charakterze czynników decyzyjnych (tab. 2), które przedstawiono w postaci map i zestandaryzowano nadając wartości z zakresu od 0 do 255 (wykorzystując rekლasyfikację danych, operatory sąsiedztwa i odległości, algebrę map, funkcje przejścia), przy czym im wyższa wartość tym wyższa przydatność do przeprowadzenia inwestycji.

Wagi poszczególnych kryteriów określono z wykorzystaniem metody porównania parami (Saaty, 1977). W podejściu tym wagi wyliczane są na podstawie macierzy powstającej w efekcie porównania parami wszystkich kryteriów używanych w analizie i określenia (dla każdej pary) relacji ważności jednego z kryteriów względem drugiego. Efektem końcowym są wyliczone oceny ważności – wagi, które pomagają ustalić hierarchię pomiędzy czynnikami. Dodatkowo obliczany jest wskaźnik spójności (ang. *consistency index*) pozwalający na ocenę czy w przeprowadzonych porównaniach nie pojawiła się niekonsekwencja. Na potrzeby przeprowadzonych analiz, porównując czynniki decyzyjne, przyjęto dwa warianty realizacji inwestycji: wariant 1 – proekologiczny (wykluczający z analizy ściśle chronione tereny przyrodnicze) i wariant 2 – proekonomiczny (minimalizujący prace ziemne oraz liczbę obiektów inżynierskich związanych z przecięciem dróg i rzek).

Następnie opracowano syntetyczną mapę przydatności terenu na podstawie wcześniej opracowanych map czynników i obliczonych wag. Wynikiem analizy wielokryterialnej jest mapa waloryzująca teren pod względem przydatności do poprowadzenia linii kolejowej. Przykładowo dla wariantu 1 – proekologicznego, obliczone wartości wynoszą od 46 do 220, gdzie tereny o wartości 46 są najmniej przydatnymi terenami pod budowę linii kolejowej z uwagi na obrane kryteria (rys. 2a). Tak opracowana mapa uwzględnia tylko obiekty o charakterze powierzchniowym lub punktowym.

W kolejnym kroku analizy uwzględniono istnienie obiektów stanowiących bariery (ograniczenia) (rys. 2b). Uwzględniono równocześnie 5 map barier związanych z:

- obiektami różnego typu, które kolej musi ominąć, z uwagi na fakt drogiego i długiego procesu ich przenoszenia (cementarze) lub likwidacji (wieże telekomunikacyjne, głazy narzutowe) – (źródło: VMAP),
- obiektami niebezpiecznymi (źródło: VMAP),
- terenami powodziowymi (źródło: HYDRO),
- sadami i zadrzewieniami o powierzchni powyżej 10 ha (źródło: mapa pokrycia i użytkowania terenu),
- Ojcowskim Parkiem Narodowym i rezerwatami (źródło: Mapa Geośrodowiskowa Polski) – barierę uwzględniono tylko dla wariantu proekologicznego.

