UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI
WYDZIAŁ BIOLOGII I NAUK O ZIEMI

PRACA MAGISTERSKA

ZASTOSOWANIE GIS W TYPOLOGII OBSZARÓW POTENCJALNEGO WYSTĘPOWANIA LAWIN ŚNIEŻNYCH NA PRZYKŁADZIE REJONU KASPROWEGO WIERCHU W TATRACH

PAWEŁ CHRUSTEK

**Praca wykonana w Zakładzie
Systemów Informacji Geograficznej Instytutu Geografii
i Gospodarki Przestrzennej UJ
pod kierunkiem prof.dr hab. Wojciecha Widackiego**

KRAKÓW 2005

Podziękowania

*Składam serdeczne podziękowania Panu Promotorowi **prof. dr hab. Wojciechowi Widackiemu** za pomoc i cenne wskazówki udzielane podczas pisania niniejszej pracy.*

*Dziękuję także osobom, które udzieliły mi życzliwej pomocy w gromadzeniu niezbędnych materiałów. Szczególnie dziękuję: Pani **dr M. Maggioni** (Uniwersytet w Turynie, Federalny Instytut do Badań Śniegu i Lawin w Davos), Panu **dr A. Ghinoi** (Uniwersytet w Wiedniu), Panu **mgr M. Karzyńskiemu** (IMGW – Kraków), Panu **mgr inż. M. Guzikowi** (TPN – Zakopane) i koledze **st. instr. rat. górskiego dr J. Radlińskiemu** (Grupa Podhalańska GOPR).*

Spis treści

Spis treści ... **3**
1. Wprowadzenie ... **5**
2. Cel Pracy ... **7**
3. Zarys historii badań lawinowych w Europie ... **8**
4. Śnieg jako główne tworzywo lawin ... **13**
4.1 Śnieg i opady śnieżne ... 13
4.2 Pokrywa śnieżna i jej przeobrażenia ... 15
5. Lawiny śnieżne – ich klasyfikacje i główne czynniki powstawania ... **19**
5.1 Typy lawin śnieżnych ... 20
5.1.1 Lawiny pyłowe ... *21*
5.1.2 Lawiny deskowe ze śniegu osiadłego ... *22*
5.1.3 Lawiny deskowe – gipsowe ... *23*
5.1.4 Lawiny śniegu ziarnistego ... *23*
5.2 Czynniki lawino - twórcze ... 24
5.2.1 Czynniki stałe ... *25*
5.2.1.1 Nachylenie zboczy ... 25
5.2.1.2 Ekspozycja ... 27
5.2.1.3 Wegetacja ... 27
5.2.1.4 Rodzaj podłoża ... 29
5.2.1.5 Wysokość ... 29
5.2.1.6 Kształt stoków ... 30
5.2.2 Czynniki zmienne - meteorologiczne ... *31*
5.2.2.1 Opady ... 31
5.2.2.2 Wiatr ... 32
5.2.2.3 Oddziaływanie ciepła – krótkofalowego i długofalowego ... 36
6. Mapy zagrożenia lawinowego w Europie ... **39**
7. Charakterystyka terenu badań ... **43**
7.1 Położenie ... 43
7.2 Środowisko przyrodnicze ... 44
8. Materiały, narzędzia i metoda pracy ... **46**
8.1 Materiały źródłowe ... 46
8.2 Narzędzia pracy ... 47

8.2.1 Systemy Informacji Geograficznej *48*
8.2.2 Wyznaczanie parametrów morfologicznych z Cyfrowego Modelu Rzeźby (DEM) *50*
8.2.2.1 Nachylenie i ekspozycja 50
8.2.2.2 Zakrzywienie powierzchni (Curvanture-ArcInfo) 51
8.2.3 Wpływ rozdzielczości DEM na określanie parametrów morfologicznych *52*
8.3 Metody 53
8.3.1 Tworzenie obszarów potencjalnego występowania lawin śnieżnych (PRA) *53*
8.3.1.1 Wyznaczanie obszarów potencjalnego występowania lawin śnieżnych (PRA) 53
8.3.1.2 Charakterystyka topograficzna i morfologiczna obszarów PRA 62
8.3.2 Typologia obszarów PRA pod względem stopnia ryzyka uwolnienia lawiny *64*
9. Wyniki 83
9.1 Obszary PRA i ich charakterystyka topograficzno-morfologiczna 83
9.2 Typologia obszarów PRA pod względem stopnia ryzyka uwolnienia lawiny 86
10. Weryfikacja wyników 88
10.1 Weryfikacja lokalizacji obszarów PRA 89
10.2 Weryfikacja Map Stopnia Zagrożenia Wystąpienia Lawiny 92
10.3 Weryfikacja – podsumowanie 98
10.4 Praktyczne zastosowanie map wynikowych 99
10.5 Dyskusja na temat zastosowanych metod 102
11. Podsumowanie 107
12. Literatura 109
13. Spis tabel 112
14. Spis rycin 113
15. Spis rysunków 115
16. Spis fotografii 117

1. Wprowadzenie

Problematyka lawin od dawna interesowała badaczy. Ze względu na złożoność problemu, badaniem lawin zajmują się zwykle interdyscyplinarne zespoły badawcze. W krajach, gdzie tereny górskie pokrywają duże powierzchnie ranga problemu lawin śnieżnych staje się znacząca. Niszczycielski żywioł przynosi nie tylko śmierć, powoduje także wiele zniszczeń w infrastrukturze (McClung, Shaerer 1993). Wywierają także wpływ na rzeźbę gór, modelując na zboczach głębokie bruzdy zwane żlebami, przez wyprzątanie z nich gruzu i usypywanie z niego stożków piargowych (Kondracki, 2001).

Każdego roku, lawiny pochłaniają więcej niż 150 ofiar na całym świecie. W europejskiej historii największą katastrofą było zejście lawiny we francuskiej dolinie Val d'Isere w 1970 roku, która wpadając w osiedle mieszkalne spowodowała śmierć 39 osób. Tej samej zimy lawina zniszczyła sześć budynków w szwajcarskiej miejscowości Rackingen przynosząc śmierć 30 osobom.

Innym przykładem spoza kontynentu europejskiego może być katastrofa w himalajskiej wiosce Gusikar na północy Indii, gdzie 7 maja 1979 r zginęło 35 osób. W sumie w tamten katastrofalny weekend na skutek zejścia lawin w indyjskich wioskach zginęło ok. 200 osób.

W Tatrach Polskich ze względu na znacznie mniejszy obszar i brak na nim osiedli mieszkalnych problem lawin posiada mniejszą wagę. Nie oznacza to jednak, że jest mało znaczący. Warto zwrócić uwagę, że podobnie jak w innych górskich rejonach już w XIX wieku zimowa aktywność górska, także w Tatrach zaczęła stawać się coraz bardziej popularna. Ważną datą w historii tatrzańskiej jest 8 lutego 1909 roku, kiedy to właśnie w lawinie spod Małego Kościelca ginie Mieczysław Karłowicz, jeden z głównych inicjatorów założenia Tatrzańskiego Ochotniczego Pogotowia Ratunkowego. Od tamtego czasu statystyki pokazują że w Tatrach Polskich w lawinach corocznie ginie od 2 do kilku osób. Do największej tragedii lawinowej w Tatrach doszło 28 lutego 2003 roku w rejonie Rysów (2499 m.n.p.m.). Lawina porywając grupę licealistów przyniosła śmierć siedmiu młodym ludziom.

Warto w tym miejscu zaznaczyć że lawiny w Polsce nie występują tylko w Tatrach, a do największej tragedii lawinowej w Polsce doszło 20 marca 1968 roku w Białym Jarze w Karkonoszach. Zginęło wtedy 21 osób.

Poza Tatrami i Karkonoszami lawiny występują także w Bieszczadach i w masywie Babiej Góry.

Za kolebkę wiedzy o lawinach w Europie, uważa się ośrodki badawcze w krajach Alpejskich. Już pod koniec XIX stulecia, szybki rozwój tamtejszych ośrodków turystycznych. spowodował znaczący wzrost liczby zabudowań mieszkalnych, hoteli czy górskich odcinków dróg. Przed społeczeństwem górskim stanęło wtedy bardzo ważne pytanie: jak osiągnąć maksymalne korzyści z odwiedzających zimą turystów przy jednoczesnym ograniczeniu wszelkiego ryzyka do minimum? Dodatkowo coraz częstsze zniszczenia w infrastrukturze i zwiększająca się ilość ofiar śmiertelnych spowodowana zejściem lawin, spowodowały, że problemem musiały zainteresować się organizacje rządowe tamtych krajów, które w efekcie zaczęły finansować badania przyczyniające się do ograniczenia tej niekorzystnej tendencji. Analogicznie wraz ze wzrostem popularności zimowej aktywności górskiej rodziły się ważne ośrodki badawcze, także poza krajami alpejskimi - w krajach skandynawskich, Ameryce Północnej czy na wyspach Japonii (Ghinoi, 2003).

Jak już wspomniano na wstępie badaniem lawin zajmują się interdyscyplinarne zespoły badawcze. Technologia GIS znalazła szerokie zastosowanie w owych badaniach, głównie przy tworzeniu map zagrożenia lawinowego. Narzędzia i aplikacje Systemów Informacji Geograficznej uznane zostały w tej dziedzinie jako potężne narzędzie do tworzenia bazy danych i wykonywania wszelkich zaawansowanych analiz przestrzennych (Ghinoi, 2003). Jak podaje literatura ok. 65% map zagrożenia lawinowego w Europie zostało skonstruowanych dzięki owej technologii (Ghinoi, 2003). Podstawą przy opracowywaniu owych map jest wyznaczenie obszarów potencjalnego uwolnienia lawiny. W połączeniu ze skomplikowanymi modelami dynamicznymi przyczyniają się do powstania syntetycznych map zagrożenia lawinowego, niezbędnych w planowaniu przestrzennym, czy w bieżącym informowaniu o stopniu zagrożenia lawinowego na obszarach górskich.

2. Cel Pracy

Celem niniejszej pracy jest wyznaczenie w rejonie badań, obszarów potencjalnego występowania lawin (w sensie uwolnienia lawiny), ich charakterystyka topograficzno – morfologiczna, oraz typologia ze względu na stopień ryzyka wyzwolenia potencjalnej lawiny. Jak wspomniano powyżej jest to podstawa w tworzeniu syntetycznych analiz i map zagrożenia lawinowego.

Badanie oparto głównie na analizie Cyfrowego Modelu Terenu wykorzystując metody naukowców z Instytutu do Badań Śniegu i Lawin w Davos. Cel ten będzie realizowany poprzez wykorzystanie nowoczesnych technik komputerowych jakie dają Systemy Informacji Geograficznej w oparciu o dane rastrowe i wektorowe.

Celem poznawczym jest określenie przestrzennej lokalizacji i wielkości terenów potencjalnie zagrożonych uwolnieniem lawiny. Co wykorzystane może zostać w dalszych interdyscyplinarnych badaniach, czy też do bezpieczniejszego planowania wszelkiej zimowej górskiej aktywności.

Do weryfikacji wykorzystanych metod posłużą istniejące mapy analogowe i cyfrowe dotyczące historycznych lawin na badanym obszarze.

W celu przybliżenia zjawiska lawin śnieżnych w pierwszej części pracy przedstawiono krótką historię badań lawinowych na świecie a w szczególności na kontynencie europejskim, oraz podstawowe zagadnienia dotyczące problematyki śniegu i lawin śnieżnych.

3. Zarys historii badań lawinowych w Europie

W języku łacińskim używano słowa „labor" chcąc wyrazić pojęcie „zsuwania się" i z tegoż słowa skonstruowano termin „labina" oznaczający zsuwanie się mas śniegu. Ligurowie żyjący ponad 2000 lat p.n.e. używali pojęcia „lave" do opisania zsuwającego się ze stoków rumoszu skalnego lub wulkanicznej lawy. Włoskie słowo „lavina" posiada łacińskie korzenie i oznacza zimową i wiosenną lawinę śnieżną. Podobnie niemieckie słowo „Lawine" posiada swoje źródło w łacińskim słowie „labina". Francuzi używając słowa „aval" (oznaczającego „w dół doliny") skonstruowali słowo „avalanche". Angielskie „avalanche" (wzięte z francuskiego języka) posiada ramy pojęciowe ograniczające się do „szybkiego i nagłego ruchu śniegu lodu czy skał w dół stoku". W związku z tym chcąc wyrazić „labinę" w jezyku angielskim przed słowo „avalanche" winno znaleźć się słowo „snow". W jezyku polskim słowo „lawina" jest fonetyczną odmianą łacińskiego słowa „labina" i wedle Encyklopedii PWN oznacza „zsuwające się lub staczające z dużą prędkością masy kamienne (l. kamienne) lub śniegu (l. śnieżne)".

Jak wiadomo z literatury pierwszymi którzy przeciwdziałali niszczycielskim skutkom lawin byli Austriacy, którzy już w 1613 r. wznosili pierwsze mury ochronne wokół górskiej wioski Galtur (w tyrolskiej dolinie Paznaun), i trzydzieści lat później pierwszą skalną terasę chroniącą wysokogórską kolej (Bauer, 2001; za Ghinoi 2003). Francuzi jako pierwsi w 1860 roku wprowadzili zalesianie potencjalnie niebezpiecznych stoków, co przyczyniać się miało do stabilizacji pokrywy śnieżnej. Podobny typ przeciwdziałania wprowadzono w Szwajcarii w 1860 r. W 1874 powstał Federalny Inspektorat Leśny (Federal Forestry Inspectorate), który w 1878 dał oddziałom w Kantonach wyraźne instrukcji na temat rejestrowania danych o lawinach śnieżnych. Sporządzane na tej podstawie dzienniki zawierały rejestr obszarów potencjalnie zagrożonych, opis występujących przypadków lawin i rejestr wyrządzanych przez lawiny szkód. Wszystkie prowadzone obserwacje zostały pierwszy raz opublikowane w 1910 r. pod tytułem „Statistik und Verbau der Lawinen in den Schweizeralpen".

Pod koniec XIX stulecia zakończona została budowa kolei biegnącej przez Alpy. Wiadomym stało się, że ochrona przeciw lawinom wymaga konkretnych działań. Na tym polu sławą badawczą odznaczył się Vincenzo Pollack, będący Inspektorem Kolejowym

ówczesnego Księstwa Habsburskiego. Jego starania badawcze doprowadziło do zwołania konferencji w Wiedniu w roku 1890, na której dyskutowano o wspólnych międzynarodowych metodach przeciwdziałania niszczycielskim lawinom. Niestety wraz z wybuchem pierwszej wojny światowej wszelka współpraca międzynarodowa na tym polu została zawieszona.

W 1931 r. z inicjatywy prof. Poulke powstaje Szwajcarska Komisja do Badań Śniegu i Lawin (Swiss Commission for the Researches on Snow and Snow Avalanches). W związku z tym na ziemiach szwajcarskich powstaje wiele stacji badawczych miedzy innymi grupa badawcza rozpoczyna prace w Davos Platz (1600 m), przenosząc kilka lat później stację badawczą na górę Weissfluhjoch (2670 m). W 1939 rezultat owych badań zostaje opublikowany pod tytułem „Śnieg i jego metamorfozy" („Snow and its metamorphosis"). Podczas drugiej wojny światowej w 1942 r. Szwajcarzy zakładają „Federal Institute for Snow and Snow Avalanche Studies" (S.N.V.) na górze Weissfluhjoch. W tym samym czasie pierwsze biuletyny lawinowe zostają wprowadzone i systematycznie ulepszane przez Swiss Alpine Club. Od 1945 r. biuletyny te wydawane są przez S.N.V.

Po katastrofach lawinowych jakie nawiedziły Alpy w pierwszych miesiącach roku 1951 położono silny nacisk na skonstruowaniu „Instrukcji Lawinowych" dla samorządów lokalnych. Opracowane Instrukcje przez S.N.V. zawierały następujące informacje: mapy w skali 1 : 50 000 wskazujące obszary potencjalnie zagrożone lawinami, szlaki potencjalnych spływów, dane dotyczące topografii dróg zejściowych, częstość występowania i sposoby przeciwdziałania skutkom.(Frutiger, 1974 za Ghinoi, 2003).

W następnych latach S.N.V. systematycznie publikował wyniki prowadzonych badań nad mechaniką śniegu i dynamiką śnieżnych lawin. Rezultatem tego były narodziny nowych aktywnych metod kontrolowania lawin – w 1955 powstaje pierwszy instrument, wykonany z całości ze stali służący do kontroli dynamiki lawin. W tym samym roku badacz Voellmy pisze pierwsze podstawowe równania dynamiki śnieżnych lawin, otwierając nowe pole badawcze – badania nad dynamicznymi modelami. Owe równania po dzień dzisiejszy wykorzystywane są w wielu aplikacjach komputerowych symulujących dynamikę lawin.

W 1968, włoska Komisja do Badań Śniegu i Lawin (Commission for Snow and Snow Avalanches) zdecydowała się na wykonaniu spisu zadań prowadzonych w kierunku przeciwdziałania lawinom i ich skutkom. Uznano, że dla odpowiedniej oceny sytuacji lawinowej niezbędne są następujące kroki: wykonywanie obserwacji meteorologicznych,

gromadzenie materiałów fotograficznych z rejonów mających duże znaczenie turystyczne, kodowanie danych czy propagowanie wiedzy o lawinach poprzez różnego rodzaju biuletyny. Wytyczne na temat obserwacji meteorologicznych i prognozowania lawin zapożyczono ze szwajcarskiego S.N.V z Davos.

W ciągu lat siedemdziesiątych znacząco wzrosła liczba turystów odwiedzających Alpy. Fakt ten zwrócił uwagę badaczy, którzy stopniowo odkrywali nowe drogi do oceny stopnia zagrożenia lawinowego oraz przyczynili się do powstania pierwszego planu zagospodarowania na terenach zagrożonych.

Norwegowie rozwinęli statystyczne metody do kalkulowania zasięgów lawin (zasięgów czoła lawin ang. „run out zone") bazując wyłącznie na parametrach topograficznych. Stworzone modele dały pozytywny rezultat nie tylko w Norwegii, ale także pomyślnie sprawdziły się w niektórych rejonach Alp.

W dniu dzisiejszym społeczność naukowców zajmująca się tematyką śniegu i lawin rozszerzyła się na cały świat osiągając rozmiary których nie spodziewał się na pewno V. Pollack przed Konferencją w Wiedniu w roku 1890.

Projekt Unii Europejskiej SAME (Snow Avalanche Modelling and Warning in Europe) zgromadził w ostatnich latach wiedzę rozproszoną po europejskich krajach gdzie tematyka lawin daje znać o sobie. Ideą zgromadzenia wiedzy była późniejsza możliwość opracowywania nowych projektów osadzonych na wspólnym gruncie.

W Polsce niesystematyczne badania śniegu i lawin sięgają początku ubiegłego wieku. Od tego czasu ukazało się szereg publikacji dotyczących śniegu, genezy lawin oraz ich zasięgu. Klasycznym jest dzieło Dobrowolskiego „Historia naturalna lodu" (Dobrowolski, 1923).

Najważniejsze prace dotyczące problematyki śniegu i lawin to przede wszystkim prace M. Zaruskiego (1910), W. H. Paryskiego (1948), L. Sawickiego (1910), W. Pawlika (1931), W. Milaty (1937), A. Kosiby (1978), K. Chomicza (1963), A. Myczkowskiego (1962), M. Sadowskiego (1971), M. Klapowej (1980).

Systematyczne badania śniegowe i lawinowe w Tatrach zainicjował w roku 1959 K. Chomicz. W roku 1960 do programu badań klimatologicznych Stacji Badań Niwalnych IMGW na Hali Gąsienicowej włączono badania śniegowe i lawinowe, według wytycznych przygotowanych przez K. Chomicza. Kierownictwo stacji na Hali Gąsienicowej objęła wtedy Maria Kłapowa, rozszerzając znacznie program badań.

Fot. 3.1 Stacja Badań Niwalnych IMGW na Hali Gąsienicowej (fot. P. Chrustek)

Badania obejmowały fizyczne właściwości pokrywy śnieżnej, częściowo też i właściwości dynamiczne, oraz rejestrację spadłych lawin śnieżnych. Zmierzano do poznania przyczyn i prawidłowości tworzenia się lawin, oraz ustalenia wartości krytycznych dla oceny stabilności pokrywy śnieżnej na stoku. Wieloletni materiał obserwacyjny, dotyczący rozmieszczenia, liczby i wielkości lawin umożliwił opracowanie syntetycznej mapy zasięgów i częstości lawin śnieżnych w Tatrach. Dane dotyczące lawin spadłych były publikowane w latach sześćdziesiątych w Pracach PIHM „Śnieg i Lawiny w Tatrach".

Jednym z efektów długoletnich badań jest również opracowana w 1989 roku przez M. Kłapową „Instrukcja do prognozowania Lawin Śnieżnych w Tatrach Polskich".

W połowie lat 80-tych z powodów ekonomicznych nastąpiła znaczna redukcja programu pomiarowego. Stacja funkcjonowała jedynie jako posterunek meteorologiczny z zawężonymi do minimum obserwacjami pokrywy śnieżnej. Redagowany był jednak nadal – jeden raz w tygodniu – Komunikat Narciarski, jak również określano codziennie stopień zagrożenia lawinowego według wspomnianej instrukcji, przekazując sugestię do Tatrzańskiego Ochotniczego Pogotowia Ratunkowego i Tatrzańskiego Parku Narodowego. (na podstawie niepublikowanych materiałów IMGW).

Obecnie w krakowskim oddziale IMGW w Dziale Służby Obserwacyjno - Pomiarowej Wisły Górnej i Zespole Modelowania Numerycznego, trwają prace nad adaptacją i uruchomieniem modeli SAFRAN – CROCUS – MEPRA (SCM), które pozwalają określać stopień zagrożenia lawinowego. Modele opracowano w CEN (Centre d'Etudes de la Neige - Snow Study Centre) w Grenoble dla obszaru Alp Francuskich

i Pirenejów. Stopień zagrożenia lawinowego obliczany jest poprzez symulację czasowo-przestrzenną stratygrafii pokrywy śnieżnej i analizę jej stabilności w zależności od nachylenia stoków, ich wysokości nad poziomem morza i ekspozycji. Prognoza stopnia zagrożenia obliczona jest dla lawin naturalnych i wywołanych sztucznie.

Poza obszarem Tatr systematyczne badania lawinowe prowadzone są przez służby Górskiego Ochotniczego Pogotowia Ratunkowego.

Chociaż nie tyczy się to obszaru europejskiego nie sposób pominąć osiągnięć badawczych w Północnej Ameryce (w Stanach Zjednoczonych i Kanadzie) prowadzone na bardzo wysokim poziomie od lat 50 XX stulecia. Szczególnie w latach 50-tych powstało tam wiele biur prognozowania lawinowego zaopatrzone w stacje badawcze, wyposażone w profesjonalne instrumenty i narzędzia do pozyskiwania i obróbki danych.

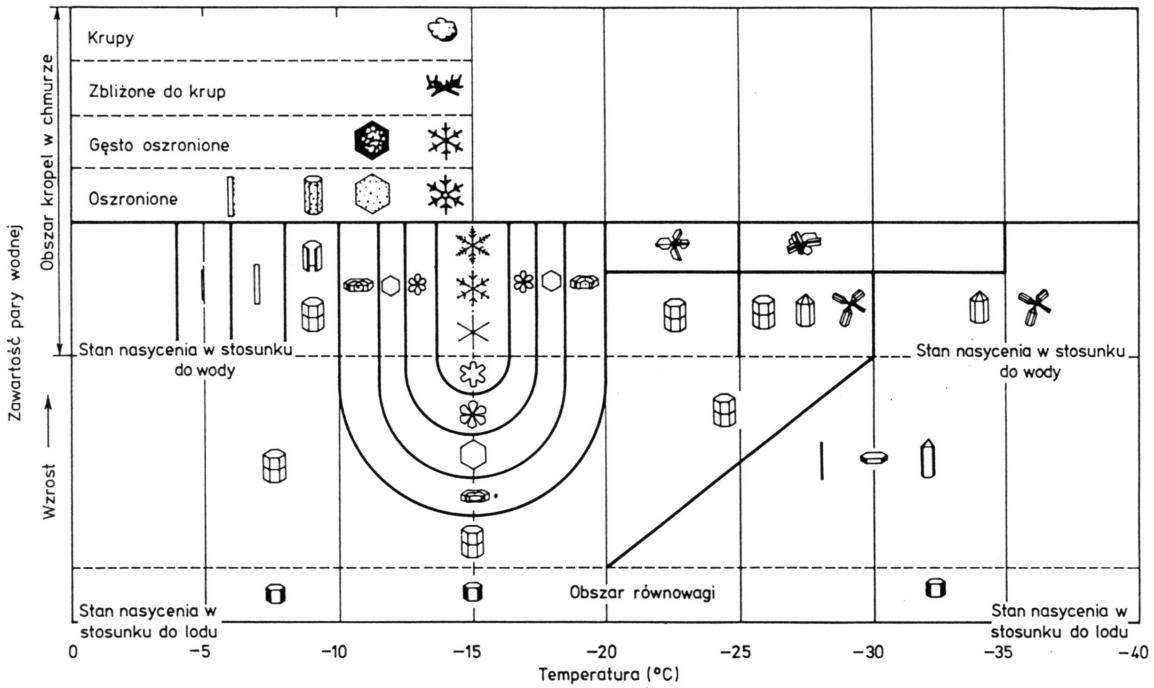
4. Śnieg jako główne tworzywo lawin

4.1 Śnieg i opady śnieżne

Termin „**śnieg”** może mieć wiele znaczeń. W meteorologii oznaczać może zarówno opad atmosferyczny w postaci stałej - **śnieżynek** (kryształki lodu, tworzące często delikatne rozgałęzione formy), jak również proces wypadania śnieżynek (opad śnieżny). Często pod tym pojęciem rozumie się **pokrywę śnieżną,** którą z geologicznego punktu widzenia można traktować jako luźną, porowatą skałę osadową zbudowaną z kryształków lodowych lub ich fragmentów pochodzenia atmosferycznego (Dobrowolski, 1923; Szumski, 1955 za Janią, 1997).

Kryształy lodu są częstym składnikiem chmur. Są one powszechne w wyższych partiach troposfery. Wzajemne relacje między ciśnieniem, temperaturą i ilością pary wodnej decydują o wzroście kryształów lodu w chmurach i o tworzeniu się opadów w formie zestalonej. Kryształ lodowy stanowi zalążek kryształu śnieżnego. Powstawanie kryształu lodu może nastąpić przez spontaniczną transformację przechłodzonych kropel wody albo przez resublimację pary wodnej (to znaczy jej przejście z fazy gazowej w stan stały) na jądrze stałym. (Jania, 1997). Podstawową postacią kryształków śniegu jest gwiazdka sześciopromienna. Gwiazdki powstają z sześciobocznych blaszek, ponieważ sublimacja pary wodnej odbywa się najszybciej w narożach blaszek, gdzie właśnie narastają promiennie; na tych promieniach z kolei tworzą się dalsze odgałęzienia. Srednice padających śnieżynek mogąbyć bardzo różne, na ogół rzędu milimetrów (Chromow, 1973).

Obserwacje związków pomiędzy typem pogody i rodzajem chmur a formą opadu śnieżnego, następnie badania laboratoryjne nad sztucznym śniegiem pozwoliły określić warunki powstawania różnych kryształów śniegu.