**Tabela 2.** Przyjęte wagi dla czynników decyzyjnych, w zależności od wariantu trasy

Czynniki decyzyjne	Źródło danych	Sposób standaryzacji	Wariant	
			1	2
Park narodowy	Mapa Geośrodowiskowa Polski	Park – bariera, im dalej od strefy ochronnej tym większa przydatność	0,092	0,058
Odległość od terenów powodziowych	Mapa Hydrograficzna Polski	W odległości powyżej 300 m obszary przydatne do poprowadzenia inwestycji	0,089	0,095
Sady i zadrzewienia	Mapa pokrycia i użytkowania terenu	Tylko o pow. pow. 10 ha, tereny w odległości powyżej 30 m o wysokiej przydatności	0,038	0,034
Skupiska zabudowy	GUS, Mapa pokrycia i użytkowania terenu	Im większe skupisko ludności w promieniu 1 km, tym większa przydatność	0,126	0,127
Odległość od terenów specjalnych, użyteczności publicznej, zabytki	Mapa pokrycia i użytkowania terenu Mapa Geośrodowiskowa Polski	Tereny poniżej 100 m o niskiej przydatności	0,073	0,091
Obiekty wodne (jeziora, bagna, tereny podmokłe, studnie)	Mapa pokrycia i użytkowania terenu Mapa Geośrodowiskowa Polski Baza HYDRO TBD	Obiekty wodne z założenia są obiektami generującymi wysokie koszty podczas kolizji z trasą linii kolejowej, dlatego uznano je za tereny o bardzo niskiej przydatności	0,075	0,051
Odległość od zabudowy	Mapa pokrycia i użytkowania terenu	200÷2000 m – tereny o wysokiej przydatności; (0 m÷200 m, hałas) lub (>2000 m, zbyt daleko od stacji) – tereny z niską przydatnością	0,056	0,091
Gleby	Mapa glebowo-rolnicza	Kompleksy 6, 7, 9 – korzystne ze względu na przydatność terenów dla wprowadzenia nowych inwestycji (wysoka przydatność) ; kompleksy 3, 4, 5, 8, 2z, 3z – średnio korzystne; kompleksy 1 i 2 niekorzystne ze względu na swoją urodzajność (niska przydatność)	0,041	0,035
Tereny ochrony ujęć wód	Mapa Geośrodowiskowa Polski	Tereny ochrony bezpośredniej ujęć wód – bariera; tereny ochrony pośredniej ujęć wód – bardzo niskie wartości przydatności	0,055	0,046
Obiekty ochrony przyrody	Mapa Geośrodowiskowa Polski	Park krajobrazowy – niska przydatność ; Obszar chronionego krajobrazu – średnia przydatność	0,199	0,114
Podłoże	Szczegółowa Mapa Geologiczna Polski Mapa Geośrodowiskowa Polski	Tereny, na których poziom wodonośny: > 2 m p.p.t. – wysoka przydatność ; 1÷2 m p.p.t. – średnia przydatność ; 0 ÷1 m p.p.t. – niska przydatność . Ze względu na budowlanych terenami najbardziej korzystnymi są te, na których występują piaski i żwiry, gliny piaszczyste. Niekorzystne podłoże budowlane tworzą utwory wrażliwe na zmiany wilgotności, grunty o obniżonej nośności o dużej zawartości wody i słabej przepuszczalności i dużej ścisłości pod obciążeniem	0,037	0,083
Pokrycie i użytkowanie terenu	Mapa pokrycia i użytkowania terenu	Tereny leśne – obszary o niskiej przydatności, tereny w odległości powyżej 30 m o wysokiej przydatności	0,057	0,080
Rzeźba terenu	NMT (LPIS)	Im bliżej powierzchni trendu 4. stopnia z NMT, tym większa przydatność	0,063	0,096

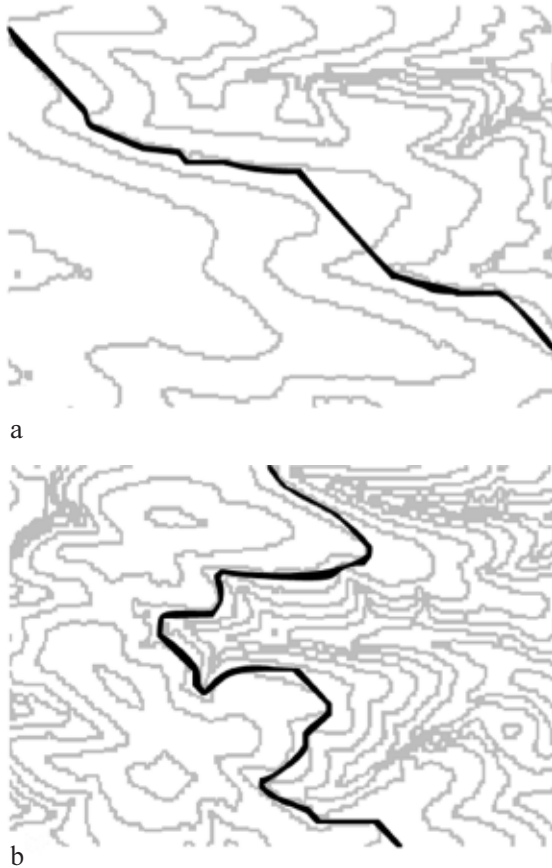


**Etap 2.** Uwzględnienie obiektów liniowych – dróg oraz rzek (źródło: TBD). Ich przecięcie z linią kolejową prowadzi do wysokich kosztów budowy – w przypadku rzek – mostów i przepustów oraz w zależności od ważności drogi – wiaduktów, tuneli lub skrzyżowań kolizyjnych jakimi są przejazdy kolejowe. Co więcej, przecięcia z tego typu obiektami zmniejszają również bezpieczeństwo oraz utrudniają komunikację. Sposób wykorzystania tych danych w analizie opisano w etapie 4.

**Etap 3.** Uwzględnienie rzeźby terenu, która jest jednym z głównych czynników, warunkujących przebieg trasy linii kolejowej – zarówno od strony technicznej jak i ekonomicznej. Profesjonalne oprogramowanie do automatycznego trasowania dróg i kolei posiada opracowane w tym celu specjalne algorytmy uwzględniające te obydwa uwarunkowania (Gipps i in., 2001). Podjęto próbę rozwiązania tego problemu bazując na posiadanych danych wysokościowych i opierając się o dostępne moduły w oprogramowaniu Idrisi. Przyjęto założenie, aby algorytm programu, wyznaczając trasę pomiędzy punktem początkowym i końcowym, przecinał minimalną liczbę warstw (nie prowadził trasy w miejscach o urozmaiconej rzeźbie terenu, a jeśli to konieczne – trawersował zbocze). Podczas manualnego projektowania trasy unika się bowiem nagłych zmian wysokości (ze względu na konieczność utrzymania reżimu jej nachylenia oraz wysokie koszty robót inżynierskich, takich jak tunele, mosty, głębokie wkopy, wysokie nasypy). Jeśli konieczne jest przekroczenie przełęczy lub dolin, wybiera się miejsca najwęższe. Rozwiązaniem przyjętym podczas trasowania w programie Idrisi jest więc „naśladowanie” manualnego tyczenia trasy przez projektanta. Dla zrealizowania tego celu bazowa rozdzielczość komórki rastra mapy NMT (30 m) jest zbyt duża. W pierwszym kroku sztucznie ją zwiększono do 10 m, a następnie odpowiednimi narzędziami wygenerowano do postaci wektorowej o cięciu warstwicowym 10 m. W ostatnim etapie dokonano konwersji ponownie na postać rastrową. Aby móc uwzględnić w analizie równocześnie wszystkie wymienione wyżej mapy, zarówno o rozdzielczości komórki 30 m, jak i 10 m, ustalono analityczną rozdzielczość piksela na 10 m (piksele 30 metrowe powstałe na etapach 1, 2, 3 zmultiplikowano do 10 m). Sposób wykorzystania tak przygotowanych danych opisano w etapie 4.

**Etap 4.** Dla wytyczenia w sposób automatyczny optymalnej trasy posłużono się tak zwanymi „mapami kosztów”. Do ich tworzenia wykorzystywane są algorytmy oparte o operatory odległości, w których uwzględniane są dodatkowe mapy czynników („mapy tarcia”) obrazujące „opór” przemieszczania się po komórce (lub całkowity zakaz). Dysponując mapą powierzchni kosztów, obliczoną od startu obliczeń (to jest komórki lub grupy komórek) i wskazując obiekt docelowy, można obliczyć optymalny przebieg „ścieżki”. Dokonując niezależnych obliczeń kosztów zarówno od obiektu startowego jak i końcowego, a następnie – za pomocą algebry map – sumując obie mapy kosztów, można uzyskać nie tylko optymalną „najtańszą” ścieżkę, ale również „korytarze” o niskich kosztach.