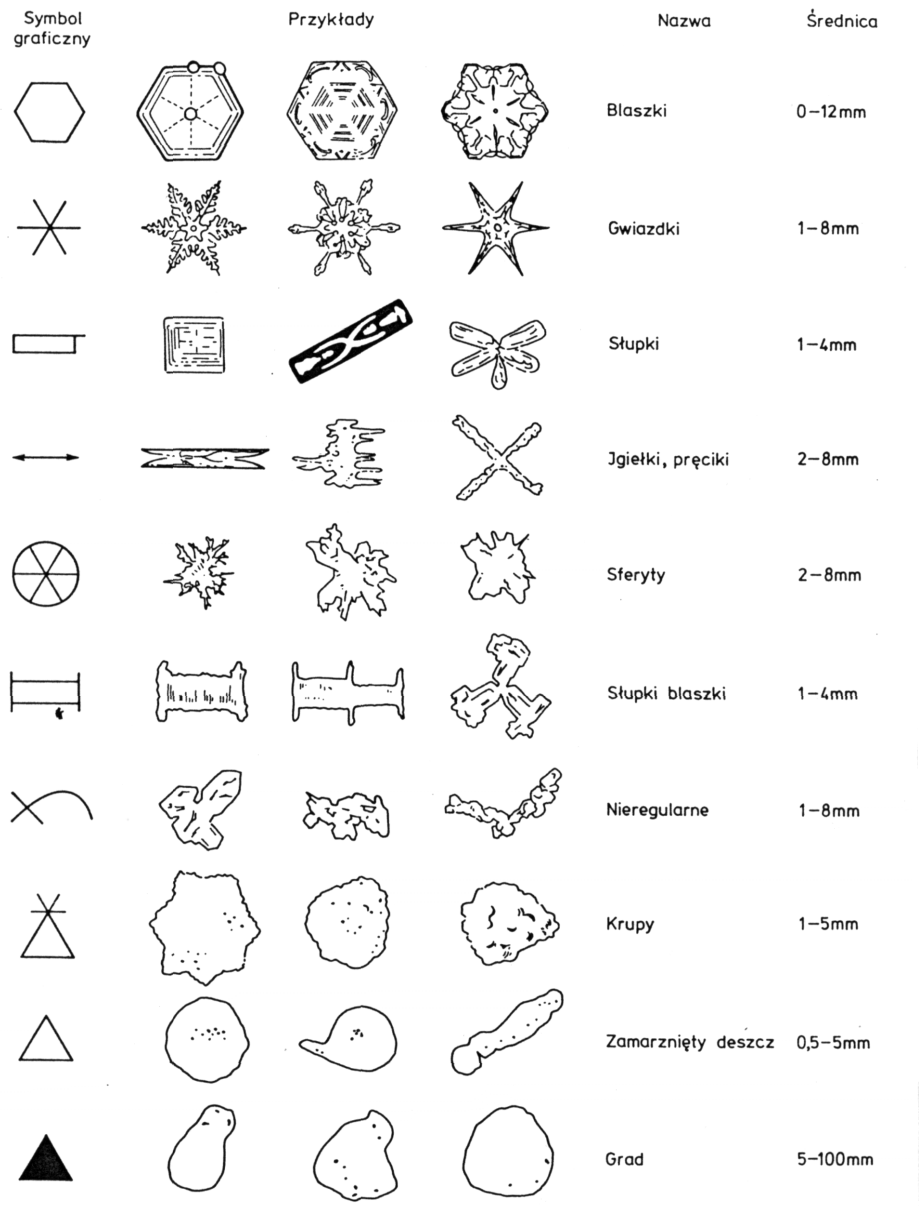
Rys. 4.1 Uwarunkowania termiczne i wilgotnościowe powstawania kryształków śniegu w atmosferze (wg Magano Lee'go, 1966 za Janią, 1997)

Rys. 4.1 pokazuje warunki tworzenia się naturalnych kryształków śniegu, zależności od temperatury i wilgotności powietrza. Jest szczególne, że gwiazdki śnieżne tworzą się w stosunkowo wąskim zakresie temperatur, natomiast kolumny lodowe powstają w wąskim zakresie prężności pary wodnej, w pobliżu stanu nasycenia, a w szerokim przedziale termicznym. Zderzanie się śnieżynek w czasie opadu jest najistotniejszym czynnikiem wzrostu ich masy (Jania, 1997).

Ogromne bogactwo form i kształtów śnieżynek docierających na ziemię wynika więc ze zmieniających się proporcji temperatury i prężności pary wodnej, ale też z warunków dynamicznych w chmurze i w czasie opadania (Jania, 1997)

Powtarzające się formy kryształów śniegu i powstawanie poszczególnych rodzajów w zbliżonych warunkach meteorologicznych stały się podstawą klasyfikacji opadów stałych

Na początku lat pięćdziesiątych Międzynarodowa Komisja Śniegu i Lodu ustaliła schemat tzw. międzynarodowej klasyfikacji śniegu (Jania, 1997). Zasadniczym kryterium podziału jest morfologia i wielkość pojedynczych cząstek opadu. Na rys. 4.2 przedstawiono graficzne podsumowanie tej klasyfikacji



Rys. 4.2 Międzynarodowa klasyfikacja śniegu i opadów zestalonych (za Janią, 1997).

4.2 Pokrywa śnieżna i jej przeobrażenia

Kryształy śniegu spadłe na powierzchnię ziemi tworzą warstwę pokrywy śnieżnej. Rodzaj spadłego śniegu, temperatura powietrza i gruntu oraz siła wiatru w czasie opadu decydują o charakterystycznych cechach inicjalnej pokrywy śnieżnej. W czasie zalegania śniegu wymienione uprzednio czynniki, wraz z promieniowaniem słonecznym, wilgotnością powietrza oraz siłą grawitacji, powodują modyfikację pokrywy śnieżnej - metamorfozę śniegu.

Przeobrażanie to zachodzi w ciągu całego okresu jej zalegania. Pokrywa śnieżna, która przetrwała okres lata zasila na stałe wieloletnie płaty śnieżne i lodowce. Podlega ona procesowi dalszych przeobrażeń na skutek firnizacji i przechodzenia w lód lodowcowy. Procesy zachodzące w pokrywie sezonowej w swej naturze fizycznej są takie same, jak metamorfoza wieloletnia. Istotną różnicą jest długotrwałe działanie większych ciśnień i izolacja od atmosfery przez kumulujące się każdego roku nowe warstwy śniegu. Pewne znaczenie ma także rodzaj podłoża pokrywy - grunt, lód, czy firn (Jania, 1997)

Ze względu na strukturę i teksturę wydziela się zazwyczaj dwa rodzaje pokrywy śnieżnej: śnieg świeży i śnieg zleżały (stary, przekrystalizowany). Pokrywa świeżo spadłego śniegu w czasie bezwietrznej i mroźnej pogody (poniżej -15°C) ma niewielką gęstość (10-50 kg/m^3), gdyż ponad 90% objętości zajmuje powietrze pomiędzy kryształkami śniegu. Dalsze zmiany pokrywy śnieżnej są zależne przede wszystkim od temperatury powietrza (od której zależy gradient termiczny w pokrywie) oraz czasu trwania pokrywy śnieżnej. Ważną rolę przy depozycji śniegu odgrywa wiatr. Zagadnienie to zostanie dokładniej opisane w dalszych rozdziałach.

Pokrywa śnieżna to bardzo zmienny materiał, stanowiący delikatną mieszaninę lodu, pary wodnej i w niektórych warunkach także wody, znajdujących się blisko lub w temperaturze topnienia. Skutkiem tego śnieg podlega ciągłym zmianom. Dąży on do zredukowania wolnej energii powierzchniowej kryształów (ziaren) lodu poprzez zwiększanie gęstości i eliminację niniejszych ziaren. W tym samym czasie pokrywa śnieżna reaguje na różne bodźce pochodzące od środowiska, w którym się znajduje. Decydujące są warunki meteorologiczne (temperatura i wilgotność powietrza, promieniowanie słoneczne, wiatr, dalszy opad śniegu lub deszcz i in.). Powstająca woda roztopowa i gradienty temperatur w obrębie pokrywy oraz pomiędzy powietrzem a śniegiem są bodźcami najważniejszymi. Pod wpływem tych czynników zmienia się miąższość, termika, struktura i tekstura pokrywy śnieżnej co w efekcie wpływa na tworzenie się warstw o różnej twardości.

Od siły spójności śniegu zależy utrzymywanie się śniegu na już powstałej pokrywie śnieżnej lub na gruncie, co z kolei ma podstawowe znaczenie przy powstawaniu lawin (Trepińska, 2002)

Klasyfikacje pokrywy śnieżnej uwzględniają procesy metamorfozy i jej stadia. Szeroko przyjęta klasyfikacja R.A. Sommerfelda i E. La Chapelle'a w 1970r. (Jania, 1997) dzieli śnieg na cztery grupy, w zależności od stanu metamorfozy: śnieg nie zmetamorfizowany, metamorfoza w jednolitej temperaturze (destruktywna), metamorfoza w warunkach gradientu temperatury (konstruktywna), firnizacja. Metamorfoza destruktywna prowadzi do utraty przez

spadły śnieg cech krystalicznych i możliwości jego przemiany w zaokrąglone ziarna. Wiąże się to z większą prężnością pary wodnej nad ostrymi, wystającymi częściami kryształu śnieżnego niż fragmentami o mniejszej krzywiźnie. Zredukowanie wolnej energii powierzchniowej kryształu następuje na skutek migracji cząsteczek pary wodnej od fragmentów wystających (sublimacja) do fragmentów bardziej zaokrąglonych (resublimacja). Metamorfoza konstruktywna prowadzi do wzrostu graniastych kryształów dzięki przepływowi pary wodnej od warstw o temperaturach wyższych (sublimacja) do warstw chłodniejszych (resublimacja) w warunkach różnicy temperatur. Tworzą się formy kielichowate, luźne, zwane szronem wgłębnym. Maria Kłapowa (1980) zmodyfikowała i zastosowała tę klasyfikację w warunkach tatrzańskich. W tabeli 4.1 przedstawiono cechy poszczególnych gatunków śniegu (w trzech grupach metamorficznych) według tej autorki.

Gatunki śniegu Rodzaj i forma kryształów	Wielkość kryształów mm	Twardość śniegu		Wilgotność śniegu	Gęstość śniegu	
		rodzaj twardości	skala twardości		zakres, g/cm³	najczęstsze wartości, g/cm³
Metamorfoza destruktywna						
Śnieg świeżo spadły, płatki igły i ich kombinacja	6	puszysty	1	suchy	0,02 - 0,06	0,02
Śnieg zleżały - częściowy rozpad, z elementami kryształów	0,5 - 2	miękki luźny	1	suchy	0,07 - 0,17	0,08
Śnieg zleżały, pylasty (proszek) całkowity rozpad	0,5	miękki	2	suchy	0,14 - 0,20	0,18
Śnieg zleżały, pylasty (proszek) całkowity rozpad	0,5	średnio twardy	3	suchy	0,18 - 0,25	0,25
Śnieg zleżały, pylasty (proszek) całkowity rozpad	0,5	twardy	4	suchy	0,24 - 0,34	0,28
Śnieg z elementami kryształów	0,5 - 2	miękki	1	wilgotny	0,06 - 0,20	—
Śnieg pylasty	0,5	miękki	2	wilgotny lepki	0,16 - 0,28	0,26
Metamorfoza konstruktywna						
Śnieg stary						
Śnieg drobnoziarnisty	0,5 - 2	miękki	2	suchy	0,24 - 0,34	0,26
Śnieg drobnoziarnisty	0,5 - 2	średnio twardy	3	suchy	0,26 - 0,42	0,30
Śnieg drobnoziarnisty	0,5 - 2	twardy	4	suchy	0,30 - 0,46	0,38
Śnieg gruboziarnisty	2 - 4	miękki	2	suchy	0,32 - 0,50	0,38, 0,50
Śnieg gruboziarnisty	2 - 4	średnio twardy	3	suchy	0,34 - 0,53	0,42, 0,50
Śnieg gruboziarnisty	2 - 4	twardy	4	suchy	0,37 - 0,50	0,50
Śnieg gruboziarnisty i szron	2 - 6	miękki	2	suchy	0,31 - 0,37	0,32
Śnieg gruboziarnisty i szron	2 - 6	średnio twardy	3	suchy	0,31 - 0,37	0,32
Szron wgłębny, w formie kielichów	2 - 6	miękki luźny	2	suchy	0,24 - 0,32	0,28
Metamorfoza tajania						
Śnieg stary						
Śnieg gruboziarnisty, kanciasty	2 - 6	miękki	2	suchy	0,32 - 0,50	0,50
Śnieg gruboziarnisty, kanciasty	2 - 6	średnio twardy	3	suchy	0,40 - 0,53	0,50
Śnieg gruboziarnisty, kanciasty	2 - 6	twardy	4	suchy	0,40 - 0,53	0,50

Tab. 4.1 Klasyfikacja pokrywy śnieżnej i charakterystyka poszczególnych gatunków śniegu w Tatrach (wg Kłapowej, 1980 za Janią, 1997)

Więcej na temat śniegu i pokrywy śnieżnej można znaleźć w wielu pozycjach literatury polskiej i zagranicznej, min w pracach: Dobrowolskiego (1923), Kłapowej (1980), Kosiby (1978) czy też bardziej współczesnych: Jani (1997) , Trepińskiej (2002). Pozycja Amerykańskich naukowców „Avalanche Handbook" uznana i ceniona na całym świecie, zdaje się być doskonałą kompilacją wszystkich zagadnień przedstawionych powyżej i w dalszej części pracy.

W kolejnych rozdziałach omówiono zagadnienia związane z właściwościami, oraz przemianami jakie zachodzą w pokrywie śnieżnej, bezpośrednio związanymi ze zjawiskiem lawin śnieżnych.

5. Lawiny śnieżne – ich klasyfikacje i główne czynniki powstawania

Leżąca na stoku pokrywa śnieżna podlega działaniu naprężeń spowodowanych siłą ciężkości:

$$T = Qgh \cdot sina$$

gdzie: T - naprężenie styczne do powierzchni śniegu (ścinające), Q — gęstość śniegu, g - przyspieszenie ziemskie, h - grubość pokrywy śnieżnej, a - kąt nachylenia stoku.

Wielkość naprężenia zależy więc od gęstości śniegu, nachylenia stoku i grubości pokrywy śnieżnej. Naprężenia te wywołują przemieszczanie śniegu z powodu deformacji wewnętrznych lub poślizgu pokrywy po podłożu. Może to być ruch powolny lub ruch szybki — lawina śnieżna. Powolne spełzywanie i zsuwanie śniegu przebiega w tempie od kilku milimetrów do kilku centymetrów na dobę (Baranowski, 1979; Klapowa, 1980; za Jania 1997).

Deformacjom pokrywy śnieżnej przeciwdziałają siły spoistości międzycząsteczkowej (lepkość - tarcie wewnętrzne, będące efektem kohezji) i tarcie na kontakcie z podłożem. Wskaźnikiem wytrzymałości śniegu na rozrywanie i ścinanie jest zwykle jego twardość**,** czyli odporność na przenikanie weń obcych ciał (mierzona penetrometrem). Wytrzymałość śniegu zależy od jego temperatury i gęstości oraz rodzaju ziaren lodowych i ich połączenia. Śnieg drobnoziarnisty jest bardziej odporny na ścinanie niż gruboziarnisty, a także świeża pokrywa składająca się ze śnieżynek (Wilhelm, 1975; za Jania 1997). Świeża warstwa śniegu nie jest stabilna, ale wykazuje dużą plastyczność wskutek sczepiania się śnieżynek. Umożliwia to utrzymanie śniegu na grzbietach w formie nawisów. Pokrywa śnieżna o większej gęstości jest bardziej wytrzymała na działanie naprężeń. Szczególnie ważna jest temperatura. Odporność na ścinanie zmniejsza się, gdy temperatura zbliża się do 0°C. Gdy śnieg topnieje i pojawia się w nim woda, jego odporność maleje jeszcze bardziej, gdyż rozluźniają się ziarna i warstwy (Jania, 1997)

Bezpośrednią przyczyną ruchu masy śniegu na stoku jest przekroczenie krytycznej wartości jej stabilności „h_K", którą można wyrazić przez równanie: (Trepińska, 2002)

$$\mathbf{h_K = Ss / [p\ (sin\ a - C\ cos\ a)]}$$

gdzie:

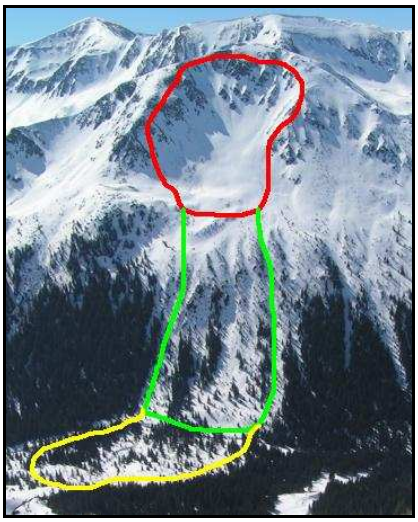
Ss - siła spójności śniegu w $g \cdot cm^{2}$ lub $kg \cdot m^{2}$,

p - gęstość w $g \cdot cm^{3}$,

C - współczynnik tarcia wewnętrznego (bezwymiarowy),

a - kąt nachylenia stoku.

Szybki ruch dużej masy śniegu w dół stoku, na odległość większą niż 50 m, nazywa się **lawiną śnieżną** (Fraser, 1978; za Janią, 1997). Ruch mas śniegu zaczyna się w miejscu zwanym „obszarem potencjalnego wystąpienia lawiny"(ang. potential release area), dalej zsuwa się po stoku tzw. „szlakiem lawinowym" (ang. avalanche track) i kończy swój ruch w „obszarze akumulacji" lawiny (ang. run out zone).



Rys. 5.1 Podział obszaru spływu lawiny (kolor czerwony – obszar potencjalnego wystąpienia lawiny, kolor zielony – szlak lawinowy, kolor żółty - obszar akumulacji). Fot. P. Chrustek

5.1 Typy lawin śnieżnych

W literaturze istnieje szereg różnych klasyfikacji lawin śnieżnych. Najważniejsze z nich to: genetyczne - min przedstawiona przez Łosiewa w 1966r,w której pogrupowano lawiny wedle ich przyczyn powstania) i morfologiczne - min przedstawione przez Frasera w 1978 r., w której kryterium podziału wyznaczała morfologia samych lawin a także terenu w jakim one powstają (Jania, 1997). W niniejszej pracy dla usystematyzowania zjawisk lawinowych posłużono się najprostszym rozróżnieniem ich rodzajów, opartym na gatunkach śniegu (na podstawie materiałów górskich służb ratowniczych).

5.1.1 Lawiny pyłowe

Nazwą tą obejmuje się lawiny powstaje ze śniegu, który nie uległ jeszcze opisanym przemianom jakościowym i zachował całkowicie lub częściowo konsystencję sypką, mało związaną.

Najbardziej typowe są tu lawiny z suchego puchu śnieżnego, spadłego przy niskich temperaturach. Powstają one najczęściej w okresie od grudnia do lutego, a więc w pełni zimy, po opadach lekkiego i zmrożonego śniegu, przy mrozie poniżej -15°C. Spoistość warstwy takiego śniegu jest praktycznie żadna i przy odpowiednio grubej warstwie wystarcza niewielki bodziec (np. powiew wiatru, hałas) do spowodowania lawiny. Często także ruszają one niejako samoistnie, gdy ciężar warstwy puchu przekroczy krytyczną grubość, zależną od stromizny i szorstkości podłoża.

Niebezpieczeństwo, jakie niosą z sobą te lawiny nie polega na niszczącej energii mas śniegu, lecz na tym, że lekkie kryształki puchu zostają rozpylone w postać jakby chmury spadającej z ogromną szybkością. Przed czołem tej chmury, mającej konsystencję podobną do płynu, wytwarza się, podobnie jak przy wybuchu, ciśnieniowa fala uderzeniowa, dając efekt akustyczny w postaci grzmotu. Ciśnienie to jest tak znaczne, że człowiek znajdujący się w pobliżu toru lawiny może zostać rzucony w dół niby huraganem i uduszony gęstą zawiesiną śniegu w powietrzu, jak topielec wodą. W tylnej części lawiny występuje efekt ssania o znacznej sile, mogący wciągnąć w jej głąb. Szybkość tych lawin jest bardzo duża (100 do 300 km/godz.!), a ucieczka przed nimi praktycznie niemożliwa.

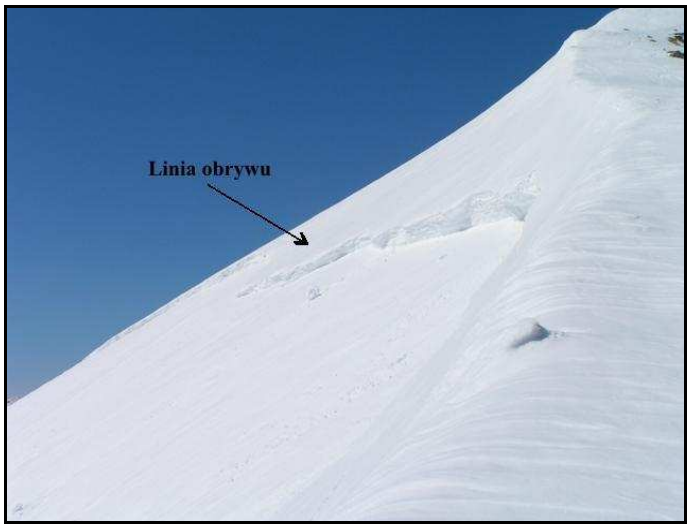
Podobne w charakterze są lawiny pyłowe powstałe z osiadłego nieco, lecz suchego i sypkiego śniegu. Są one częste po okresach intensywnych opadów w pełni zimy (grudzień - luty), gdy utrzymuje się ujemna temperatura, a śnieg nie osiadł całkowicie. Niebezpieczeństwo jest tym większe, im grubsza warstwa śniegu, a podkład gładszy (lodoszreń czy trawiasty stok).

Ruszenie takiej lawiny, podobnie jak poprzednio opisanej, nastąpić może samoistnie lub być spowodowane np. przez narciarza (ten bowiem gatunek śniegu jest dla narciarzy bardzo atrakcyjny). Lawina rusza w postaci pola śnieżnego, które na nierównościach terenu rozpada się w sypkie kopce i bałwany przypominające fale. Wytwarza również silny prąd powietrza i duszącą chmurę śniegową oraz efekt grzmotu. Spora jednak jej część spada po stoku tworząc w końcu rozsypaną hałdę ubitego już śniegu.

Lawiny pyłowe z nieco zwilgotniałego pod wpływem ocieplenia śniegu są typowe dla przedwiośnia. Sygnałem ostrzegawczym jest staczanie się po stoku „kalafiorowatych" grudek. Jako że zwilgotniały śnieg jest bardziej zwięzły, lawina składa się z różnej wielkości miękkich, toczących się grud. Lawiny takie mają dużą siłę niszczącą, bowiem waga l m^3 tego rodzaju śniegu dochodzi do 200 kg.

5.1.2 Lawiny deskowe ze śniegu osiadłego

Lawiny ze śniegu osiadłego występują często na stokach zawietrznych, gdzie wskutek działania wiatru odłożyła się gruba warstwa lekko już zsiadłego śniegu. Jest to gatunek śniegu już dość silnie związany, toteż impuls wyzwalający musi być dość energiczny, jak np. spadnięcie nawisu (tworzącego się właśnie na zawietrznej stronie grzbietu) lub obciążenie i podcięcie stoku przez narciarza.



Fot. 5.1 Strefa obrywu lawiny „deski śnieżnej" ze śniegu osiadłego na stokach Goryczkowej Czuby. (Fot. P. Chrustek)

Ostrzegawczym sygnałem istniejących napięć są pojawiające się na powierzchni śniegu pęknięcia, a po oderwaniu lawiny pozostaje charakterystyczna krawędź o wysokości równej grubości obsuniętej warstwy śniegu (Fot. 5.1). Lawina obsuwa się z głuchym hukiem w postaci deski śnieżnej, rozpadającej się na nierównościach terenu. Lawiny te występują jako powierzchniowe a warstwa śniegu obsuwa się po innej warstwie w strefie osłabienia spójności.

5.1.3 Lawiny deskowe – gipsowe

Powstają na stokach nawietrznych, gdzie na powierzchni wiatr wytwarza warstwę gipsu. Śnieg ten w grubej warstwie utrzymuje nawet ciężar pieszego, jest jednak bardzo zdradliwy z uwagi na swą kruchość i łamliwość. Ponadto pod warstwą gipsu powstają często puste przestrzenie i poślizgowe warstwy nie związanego śniegu lub szronu wgłębnego.

Deskowe lawiny gipsu spadają z reguły dopiero z powodu załamania ich powierzchni przez ludzi. Daje się wówczas słyszeć głuchy huk pękającej warstwy, a czasem syk wytłaczanego spod niej powietrza, i wielkie tafle, pękając i łamiąc się ruszają w dół stoku, wzniecając nieco śnieżnego pyłu. Na ogół są to lawiny warstwy powierzchniowej.

Ich niebezpieczeństwo polega na ogromnym prawdopodobieństwie odniesienia obrażeń od kotłujących się tafli i grud twardego śniegu, wciągającego ofiarę w głąb masy lawiny.

5.1.4 Lawiny śniegu ziarnistego

Zaliczamy do nich głębokie lawiny powstałe przy ześlizgnięciu się grubych warstw śniegu po zmetamorfizowanych, ziarnistych warstwach utworzonych w przygruntowej części pokrywy śnieżnej w czasie zimy.

Fot. 5.2 Wiosenna lawina gruntowa na stokach Suchego Kondrackiego Wierchu (Fot. P. Chrustek)

Lawiny takie wystąpić mogą w pełni zimy lub na wiosnę, a ich obsunięcie następuje na ogół z powodu przekroczenia krytycznego obciążenia stoku dużymi masami spadłego śniegu lub też pod ciężarem grupy narciarzy czy alpinistów. Szansę uratowania się są w tym gatunku lawin bardzo znikome z uwagi na zwykle duży ich zasięg, głębokość i wagę mas śniegu, tym więcej, że są to na ogół lawiny gruntowe.

Podobne w charakterze są wiosenne lawiny firnowe, rodzaj typowy dla okresu wiosennych odwilży. Mogą to być na ogół płytkie obsunięcia warstw powierzchniowego firnu albo o wiele groźniejsze, głębokie, sięgające podłoża lawiny przesiąkniętego wodą śniegu, niosące kamienie, płaty gruntu, pnie drzew itp. Ich zesunięcie następuje zwykle niejako samoistnie, gdy przenikająca z górnych warstw woda odwilżowa podmyje pokrywę śnieżną, tworząc wilgotną, śliską papkę niwelującą siły tarcia. Przyczyną powstania takiej lawiny jest zazwyczaj trwała wiosenna odwilż połączona z opadami deszczu.
Miejsca szczególnie zagrożone lawinami śniegu ziarnistego to wszelkie zagłębienia stoku, a więc depresje, kotły, żleby i jary, których dnem ścieka woda. Masy mokrego śniegu o wielkim ciężarze jednostkowym, dochodzącym do 600 kg/m^3, osuwają się z głuchym grzmotem, wywołując dość silny podmuch. Rozpraszanie śniegu nie występuje z uwagi na jego wilgotną konsystencję i ciężar.

5.2 Czynniki lawino - twórcze

Odporność pokrywy śnieżnej na ścinanie i wielkość działających nań naprężeń zależy od wielu, niekiedy powiązanych ze sobą czynników. Autorzy tzw. **międzynarodowej klasyfikacji lawin** (za Janią, 1997) wyróżnili :

1. Czynniki stałe czyli czynniki morfologiczne takie jak:

- nachylenie zboczy
- ekspozycja zboczy
- wegetacja na stokach
- szorstkość podłoża
- wysokość nad poziom morza
- kształt stoków

2. Czynniki zmienne podzielone na trzy grupy:

a) Pogoda
   - Opady
   - Wiatr
   - Promieniowanie słoneczne

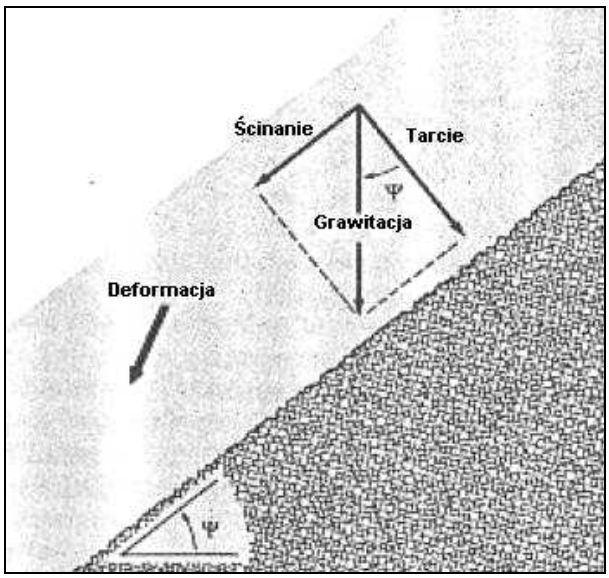
b) Charakter pokrywy śnieżnej

c) Sposób wyzwolenia lawiny
   - Samorzutny
   - Sztuczny

5.2.1 Czynniki stałe

5.2.1.1 Nachylenie zboczy

Składowa siły ciężkości i siły tarcia generuje tzw. siłę ścinania odpowiadającą za oderwanie pewnej masy śniegu (Rys.5.2) .



Rys. 5.2 Siły deformacyjne w pokrywie śnieżnej (Źródło: McClung, Schaerer; 2002)

Intensywność tej siły wzrasta proporcjonalnie do masy śniegu i kąta nachylenia zboczy. Jest wiadomym, że nawet mała masa śniegu może oderwać się od bardzo stromego stoku a masy większe nie mające możliwości osadzania się na stromych stokach mogą oderwać się na stokach o mniejszym nachyleniu. Dokładne studia na temat związku wielkości nachylenia zboczy (w strefie obrywu lawiny) a typem występujących lawin przedstawili McClung i Schaerer (2002).