Obydwa te rozwiązania wykorzystano do automatycznego wyznaczenia tras oraz korytarzy pomocnych do szczegółowego trasowania manualnego. Punktem startowym obliczeń była stacja PKP Batowice leżąca na północnych obrzeżach Krakowa, punktem docelowym – miejscowość Skała. Mapa tarcia (rys. 3a) powstała na drodze algebry map, w oparciu o połączenie informacji z mapy przydatności terenu, mapy barier, mapy obiektów liniowych i rzeźby terenu. Dokonano inwersji wartości przydatności (z rys. 2a), tak aby tereny o najwyższej przydatności uzyskały niskie wartości „oporu”. Obszarom barier (z rys. 2b) przypisano wartości „-1” oznaczające dla algorytmu obliczeń kosztów obszary wykluczone całkowicie z analizy. Następnie przypisano bardzo wysokie wartości tarcia dla obiektów liniowych



**Rys. 5.** Automatyczne trasowanie z uwzględnieniem warunku minimalizacji przecięcia warstwicy:  
 a – fragmenty trasy biegnącej wzdłuż warstwicy,  
 b – trawersowanie zbocza o zróżnicowanej rzeźbie wzdłuż krętej warstwicy

zach danych. Nawet jednak w przypadku konieczności ich aktualizacji, wykorzystanie dostępnych baz danych przestrzennych umożliwia szybsze i tańsze działania projektowe. Na podkreślenie zasługuje również fakt, iż w procesie aktualizacji danych bardzo pomocne są teledetekcyjne dane obrazowe, które z natury posiadają zazwyczaj wyższy poziom aktualności.

Dostępne w ramach infrastruktury informacji przestrzennej bazy danych pozwalają na budowę bazy danych przydatnych dla rozważanego problemu projektowego. Dane te, zestawione w formie map tematycznych, mogą być potem wykorzystywane w manualnym procesie trasowania. Jednak, jak pokazano na przykładzie omówionego w artykule problemu lokalizacji linii kolejowej, możliwe jest również z powodzeniem wykorzystanie narzędzi analitycznych dostępnych w oprogramowaniu GIS do częściowej automatyzacji tego procesu. Co więcej, narzędzia te umożliwiają również wsparcie procesu decyzyjnego poprzez uwzględnienie różnych wariantów konstrukcji reguły decyzyjnej, w zależności od preferencji różnych zainteresowanych stron.

i warstwicy. Obliczony optymalny przebieg trasy w wariantcie proekologicznym, na tle korytarza niskich kosztów, przedstawia rysunek 3b.

Dla wariantu proekonomicznego (rys. 4a) zastosowano inny zestaw wag (patrz tab. 2) oraz zwiększono znaczenie obiektów liniowych utrudniających inwestycję (drog, rzek), przypisując im wyższe wartości oporu niż dla wariantu proekologicznego. Analogicznie, sterując wartościami oporu przypisanymi do warstwicy, można wpływać na stopień uwzględnienia znaczenia NMT w procesie wyznaczania trasy (rys. 4b). Testy bazujące na wyznaczaniu optymalnej trasy opartym tylko na tym czynniku wykazały skuteczność takiego zabiegu (rys. 5).

## Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone prace potwierdzają, iż cyfrowe zbiory danych przestrzennych, dostępne w Polsce w ramach krajowej infrastruktury danych przestrzennych, z powodzeniem mogą zostać wykorzystane do wsparcia procesu trasowania infrastrukturalnych obiektów liniowych. Należy jednak zaznaczyć, iż z punktu widzenia praktycznego zastosowania niezwykle istotnym aspektem jest odpowiedni poziom aktualności wykorzystywanych w anali-

W trakcie analiz nie udało się uwzględnić czynników związanych z parametrami technicznymi trasy. Nie wyznaczono terenów, które spełniałyby parametr techniczny, jakim jest pochylenie miarodajne (w pewnym zakresie postulat ten realizowano poprzez linię trendu dla NMT). Aby spełnić techniczne wymagania podczas budowy linii trzeba byłoby wyrównać ją przez nasypy i wykopy. W niektórych miejscach nieuniknione jest wybudowanie obiektów inżynierskich takich jak mosty i wiadukty. Powstała trasa nie spełnia również wymagań jeśli chodzi o minimalne promienie łuków poziomych. Rozwiązaniem tego problemu jest jednak zaproponowana metoda wyznaczenia szerszego korytarza niskich kosztów, w którym projektant mógłby już manualnie projektować linię. W kolejnych etapach procesu projektowego – szczegółowym trasowaniu wybranego wariantu – należałoby wygładzić przebieg trasy, dysponując danymi w większych skalach (1: 10 000 lub 1: 5 000).

Podsumowując – cyfrowe dane przestrzenne oraz współczesne narzędzia geoinformacyjne mogą z powodzeniem znaleźć zastosowanie na etapie projektowania wstępnego infrastrukturalnych inwestycji liniowych, na którym następuje wybór wariantów trasy. Zawierają one niezbędne informacje na temat topografii, geologii, istniejącej infrastruktury oraz elementów przyrodniczych. Użycie systemów informacji geograficznej do wspomaganie decyzji planistycznych dotyczących nowych połączeń komunikacyjnych generuje duże korzyści, pozwalając zwłaszcza na obniżenie kosztów i oszczędność czasu. Dodatkowo, dzięki możliwości uwzględniania preferencji różnych grup interesów, stać się mogą narzędziem ułatwiającą komunikację planisty i inwestora ze społeczeństwem oraz partycypację społeczną w procesie planistycznym.

## Literatura

### Pozycje podręcznikowe i publikacje

- Basiewicz T., 1977: Nowoczesne metody projektowania dróg komunikacyjnych, Seria: Studia z zakresu inżynierii – Polska Akademia Nauk, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, nr w serii: 16, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Basiewicz T., 1982: Projektowanie linii kolejowych, Politechnika Krakowska, Kraków.
- Basiewicz T., 1988: Projektowanie infrastruktury kolejowej, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Gipps P. G., Gu K. Q., Held A., Barnett G., 2001: New technologies for transport route selection. *Transportation Research Part C*, 9: 135-154.
- Maneck A. (red.), 2000: Sozologiczne uwarunkowania bonitacji terenu dla modernizacji i lokalizacji obiektów komunikacji z uwzględnieniem zasad ekorozwoju. *Metodyka – opracowanie modelowe na przykładzie okolic Krakowa*. Zakład Sozologii IGSMiE PAN, Kraków.
- Massel A., 2006: Projekt linii dużych prędkości Wrocław/Poznań-Łódź-Warszawa. Międzynarodowa konferencja naukowo-techniczna „Nowe i modernizowane połączenia kolejowe w Polsce”, Warszawa, 10-11 maja: 17-29.
- Saaty T. L., 1977: A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15: 234-281.
- SENER Ingeniería y Sistemas, S.A., 2008. Rozwój szybkich kolei. Doświadczenia hiszpańskie. Konferencja naukowo-techniczna „Projektowanie, budowa i utrzymanie infrastruktury w transporcie szynowym”, Zakopane, 9-11 kwietnia: 232-246.
- Sysak J., 1982: Podstawy dróg kolejowych, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa.
- Towpik K., 2009: Infrastruktura transportu kolejowego. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

**Spis najważniejszych aktów prawnych związanych z lokalizacją linii kolejowych na etapie prac przedprojektowych (w kolejności chronologicznej)**