Nachylenie stoku [^{0}]	*Typy lawin śnieżnych*
60-90	Lawiny występują rzadko, występowanie częsty i małych rozmiarów kaskad śnieżnych
30-60	Lawiny ze śniegu luźnego - suchego (dry loose avalanches)
45-55	Częste i niewielkich rozmiarów lawiny – deski śnieżne (slab avalanches)
35-45	Lawiny –deski śnieżne (slab avalanches) wszystkich rozmiarów
25-35	Rzadkie ale zwykle dużych rozmiarów lawiny – deski śnieżne (slab avalanches); lawiny ze śniegu luźnego - mokrego (wet loose avalanches)
10-25	Rzadkie lawiny ze śniegu mokrego (wet snow avalanches; slush avalanches)

Tab. 5.1 Zależność pomiędzy kątem nachylenia stoku a typem występujących lawin (Źródło: McClung, Schaerer; 2002)

Na podstawie powyższej tabeli zauważyć można, że odpowiednie nachylenia wpływają na ewolucje pewnych typów pokrywy śnieżnej co w konsekwencji wpływa na powstawanie odpowiednich typów lawin. Jednakże nachylenie nie wpływa na to dominująco, bo jak już wspomniano na strukturę pokrywy śnieżnej znaczący wpływ mają różne czynniki meteorologiczne. Kąty nachylenia wydają się reprezentować przyczynowy czynnik, który tylko pośrednio jest powiązany z czynnikami meteorologicznymi. W pewnym sensie występować może tu zależność bezpośrednia, gdy na przykład mowa jest o wielkości promieniowania słonecznego (McClung, Schaerer; 2002)

5.2.1.2 Ekspozycja

Generalnie intensywność i wielkość dopływu promieniowania słonecznego występującego na zboczu, zależy głównie od trzech czynników: odległość między Słońcem a Ziemią w danym miejscu i czasie, kąta padania promieni słonecznych i rodzaju pokrycia powierzchni (zmieniającą się z szerokością geograficzną), oraz z zależności pomiędzy kątem padania promieni a nachyleniem zboczy (zmieniające się z wielkością nachylenia i orientacją zboczy). Jak wspomniano w poprzednich paragrafach promieniowanie słoneczne określa temperatury w pokrywy śnieżnej a co za tym idzie także siły wiążące pokrywę. Tak więc wydaje się oczywistym, że orientacja zboczy (wraz z nachyleniem) znacząco wpływa na formowanie się lawin. Przykładowo można wspomnieć o „szronie wgłębnym". „Preferuje" on stoki północne (na półkuli N) w okresie środkowej zimy, które w czasie dnia otrzymują niewielką ilość bezpośredniego promieniowania słonecznego, a w ciągu nocy dodatkowo następuje silne wypromieniowanie.

5.2.1.3 Wegetacja

Lasy generalnie wpływają stabilizująco na pokrywę śnieżną zwiększając siłę tarcia w pokrywie i tym samym jej stabilność, wykluczając możliwość wystąpienia lawiny (w obszarze startu). Oczywiście stwierdzenie to dotyczy lasu o odpowiedniej zwartości. W obszarze, gdzie występują pojedyncze drzewa wpływ na stabilizację pokrywy się znacząco zmniejsza. Dodatkowo korony drzew zatrzymują część opadów i powoduje to powstawanie w warstwie przypowierzchniowej lasów specyficznego mikroklimatu odbiegającego w swych cechach znacznie od mikroklimatu terenów otwartych.
Las wpływa stabilizująco na pokrywę jeśli mowa o obszarze uwolnienia lawiny. Obszary leśne położone ponad tymi obszarami bez względu na kondycje i zagęszczenie zwykle nie są w stanie zatrzymać pędzącej z wielką siła lawiny. Często lawiny powodują znaczne szkody w drzewostanie znajdującym się w dolnych partiach zboczy.

Fot. 5.3 Wylesienie w Tatrach spowodowane zejściem lawiny
(Źródło: Materiały archiwalne GOPR)

Nadal nie jest dokładnie zbadana relacja między pewnymi typami krzewów lub trawy a formowaniem się lawin. Generalnie jednak zauważa się że np. stoki pokryte kosodrzewiną wpływają fizycznie na stabilizację (zwiększenie siły tarcia), a także powodują powstawanie odpowiedniego mikroklimatu sprzyjającego stabilizacji pokrywy (wolniejszy przebieg metamorfozy destruktywnej) (Kłapowa, 1980). Jednak ten wpływ staje się nieznaczny wraz z całkowitym przykryciem krzewów przez śnieg.

Fot. 5.4 Kosodrzewina na stromym stoku stabilizująca pokrywę śnieżną (Fot. P. Chrustek)

5.2.1.4 Rodzaj podłoża

Kiedy grubość pokrywy śnieżnej jest mniejsza niż średnica fragmentów skały, leżącej na topograficznej powierzchni, pokrywa śnieżna zostaję wystarczająco ustabilizowana i zakotwiczona by nie dopuścić to uwolnienia lawiny. Rośliny krzewiaste także mogą wpływać na szorstkość podłoża jednak jak wspomniano wcześniej zależne jest to od pewnych czynników. Jeśli chodzi o trawy górskie to generalnie stwierdzić można, że zwiększają frekwencje występowania lawin i są szczególnie wrażliwe na szybką akumulacje śniegu - ze względy na swa fizjonomie tworzą dogodną warstwę poślizgową.
Tabela poniżej wskazuje maksymalną grubość pokrywy dla odpowiedniej powierzchni gwarantującą pewien stopień stabilizacji.

Głębokość pokrywy	***Typ terenu***
0.3 m	Relatywnie gładka powierzchnia: trawa, naga skała, drobny rumosz skalny
0.6 m	Powierzchnia o relatywnie średniej szorstkości: średniej wielkości głazy, małe drzewa, krzewy
1.0 m	Powierzchnia o relatywnie dużej szorstkości: dużej wielkości głazy, rumosz skalny o bardzo dużej frakcji

Tab. 5.2 Średnia wysokość pokrywy śnieżnej na odpowiedniej powierzchni zapewniająca względny stopień stabilizacji (Źródło: McClung, Schaerer; 2002)

Innym wyznacznikiem szorstkości podłoża jest litologia skał. Obserwuje się generalnie, że lawiny występują częściej na stokach pokrytych skałami o gładkiej powierzchni niż na stokach pokrytymi rumoszem skalnym (McClung, Schearer; 2002).

5.2.1.5 Wysokość

Wysokość n.p.m. generalnie ma znaczący wpływ na trzy ważne czynniki meteorologiczne:

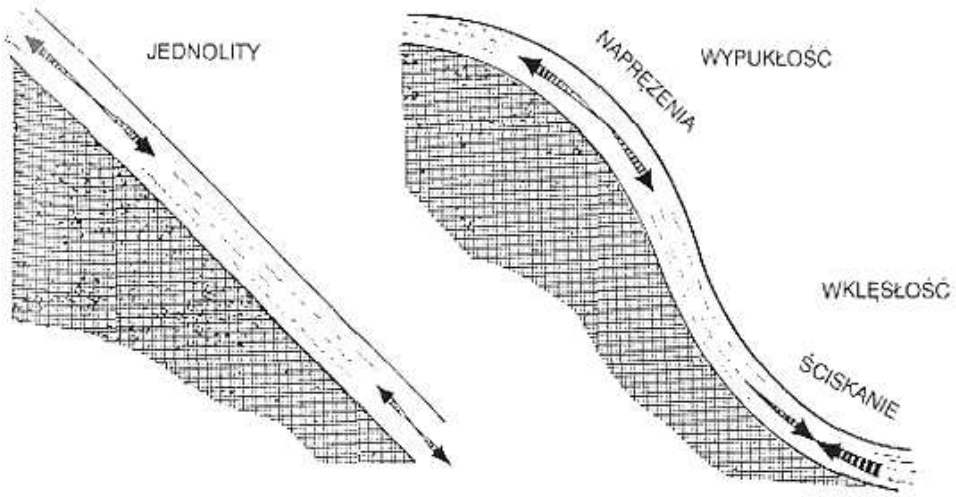
1. wielkość opadów
2. prędkość wiatru
3. temperaturę

Dokładny wpływ powyższych czynników na powstawanie lawin omówiono szerzej w kolejnych paragrafach.

5.2.1.6 Kształt stoków

Topografia zbocza w przekroju podłużnym i poprzecznym wpływa na stany napięć w pokrywie śnieżnej i na wielkości możliwej akumulacji śniegu. Generalnie bardziej na występowanie lawin narażone są stoki wklęsłe (w profilu poprzecznym), co ma bezpośredni związek z pojemnością akumulacyjną mas śniegu i siłami działającymi w pokrywie (żleby, jary). Stoki płaskie (profilu poprzecznym) posiadają mniejszą pojemność akumulacyjną, jednak sprzyjają powstawaniu lawin deskowych. Stoki wypukłe są najmniej narażone na występowanie lawin (McClung, Schearer; 2002).

W profilu podłużnym krytyczne są fragmenty wypukłe nachylone w dół stoku a znaczne rozczłonkowanie zboczy (terasy, progi skalne) sprzyjają stabilizacji pokrywy na stoku.



Rys. 5.3 Siły działające w pokrywie śnieżnej w zależności od formy terenowej (Źródło: Fyffe, Peter; 2000)

5.2.2 Czynniki zmienne - meteorologiczne

5.2.2.1 Opady

Znaczący wpływ na powstawanie lawin ma wielkość opadu a także jego forma. Możliwość występowania opadów śniegu rośnie wraz z wysokością. Wysokość powoduje wzrost odsetka opadów w formie stałej do ogólnej sumy opadów.

W Tatrach ogólną liczbę dni z opadem śniegu określa formuła Chomicza (Trepińska, 2002).

D= 34.3 + 0,102 H

D - liczba dni ze śniegiem
H - wysokość nad poziom morza

W Alpach i w Karpatach liczba dni z opadem śniegu, jak też długość trwania pokrywy śnieżnej na ogół rośnie liniowo wraz z wysokością, natomiast w górach w strefie klimatu oceanicznego, wilgotnego, zależność ta jest nieliniowa. Pod uwagę bierze się opad o wysokości > 0,1 mm. Gradient śniegowy (zmiana liczby dni z opadem śniegu na 100 m wysokości) jest skokowy. Wilgotne masy powietrza mogą dawać duże opady śniegu, co wpływa na długość trwania pokrywy śnieżnej. Gradient śniegowy jest bardzo zróżnicowany w wielu pasmach górskich na świecie i empiryczne wzory, słuszne dla gór, z których zaczerpnięto dane do wyliczenia jego wartości, mogą nie sprawdzić się w innych górach. Wyliczone dla polskiej części Karpat Zachodnich średnie wartości liczby dni z opadem śniegu kształtują się następująco: od progu Pogórza Karpackiego liczba dni z opadem śniegu rośnie z wysokością n.p.m. od 30 do 140 dni w chłodnej porze roku a od poziomu 1500 m n.p.m., opad śniegu może wystąpić w ciągu całego roku. W polskich Karpatach opady śniegu zmniejszają się z zachodu na wschód. W Tatrach, w dolnej partii stoków, opadów jest mniej niż w innych częściach Karpat, natomiast od wysokości 1000 m opady wyraźnie rosną. Wyjaśnienie tego nierównomiernego rozkładu kryje się w fakcie, że od tej wysokości stoki Tatr są wystawione na działanie opadonośnych mas powietrza, ze względu na brak osłony przez niższe pasma Beskidów. K. Chomicz (1977) uważa, że na wysokości 1000-1100 m n.p.m. zaznacza się charakterystyczny

próg opadowy. Opady śniegu po stronie północno-zachodniej Tatr są większe niż po stronie południowo-wschodniej, chociaż i tu można wykryć wspomniany próg opadowy (Trepińska, 2002).

Na wielkość zagrożenia lawinowego jak już wspomniano ma wpływ ilość świeżego opadu, intensywność opadów, oraz ich czas trwania. Miernikiem zagrożenia lawinowego jest suma grubości opadów z trzech dni. Zależność ta przedstawia poniższa tabela.

Suma grubości z 3 dni [cm]	*Stopnie zagrożenia*
Do 30	Nie ma znacznego przyrostu zagrożenia
30-50	Miejscowe zagrożenie lawinowe
50-80	Ogólne zagrożenie lawinowe
80-120	Duże zagrożenie lawinowe
Ponad 120	Bardzo duże ogólne zagrożenie (sytuacje katastrofalne)

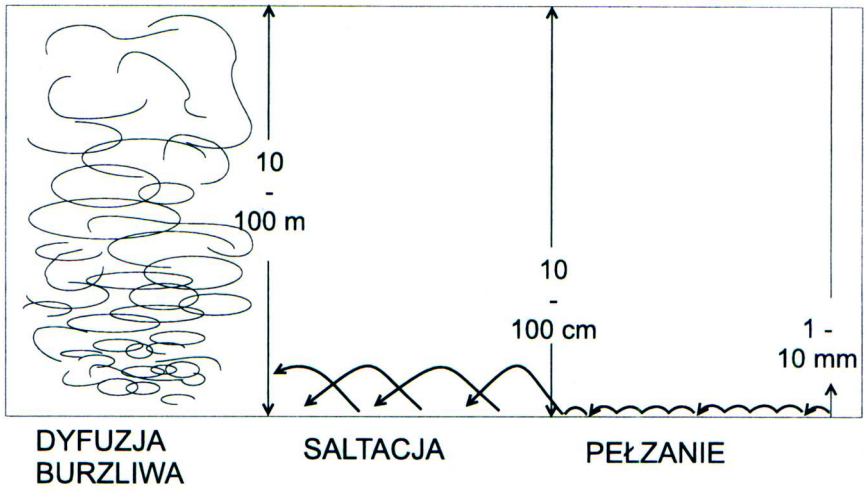
Tab. 5.3 Zależność pomiędzy grubością pokrywy świeżego śniegu a stopniem zagrożenia lawinowego (Źródło: Materiały szkoleniowe GOPR)

Ważne z punktu widzenia zagrożenia lawinowego ma także rodzaj opadu. Opad śniegu różnego rodzaju wpływa na dalsze transformacje pokrywy i szybkość transformacji w pokrywie. Deszcz wywołuje znaczne zmiany w strukturze pokrywy i zwiększa jego wagę. W wyniku tego wzrastają niekorzystne naprężenia w pokrywie sprzyjające siłą zrywającym. Woda przenika w głąb, zmniejsza spoistość śniegu, zaś w przypadku natrafienia na wgłębną lodoszreń wytwarza na tym nieprzenikliwym podłożu bardzo śliską warstwę o papkowatej konsystencji. Ocieplenie połączone z opadem deszczu jest więc poważnym sygnałem ostrzegawczym o możliwości zejścia lawiny.

5.2.2.2 Wiatr

Wiatr jest odpowiedzialny za transport i redystrybucje śniegu. Ma on bardzo silny wpływ na nierównomierny rozkład pokrywy śnieżnej. Napotykając na swej drodze grzbiet górski, wywiera znaczne ciśnienie na stok nawietrzny, wytwarzając deskowatą powierzchnię gipsu. Cały zaś nie związany śnieg przerzucony zostaje przez grań na drugą stronę. (Trepińska, 2002)

Wywiewanie śniegu i modelowanie powierzchni pokrywy zależy od prędkości wiatru i twardości (zwartości) śniegu. Wyróżnia się pewne krytyczne prędkości wiatru, powyżej których następuje przenoszenie śniegu (Rys. 5.4)



Rys. 5.4 Rodzaje wywiewania śniegu z pokrywy śnieżnej (Źródło: Trepińska; 2002)

Regularne zafalowania na powierzchni pokrywy śnieżnej powstają już przy niewielkich prędkościach wiatru, około 0,5 m/s, szczególnie na niezwiązanym leżącym śniegu, to tzw. *ripplemarki* (zmarszczki), analogiczne do form powstających na piasku. Przy bardzo słabych wiatrach, ale dość regularnie wiejących z jednego kierunku, formowanie powierzchni śniegu odbywa się w procesie zwanym *pełzaniem***.** Przenoszenie śniegu odbywa się ruchem skokowym, a proces powstawania mini-wydm na powierzchni śniegu określany jest mianem *saltacji***.** Luźny, niezwiązany śnieg podlega wywiewaniu powyżej 10 metrów nawet do wysokości kilkudziesięciu metrów. Jest to proces *dyfuzji burzliwej*. Prędkość wiatru jest wtedy większa od 5 m/s. Jednakże związana, twarda pokrywa śnieżna wymaga prędkości wiatru co najmniej 25 m/s, aby nastąpiło wyrwanie, wykruszenie i przemieszanie bryłek z jej powierzchni. Transport wywiewanego śniegu zależny jest więc od siły przenoszącej wiatru. Dodatkowo działa tu jeszcze ciśnienie powietrza, oraz pionowy rozkład temperatury i wilgotności powietrza. Wynika z tego, że w wysokich górach proces tworzenia się wiatrowych, często bardzo efektownych form niwalnych, napotyka na sprzyjające warunki. Próby wyliczenia ilości śniegu przenoszonego przez wiatr dają różne wyniki, w zależności od wielkości powierzchni, z której wywiewany jest śnieg. Szacunkowe wartości mieszczą się w granicach od kilkuset do kilku tysięcy metrów sześciennych.(Trepińska, 2002)

Wydajnością zamieci Q nazwano ogólną masę śniegu przechodzącą w ciągu minuty przez linię grubości 1 centymetra, skierowaną prostopadle do kierunku wiatru. Wydajność

zamieci zależy głównie od prędkości wiatru, zgodnie ze wzorem D. Mielnika (za Trepińską, 2002):

$$\mathbf{Q = 0{,}0129 \cdot v^3}$$

Q - wydajność w g/cm . min, w warstwie przenoszenia grubości l cm

v - prędkość wiatru na wysokości 11 metrów . (m/s).

Wzór A.K. Djunina (za Trepińską, 2002) uwzględnia wielkość krytycznej prędkości wiatru (v=2,71 m/s), poniżej której przenoszenie śniegu nie występuje

$$\mathbf{Q = 0{,}153(v_1 - 2{,}71)^3}$$

gdzie:

$\mathbf{v_1}$ - prędkość wiatru na wysokości l metra (m/s).

Wyliczono, że na szczycie wzgórza (niewysokiego) wydajność zamieci może być dziesięciokrotnie większa niż na stronie zawietrznej, u podnóży wzgórza. Wzory empiryczne są oparte na pomiarach z przyrządów zwanych „zamieciomierzami". Niektóre z nich działają na zasadzie fotometrycznej, mierząc osłabienie strumienia świetlnego w powietrzu zmętnionym przez padający śnieg (Trepińska, 2002).

Długie, ostrokrawędziste formy na rozległych powierzchniach śniegu, ułożone prostopadle do kierunku wiatru w postaci śnieżnych stopni, noszą nazwę zastrug. Powstają na twardej, ubitej powierzchni śniegu lub lodu, przy silnych wiatrach, o prędkości powyżej 25 m/s.

Efekt oddziaływania wiatru na powierzchnię pokrywy śnieżnej w znacznej mierze zależy od szorstkości podłoża. Opór stawiany przez tarcie jest największy blisko powierzchni i spada z wysokością.

Do często spotykanych form niwalnych w górach należą nawisy śnieżne. Powstają zwykle na krawędziach stoków zawietrznych, mają rozmiary od kilku do kilkudziesięciu metrów długości (Fot. 5.5).

Fot. 5.5 Nawisy śnieżne na grani w pobliżu Skrajnej Turni (Fot. P. Chrustek)

Nawisy złożone są z ubitego śniegu i lodu, są formami sezonowymi wybitnie nietrwałymi. Jedynie w bardzo wysokich górach utrzymują się prawie stale, zmieniając jednak swój kształt. Strumienie powietrza niosące często drobny śnieg i rozdrobniony lód zderzają się z granią górską po stronie nawietrznej. Niesiony śnieg ulega zagęszczeniu i ubiciu. Po przekroczeniu grani następuje lokalna dywergencja strumieni powietrza, słabnie ich zdolność transportowa, a niesiony śnieg osiada po stronie zawietrznej tworząc tzw. „poduszki śnieżne" śniegu przewianego. Po tej stronie tworzy stojący wir powietrzny, który żłobi w już istniejącej pokrywie śnieżnej wgłębienie, za nim narasta śnieżny kołnierz określany jako „kiść ssania" (J. Marcinek, 1991; za Trepińską, 2002). Jest grubszy w przedniej części, po zawietrznej, natomiast w górnej części śnieg ulega sprasowaniu. Wszystkie te formy są potencjalnym źródłem napięć i zagrożenia lawinowego w pokrywie śnieżnej na stoku. Maksymalny kąt nachylenia szacuje się na 50-55° na zawietrznej stoku, inaczej mówiąc - nawis może narastać do takiego kąta nachylenia. Po przekroczeniu tego kąta musi runąć w dół. Na górnej prawie płaskiej powierzchni nawisu występują czasem pęknięcia równoległe do przebiegu grzbietu górskiego. Są one oznaką osłabienia spoistości, osiadania i możliwości oberwania tego nawisu (Fot. 5.6). Obok tego niebezpieczeństwa spadnięcia wędrującego granią wraz z nawisem lub przysypaniu znajdującego się pod nim człowieka, grożą naruszeniem równowagi znajdującego się poniżej stoku przez gwałtowne obciążenie i wstrząs wywołany spadającą masą śniegu. Jest to częsta przyczyna powstawania lawin.

Fot. 5.6 Pęknięcie nawisu prostopadłe do linii grani na stokach Beskidu (Fot. P. Chrustek)

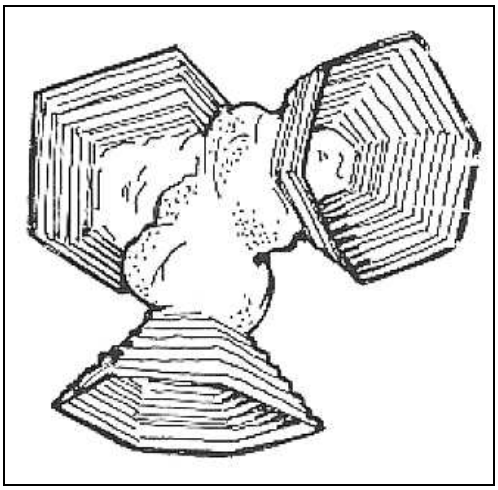
5.2.2.3 Oddziaływanie ciepła – krótkofalowego i długofalowego

Ciepło a zwłaszcza jego zdolności przemieszczania i przenikania to ważny czynnik lawino – twórczy, powodujący zmiany fizyczne w śnieżnych kryształach tworzących pokrywę śnieżną. Energia cieplna dociera do powierzchni pokrywy śnieżnej głównie dzięki bezpośredniemu promieniowaniu słonecznemu (promieniowanie krótkofalowe). Dodatkową część ciepła otrzymuje w wyniku długofalowego wypromieniowania powierzchni ziemskiej, a także przez promieniowanie cieplne rozproszone. Ogrzewanie lub ochładzanie pokrywy następuje także w wyniku adwekcji mas powietrza. Wspomniane mechanizmy w połączeniu zapoczątkowują ważne zmiany fizyczne w pokrywie śnieżnej (McClung, Schaerer; 2002).

Jedną z tych przemian jest powstawanie tzw. „***szronu powierzchniowego***". Powstaje on w wyniku zalegania ciepłych i wilgotnych mas powietrza nad stosunkowo chłodniejszą powierzchnią pokrywy śnieżnej. W wyniku kondensacji pary wodnej w niższej temperaturze przy powierzchni pokrywy. Powstają wtedy miękkie jak puch kryształy, które po przykryciu nową warstwą świeżego śniegu tworzą potencjalną warstwę ześlizgu (Ghinoi, 2003).

„***Szron wgłębny"*** powstaje w wyniku tworzenia się gradientów temperaturowych w obrębie pokrywy (zwykle wystarczy gradient o wartości 10^0C; McClung, Schaerer; 2002). Powstanie gradientów w pokrywie wynika z tego, że powierzchnia gruntu w okresie zimy dzięki zmagazynowanej energii cieplnej ma temperaturę bliską 0^0C, kiedy to temperatura na powierzchni pokrywy ma wartość prawie zawsze niższą. W wyniku różnic temperatur następuje wędrówka

ciepłego powietrza (nasyconego parą wodną) od powierzchni gruntu w głąb pokrywy. Szybkość przemieszczania jest tu wprost proporcjonalna do wartości gradientu temperatury. Chociaż proces ten przebiega generalnie wolno, to w wyniku utrzymywania się odpowiednich warunków pogodowych (silne mrozy przez kilka dni) powstaje w głębi pokrywy warstwa „szronu wgłębnego", która podobnie jak omawiana wcześniej warstwa szronu powierzchniowego, ze względu na swą fizyczną formę może być odpowiedzialny za osłabienie i destabilizację pokrywy śnieżnej. Szron wgłębny powstaje zwykle w warunkach klimatu kontynentalnego, a także w miejscach o najmniejszej dostawie bezpośredniego promieniowania słonecznego (miejscach zacienionych). Miedzy gruntem a otaczającym pokrywę chłodnym powietrzem, powstają wtedy duże gradienty temperaturowe powodujące jak wcześniej wspomniano przemieszczanie energii w profilu pionowym pokrywy.



Rys. 5.5 Forma kryształu „szronu wgłębnego" silnie destabilizująca pokrywę śnieżna. (Źródło: Fyffe, Peter; 2000)

Na stokach o dużej dostawie bezpośredniego promieniowania słonecznego (na stokach o ekspozycji południowej na półkuli północnej środkowym okresie zimy), względnie regularne okresy ochłodzenia i ocieplenia sprzyjają szybkiemu wiązaniu i stabilizacji pokrywy. Związane jest to z regularnym nadtapianiem i zamarzaniem śniegu. Powstają twarde pokrywy, które zwykle są stabilne i bezpieczne. Niebezpieczeństwo mogą nieść wtedy gdy na taką zalodzoną powierzchnie spadnie świeża warstwa śniegu, która z łatwością może ślizgać się na twardej i zalodzonej powierzchni. (McClung, Schaerer; 2002).

Odwilż powoduje szybkie zmiany w budowie pokrywy śnieżnej i strukturze śniegu. Następuje szybkie jego osiadanie, a najbardziej nadtopiona warstwa powierzchniowa po ponownym ochłodzeniu tworzy lodoszreń. Przy dłużej trwających, silnych odwilżach,

a szczególnie w okresie wiosny, woda z topniejącego śniegu przesiąka w głąb osłabiając spoistość warstw, a dochodząc do gruntu spływa po nim, zrywając często przyczepność całej pokrywy śnieżnej i stwarzając warunki do powstawania lawin gruntowych.

Bardzo gwałtowne jest działanie odwilży związanej z wiatrem halnym, zwłaszcza na północnych stokach Karpat, gdzie wiatr ten jest ciepły i suchy. Odwilż tego typu powoduje nadzwyczaj szybkie procesy parowania i topnienia, co pociąga za sobą zmianę warunków śnieżnych w ciągu paru godzin. Dochodzi wtedy często do masowego zejścia lawin. Podobne działanie ma silne nasłonecznienie, szczególnie w czasie wiosny, gdy temperatury nie są już zbyt niskie - nagrzane w ten sposób partie terenu traktować należy jako szczególnie zagrożone.

Przy odwilżach wiosennych, połączonych z całodobowymi dodatnimi temperaturami, zejścia lawin można oczekiwać w ciągu całej doby. Naoczną oznaką lawiniastości mokrego śniegu są toczące się i rosnące w miarę spadania grudy, zwane często kalafiorami. (materiały szkoleniowe GOPR, 1983)

6. Mapy zagrożenia lawinowego w Europie

Mapy zagrożenia lawinowego identyfikują obszary zagrożone występowaniem lawin. Pierwsza tego typu mapa powstała w Gadmen i Wengen (w szwajcarskim kantonie Bern), w 1954 i 1960 roku. Stworzone strefy zagrożenia opracowano głównie na podstawie zanotowanych przypadków zejścia lawin bez uwzględnienia czynników meteorologicznych czy kalkulacji dynamiki lawin. Z czasem, wraz z dynamicznym rozwojem badań w tej dziedzinie opracowano „Przewodnik do wydzielania obszarów zagrożenia lawinowego" (ang. Swiss Guidelines for avalanche zoning") wydanym w 1984r. Obecnie mapy zagrożenia lawinowego są tworzone na podstawie kompleksowych analiz różnego typu czynników lawino - twórczych. Procedury definiowania owych map najczęściej obejmują (wg Maggioni, 2004) :

- analizę „katastru lawinowego", czyli map zawierających przestrzenny zasięg historycznych lawin,
- analizę pokrywy śnieżnej i klimatu badanego regionu,
- wiedzę na temat topografii i geomorfologii terenów występowania lawin (miejsc obrywu lawin, drogę zejścia i strefę czołową),
- szacunki prawdopodobieństwa wystąpienia określonego typu lawiny i ich frekwencji;
- interpretację rezultatów kalkulacji dynamiki lawin;

W większości przypadków procedura definiowania stref zagrożenia rozpoczyna się od określenia obszarów potencjalnego występowania lawin (**P**otential **R**elease **A**reas), czyli miejsc w których lawiny mają swój początek. Dzięki temu szacuje się prawdopodobną objętość mas śniegu których droga zejścia determinowana jest przez odpowiednie warunki morfologiczne, oraz odpowiednie właściwości fizyczne i dynamiczne mas śniegu wprawionych w ruch. Określenie zasięgu lawin w strefie akumulacji (ang. „run out zone") odgrywa znaczącą role nie tylko dla zwiększenia bezpieczeństwa osób poruszających się w terenach zagrożonych. Określenie owych stref to podstawa w planowaniu

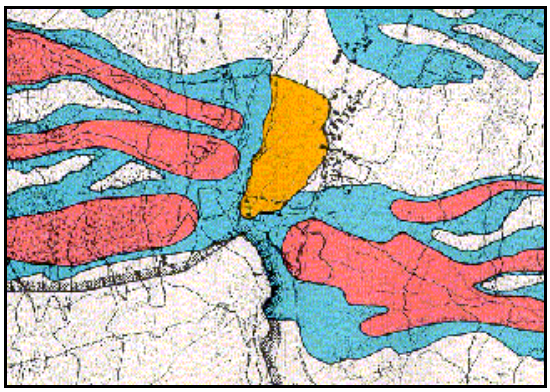
przestrzennym, które reguluje możliwości powstania nowych osiedli mieszkalnych, czy też powstania infrastruktury technicznej na potrzeby bytowe ludzi (Ghinoi, 2003).

Wspomniany na wstępie projekt Unii Europejskiej „SAME" pozwala na przegląd map zagrożenia lawinowego występujących na naszym kontynencie. Najważniejsze z nich prezentują się następująco (wg Ghinoi, 2003):

Francuzi opracowali „Carte de localisation propable des avalanches" czyli mapę prawdopodobieństwa wystąpienia śnieżnych lawin, gdzie drogi lawin wyznaczono na podstawie interpretacji zdjęć i pomiarów terenowych, oraz wywiadów ze świadkami historycznych przypadków zejść lawin. Skala owych map wynosi zwykle 1:25000. Taki sam typ mapy opracowano także w Hiszpanii i we Włoszech.

Szwajcarzy opracowali swoje mapy w skalach od 1:1000 do 1:15000. Mapy te opierają się głównie na skomplikowanych analizach modeli matematycznych, analiz GIS i opinii ekspertów. Wynikiem tego są dokumenty wskazujące strefy różnego stopnia zagrożenia.

Norwegowie stworzyli swoje mapy na podstawie historycznych zejść lawin i określeniu PRA identyfikując wyłącznie obszary znajdujące się powyżej górnej granicy leśnej, których nachylenie jest większe od 30^0.



Ryc. 6.1 Przykład strefowania obszarów na szwajcarskiej kompleksowej mapie zagrożenia lawinowego (Źródło: Gruber, 2001)

Jeśli chodzi o Tatrzańska bazę danych to opiera się ona głównie na badaniach prowadzonych przez K. Chomicza i M. Kłapową, których wyniki były publikowane min. w biuletynach PIHM. Wynikiem tego są mapy na których zaznaczono szlaki zejścia lawin (bez określenia granic lawiny) i częstotliwość występowania w danym okresie badań.

Ryc. 6.2 Fragment mapy częstości występowania lawin w Tatrach z okresu 1961 – 72r. (Źródło: Materiały IMGW)

Oprócz map istnieje także baza tekstowa opisująca pojedyncze przypadki lawin. Charakterystyka obejmuje (wg materiałów IMGW):

- datę godzinę zejścia lawiny,
- lokalizacje (słowna bez podania współrzędnych)
- genezę lub przyczynę zjawiska lawinowego,
- warunki pogodowe w momencie zejścia lawiny,
- rodzaj lawiny,
- charakterystykę miejsca obrywu,
- krótką charakterystykę szlaku lawinowego,
- opis stożka (czoła) lawinowego,
- szkody wyrządzone przez lawinę,
- dokumentację (fotograficzną) zjawiska lawinowego i wyrządzonych szkód),

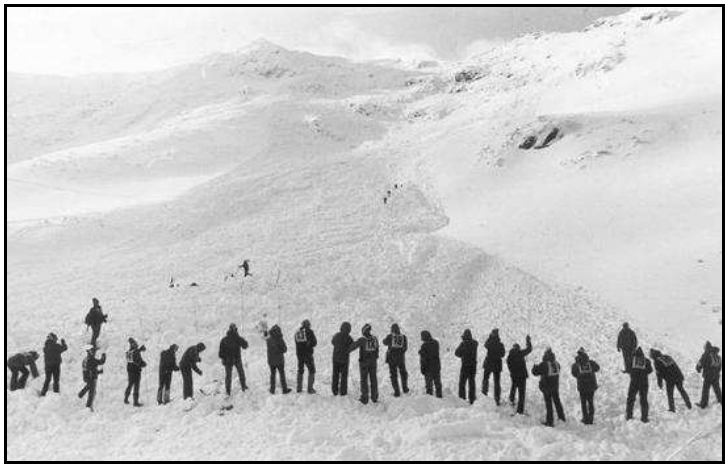
Niestety taka bogata informacja o historycznych lawinach dotyczy okresu z lat 60-80, kiedy to kierownikiem Stacji na Hali Gąsienicowej była M. Kłapowa.

Obecnie rejestracje danych o historycznych lawinach prowadzi, także Tatrzański Park Narodowy który w swoich zasobach posiada cyfrową warstwę wektorową z obrysem kilkudziesięciu przypadków lawin wykonanym głównie dzięki pomiarom GPS.
Poligonom będącym granicami zasięgu lawin przypisane są następujące atrybuty:

- data i godzinę zejścia lawiny,
- krótki opis zawierający informację o typie lawiny, charakterystyce czoła lawiny i skutki zejścia lawiny,

Charakterystyka opisowa nie dotyczy wszystkich zarejestrowanych przypadków a występująca jest w większości niekompletna. Wynika to z faktu, iż gromadzenie danych na tym polu nie opiera się o konkretne wytyczne czy instrukcje.

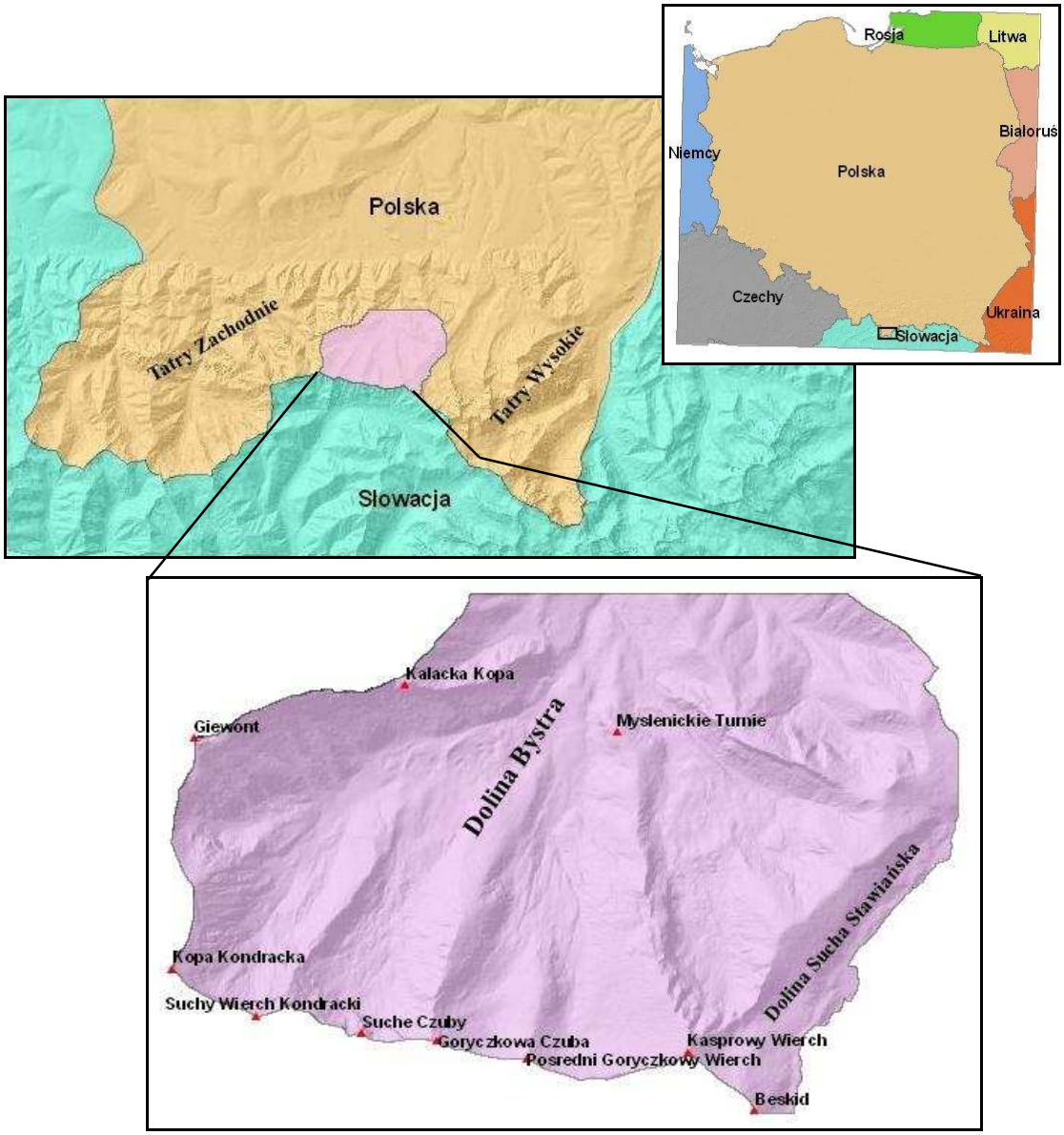
Część danych o historycznych lawinach posiadają także górskie służby ratownicze (GOPR, TOPR), które posiadają dokumentacje kartograficzną i fotograficzną. Dotyczy to jednak, głównie przypadków w których zaszła potrzeba interwencji pogotowia.



Fot. 6.1 Akcja ratunkowa na lawinisku w Tatrach (Źródło: Materiały archiwalne GOPR)

7. Charakterystyka terenu badań

7.1 Położenie



Ryc. 7.1 Geograficzne położenie terenu badań

Teren badań to obszar o powierzchni 1448 ha (czyli 14,48 km^2). Rozciągłość południkowa badanego terenu wynosi 3.6 km a równoleżnikowa 5.4 km. Pod względem fizyczno - geograficznym obszar w całości znajduję się w mezoregionie „Tatr

Zachodnich", a ten w makroregionie „Łańcucha Tatrzańskiego", podprowincji „Centralnych Karpat Zachodnich" i prowincji „Karpat Zachodnich" (Kondracki, 1998). Pod względem topograficznym badany obszar znajduję się w obrębie Doliny Suchej Stawiańskiej (o powierzchni 1.8 ha, na wschód od Kasprowego Wierchu) i górnego fragmentu Doliny Bystrej (o powierzchni 1446.2 ha, na północ i zachód od Kasprowego Wierchu).

7.2 Środowisko przyrodnicze

Geologicznie obszar zbudowany jest ze skał magmowych i metamorficznych tworzących trzon krystaliczny (głównie granitoidów i gnejsów, z których najstarsze uformowane zostały w orogenezie kaledońskiej), oraz skał osadowych powstałych w okresach triasu, jury i kredy. O rysach obecnej rzeźby zdecydowały w dużym stopniu dawne spękania trzonu krystalicznego, w postaci krzyżujących się linii przesunięć i uskoków na których powstała większość przełęczy. Rzeźba ma tu przeważnie charakter erozyjny i częściowo krasowy (Nyka, 1994).

Klimat Tatr cechuje piętrowość. Według podziałów M. Hessa (1969), badany obszar znajduje się w czterech piętrach klimatycznych: Umiarkowanie chłodnym ($4^0C \leq T_{śr.\ roczna} < 6^0C$), Chłodnym ($2^0C \leq T_{śr.\ roczna} < 4^0C$), Bardzo chłodnym ($0^0C \leq T_{śr.\ roczna} < 2^0C$) i Umiarkowanie zimnym ($-2^0C \leq T_{śr.\ roczna} < 0^0C$). Temperatura zmienia się w profilu pionowym ze średnią $0{,}5^0C$ na 100 m. Maksimum opadowe wynosi tu powyżej 1850 mm. Maksimum opadowe przypada na czerwiec, minimum – w wyższych partiach na pierwszą połowę zimy (listopad - luty), w pasie szczytów na jesień (wrzesień-październik). Nieomal połowa opadów w ciągu roku przybiera postać stałą, w wyższych partiach gór żaden miesiąc nie jest pozbawiony opadów śniegu. Pokrywa śnieżna zalega na Kasprowym Wierchu średnio od końca września do końca czerwca, osiągając swoje średnie maksimum (ponad 160 cm) pod koniec marca (Klimat Tatr, 1974; za Trepińską, 2002).

Środowisko roślin podobnie jak klimat, charakteryzuje piętrowość. Dolny obszar badań zajmuje pas lasów, w którym wydzielono 2 piętra: dolnoreglowe (do 1250 m), pierwotnie złożone głównie z drzewostanów bukowo-jodłowych ze świerkiem i jaworem, oraz górnoreglowe (do 1550 m), krainę świerka. Linią niezwykle ważną wegetacyjnie i krajobrazowo jest górna

granica lasu, którą oprócz karlejącego świerka tworzą m.in. takie drzewa, jak wierzba śląska, brzoza karpacka, jarząb nagi i limba. Ponad lasami - do 1800 m - rozpościera się subalpejskie piętro kosodrzewiny, w miarę wzrostu wysokości karlejącej i rozpadającej się na płaty i kępki. Spełnia ona ważną funkcję ochronną (lawiny, osuwiska, erozja, retencja). Z kolei następuje piętro hal (alpejskie), sięgające do najwyższych kulminacji badanego obszaru. Tworzą je naturalne łąki górskie złożone z traw i kwitnących ziół. Występują tu też krzewinki takie jak: borówka, wrzos, jałowiec halny czy wierzby karłowate (Nyka, 1994).

8. Materiały, narzędzia i metoda pracy

W rozdziale tym przedstawiono metody i narzędzia, które umożliwiły przeprowadzenie analizy, oraz źródła danych wykorzystanych w poniższym opracowaniu. Kolejne rozdziały opisują procedury i metody przetwarzania materiałów źródłowych.

8.1 Materiały źródłowe

W poniższej pracy zostaną wykorzystane zarówno materiały cyfrowe jak i analogowe. Materiały cyfrowe to:

1. ***Cyfrowy Model Terenu*** (DEM – Digital Elevation Model) – jest to przestrzenny model badanego terenu, w formacie rastrowym o rozdzielczości w oryginale 5 m i wymiarze 716 rzędów i 1119 kolumn. Jego powierzchnię wyznaczają punkty współrzędnych ***x, y, z***, gdzie współrzędna ***z*** jest trzecią wartością charakteryzującą lokalizacje (wysokość) (Widacki, 1997). Model wykonany jest w odwzorowaniu UTM strefa 34N opartym na elipsoidzie WGS 84.

2. ***Rastry map analogowych*** – są to rastry map topograficznych w skali 1:10000 oparte na odwzorowaniu poprzecznym Merkatora i elipsoidzie odniesienia WGS 84.

3. ***Ortofotomapy lotnicze*** – mające rozdzielczość 0.75m, oparte na odwzorowaniu poprzecznym Merkatora i elipsoidzie odniesienia WGS 84.

4. ***Warstwa cyfrowa pokrycia terenu*** w formacie „shape - arc info" oparta na pomiarach fotogrametrycznych i terenowych GPS. Warstwę wykonano w ramach prowadzonego w Tatrzańskim Parku Narodowym projektu „Kasprowy" (Wężyk, Guzik; 2001). Oparta na odwzorowaniu UTM strefa 34N i elipsoidzie odniesienia WGS 84.

5. ***Warstwa cyfrowa zasięgu historycznych lawin*** w formacie „shape - arc info" – wykonywana na bieżąco na podstawie pomiarów GPS prowadzonych w Tatrzańskim Parku Narodowym. Oparta na odwzorowaniu UTM strefa 34N i elipsoidzie odniesienia WGS 84.

Wszystkie warstwy prócz ortofotomapy, udostępniono z cyfrowej bazy danych Tatrzańskiego Parku Narodowego. Ortofotomapy lotnicze zakupiono w Urzędzie Marszałkowskim Województwa Małopolskiego dla potrzeb pracy.

Dane analogowe to:

1. **Dane meteorologiczne** częstości występowania wiatrów na określonych kierunkach z wielolecia 1984 - 2004. Dane pochodzą z wysokogórskiej stacji meteorologicznej na Kasprowym Wierchu ($\varphi = 49^0$ 13' 57'' ; $\alpha = 19^0$ 58' 55''; H= 1987 m n.p.m.)

2. **Mapa częstości występowania lawin w Tatrach** w okresie 1961-72, opracowana na podstawie mapy w skali 1:25 000.

Dane pochodzą z Krakowskiego Oddziału Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

8.2 Narzędzia pracy

Wszystkie przeprowadzone w poniższej pracy analizy zostały wykonane przy wykorzystaniu Systemów Informacji Geograficznej. Umożliwiły one wprowadzanie, przechowywanie, zarządzanie, przetwarzanie oraz wyprowadzanie danych.

Zostały wykorzystane następujące programy:

- ArcGIS 8.2
- Erdas Imagine 8.2
- Microsoft Excel 2000
- Microsoft Word 2000

Zasadnicze etapy pracy zostały wykonane w oprogramowaniu **ArcGIS v 8.2**, a w szczególności w aplikacji *Spatial Analyst*, oferującego zestaw narzędzi koniecznych do analiz i modelowania przestrzennego.

Oprogramowanie **Erdas Imagine 8.2** pozwoliło na przygotowanie i obróbkę danych formatu rastrowego. W jego skład wchodzi kilkanaście modułów umożliwiających wykonywanie wielu operacji matematycznych wykorzystujących obrazy rastrowe.

Przygotowywanie i edycje danych statystycznych, a także edycję tekstów wykonano w oprogramowaniu firmy Microsoft (**Excel, Word**).

Poniższe paragrafy opisują krótko teoretyczne podstawy wykorzystania narzędzi Systemów Informacji Geograficznej oraz krótko scharakteryzują podstawowe źródło danych o morfologii terenu jakim jest Cyfrowy Model Terenu (DEM.)

8.2.1 Systemy Informacji Geograficznej

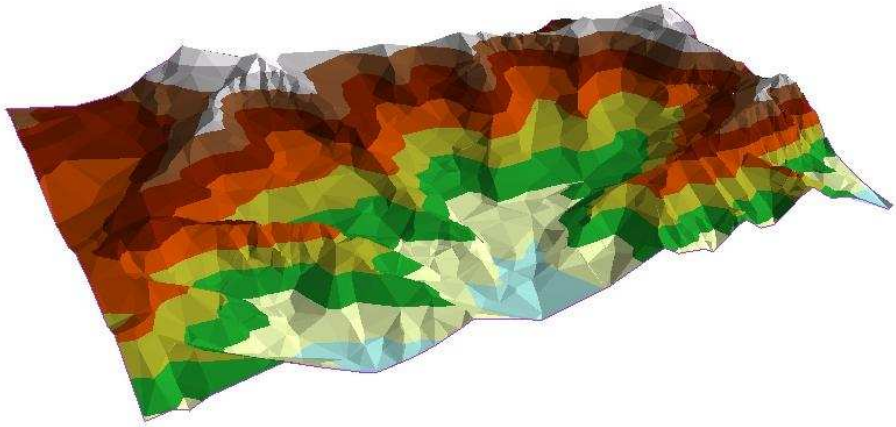
Generalnie GIS to narzędzia umożliwiające automatyczną analizę i interpretacją danych o obiektach przestrzennych, przechodzenie od danych cyfrowych do map, modeli trójwymiarowych, równań lub wyrażeń logicznych. Od strony funkcjonalnej GIS to program obsługujący cyfrową kolekcję map tematycznych lub cały atlas oraz wyniki ich przetworzeń: tabele i wykresy (Widacki, 1997).

Podstawą w niniejszej pracy jest uzyskanie danych na temat morfologii terenu. Systemy GIS umożliwiają uzyskiwanie parametrów morfologicznych na podstawie modeli rastrowych i wektorowych.

Model rastrowy reprezentuje Cyfrowy Model Terenu (DEM). Jego powierzchnią jest układ regularnej siatki kwadratów, których punkty wyznaczają współrzędne ***x,y,z*** , gdzie współrzędna ***z*** jest trzecią wartością charakteryzującą lokalizacje (wysokość). Uzyskana reprezentacja daje obraz trójwymiarowy. Ponieważ nie jest on w pełni trójwymiarowy, popularnie określa się go jako obraz dwuipółwymiarowy. Model w pełni trójwymiarowy przedstawia nie tylko fragment powierzchni terenu, lecz także np. znajdujące się w nim utwory geologiczne (Widacki, 1997).

Ryc. 8.1 Cyfrowy Model Terenu (DEM) z nałożoną ortofotomapą

Model wektorowy reprezentuje model TIN (Triangulated Irregular Network) będący siecią nieregularnych trójkątów, których wierzchołki stanowią punkty o znanych wysokościach. Algorytmy do obliczania TIN zakładają, że wysokość na bokach trójkątów zmieniają się stopniowo a nie gwałtownie. Regularna siatka DEM już z natury oddaje relacje przestrzenne dla TIN, konieczne natomiast jest zbudowanie topologii. Jakość tego modelu jest determinowana przez rozmieszczenie oryginalnych punktów i poprawność interpolacji. (Widacki 1997)



Ryc. 8.2 Model TIN

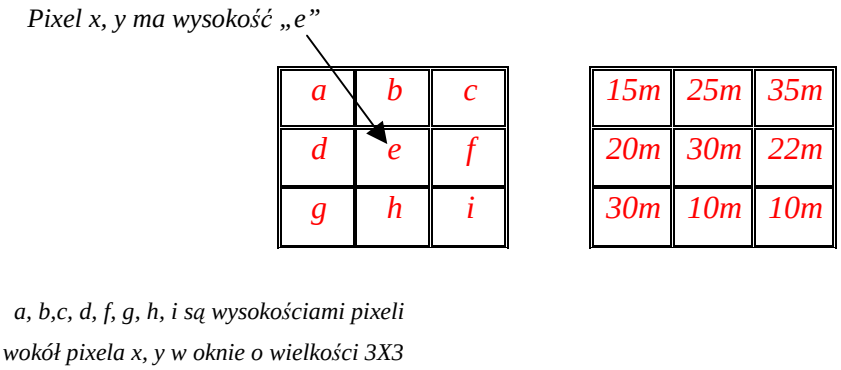
Chociaż model TIN lepiej oddaje charakter rzeźby bardziej urozmaiconej (uskoki, urwiska itp.) to generalnie trudniej nim operować. Wiele algorytmów bazujących na regularnej siatce nie posiada swoich odpowiedników w modelach wektorowych co sprawia że model DEM staje się bardziej praktyczny i uniwersalny w badaniach prowadzonych w niniejszej pracy.

8.2.2 Wyznaczanie parametrów morfologicznych z Cyfrowego Modelu Rzeźby (DEM)

Dzięki aplikacjom GIS model może służyć do wygenerowania szeregu nowych atrybutów opisujących morfometrię terenu. Należą do nich *atrybuty podstawowe* takie jak nachylenie, ekspozycja, formy rzeźby i *atrybuty zawaansowane* jak potencjalny dopływ promieniowania słonecznego który jest funkcją wysokości, nachylenia terenu, ekspozycji i zacienienia obszarów w kolejnych okresach roku (Maggioni, 2004)
Poniżej opisano metody generowania podstawowych parametrów, które stanowią podstawę analizy w niniejszej pracy. Parametry które nie zostaną wymienione a zostaną wykorzystane w pracy opisano w dalszych rozdziałach opisujących szczegółowe kroki prac.

8.2.2.1 Nachylenie i ekspozycja

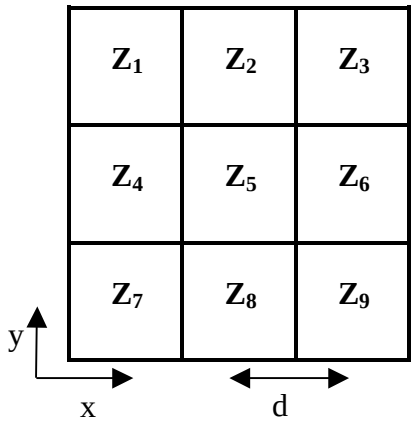
Funkcję nachylenia i ekspozycji zaimplementowano z oprogramowania ArcInfo - ESRI. Funkcja nachylenia oblicza maksymalny gradient zmian pomiędzy pikselem a jego sąsiadami. Może być wyrażona w stopniach lub procentach. Funkcja ekspozycji identyfikuje zaś kierunek maksymalnego gradientu pomiędzy pikselem i jego sąsiadami (wyrażonego w stopniach). Obydwie funkcje obliczane są na podstawie analizy sąsiedztwa na powierzchni podstawowej 3X3 piksela (ArcDoc, 2001).



Rys. 8.1 Okno o wymiarach 3x3 stosowane do obliczeń nachylenia i ekspozycji każdego piksela (Źródło: Erdas Field Guide,1998)

8.2.2.2 Zakrzywienie powierzchni (Curvanture-ArcInfo)

Funkcja ta generuje dwa rodzaje powierzchni: ***plan curvanture*** - jest gradientem zmian ekspozycji wzdłuż poziomic; ***profil curvanture*** – określa gradient zmian nachylenia wzdłuż linii spływu.



Rys. 8.2 Okno o wymiarach 3x3 stosowane do obliczeń „zakrzywienia powierzchni" każdego piksela

Zarówno ***plan*** jak i ***profile curvanture*** obliczane są (podobnie jak funkcje nachylenia i ekspozycji) na podstawie sąsiedztwa w obszarze 3X3 pixeli. Poniższe wzory wyrażają matematyczna interpretacje wielkości obliczanej wartości „z" (ArcDoc, 2001).

$$Z_{xx} = 100\frac{\frac{z_6 - z_5}{d} - \frac{z_5 - z_4}{d}}{d} = 100\frac{z_4 + z_6 - 2z_5}{d^2}$$

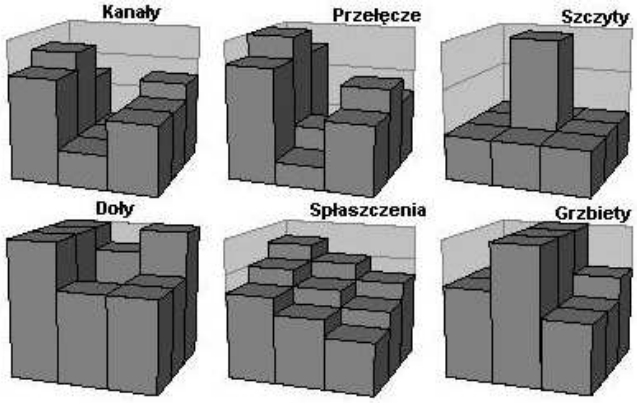
$$Z_{yy} = 100\frac{\frac{z_8 - z_5}{d} - \frac{z_5 - z_2}{d}}{d} = 100\frac{z_2 + z_8 - 2z_5}{d^2}$$

W niniejszej pracy użyto wartości zakrzywienia w profilu podłużnym (*plan curvanture*) –0.2 i +0.2 jako wartości graniczne w wydzieleniu obszarów o formie wklęsłej, płaskiej i wypukłej. Dla przyjętej rozdzielczości d=50 m, wybrana wartość 0.2 odpowiada wzrostowi wysokości (z_6 - z_5 i z_5 – z_4) równej 2.5 m pomiędzy wysokościami centralnych punktów sąsiadujących pikseli (Maggioni, 2004).

8.2.3 Wpływ rozdzielczości DEM na określanie parametrów morfologicznych

Podstawowymi problemami pojawiającymi się przy określaniu parametrów morfologicznych z DEM są jakość danych źródłowych do wygenerowania modelu i jego późniejsza rozdzielczość przestrzenna. (Wilson 2000; za Maggioni, 2004).

Wood, Evans, Peucker & Douglas zdefiniowali sześć klas form morfologicznych możliwych do wygenerowania z modelu: kanały, przełęcze, szczyty, doły, spłaszczenia i grzbiety (za Maggioni 2004).



Rys. 8.3 Klasy form terenu reprezentowanych przez siatkę GRID Cyfrowego Modelu Terenu (Źródło: Maggioni, 2004)

Jednak kiedy występuje konieczność zaklasyfikowania jakiegoś punktu w przestrzenie do odpowiedniej klasy w oparciu o analizę modelu, wynik klasyfikacji ściśle zależy od przyjętej rozdzielczości przestrzennej modelu co obrazuje rysunek poniżej.

Rys. 8.4 Wpływ rozdzielczości modelu rastrowego na określanie klasy formy morfologicznej (Źródło: Maggioni, 2004)

Jak łatwo zauważyć ten sam punkt w przestrzeni może być przyporządkowany do różnej klasy w zależności od przyjętych parametrów modelu. Jest więc rzeczą jasną, że dobór parametrów jest zależny od charakteru terenu badań i celów w jakim są one wykonywane. Zmniejszanie rozdzielczości przestrzennej modelu sprawia „wygładzanie

powierzchni" co powoduje, że szczegółowe parametry morfologiczne są maskowane i niemożliwe do przeanalizowania. Modele o wysokiej rozdzielczości pozwalają na szczegółową analizę parametrów co jednak nie oznacza, że posiadają one większą użyteczność dla każdego typu charakteryzowanej cechy morfologicznej. Często owe „wygładzenie powierzchni" wykonuje się celowo chcąc uzyskać obraz uogólniony badanej cechy.

Szczegółowe wykorzystanie modułów poszczególnego oprogramowania opisano szerzej w rozdziałach opisujących szczegółowo etapy prac.

8.3 Metody

Rozdział ten przedstawia etapy przygotowania materiałów, a także metody przetwarzania i sposoby postępowania.