- Ustawa z dnia 4 lutego 1994 roku Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. 2005 Nr 228, poz. 1947, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 3 lutego 1995 roku o ochronie gruntów rolnych i leśnych (Dz.U. 2004 Nr 121, poz. 1266, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 21 sierpnia 1997 roku o gospodarce nieruchomościami (Dz.U. 1997 Nr 115, poz. 741, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 roku Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2001 Nr 62, poz. 627, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 18 lipca 2001 roku Prawo wodne (Dz.U. 2001 Nr 115, poz. 1229, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 27 marca 2003 roku o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym (Dz. U. 2003 Nr 80, poz. 717, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 28 marca 2003 roku o transporcie kolejowym (Dz.U. 2003 Nr 86, poz. 789, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 23 lipca 2003 roku o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami (Dz. U. 2003 Nr 162, poz. 1568, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 16 kwietnia 2004 roku o ochronie przyrody (Dz.U. 2004 Nr 92, poz. 880, z późn. zm.).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 lipca 2004 roku w sprawie gatunków dziko występujących roślin objętych ochroną (Dz.U. 2004 Nr 168, poz. 1764).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 21 lipca 2004 roku w sprawie obszarów specjalnej ochrony ptaków Natura 2000 (Dz.U. 2004 Nr 229, poz. 2313, z późn. zm.).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 28 września 2004 roku w sprawie gatunków dziko występujących zwierząt objętych ochroną (Dz.U. 2004 Nr 220, poz. 2237).
- Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 9 listopada 2004 roku w sprawie określenia rodzajów przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko oraz szczegółowych uwarunkowań związanych z kwalifikowaniem przedsięwzięcia do sporządzenia raportu o oddziaływaniu na środowisko (Dz.U. 2004 Nr 257, poz. 2573, z późn. zm.).
- Ustawa z dnia 28 lipca 2005 roku o lecznictwie uzdrowiskowym, uzdrowiskach i obszarach ochrony uzdrowiskowej oraz o gminach uzdrowiskowych (Dz.U. 2005 Nr 167, poz. 1399, z późn. zm.).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 roku w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz.U. 2007 Nr 120, poz. 826).
- Ustawa z dnia 3 października 2008 roku o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. 2008 Nr 199, poz. 1227, z późn. zm.).

**Abstract**

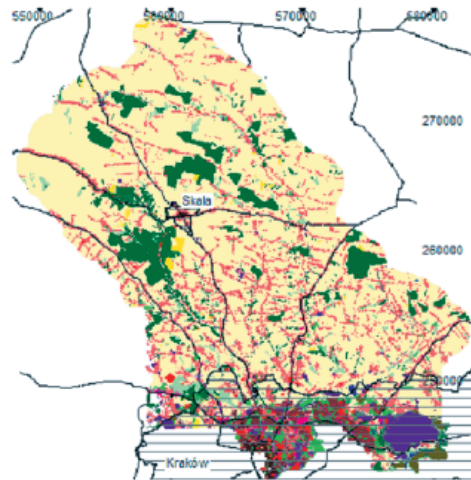
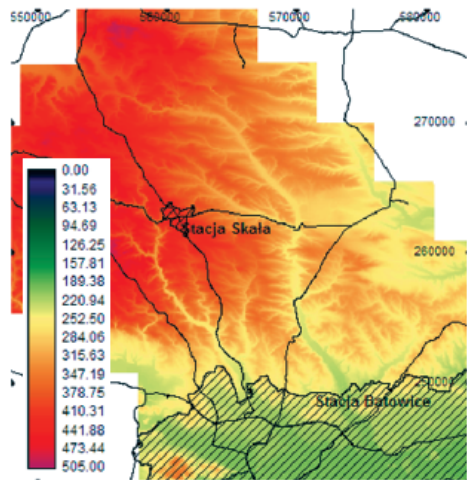
*Setting routes for linear objects such as roads, railways or pipelines is a complex planning task. Today, when the process of modernizing transport infrastructure is under way, there are some crucial aspects to discuss.*