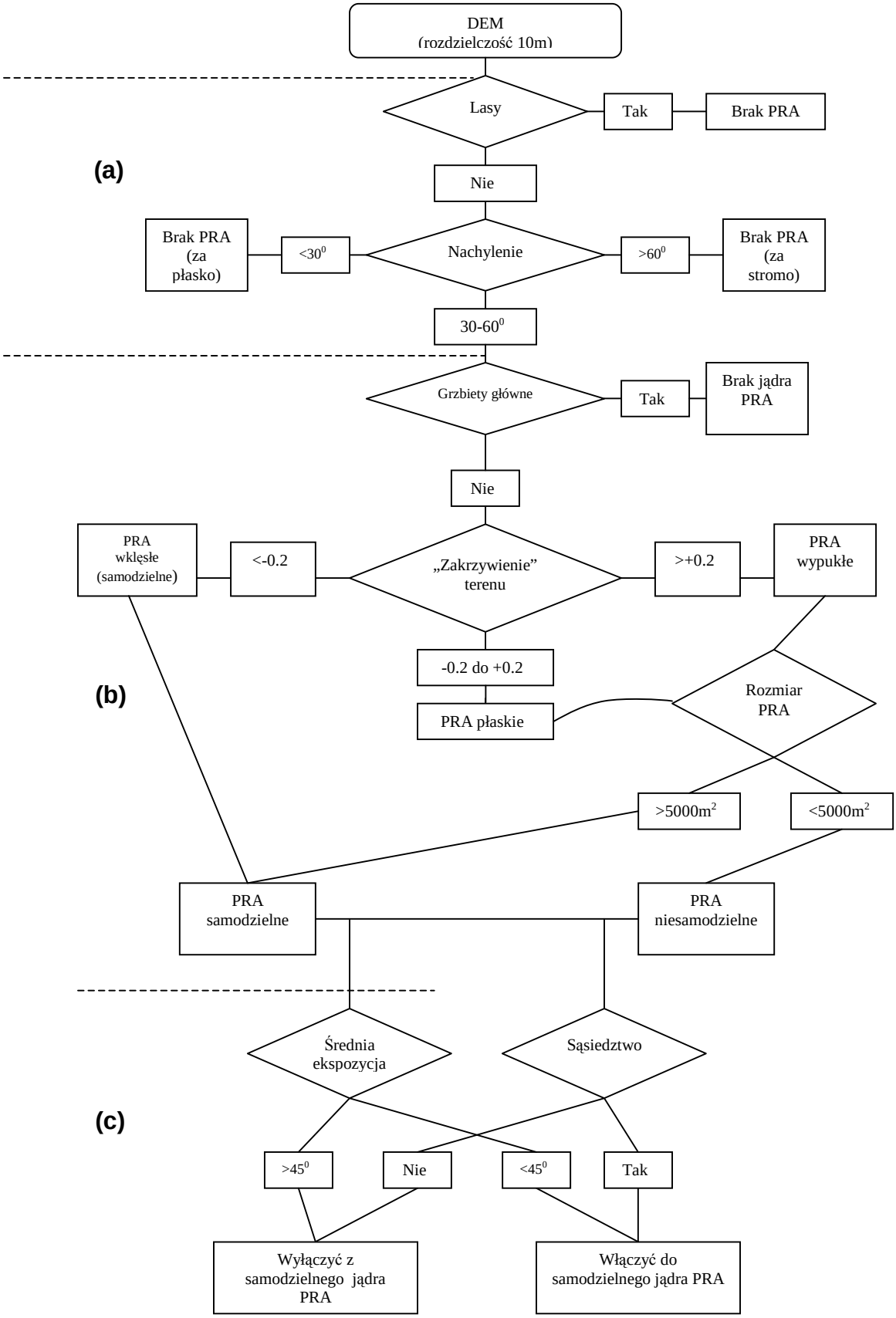
Rozdział ten podzielono na dwie części: pierwsza opisuje metody i tok postępowania w określeniu obszarów potencjalnego występowania lawin śnieżnych, druga natomiast ich charakterystykę pod względem stopnia ryzyka wystąpienia lawiny.

8.3.1 Tworzenie obszarów potencjalnego występowania lawin śnieżnych (PRA)

8.3.1.1 Wyznaczanie obszarów potencjalnego występowania lawin śnieżnych (PRA)

Wydzielenie obszarów potencjalnego występowania lawin śnieżnych (PRA) oparte zostało o szwajcarską metodę, zaproponowaną przez badaczy z Instytutu do Badań Śniegu i Lawin w Davos (Maggioni, Gruber 2002; Maggioni, 2004).

Metodę opracowano posługując się danymi historycznymi, opisującymi ponad 4500 przypadków zejścia lawin w okresie ponad 50 lat. Celem tej metody jest wyznaczenie pojedynczych obszarów o względnie jednolitej formie morfologicznej, które stanowią obszar potencjalnego występowania lawin o podobnym charakterze genetycznym. Podstawowym materiałem w badaniach jest cyfrowy model wysokości o wysokiej rozdzielczości przestrzennej (10 m), na podstawie którego stosując odpowiedni algorytm postępowania wyznaczone zostają obszary PRA podzielone na trzy grupy (płaskie, wklęsłe i wypukłe).



Rys. 8.5 Procedura definiowania obszarów PRA: **(a)** Definiowanie PRA, **(b)** Podział PRA, **(c)** Łączenie PRA (Maggioni, Gruber 2003 – wersja zmodyfikowana)

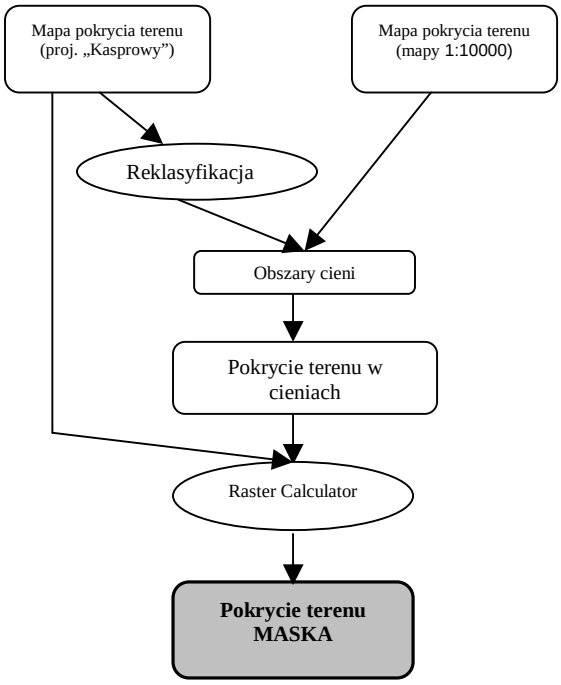
Metodę na potrzeby pracy uproszczono pomijając etap podziału samodzielnych obszarów PRA, których różnica wysokości pomiędzy najwyższym i najniżej położonym punktem jest większa od 200 m. Wydaje się, że wielkość ta jest najbardziej subiektywnym parametrem w metodzie, który powinien być poddany szczegółowej weryfikacji.

Rysunek 8.5 przedstawia kolejne kroki postępowania w wyznaczaniu owych obszarów. Szczegółowo każdy z nich opisano w kolejnych podrozdziałach.

(a) Definiowanie obszarów PRA

W tym etapie pracy stosując jako główne kryterium nachylenie stoku, wyznaczono podstawowe obszary PRA, które na podstawie różnych cech zostaną podzielone w dalszych etapach.

Jako maskę analizy przyjęto podstawowy obszar badań pomniejszony o powierzchnie leśne, które jak wspomniano w rozdziale 5.2.1.3, wpływają stabilizująco na pokrywę śnieżna zwiększając siłę tarcia w pokrywie i tym samym jej stabilność. Wyklucza to możliwość wystąpienia lawiny (w obszarze obrywu). Wykorzystano tutaj wektorową warstwę pokrycia terenu wykonaną w ramach projektu „Kasprowy" w Tatrzańskim Parku Narodowym (Wężyk, Guzik; 2001).

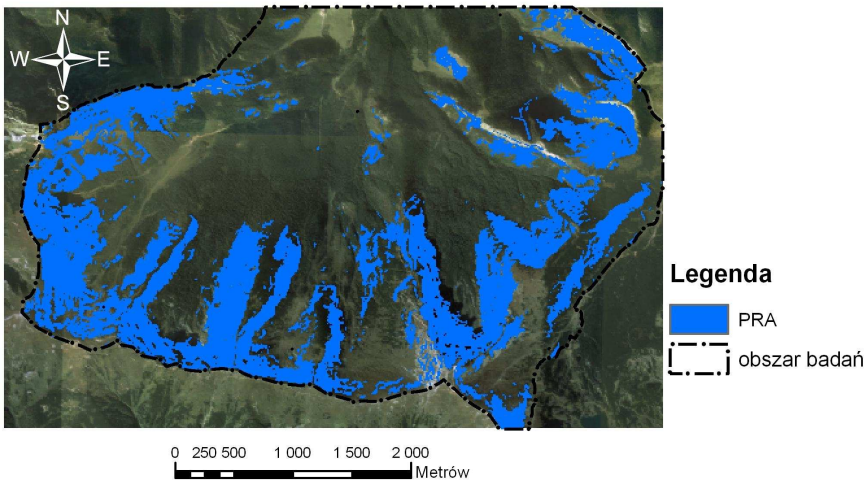


Rys. 8.6 Procedura definiowania maski pokrycia terenu

Ze względu na występująca klasę cieni (obszary braku danych na temat pokrycia) wykorzystano dodatkowo wektorową mapę pokrycia terenu opracowaną na podstawie map topograficznych w skali 1:10 000.

Obydwie mapy skonwertowano do formatu rastrowego. Wykorzystując moduł *Raster Calculator* (ArcGIS), do mapy z projektu „Kasprowy" przyłączono klasę lasów z warstwy opartej na mapach topograficznych (zawartą w obszarze cieni) (Rys. 8.6).

Nachylenie stoków jest najważniejszym kryterium morfologicznym występowania lawin śnieżnych. Wpływ wielkości nachylenia opisano w rozdziale 5.2.1.1 Generalizując można powiedzieć że systematyczne obserwacje lawin dowodzą że lawiny występują na stokach o wartości nachylenia od $30\text{-}60^0$. Przyjęto, że poniżej wartości nachylenia 30^0 siła grawitacji nie jest wystarczająco silna do zainicjowania ruchu mas śniegu natomiast powyżej wartości 60^0 nie występują korzystne warunki do akumulacji śniegu. Chociaż w tym przedziale lawiny występują często, to ze względu na małe objętości mas śniegu, lawiny te mają charakter niewielkich kaskad śnieżnych rzadko przyczyniających się do wyrządzania szkód. Mapę nachylenia wygenerowano z DEM o rozdzielczości przestrzennej 10 m. Dla wszystkich map wykorzystywanych i generowanych w analizie przyjęto odwzorowanie UTM strefa 34N opartej na elipsoidzie odniesienia WGS84.
Powstała mapa wynikowa w tym etapie pracy przedstawia podstawowe obszary PRA (nieleśne o nachyleniu $30\text{-}60^0$). Mapę w module *Raster Calculator* (ArcGIS) zreklasyfikowano do mapy „jedynkowej" gdzie wartość 1 przedstawia wyznaczone obszary. Pozostałym wartościom przyporządkowano wartość NoData (Ryc. 8.3).



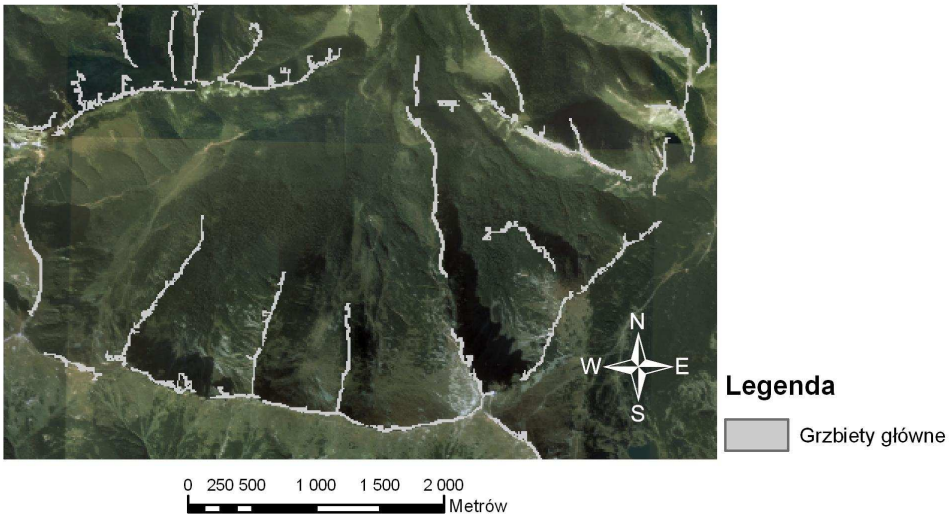
Ryc. 8.3 Mapa podstawowych obszarów PRA (z ortofotomapą w podkładzie)

(b) Podział obszarów PRA

Kolejnym etapem pracy jest podział wygenerowanych obszarów PRA na samodzielne jednostki względnie jednolite morfologicznie i mogące nawiązywać do pojedynczych przypadków lawin. Poniżej opisano parametry, które wykorzystano w dalszych podziałach.

Grzbiety główne

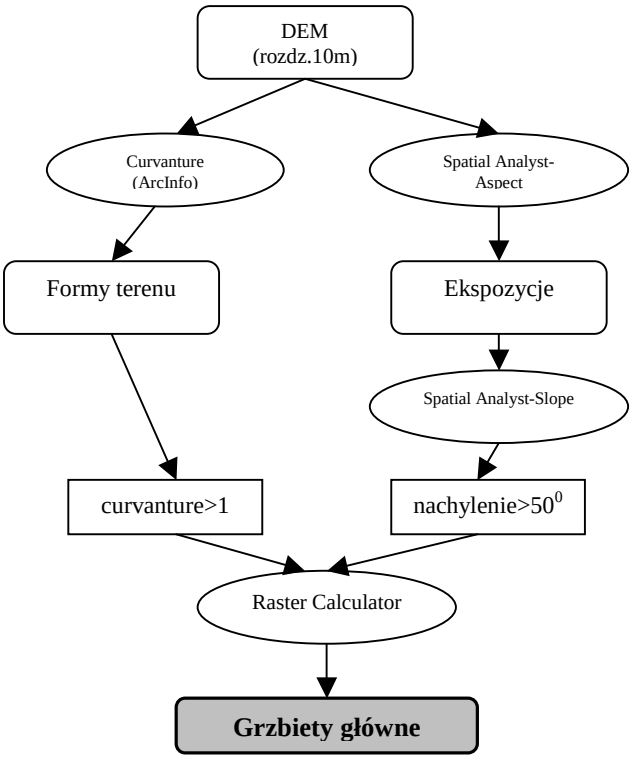
Grzbiety są bardzo ważna cechą morfologiczną terenu, oddzielającą obszary o różnej ekspozycji. W nawiązaniu do działalności deflacyjnej i akumulacyjnej wiatru, szczególną rolę odgrywają jako separator stoków dowietrznych i zawietrznych. Z badań wynika że na stokach zawietrznych występuje średnio 20-30% więcej zakumulowanego śniegu, co wpływa na odmienność obszarów ze względu na rodzaje czynników mogących wpłynąć na powstawanie lawin (Maggioni, 2004).



Ryc. 8.4 Mapa grzbietów głównych (z ortofotomapą w podkładzie)

Obszary grzbietów głównych wyłączono z analizy separując obszary o zróżnicowanej ekspozycji. Do wygenerowania grzbietów głównych wykorzystano mapy nachylenia ekspozycji (obszary o największej zmianie kąta ekspozycji - > 50^0)

i zakrzywienia terenu (*Curvanture - ArcInfo*) („zakrzywienie terenu" > 1). Sposób wyznaczenia grzbietów głównych z DEM przedstawia poniższa rycina.



Rys. 8.7 Procedura definiowania grzbietów głównych

Formy terenu *(Curvanture ArcInfo)*

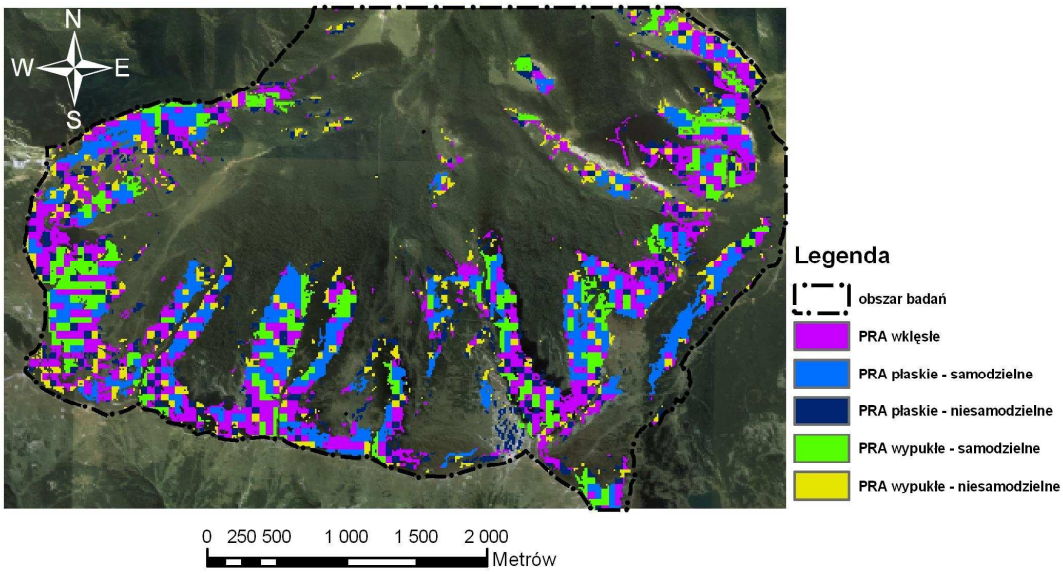
Zmiany form terenowych w profilu podłużnym i poprzecznym do nachylenia stoku, determinują czynniki przyspieszające lub spowalniające metamorfozy budujące lub redukujące w pokrywie śnieżnej (Maggioni, 2004). Wpływają także na rozkład sił działających w pokrywie, a także na wielkość akumulacji mas śniegu (Luckman, 1978; za Maggioni 2004).

Do wygenerowania mapy form terenu wykorzystano mapę „zakrzywień terenu" (*Curvanture -ArcInfo*) na podstawie DEM o rozdzielczości przestrzennej 50m. Rozdzielczość zmniejszono celowo chcąc wyeliminować zmiany w konfiguracji terenu o małej skali.

Poniżej przedstawiono wartości graniczne „zakrzywienia" dla odpowiedniego typu form.

- formy wklęsłe: plan curvanture ≤ -0.2
- formy płaskie: - 0.2 < plan curvanture < +0.2
- formy wypukłe: plan curvanture ≥ +0.2

Jak wspomniano w rozdziale 8.2.2.2 dla przyjętej rozdzielczości d = 50 m, wybrana wartość graniczna 0.2, odpowiada wzrostowi wysokości równej 2.5 m pomiędzy wysokościami centralnych punktów sąsiadujących pikseli (Maggioni, 2004).
Obszary o wartości zakrzywienia mniejszej bądź równej –0.2 zaklasyfikowano do obszarów wklęsłych, które bez względu na rozmiar uznano jako samodzielne. Obszary wklęsłe wedle założeń metody są jądrami samodzielnych obszarów PRA do których po spełnieniu odpowiednich warunków mogą być przyłączone obszary niesamodzielne.
Obszary o wartości zakrzywienia powyżej – 0.2 (płaskie lub wypukłe) mogą być uznane jako samodzielne po spełnieniu warunku powierzchni większej od 5000m^2 (Gruber, 2001). Pozostałe obszary uznano za niesamodzielne, które w końcowym etapie pracy będą przyłączane do odpowiednich obszarów samodzielnych.

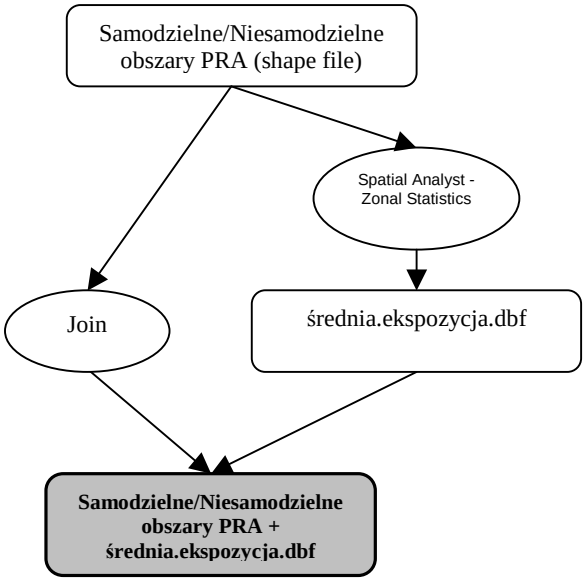


Ryc. 8.5 Mapa samodzielnych i niesamodzielnych obszarów PRA (z ortofotomapą w podkładzie)

(b) Łączenie obszarów PRA

W ostatnim etapie segregowania obszarów PRA, za kryterium przynależności obszarów niesamodzielnych do samodzielnych uznano średnią wartość ekspozycji obszarów i sąsiedztwo regionów (Rys. 8.5). Wygenerowane w poprzednich etapach pracy

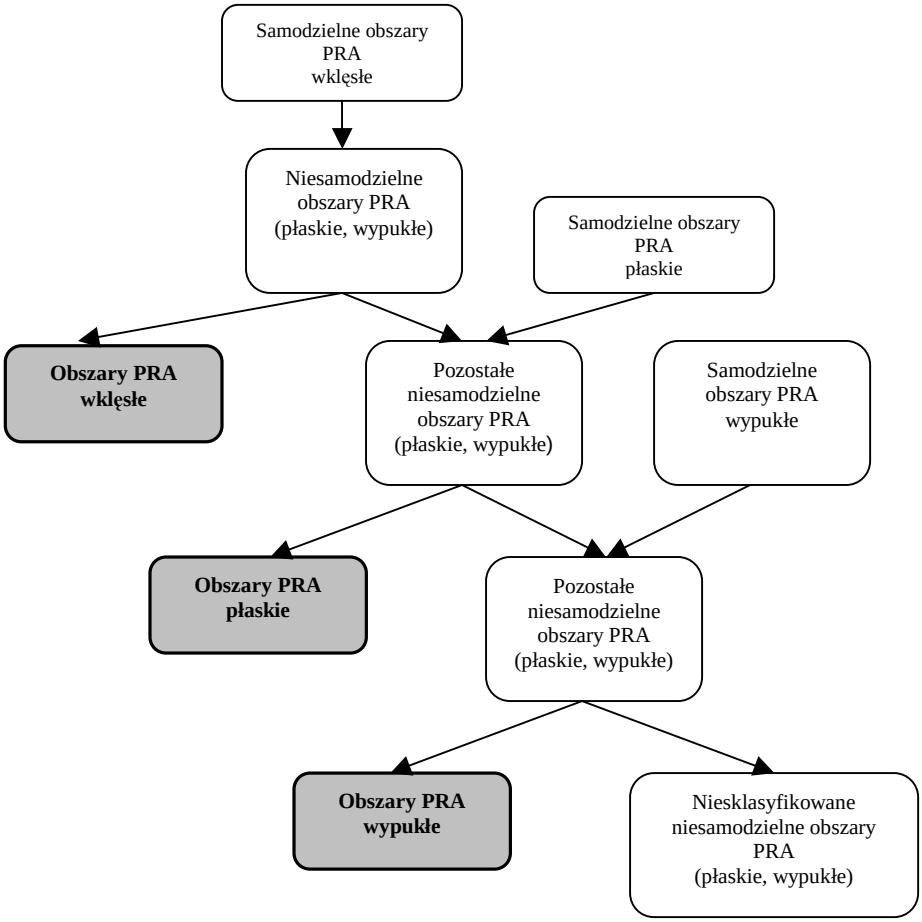
rastrowe mapy obszarów PRA przekonwertowano w module *Spatial Analyst – ArcGIS* do wektorowego formatu *shape – ArcGIS*.



Rys. 8.8 Procedura określania średniej ekspozycji dla obszarów PRA

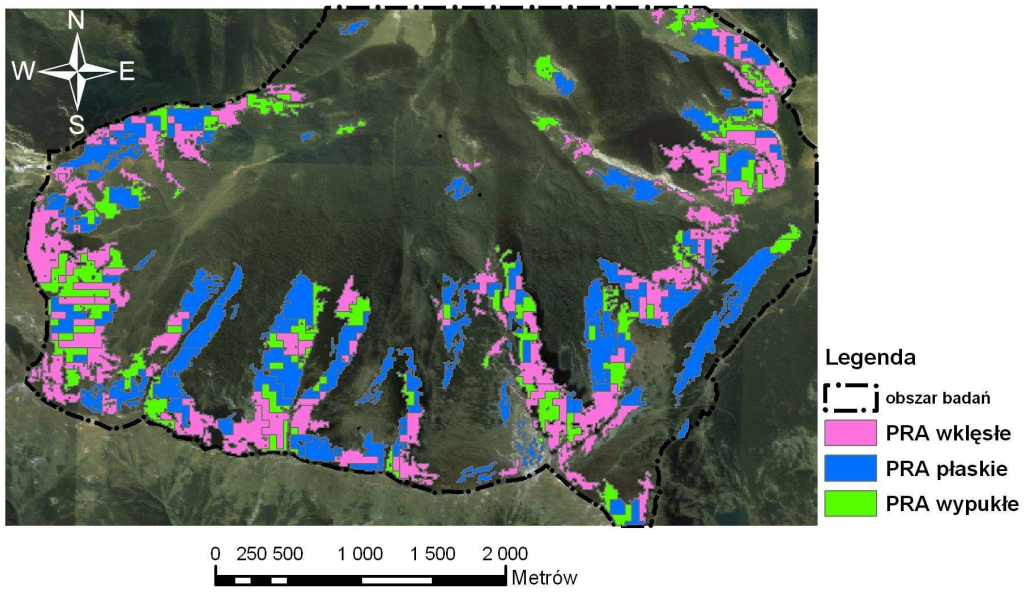
Używając funkcji *Zonal Statistics* modułu *Spatial Analyst – ArcGIS*, wygenerowano tabele atrybutów formatu *.dbf ze średnimi wartościami ekspozycji dla każdego poligonu. Za pomocą funkcji *„join”* tabele połączono z warstwą poligonów na podstawie wspólnej wartości *ID* (Rys. 8.8).

Przyłączanie niesamodzielnych obszarów PRA do jednostek samodzielnych wykonano posługując się funkcja *„Select by Attributes”*. Dla każdego samodzielnego obszaru PRA wykonano selekcje pod warunkiem styczności i odpowiedniej wartości ekspozycji sąsiadujących poligonów. Obszary niesamodzielne przyłączano jeśli granica poligonów była ze sobą styczna i wartość średniego kąta ekspozycji nie była mniejsza lub większa od 45^0 (Rys. 8.5). Kolejność wykonywania selekcji dla obszarów wklęsłych wypukłych i płaskich pokazuje rysunek 8.9. Obszary nie spełniające obydwóch warunków poddano dalszym selekcjom analizując kolejne typy samodzielnych PRA.



Rys. 8.9 Procedura przyłączania niesamodzielnych obszarów PRA do samodzielnych PRA.

Jak widać na powyższej rycinie, selekcje dokonano hierarchicznie przyjmując wklęsłe obszary PRA za priorytetowe. Samodzielne obszary w danym typie formy analizowano w kolejności malejącej powierzchni. Obszary które nie spełniły warunków selekcji w żadnym typie samodzielnego PRA, pozostały jako obszary niesklasyfikowane. Rezultatem wykonywanych prac jest wektorowa mapa obszarów PRA trzech różnych form: wklęsłych, płaskich i wypukłych (Ryc. 8.6). Szczegółowy opis wyników opisano w rozdziale dziewiątym.

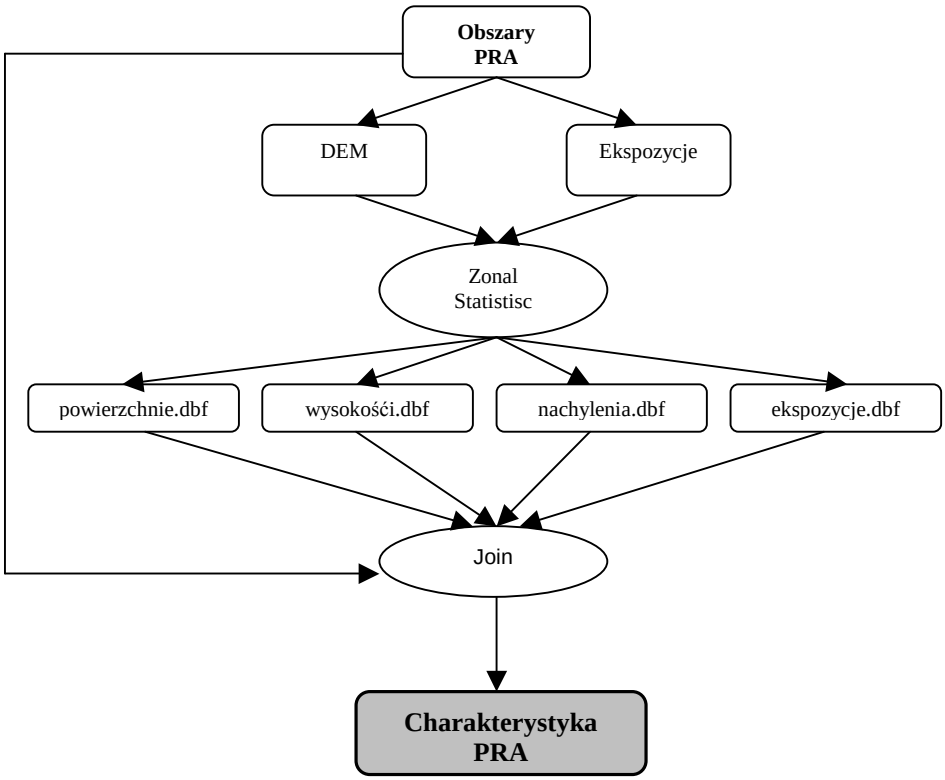


Ryc. 8.6 Końcowa mapa samodzielnych obszarów PRA (z ortofotomapą w podkładzie)

8.3.1.2 Charakterystyka topograficzna i morfologiczna obszarów PRA

Jednym z głównych celów skonstruowania metody wyznaczania obszarów PRA przez naukowców z Davos, było wyznaczenie obszarów potencjalnego występowania lawin względnie jednolitych pod względem topograficznym i morfologicznym (formy terenu, ekspozycji etc.). Przyporządkowanie pojedynczym jednostkom PRA wybranych parametrów morfologicznych pozwoliło na łatwe charakteryzowanie historycznych przypadków lawin. Lawinie mającej swój początek w konkretnym obszarze PRA, przyporządkowano uśrednione wartości przyporządkowanych wcześniej parametrów. Dzięki temu dysponując ogromna bazą danych możliwe było zanalizowanie zjawiska występowania lawin w wybranych warunkach topograficznych i morfologicznych. (Maggioni, 2004)

Ze względu na mierną homogeniczność danych historycznych lawin w Tatrach (różnorodność charakterystyki danych pochodzących z różnych źródeł i okresów) tego typu kompleksowa analiza nie jest w pełni możliwa. Wykonaną w niniejszej pracy charakterystykę obszarów PRA wykonano jako przykład zastosowania w prowadzonych badaniach w przyszłości.



Rys. 8.10 Procedura charakteryzowania obszarów PRA

Charakterystykę wektorowych poligonów PRA oparto na analizie wykorzystującej funkcję *Zonal Statistisc* Modułu *Spatial Analyst – ArcGIS* (Rys. 8.10). Analizują rastrowe warstwy cyfrowego modelu terenu DEM i ekspozycji terenu, każdej jednostce przyporządkowano następujące cechy:

- powierzchnię obszaru,
- maksymalną wysokość bezwzględna,
- minimalna wysokość bezwzględna,
- zakres wysokości bezwzględnej,
- maksymalne nachylenie,
- minimalne nachylenie,
- średnie nachylenie,
- średnią wartość kąta ekspozycji,

Połączenie tabel atrybutów z wektorową warstwą PRA wykonano za pomocą funkcji *„join”* na podstawie wspólnych wartości ID. Szczegółowo wyniki prac oraz możliwości ich praktycznego zastosowania opisano szerzej w rozdziale dziewiątym.

8.3.2 Typologia obszarów PRA pod względem stopnia ryzyka uwolnienia lawiny.

Ocenie stopnia zagrożenia występowania lawiny (w sensie uwolnienia lawiny) poświęcono osobny podrozdział, ponieważ analiza ta nie wymaga wcześniejszego definiowania samodzielnych jednostek PRA. Wydaje się, że wektorowa mapa, której nieodłącznym komponentem jest tabela atrybutów, może być bardzo przydatna dla osób prowadzących badania lawinowe, ale jednocześnie trudna do odbioru dla potocznego użytkownika jakim może być na przykład turysta. Problemem nie jest tylko forma przedstawienia danych, ale przede wszystkim potrzeba użycia specjalistycznego oprogramowania.

Wynikami prac przedstawionych w tym rozdziale są syntetyczne mapy, które wykorzystać można zarówno w zawansowanych analizach GIS, oraz jako warstwę tematyczną ogólno dostępnej mapy analogowej.

Metoda określania stopnia zagrożenia jest propozycja autora niniejszej pracy i opiera się o przedstawioną na wstępie wiedzę na temat teorii formowania się lawin poprzez wpływ różnych czynników lawino twórczych (opisanych szerzej w rozdziale 5.2). Należy zaznaczyć na wstępie, że z pewnością metoda ta nie wyczerpuje wiedzy na temat wpływów odpowiednich czynników na powstawanie lawin. Wykorzystanie wyników poniższych prac do celów praktycznych powinno bezwzględnie być poprzedzone przestudiowaniem zagadnień związanych z tematem lawin i oceną aktualnych warunków śniegowych i pogodowych w danym miejscu i danym czasie.

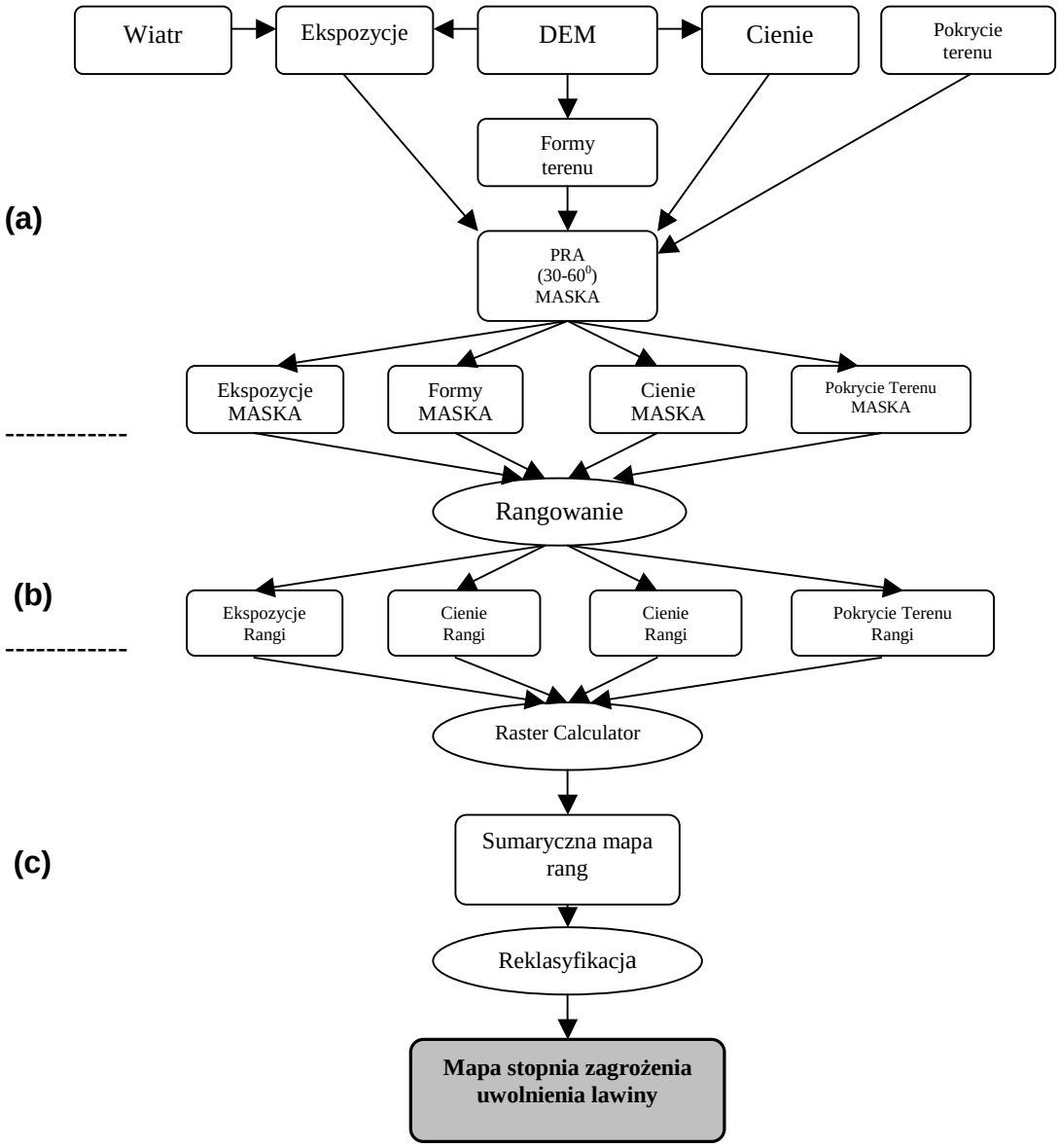
Metoda określania stopnia zagrożenia opiera się na rastrowej analizie wybranych czynników lawino twórczych, oraz cech mających na nie bezpośredni wpływ. Podobnie jak w rozdziale poprzednim podstawą analiz jest Cyfrowy Model Rzeźby DEM. Za maskę badań przyjęto powierzchnię wyznaczonych w poprzednim rozdziale obszarów PRA.

Analizie poddano następujące parametry:

1. ***nachylenie stoków***,
2. ***formy terenu***,

3. ***pokrycie terenu***,
4. ***ekspozycję stoków*** (ze względu na działalność wiatru),
5. ***dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego*** (zacienienie obszarów),

Ze względu na dużą zmienność dwóch ostatnich parametrów w ciągu roku jak i sezonowe zróżnicowanie wpływu poszczególnych parametrów na powstawanie lawin, analizie poddano oddzielnie każdy miesiąc w którym istnieje potencjalne zagrożenie występowania lawin. Poniższy rysunek pokazuje kolejne etapy prac, które wykonano oddzielnie dla każdego miesiąca (od listopada do maja).



Rys. 8.11 Procedura oceny stopnia zagrożenia wystąpienia lawiny: **(a)** Generowanie warstw, **(b)** Rangowanie warstw, **(c)** Wyprowadzanie mapy wynikowej

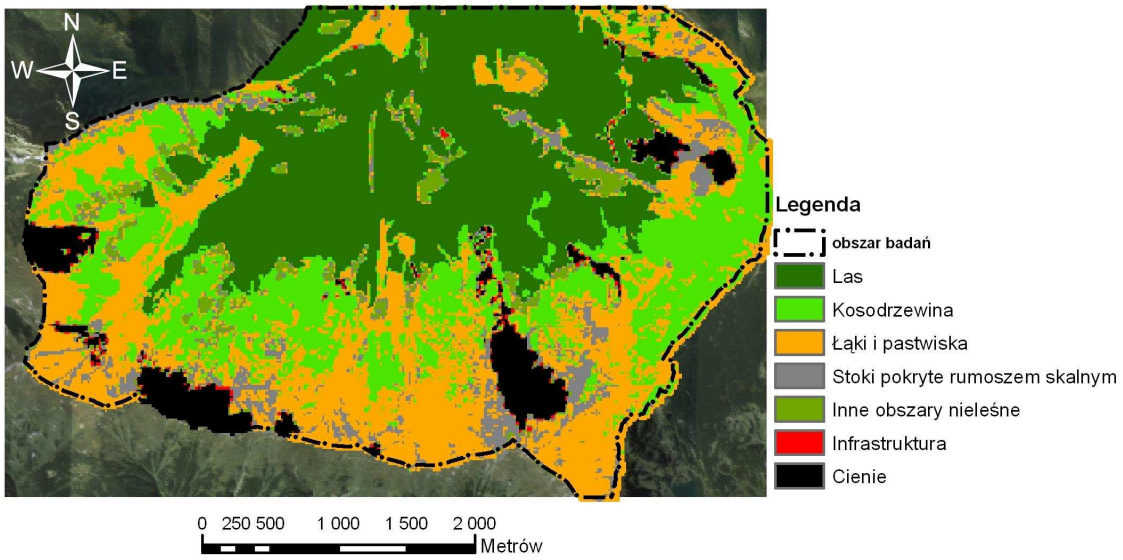
(a) Generowanie warstw

Mapa PRA (30-60^0) – maska

W miejscu tym wykorzystano mapę wygenerowaną wcześniej na potrzeby określenia samodzielnych jednostek PRA. Mapa służyć ma jako maska terenu badań i wskazuje obszary bezleśne o nachyleniu 30-60^0 (na podstawie DEM o rozdzielczości 10m).

Mapa pokrycia terenu

Podobnie jak powyżej wykorzystano warstwę przygotowana dla potrzeb generowania jednostek PRA w poprzednich rozdziałach. Cyfrową mapę pokrycia terenu pozyskano od Tatrzańskiego Parku Narodowego (Wężyk, Guzik; 2001). Wektorowa mapa w oryginale posiadała pokrycie terenu podzielone na 23 klasy. Na potrzeby pracy mapę przekonwertowano do formatu rastrowego (do rozdzielczości przestrzennej 5m) i zreklasyfikowano do 7 następujących klas: lasy, kosodrzewina, łąki górskie i pastwiska, stoki pokryte rumoszem skalnym, inne obszary bezleśne, infrastrukura i cienie (Ryc. 8.7)

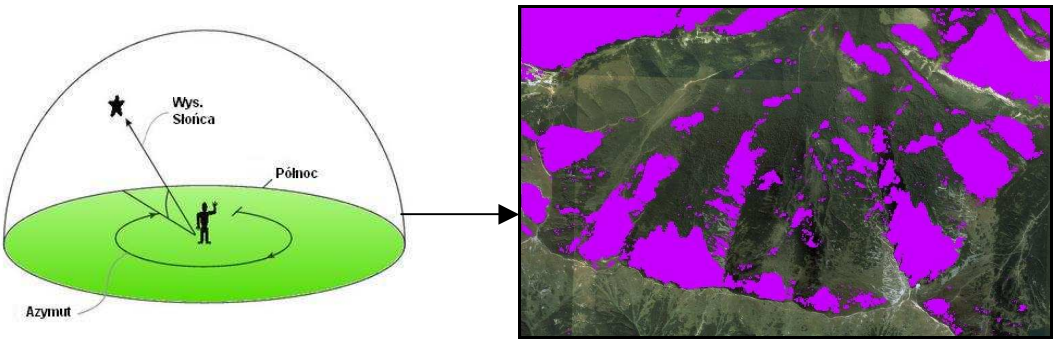


Ryc. 8.7 Mapa pokrycia terenu

Dodatkowo jak wspomniano w rozdziale 8.3.1.1, obszary zawarte w cieniach uzupełniono na podstawie digitalizacji map topograficznych w skali 1: 10 000 (Rys. 8.6)

Mapy zacienienia obszaru

Przedstawiają obszary zawarte w granicach średniego (miesięcznego) zasięgu cieni, rzucanego przez wyniosłości terenowe (wpływ wielkości dopływu bezpośredniego promieniowania słonecznego na procesy lawino - twórcze opisano szerzej w rozdziale 5.2.2.3.). Uśrednione zacienienie otrzymano na podstawie analizy *Model Shadows* w aplikacji *Spatial Analyst – ArcGIS*. Funkcja *Hillshade - ArcGIS* generuje rastrowe mapy cieni na podstawie danego azymutu i wysokości Słońca (Rys. 8.12)

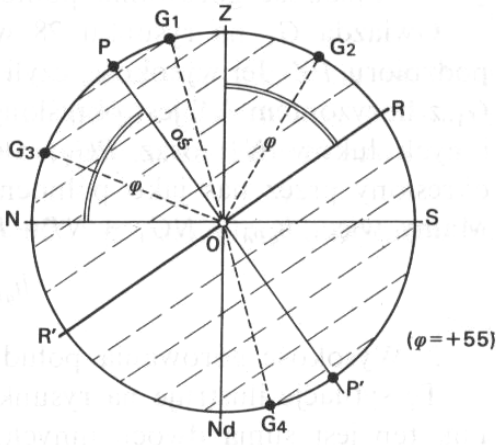


Rys. 8.12 Sposób generowania mapy zacienienia obszarów

Dla każdego miesiąca przyjęto stałą wartość azymutu równą 180^0. Odpowiada ona azymutowi Słońca w momencie górowania południowego, czyli w momencie swojej kulminacji. Przyjęte wartości wysokości Słońca są średnimi wysokościami każdego miesiąca obliczonymi na podstawie poniższego wzoru:

$$\mathbf{h_{gPd} = 90^0 - \varphi + \delta}$$

Wzór przedstawia wysokość górowania południowego (tj. na południe od zenitu), Sytuację tą ilustruje na Rys. 8.13, Gwiazda G_2.



Rys. 8.13 Przekrój sfery płaszczyzną południka dla φ = 55^0 (Źródło: Mietelski; 2001)

Jej wysokością jest łuk G_2S. Łuk ten jest sumą dwóch innych: $G_2S = G_2R + RS$. Łuk G_2R daje nam kątową odległość gwiazdy od równika czyli deklinację δ gwiazdy, natomiast kąt *ROS*, który tworzy równik z horyzontem, wynosi $90^0 - \varphi$ (Mietelski, 2001).

Tabela 8.1 przedstawia średnie miesięczne wartości obliczone na podstawie powyższych wzorów. W obliczeniach przyjęto szerokość geograficzna φ będącą szerokością geograficzną punktu centralnego obszaru badań.

Miesiąc	***Średnia wysokość Słońca***	***Azymut***
Listopad	***22^0 15'***	***180^0***
Grudzień	***17^0 44'***	***180^0***
Styczeń	***20^0 10'***	***180^0***
Luty	***28^0 10'***	***180^0***
Marzec	***39^0 11'***	***180^0***
Kwiecień	***50^0 44'***	***180^0***
Maj	***59^0 44'***	***180^0***

Tab. 8.1 Średnie miesięczne wysokości i azymuty Słońca dla analizowanego okresu

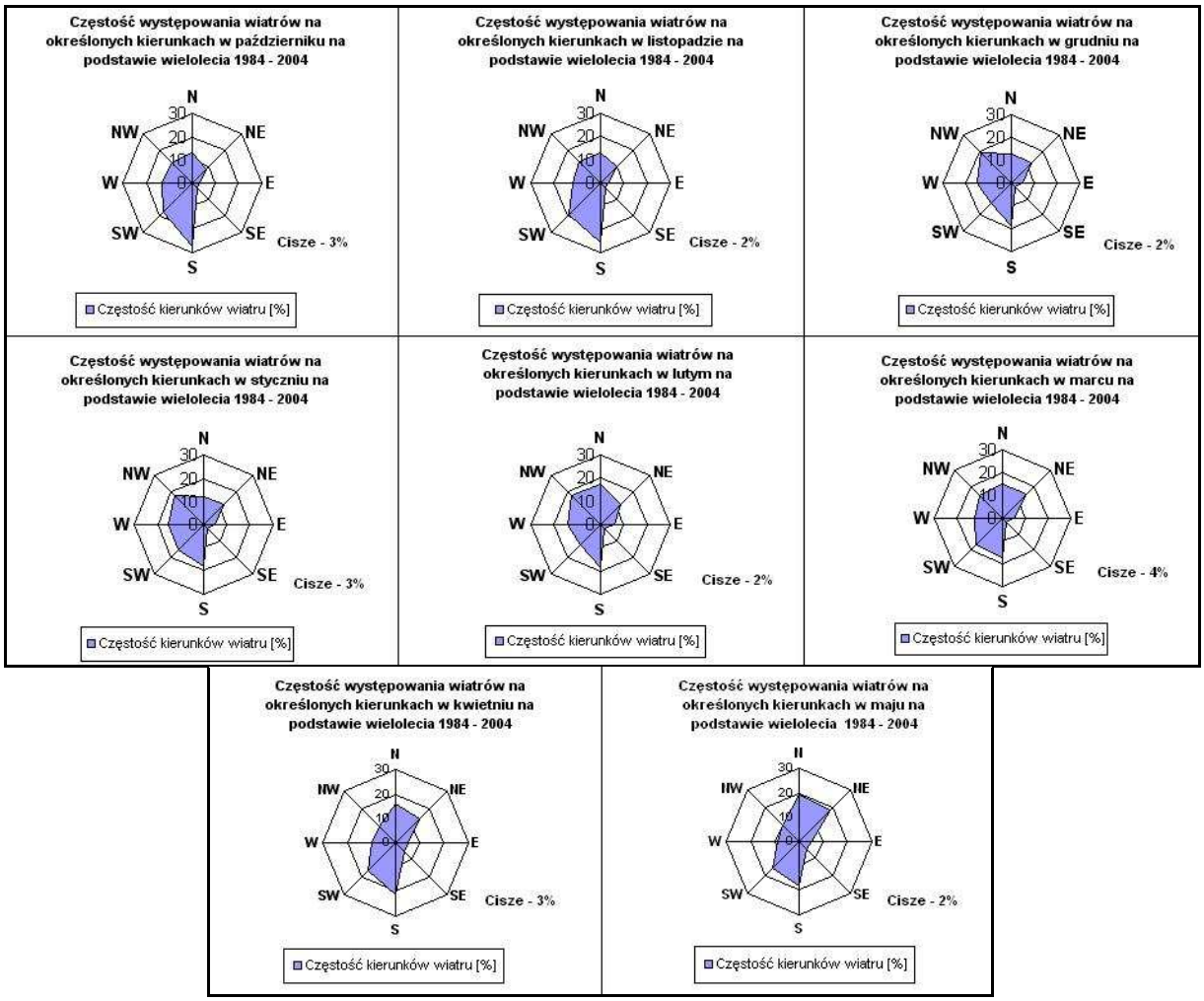
Mapy ekspozycji

Mapy te są pochodną analizy przeważających kierunków wiatru na badanym terenie (dla każdego miesiąca osobno). Na podstawie danych meteorologicznych określono częstość występowania wiatrów na określonym kierunku (w skali ośmiostopniowej). Dane meteorologiczne pochodzą z wysokogórskiej stacji meteorologicznej na Kasprowym Wierchu ($\varphi = 49^0\ 13'\ 57''$; $\alpha = 19^0\ 58'\ 55''$; H= 1987 m n.p.m.). Surowe dane przedstawiają dobowe kierunki występowania wiatrów w czterech terminach obserwacyjnych: *00, 06, 12, 18 UTC* w wieloleciu 1984 – 2004. Dla potrzeb pracy obliczono procentową częstość występowania wiatrów na określonym kierunku w każdym miesiącu na podstawie sumarycznej analizy wielolecia. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 8.2.

Miesiąc	*N*	*NE*	*E*	*SE*	*S*	*SW*	*W*	*NW*	*Cisze*	*SUMA [%]*
Styczeń	**12**	**12**	**5**	**2**	**18**	**15**	**15**	**18**	**3**	**100**
Luty	**17**	**12**	**6**	**2**	**18**	**12**	**14**	**17**	**2**	**100**
Marzec	**15**	**15**	**5**	**2**	**17**	**16**	**12**	**14**	**4**	**100**
Kwiecień	**16**	**14**	**5**	**5**	**21**	**16**	**10**	**10**	**3**	**100**
Maj	**19**	**18**	**5**	**4**	**18**	**15**	**9**	**10**	**2**	**100**
Czerwiec	**24**	**16**	**3**	**2**	**13**	**13**	**12**	**14**	**3**	**100**
Lipiec	**19**	**18**	**3**	**2**	**11**	**13**	**15**	**15**	**4**	**100**
Sierpień	**18**	**17**	**5**	**2**	**15**	**12**	**13**	**15**	**3**	**100**
Wrzesień	**16**	**13**	**3**	**2**	**17**	**19**	**15**	**13**	**2**	**100**
Październik	**13**	**8**	**3**	**3**	**27**	**18**	**13**	**12**	**3**	**100**
Listopad	**13**	**10**	**3**	**3**	**25**	**19**	**12**	**13**	**2**	**100**
Grudzień	**13**	**12**	**5**	**2**	**19**	**13**	**15**	**19**	**2**	**100**

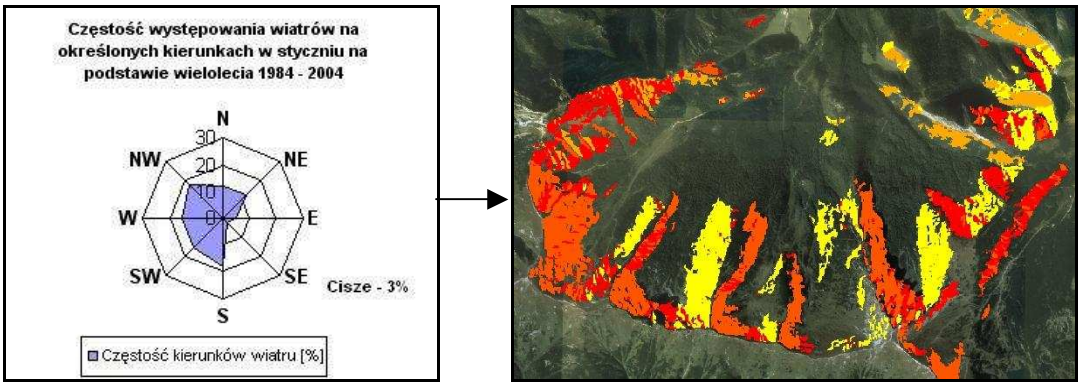
Tab. 8.2 Procentowa częstość występowania wiatrów na określonym kierunku w wieloleciu 1984 – 2004 (Źródło: dane IMGW)

Poniższe wykresy przedstawiają graficznie wyliczone statystyki i dotyczą miesięcy wybranych do analizy w niniejszej pracy (październik – maj).



Rys. 8.14 Wykresy częstości występowania wiatrów na określonych kierunkach w analizowanym okresie listopad – maj (Źródło: dane IMGW)

Wyznaczone kierunki pozwoliły na określenie ekspozycji terenu w stosunku do kierunku wiatru (stoki dowietrzne i zawietrzne). Mapy ekspozycji podzielono na cztery klasy. Trzy pierwsze wskazują kolejno stoki zawietrzne wedle największej częstości występowania wiatru na odpowiedniej ekspozycji. Do klasy czwartej zaliczono stoki zawietrzne wygenerowane na podstawie pięciu pozostałych klas kierunków wiatru (Rys. 8.15).



Rys. 8.15 Generowanie mapy ekspozycji na podstawie danych meteorologicznych

(b) Rangowanie warstw

Nadanie rangi odpowiedniej warstwie polega na przyporządkowaniu określonej wartości liczbowej dla każdej z analizowanych cech. Założono, że wartość rangi rośnie wprost proporcjonalnie do stopnia wpływu danej cechy na procesy lawino - twórcze. Analizie poddano rastrowe warstwy wygenerowane w poprzednich etapach z uwzględnieniem podziału miesięcznego (od listopada do maja). Przed rangowaniem każdą warstwę podzielono na następujące klasy którym w późniejszych etapach nadana zostanie odpowiednia ranga:

1. mapa form terenu
    a) forma wklęsła
    b) forma płaska
    c) forma wypukła

2. mapa pokrycia terenu
    a) kosodrzewina
    b) stoki pokryte rumoszem skalnym
    c) obszary w klasie cieni
    d) łąki górskie i pastwiska

3. mapa ekspozycji (na podstawie przeważających kierunków wiatrów)
    a) klasa pierwsza – stoki zawietrzne według kierunków wiatrów najczęściej występujących w danym miesiącu

b) klasa druga – stoki zawietrzne według kierunków wiatrów występujących na drugim miejscu pod względem częstości w danym miesiącu
c) klasa trzecia – stoki zawietrzne według kierunków wiatrów występujących na trzecim miejscu pod względem częstości w danym miesiącu
d) klasa czwarta – pozostałe stoki zawietrzne według kierunków wiatrów występujących w danym miesiącu

4. mapa zacienienia obszaru
   a) obszary zacienione
   b) obszary poza zasięgiem cienia

Przyporządkowując klasy mapie pokrycia terenu, wcześniej przygotowaną warstwę siedmioklasową zreklasyfikowano do warstwy czteroklasowej. Klasę lasów i infrastruktury wyłączono z analizy ze względu na brak możliwości wystąpienia lawiny. Klasę „innych obszarów bezleśnych" (do której zaliczano obszary młodnika, wiatrołomów czy inna roślinność krzewiastą) połączono z klasą „kosodrzewiny" ze względu na zbliżone właściwości stabilizujące pokrywę.

Tak przygotowanym klasą warstw nadano rangi na podstawie poniższego wzoru:

$$\mathbf{(12/L_K) \cdot N_K \cdot R_W}$$

gdzie:

12 – stała będąca najmniejszym wspólnym dzielnikiem dla liczby klas w poszczególnych warstwach

$\mathbf{L_K}$ – liczba klas w analizowanej warstwie

$\mathbf{N_K}$ – numer klasy

$\mathbf{W_W}$ – waga warstwy

Przyporządkowanie warstwie odpowiedniej wagi ($\mathbf{W_W}$) wiąże się z różnym stopniem wpływu danego czynnika na procesy lawino twórcze. Wielkość siły wpływu nie jest stała

i zmienia się w czasie dlatego czterem analizowanym warstwom przypisano wartość wagi od 1 do 4 (wzrost wagi rośnie wraz ze wzrostem wpływu na procesy lawino - twórcze). Szczegółowo nadawanie rang wedle powyższych warunków opisano poniżej analizując okresy.