*In this paper, the scope of information was defined necessary to set the route, including the content and data quality. It was done according to legal and technical requirements. Some environmental, economical, social and technical factors were considered. In the next step of the process, the spatial data accessible in Poland were selected to meet the requirements. It was also presented how to use this data and spatial analyses (using both vector and raster data) for setting linear object routes*

dr inż. Wojciech Drzewiecki  
drzewiec@agh.edu.pl  
tel. 12 617 22 88

mgr inż. Emilia Orzińska  
emiliaorzinska@gmail.com

dr inż. Tomasz Pirowski  
pirowski@agh.edu.pl  
tel. 12 617 22 88

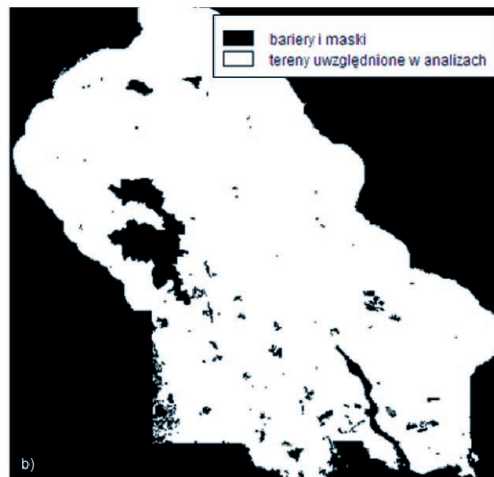
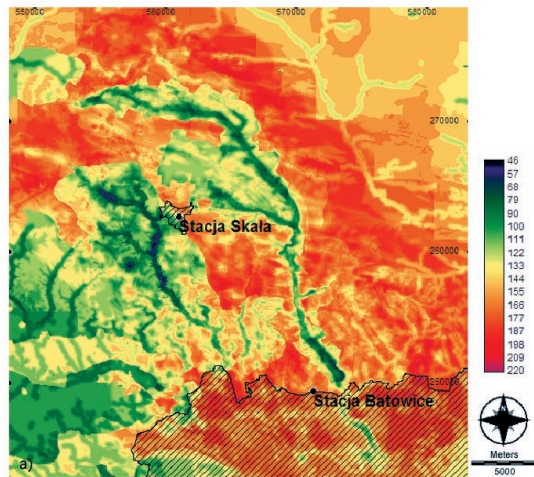


### Legenda

- zabudowa zwartemiejscowa
- zabudowa luźna wielorodzinna
- zabudowa luźna jednorodzinna
- zabudowa letniskowa
- zabudowa przemysłowa
- zabudowa handlowa
- zabudowa użyteczności publicznej / ter. specjalne
- tereny komunikacyjne
- kopalnie i zwalowiska
- budowy
- zieleń urządzone
- tereny rolnicze
- użytki zielone
- nieużytki
- lasy
- zadrzewienia i zakrzewienia
- tereny otwarte ze sporadyczną roślinnością
- podmokłości
- wody

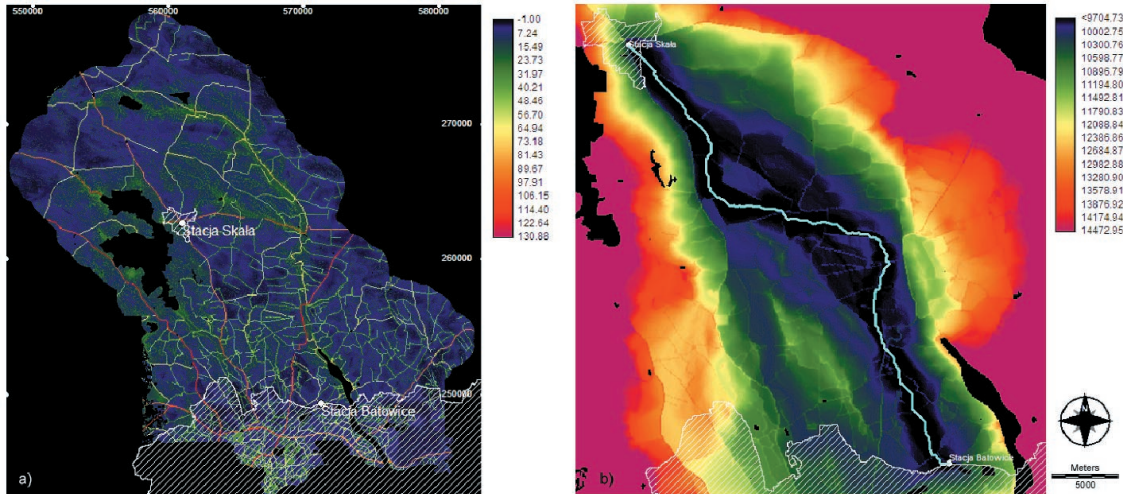


**Rys. 1.** Obszar analiz – wybrane warstwy tematyczne z bazy danych przestrzennych: a – NMT; b – mapa pokrycia i użytkowania terenu

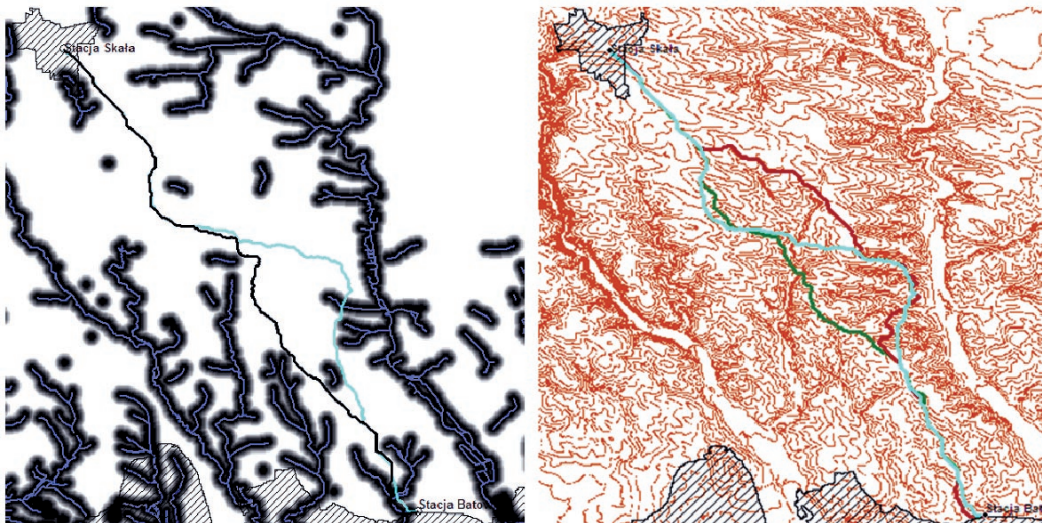


**Rys. 2.** Metoda ważonej kombinacji liniowej; wariant 1 – proekologiczny: a – mapa przydatności terenu bez uwzględnienia barier, obiektów liniowych i NMT; b – mapa barier





**Rys. 3.** Automatyczne projektowanie przebiegu linii kolejowej: a – mapa tarcia (wartości -1 wykluczają obszar z analiz, im wartości wyższe, tym „droższy” teren do prowadzenia trasy), b – wariant proekologiczny trasy (w tle mapa kosztów – niskie wartości wyznaczają korytarz do trasowania manualnego)



**Rys. 4.** Wyznaczenie wariantów tras: a – proekologiczny (kolor niebieski) i proekonomiczny (kolor czarny) wariant na tle rzek i ich stref buforowych; b – wariant proekonomiczny na tle warstwic, z różnym poziomem uwzględnienia rzeźby terenu (kolor zielony – słabe uwzględnienie NMT, niebieski – średnie, czerwony – silne)