Listopad, Grudzień

Uznano, że formy terenowe mają największy wpływ na formowanie lawin, dlatego warstwie *form terenu* przyporządkowano najwyższą wagę (W_W = 4) we wszystkich analizowanych miesiącach. Rodzaj formy wpływa zasadniczo na wielkość akumulacji śniegu (podstawowego tworzywa lawin), a także na mechanikę tworzenia się osłabień w strukturze pokrywy śnieżnej. Jak wspomniano w rozdziale 5.2.1.6, przyjmuje się że, lawiny powstają częściej na stokach wklęsłych, dlatego przypisano tej klasie najwyższą rangę (Tab. 8.3).

Typ formy	W_w= 4	N_K	Typ pokrycia	W_w= 3	N_K	Ekspo-zycja	W_w= 2	N_K	Cień	W_w= 1	N_K
wypukła	16	1	kosodrzewina	9	1	pozostałe	6	1	poza cieniem	6	1
plaska	32	2	stoki skaliste	18	2	S,SE	12	2	cien	12	2
wklęsła	48	3	cienie	27	3	NE	18	3	-	-	-
-	-	-	łąki	36	4	N	24	4	-	-	-

Tab. 8.3 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w listopadzie

Listopad jest miesiącem w którym dopiero zaczyna formować się trwała pokrywa śnieżna, tak wiec wagę W_W = 3 przyporządkowano warstwie pokrycia terenu. Rodzaj pokrycia wpływa zasadniczo na fizyczną stabilizację pokrywy. Największą rangę przypisano klasie *łąki i pastwiska górskie*, ze względu na trudność wiązania się pokrywy z takim podłożem. Trawy ze względu na swoją budowę anatomiczną, tworzą naturalna warstwę poślizgową dla świeżo spadłych mas śniegu (patrz rozdział 5.2.1.3). Najmniejszą rangę przyporządkowano *kosodrzewinie* silnie stabilizującą pokrywę, która w tym okresie rzadko osiąga miąższość większą od wysokości kosodrzewiny. Klasę *Cieni* ze względu na brak informacji na temat pokrycia, potraktowano pośrednio między klasą *łąk i pastwisk górskich* a klasą *stoków pokrytych rumoszem skalnym*. Klasy te na podstawie wizji terenowych występują w znacznej przewadze na tych obszarach.

Na podstawie analizy kierunków wiatrów występujących w tym miesiącu określono stoki północne jako zawietrzne o największej częstości występowania. Stoki zawietrzne ze względu na akumulacyjną działalność wiatru są bardziej narażone na występowanie lawin (patrz rozdział 5.2.2.2). Na tej podstawię ekspozycjom północnym przypisano największą rangę. Najmniejszą rangę otrzymały stoki, które jako zawietrzne występują najrzadziej (poniżej trzeciego miejsca pod względem częstości występujących kierunków wiatru).

Dopływ bezpośredniego promieniowania słonecznego wpływa na szybkość transformacji wewnątrz pokrywy śnieżnej. W obszarach zacienionych transformacje stabilizujące pokrywę przebiegają wolniej niż w obszarach o większej dostawie bezpośredniej energii promienistej. Jednak ze względu na małą miąższość pokrywy w tym okresie procesy te odgrywają znacznie mniejszą rolę niż procesy w czynnikach opisanych powyżej. Na tej podstawie warstwie zacienienia obszarów przypisano najmniejszą wagę ($W_W = 1$).

W grudniu podobnie jak w listopadzie pokrywa śnieżna podlega dalej procesowi początkowego formowania. Modyfikacje obejmują tylko warstwy ekspozycji i zacienienia bez zmian przypisanych wcześniej wag (Tab. 8.4).

Typ formy	W_w= 4	N_K	Typ pokrycia	W_w= 3	N_K	Ekspo-zycja	W_w= 2	N_K	Cień	W_w= 1	N_K
wypukła	16	1	kosodrzewina	9	1	pozostałe	6	1	poza cieniem	6	1
plaska	32	2	stoki skaliste	18	2	S,NE	12	2	cień	12	2
wklęsła	48	3	cienie	27	3	E	18	3	-	-	-
-	-	-	łąki	36	4	N,SE	24	4	-	-	-

Tab. 8.4 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w grudniu

Ze względu na zmienność w częstości występowania wiatrów na określonych kierunkach, zmianom uległy rangi przypisane odpowiednim ekspozycjom. W tym miesiącu najczęściej występują wiatry o kierunkach południowych i północno – zachodnim. Tak więc stokom północnym i południowo – wschodnim przypisano (jako statystycznie najczęściej zawietrznymi) najwyższą rangę. Dla warstwy zacienienia obszarów rangi nie ulegną zmianie jednak zmiana ma tutaj wymiar przestrzenny ze względu na zmieniającą się średnią wysokość Słońca w czasie.

Styczeń, Luty, Marzec

W styczniu modyfikacjom nie uległa jedynie warstwa form terenu, której przypisano stałą wagę i rangi klas dla wszystkich analizowanych miesięcy (Tab. 8.5)

Typ formy	R_w= 4	N_K	Ekspo-zycja	R_w= 3	N_K	Cień	R_w= 2	N_K	Typ pokrycia	R_w= 1	N_K
wypukła	16	1	pozostałe	9	1	poza cieniem	12	1	kosodrzewina	3	1
plaska	32	2	S,SW	18	2	cień	24	2	stoki skaliste	6	2
wklesla	48	3	E,NE	27	3	-		-	cienie	9	3
-	-	-	N,SE	36	4	-		-	łąki	12	4

Tab. 8.5 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w styczniu

Miąższość pokrywy w tym okresie jest już zwykle znaczna tak więc wpływ podłoża w procesie formowania lawin określono tu jako najmniejszy (W_W = 1). Znaczenia w tym okresie zaczynają nabierać czynniki, które wpływają na szybkość procesów stabilizacji wewnątrz pokrywy. I tak wagę równą W_W = 3, przypisano warstwie ekspozycji. Uznano że obok form terenu ważnym czynnikiem jest ekspozycja względem przeważających kierunków wiatru. Właściwości transportowe wiatru pozwalają na zwiększanie dostawy śniegu – głównego tworzywa lawin w obszary stoków zawietrznych. W styczniu najbardziej pod tym względem zagrożone są stoki o ekspozycji północnej i południowo – wschodniej. Wagę W_W = 2, przypisano warstwie zacienienia obszarów. Jak wspomniano, w tym okresie w pokrywie o znacznej miąższości procesy transformacji śniegu nabierają większego znaczenia. Szczególnie na destabilizację pokrywy narażone są obszary zacienione, w których jak wspomniano w 5.2.1.2, duże gradienty temperaturowe pomiędzy podłożem a przypowierzchniową warstwą pokrywy powodują powstanie warstwy szronu wgłębnego silnie destabilizującego pokrywę.

Typ formy	W_w= 4	N_K	Ekspo-zycja	W_w= 3	N_K	Cień	W_w= 2	N_K	Typ pokrycia	W_w= 1	N_K
wypukła	16	1	pozostałe	9	1	poza cieniem	12	1	kosodrzewina	3	1
plaska	32	2	E	18	2	cień	24	2	stoki skaliste	6	2
wklesla	48	3	SE,S	27	3	-		-	cienie	9	3
-	-	-	N	36	4	-		-	łąki	12	4

Tab. 8.6 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w lutym

Uznano, że w lutym i marcu podobnie jak w poprzednim miesiącu, zasadniczą role w procesach lawino twórczych odgrywają czynniki wpływające na procesy działające w samej pokrywie śnieżnej. Wagi przypisane warstwą nie uległy więc zmianie. Zmieniono tylko rangi przypisane poszczególnym ekspozycjom, oraz przestrzenny zakres zacienienia obszarów (Tab. 8.6 i 8.7).

Typ formy	W_w= 4	N_K	Ekspo-zycja	W_w= 3	N_K	Cień	W_w= 2	N_K	Typ pokrycia	W_w= 1	N_K
wypukła	16	1	pozostałe	9	1	poza cieniem	12	1	kosodrzewina	3	1
plaska	32	2	S,SW	18	2	cień	24	2	stoki skaliste	6	2
wklęsła	48	3	NE	27	3	-		-	cienie	9	3
-	-	-	N	36	4	-		-	łąki	12	4

Tab. 8.7 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w marcu

Kwiecień, Maj

W miesiącach tych kiedy słońce góruje wysoko a pokrywa śnieżna generalnie zaczyna podlegać wiosennemu procesowi tajania, obok zasadniczego wpływu form terenu uznano typ pokrycia i zacienienie obszarów za czynniki dominujące w procesach lawino twórczych (Tab. 8.8 i 8.9).

Typ formy	W_w= 4	N_K	Typ pokrycia	W_w= 3	N_K	Cień	W_w= 2	N_K	Ekspo-zycja	W_w= 1	N_K
wypukła	16	1	kosodrzewina	9	1	cień	12	1	pozostałe	3	1
plaska	32	2	stoki skaliste	18	2	poza cieniem	24	2	SW	6	2
wklęsła	48	3	cienie	27	3	-	-	-	S,NE	9	3
-	-	-	łąki	36	4	-	-	-	N	12	4

Tab. 8.8 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w kwietniu

Silna operacja słoneczna powoduje szybkie przenikanie ciepła bardzo głęboko w głąb pokrywy co wpływa bardzo destabilizująco na pokrywę. Często powoduje to obryw całej warstwy zalegającego śniegu, który zsuwa się po stoku jako lawina gruntowa. W początkowym okresie kwietnia obserwuje się jeszcze często lawiny – deski śnieżne gdzie wpływ podłoża nie jest znaczący, jednak uśredniając cały okres miesięczny uznano, że większy odsetek lawin ma charakter gruntowy, a pokrycie terenu ma zasadniczy wpływ na stabilizację bądź destabilizacje pokrywy. W maju typ mokrych lawin gruntowych jest przeważający. Obserwuję się, że lawiny gruntowe częściej pojawiają się na stokach o małej szorstkości podłoża (np. pokrytych trawami górskimi). Na stokach o bardziej szorstkim podłożu lawiny pojawiają się rzadziej i są zwykle znacznych rozmiarów. Na tej podstawie wagę $W_W = 3$ przypisano warstwie pokrycia terenu, w której najwyższą rangę przyporządkowano klasie łąk i pastwisk górskich.

Odwrotnie niż w poprzednio omawianych miesiącach warstwie zacienienia ($W_W = 2$) najwyższą rangę przypisano obszarom zawartym poza granicami uśrednionego cienia. Ma to związek ze wspomnianą już wcześniej silną operacją słoneczną, która w tym okresie destabilizuję pokrywę na całej jej grubości. W obszarach zacienionych procesy te są bardziej ustabilizowane.

Warstwie ekspozycji przypisano w tym okresie najniższą wagę ($W_W = 1$), ze względu na przewagę procesów, które prowadzą do zaniku pokrywy. Akumulacja jest znacznie mniejsza niż w poprzednich okresach, ze względu na mały odsetek opadów w postaci śniegu. Akumulacja wiatrowa na stokach zawietrznych nie jest duża, ponieważ przetransformowany „śnieg wiosenny" nie podlega łatwo procesowi wywiewania. Związana i twarda pokrywa wymaga prędkości wiatru powyżej 25m/s, aby nastąpiło wyrwanie, wykruszenie i przemieszczenie bryłek jej powierzchni (Trepińska, 2002).

Ze względu na wspominaną już zmienność czynnika w czasie, w poszczególnych miesiącach zmieniono rangi odpowiednim ekspozycjom na podstawie uśrednionych miesięcznych częstości występowania wiatrów na określonych kierunkach (Tab. 8.8 i 8.9).

Typ formy	W_w= 4	N_K	Typ pokrycia	W_w= 3	N_K	Cień	W_w= 2	N_K	Ekspo-zycja	W_w= 1	N_K
wypukła	16	1	kosodrzewina	9	1	cień	12	1	pozostale	3	1
plaska	32	2	stoki skaliste	18	2	poza cieniem	24	2	NE	6	2
wklęsła	48	3	cienie	27	3	-	-	-	N,SW	9	3
-	-	-	laki	36	4	-	-	-	S	12	4

Tab. 8.9 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w maju

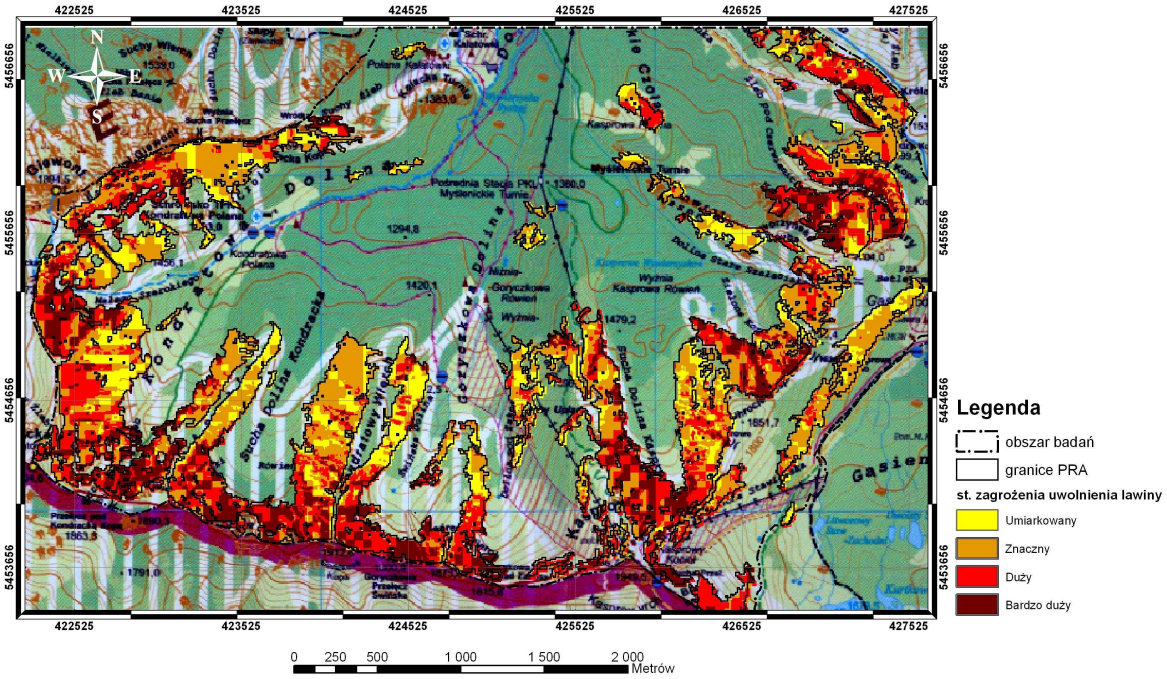
(c) Wyprowadzanie mapy wynikowej

W ostatnim etapie pracy wykorzystując moduł *Raster Calculator – ArcGIS* dla poszczególnych miesięcy wykonano sumaryczne mapy rastrowe. Zsumowano warstwy, którym wedle powyższych reguł przypisano odpowiednie rangi.

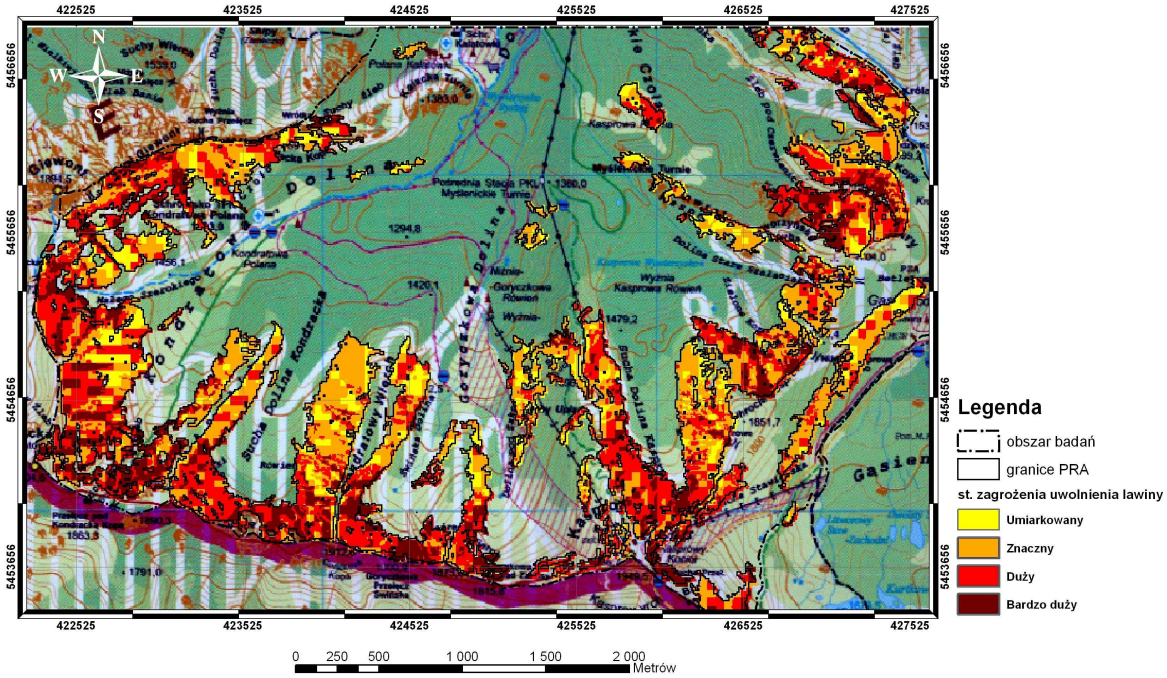
Finalnie sumaryczne mapy rastrowe zreklasyfikowano do czterech klas. Podział zakresu wartości na klasy wykonano wedle kryterium przedziałów równej rozpiętości (funkcja *Equal Interval*).

Dla każdego miesiąca wygenerowano w ten sposób mapy określające stopień zagrożenia uwolnienia lawiny na danym obszarze. Wartość stopnia zagrożenia określono za pomocą następujących klas (Ryc. 8.8 – 8.14):

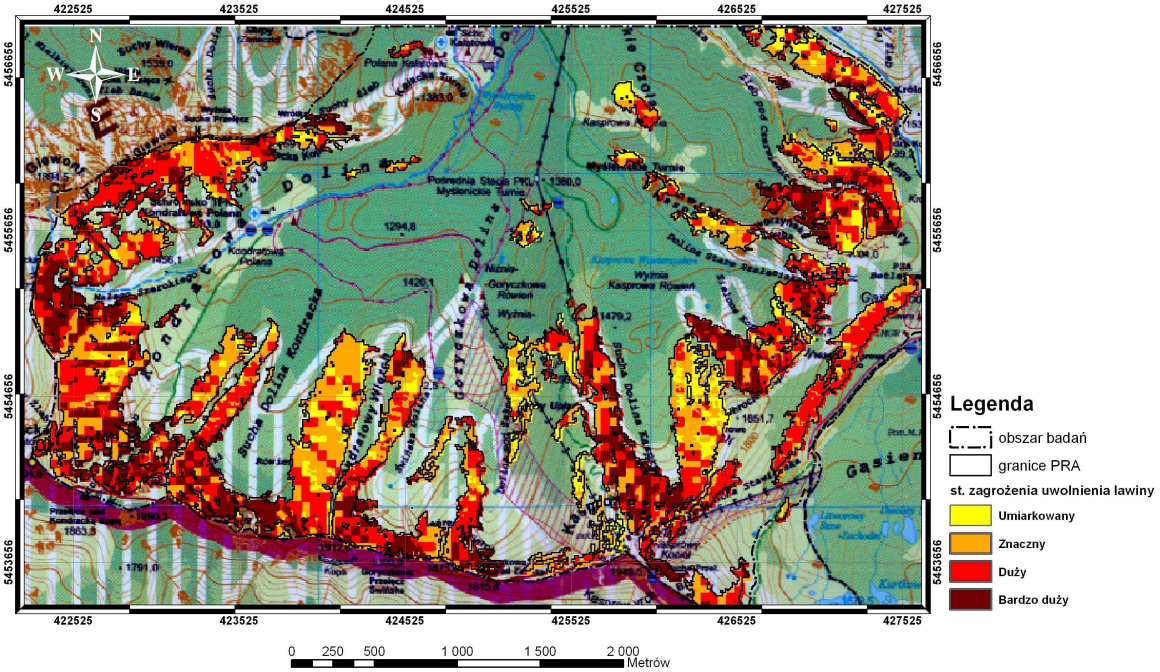
1. Umiarkowane zagrożenie uwolnienia lawiny
2. Znaczne zagrożenie uwolnienia lawiny
3. Duże zagrożenie uwolnienia lawiny
4. Bardzo duże zagrożenie uwolnienia lawiny



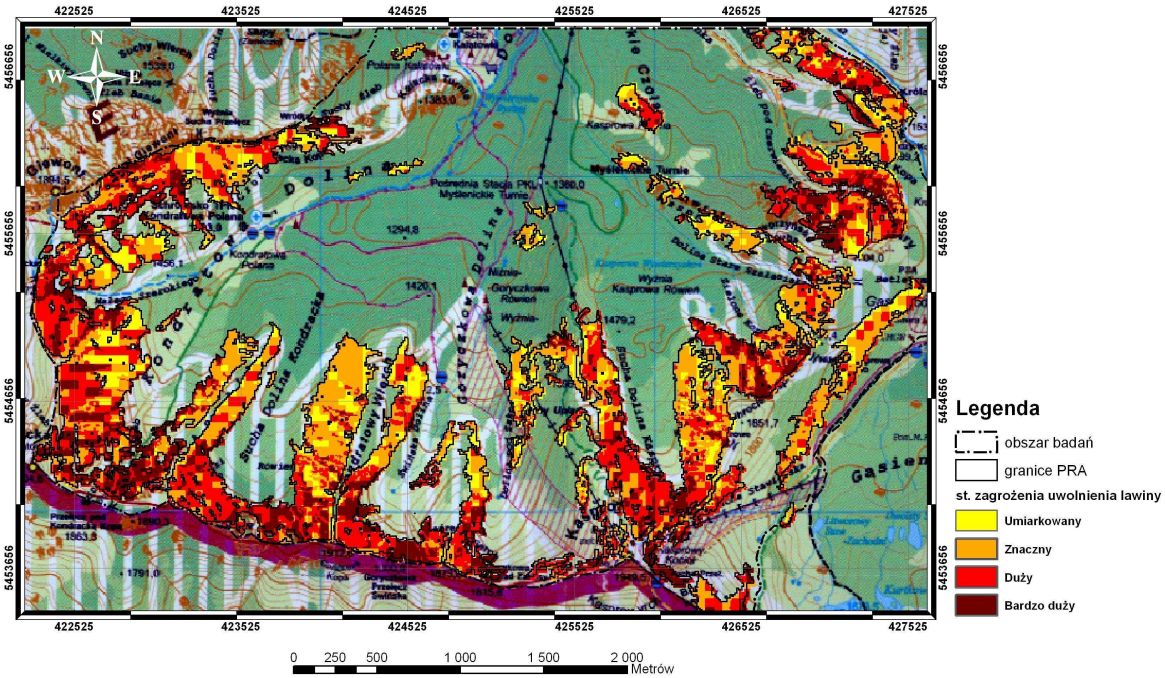
Ryc. 8.8 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w listopadzie (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000)



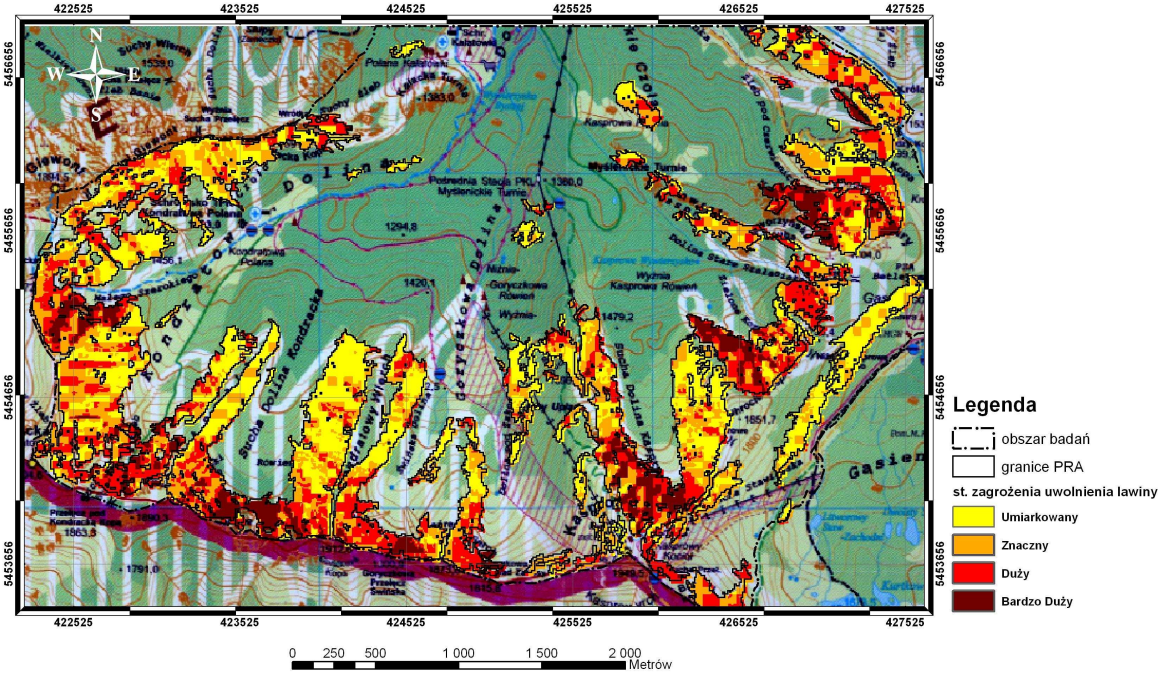
Ryc. 8.9 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w grudniu (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000)



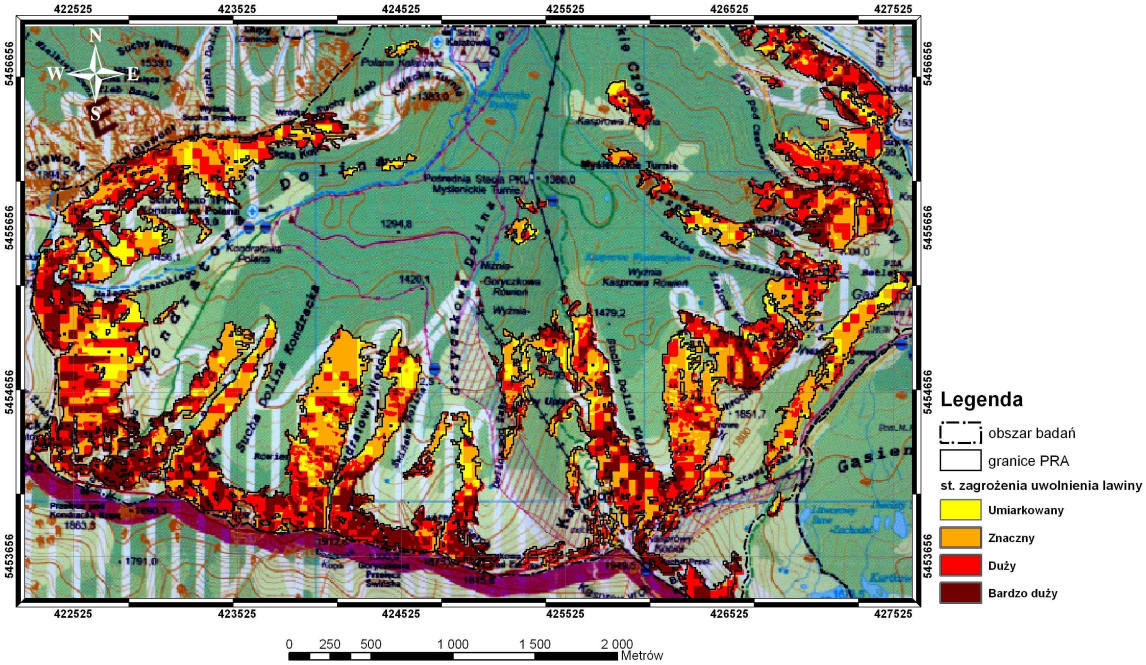
Ryc. 8.10 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w styczniu (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000)



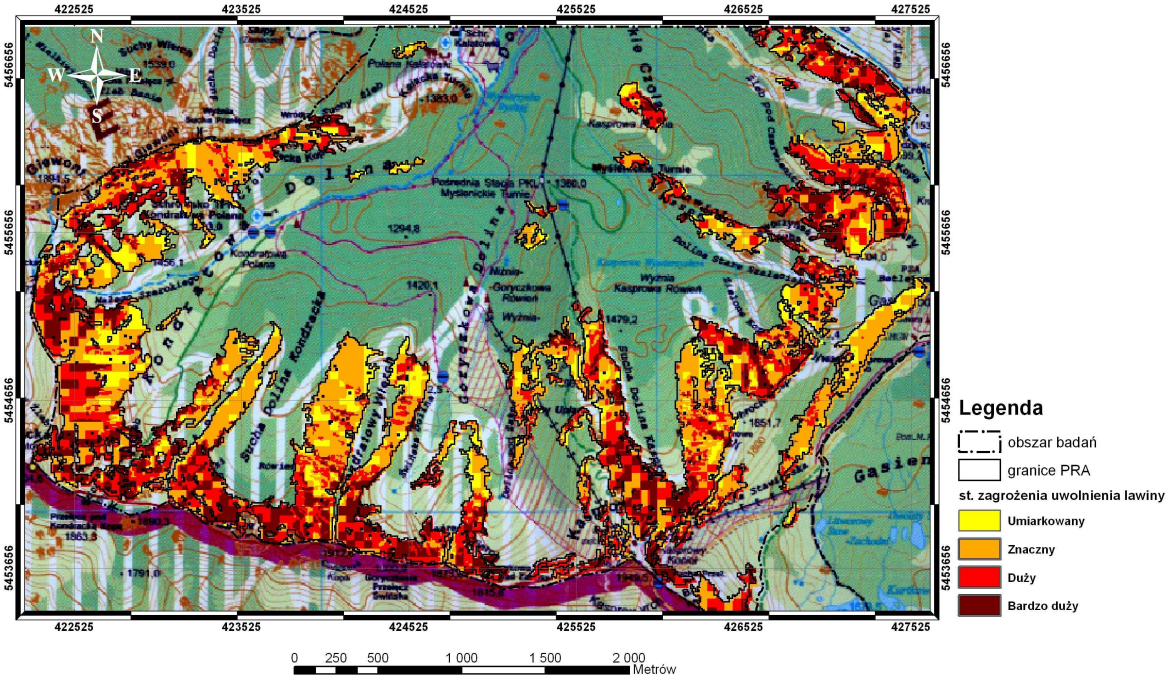
Ryc. 8.11 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w lutym (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000)



Ryc. 8.12 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w marcu (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000)



Ryc. 8.13 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w kwietniu (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000)

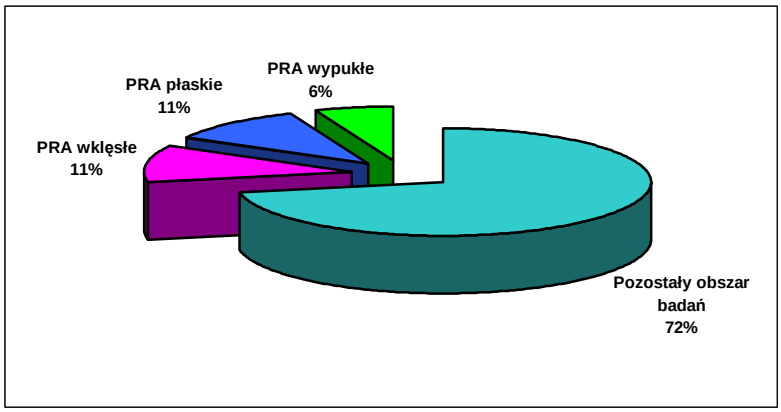


Ryc. 8.14 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w maju (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000)

9. Wyniki

9.1 Obszary PRA i ich charakterystyka topograficzno-morfologiczna

Na podstawie metod przedstawionych w rozdziale 8.3.1, na łącznym powierzchni badanego terenu – 14,48 km^2 wyznaczono obszary potencjalnego występowania lawin śnieżnych (w sensie miejsca uwolnienia lawiny) o sumarycznej powierzchni 4,07 km^2. Powierzchnia ta stanowi 28% badanego obszaru. Wygenerowane obszary PRA podzielono według typu formy terenu na 3 klasy: wklęsłe (11% badanego obszaru), płaskie (11% badanego obszaru) i wypukłe (6% badanego obszaru).



Rys. 9.1 Procentowy udział obszarów PRA w stosunku do powierzchni obszaru badań

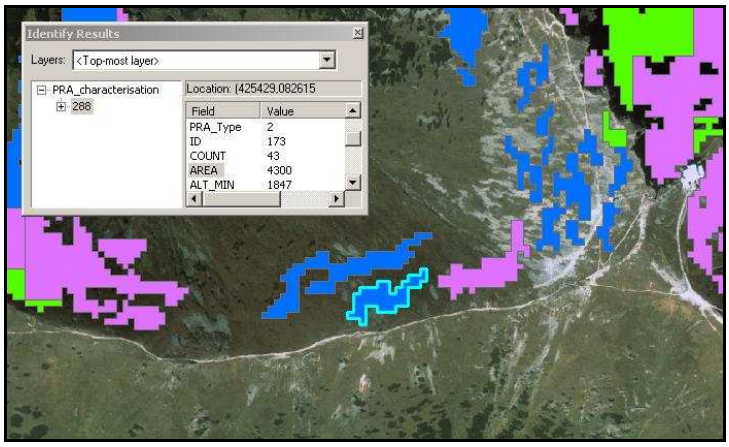
Łączna ilość wygenerowanych samodzielnych jednostek PRA wynosi 245. Obszary o typie wklęsłym i płaskim posiadają równo po 90 jednostek. Pozostałe 65 jednostek to obszary o typie wypukłym. Tabela 9.1 przedstawia ilość jednostek PRA w poszczególnych klasach powierzchniowych.

Jak widać najwięcej jednostek występuje w klasie drugiej i trzeciej w łącznym przedziale od 5000 do 30000 m^2 (łącznie 193 jednostki), najmniej zaś w klasie szóstej o powierzchni powyżej 100000 m^2 (tylko 1 jednostka).

Klasy powierzchni	*Powierzchnia [m^2]*	*Liczba obszarów PRA*
1	poniżej 5000	19
2	5000 - 10000	85
3	10000 - 30000	108
4	30000 - 50000	21
5	50000 - 100000	11
6	powyżej 100000	1
Suma		**245**

Tab. 9.1 Liczba jednostek PRA w poszczególnych przedziałach powierzchniowych

Obszary zaliczone do klasy pierwszej (5000 m^2) to niesamodzielne jednostki PRA, które w segregacji końcowej (przedstawionej na Rys. 8.9) nie włączono do żadnej samodzielnej jednostki PRA. Obszary te nie spełniły odpowiednich warunków by mogły zostać przyłączone do odpowiedniej samodzielnej jednostki, jednak ze względu na usytuowanie obszarów na terenach uczęszczanych turystycznie zdecydowało na ich pozostawienie.

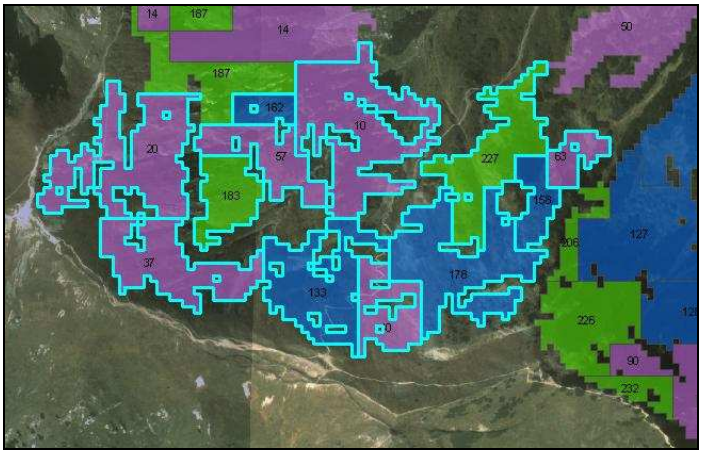


Ryc. 9.1 Przykład niesamodzielnej jednostki PRA włączonej do mapy wynikowej

Na Ryc. 9.1 przedstawiono taki przykład z rejonu Kotła Goryczkowego. Obszar PRA typu płaskiego o powierzchni 4300 m^2 (wyselekcjonowany jasna obwódką), ze względu na swoją powierzchnie i brak bezpośredniego sąsiedztwa z samodzielną jednostką PRA, zgodnie z procedurą nie został sklasyfikowany go żadnego typu. Jednak lokalizacja

w miejscu występujących tu tras narciarskich zdecydowała o włączenie jednostki do mapy wynikowej.

Na podstawie metod przedstawionych w rozdziale 8.3.1.2, wygenerowanym jednostkom PRA przypisano określone parametry morfologiczne. Każda jednostka posiada swój numer identyfikacyjny w postaci numeru *ID* lub *GRIDCODE*. Ten drugi przyporządkowano by można było w przyszłości łatwo dokonywać konwersji pomiędzy formatem wektorowym i rastrowym. Wartość ta identyfikuje unikalny numer obszaru a także jego typ morfologiczny. Typ morfologiczny identyfikowany jest przez pierwszą cyfr (1 – PRA wklęsłe, 2 – PRA płaskie, 3 – PRA wypukłe), dwie pozostałe określają numer jednostki.



Ryc. 9.2 Przykładowa grupa obszarów PRA z określonym numerem ID

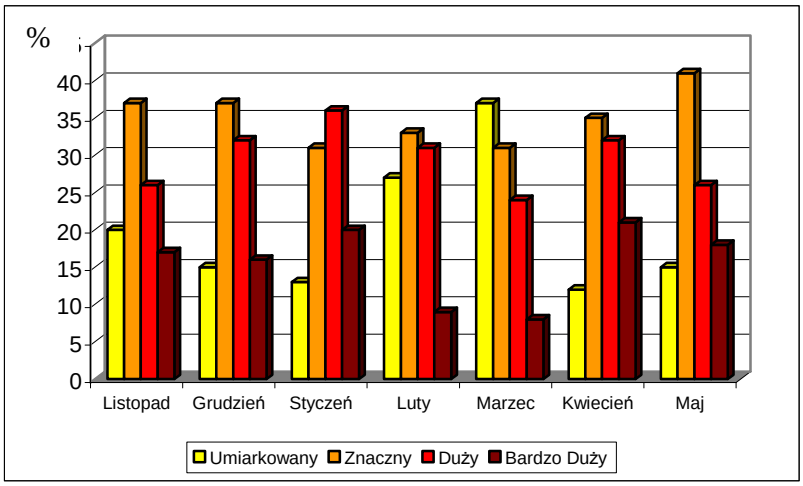
Powyższa rycina pokazuje przykładową grupę obszarów PRA (poniżej Kopy Kondrackiej) z przypisanymi unikalnymi wartościami *ID*. Wartości z tabeli atrybutów przypisanymi do grupy wyselekcjowanych jasna obwódką jednostek przedstawia Tab. 9.2 poniżej.

ID	*GRIDCODE*	*Typ PRA*	*Powierzchnia [m^2]*	*Wysokość minimalna (m n.p.m.)*	*Wysokość maksymalna (m n.p.m.)*	*Różnica wysokości (m)*	*Średnie nachylenie (^{0})*	*Minimalne Nachylenie (^{0})*	*Maksymalne Nachylenie (^{0})*	*Średnia Ekspozycja (^{0})*
10	110	1	31700	1614	1758	144	36	30	52	73
20	120	1	28900	1844	2000	156	35	30	46	85
37	137	1	19700	1811	1950	139	35	30	51	85
40	140	1	10500	1757	1846	89	33	30	38	183
57	157	1	12400	1734	1836	102	34	30	48	72
63	163	1	5700	1654	1716	62	36	30	43	225
133	245	2	21300	1731	1854	123	34	30	46	37
158	272	2	6800	1681	1772	91	35	30	41	232
162	277	2	5000	1729	1801	72	37	30	45	89
178	294	2	28200	1699	1842	143	34	30	40	327
183	303	3	10700	1785	1849	64	34	30	41	83
227	348	3	20600	1598	1764	166	35	30	42	228

Tab. 9.2 Atrybuty dla wybranej na rys.9.3 grupy obszarów PRA

9.2 Typologia obszarów PRA pod względem stopnia ryzyka uwolnienia lawiny

Metoda określona przez autora niniejszej pracy (w rozdziale 8.3.2), pozwoliła na charakterystykę obszarów potencjalnego występowania lawin (w sensie uwolnienia lawiny) pod względem stopnia ryzyka uwolnienia lawiny.



Rys. 9.2 Procentowy udział obszarów o określonej klasie zagrożenia uwolnienia lawiny

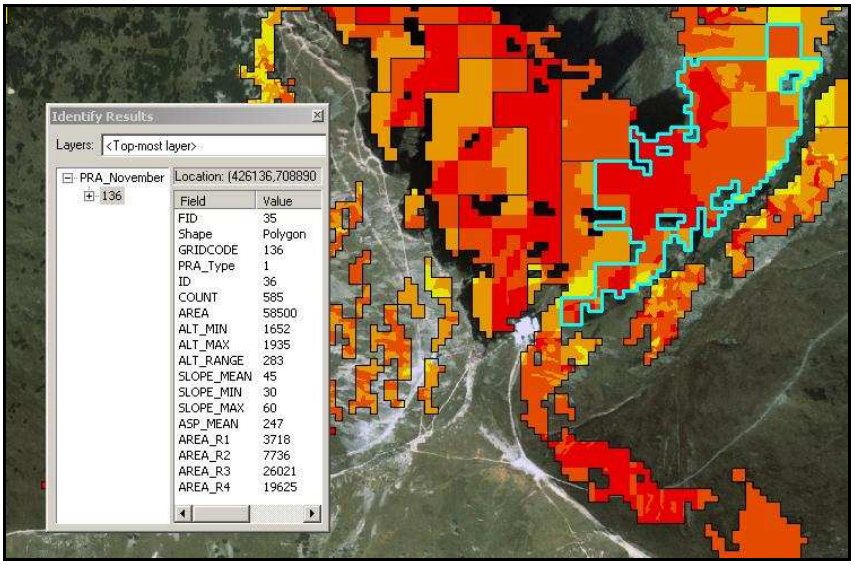
Na podstawie kompleksowej analizy czynników lawino-twórczych wygenerowano siedem rastrowych map stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny, dla pojedynczych miesięcy (w analizowanym okresie listopad – maj). Powyżej na Rys. 9.2 przedstawiono na wykresie

procentowy udział obszarów o określonej klasie zagrożenia (w stosunku do całej powierzchni PRA) w poszczególnych miesiącach.

Jak wspomniano w (w rozdziale 8.3.2), mapy zagrożenia uwolnienia lawiny można analizować jako samodzielne warstwy lub też w odniesieniu do wygenerowanych (w rozdziale 8.3.1) samodzielnych jednostek PRA.

Dla przykładu takiego odniesienia, posługując się funkcją *Zonal Statistic – ArcGIS*, każdemu poligonowi PRA (osobno dla każdego miesiąca) przypisano powierzchnie obszarów zaklasyfikowanych do odpowiedniej klasy zagrożenia.

Ryc. 9.3 przedstawia przykład charakterystyki samodzielnej jednostki PRA (w miesiącu listopadzie) zlokalizowanej na stokach Kasprowego Wierchu.



Ryc. 9.3 Charakterystyka przykładowej jednostki PRA z uwzględnieniem powierzchni zajmowanej przez odpowiednie klasy zagrożenia uwolnienia lawiny

Oprócz stałej charakterystyki topograficzno – morfologicznej, tabela atrybutów posiada informacje na temat powierzchni zajmowanej przez odpowiednią klasę zagrożenia. Informacja ta w tabeli figuruje w polach AREA_R1 (zagrożenie umiarkowane), AREA_R2 (zagrożenie znaczne), AREA_R2 (zagrożenie duże), i AREA_R4 (zagrożenie bardzo duże). Na podstawie odpowiedniego stosunku procentowego, tego typu przyporządkowanie może być przydatne przy próbie określenia uśrednionej charakterystyki zagrożenia dla całej jednostki PRA.

10. Weryfikacja wyników

Próbę weryfikacji wyników podjęto w oparciu o dane na temat historycznych lawin na badanym obszarze. Wykorzystano tutaj mapy analogowe opracowane na podstawie badań prowadzonych przez Państwowy Instytut Hydrologiczno – Meteorologiczny (obecny IMGW), oraz cyfrową warstwę wygenerowaną na podstawie pomiarów prowadzonych w Tatrzańskim Parku Narodowym.

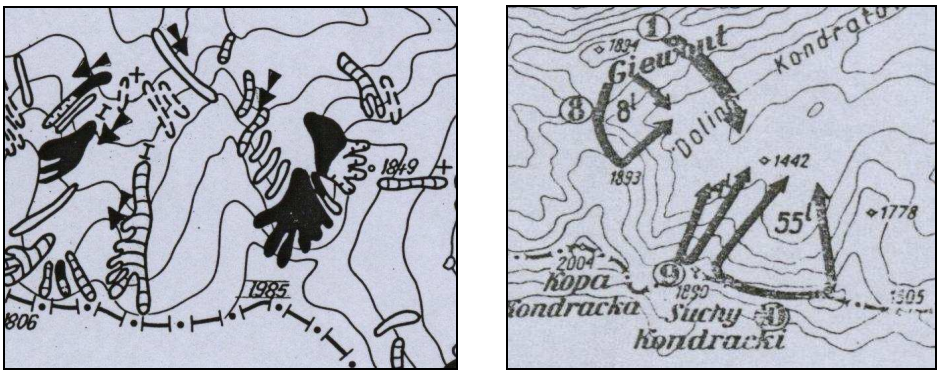
W skład map analogowych wchodzą:

1. **Mapa częstości występowania lawin w Tatrach** w okresie 1961-72, opracowana pod kierownictwem Marii Kłapowej (kopia rękopisu na podstawie mapy w skali 1:25000) .
2. **Mapa szlaków lawinowych w Tatrach w 1960 roku** (Zeszyty PIHM, 1964)
3. **Mapa szlaków lawinowych w Tatrach w 1963 roku** (Zeszyty PIHM, 1966)

Wszystkie mapy analogowe dla potrzeb analiz, zeskanowano i zrektyfikowano do układu UTM strefa 34N (elipsoida odniesienia - WGS84) w programie ERDAS IMAGINE v8.2.

Mapa z okresu 1961-72, posiada informacje na temat lokalizacji, oraz częstości występowania lawin w pięciu klasach częstości:

I. 1 raz w wieloleciu
II. 2 – 5 krotnie w wieloleciu
III. 6 – 12 krotnie w wieloleciu
IV. 12 – 20 krotnie w wieloleciu
V. 20 – 50 krotnie w wieloleciu

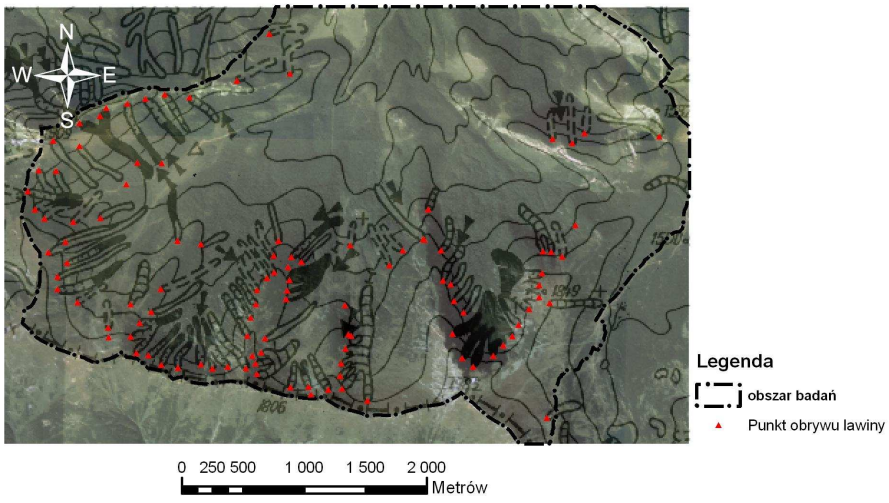


Ryc. 10.1 Fragmenty map częstości występowania lawin w Tatrach w wieloleciu 1961-72 (po lewej) i w roku 1960 (po prawej)

Mapy z roku 1960 i 1963 posiadają informacje o lokalizacji, częstości występowania a także charakterystykę pisemną zarejestrowanych przypadków. Częstość występowania lawin opisano tutaj cyfrą umieszczoną obok symbolu szlaku lawiny (po prawej na Rys. 10.1)

10.1 Weryfikacja lokalizacji obszarów PRA

Wygenerowana w niniejszej pracy mapa obszarów PRA, jest mapą która wskazuje obszary, gdzie istnieje potencjalne ryzyko uwolnienia lawiny. Chcąc zweryfikować poprawność lokalizacji tych obszarów na podstawie powyższych materiałów, wygenerowano wektorową warstwę punktów obrywu lawiny (Ryc. 10.1 poniżej). Za punkt obrywu przyjęto punkt obrywu o największej wysokości. W przypadku gdy wystąpił obryw liniowy na jednej wysokości za punkt obrywu przyjęto punkt środkowy linii.



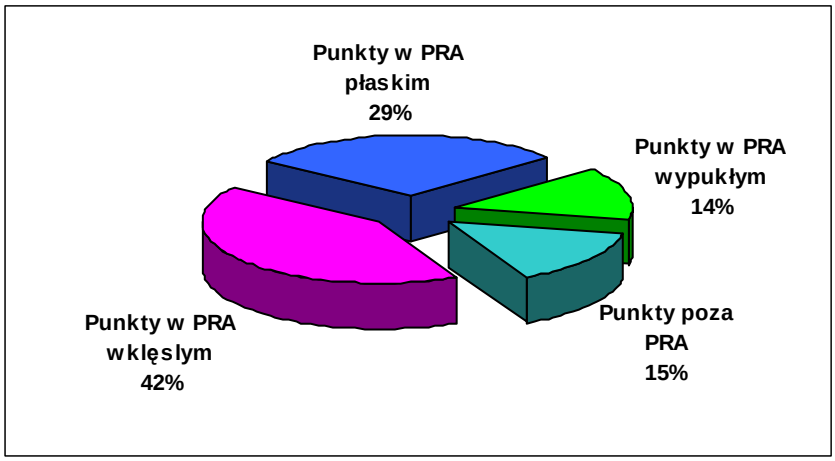
Ryc. 10.2 Punkty obrywu lawin na podstawie historycznych map lawinowych

Na podstawie analizy warstwy obszarów PRA i warstwy punktów obrywu (aplikacja *Select by Location – ArcGIS*), określono że spośród 108 punktów obrywu, aż 91 zawiera się w granicach wygenerowanych obszarów PRA. Wśród nich najwięcej (45) zawiera się w PRA o typie wklęsłym, 31 w płaskim i najmniej (15) w wypukłym (Tab. 10.1)

	Liczba punktów obrywu	*Procentowy udział*
Poza PRA	**17**	**15**
PRA wklęsłe	**45**	**42**
PRA płaskie	**31**	**29**
PRA wypukłe	**15**	**14**
Suma	**108**	**100**

Tab. 10.1 Punkty obrywu historycznych lawin w stosunku do jednostek PRA

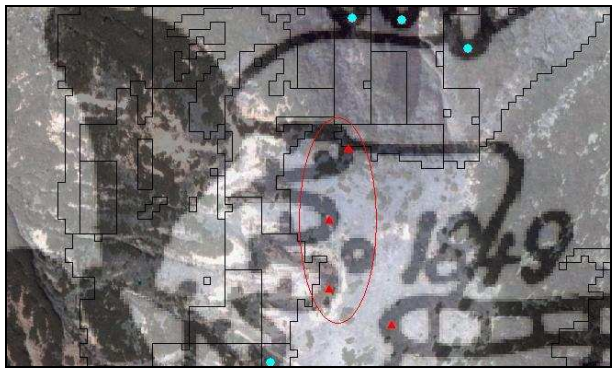
Wynika z tego, że z pośród 108 analizowanych przypadków aż 85 % zawiera się w wyznaczonych granicach PRA (Rys. 10.1).



Rys. 10.1 Procentowy udział punktów obrywu lawiny w odpowiednim typie PRA

Po przeanalizowaniu pozostałych 15 % przypadków zauważono, że wiele z nich znajduje się w bardzo bliskim sąsiedztwie granic obszarów PRA. Można w kilku przypadkach śmiało zaryzykować stwierdzenie, że wynik przynależności lub jej braku do

obszarów PRA, jest wynikiem nieprecyzyjnego wykreślenia linii obrywu na mapie. Przykład takich przypadków obrazuje rycina poniżej.



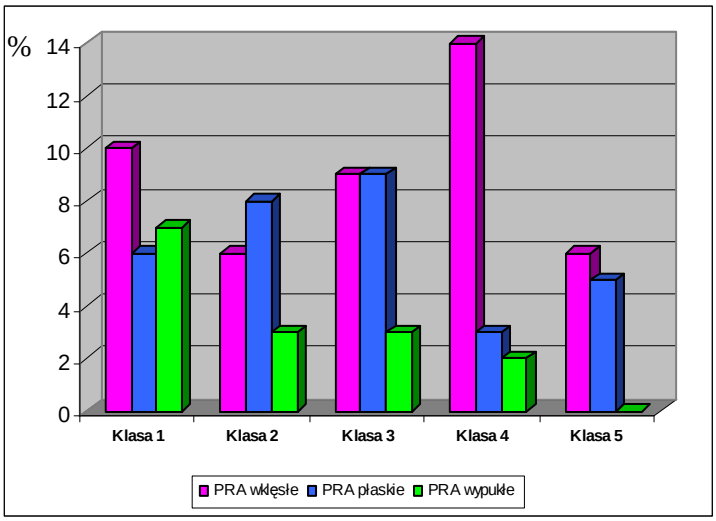
Ryc. 10.3 Przykład punktów obrywu lawin poza jednostkami PRA

W wygenerowanej warstwie punktów obrywu, każdemu punktowi w tabeli atrybutów przypisano wartości klas (częstości występowania) według podziału na mapie z okresu 1961 – 72r. (od 1 do 5). Na tej podstawie określono liczbę przypadków w każdej klasie z podziałem na odpowiedni typ PRA (Tab. 10.2)

	Klasa 1	*Klasa 2*	*Klasa 3*	*Klasa 4*	*Klasa 5*
PRA wklęsłe	**10**	**6**	**9**	**14**	**6**
PRA płaskie	**6**	**8**	**9**	**3**	**5**
PRA wypukłe	**7**	**3**	**3**	**2**	**0**
sumy	**23**	**17**	**21**	**19**	**11**

Tab. 10.2 Liczba punktów obrywu lawin w odpowiednim typie PRA i w odpowiedniej klasie częstości występowania lawin

Analizując wykres sporządzony na podstawie powyższej tabeli (Rys. 10.2) zauważyć można, że w każdej klasie dominuje liczba przypadków występujących w typie wklęsłym i płaskim. W typie wypukłym obserwuje się najmniej przypadków a liczba ta zwiększa się wyraźnie w klasach o najmniejszej częstości występowania.



Rys. 10.2 Wykres liczby punktów obrywu lawin w odpowiednim typie PRA i w odpowiedniej klasie częstości występowania lawin

10.2 Weryfikacja Map Stopnia Zagrożenia Wystąpienia Lawiny

Weryfikację map zagrożenia uwolnienia lawiny, także oparto na analizie historycznych map lawinowych opisanych powyżej. Wykorzystano tu kilka przykładów zarejestrowanych lawin, które oprócz lokalizacji posiadają także datę wystąpienia. Przykłady pochodzą z mapy z roku 60 i z obecnej bazy danych Tatrzańskiego Parku Narodowego.

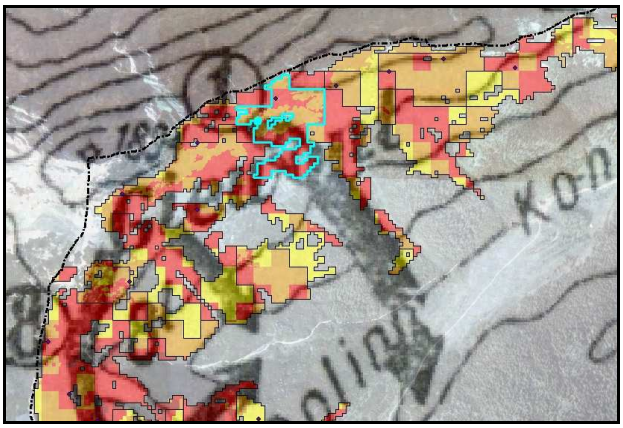
Punkty obrywu przykładowych lawin przyporządkowano do odpowiadających im obszarów PRA. Wykorzystano tutaj warstwę obszarów PRA, która w tabeli atrybutów zawiera dane na temat wielkości zajmowanych powierzchni w odpowiedniej klasie zagrożenia. Procentowy udział tych obszarów w odpowiednim PRA lawiny przedstawiono w tabeli poniżej. Poniżej opisano także szczegółowo analizowane przykłady.

	Przykład 1 13.02.1960	*Przykład 2 29.03.1960*	*Przykład 3 09.03.2001*	*Przykład 4 12.04.2003*	*Przykład 5 12.04.2003*	*Przykład 6 31.01.2004*
R1	0	6	24	6	0	32
R2	45	17	38	15	2	54
R3	55	53	31	17	42	8
R4	0	24	7	62	56	6

Tab. 10.3 Procentowy udział powierzchni o określonej klasie zagrożenia uwolnienia lawiny w PRA odpowiadającym wybranym punktom obrywu lawiny

Przykład pierwszy przedstawia lawinę z 13 lutego 1960 roku. Na podstawie wytycznych pomiarowych PIHM z tamtego okresu, lawinie przypisano następującą charakterystykę:

- Miejsce zejścia: Płd. Zbocze Giewontu, środkowy żleb.
- Geneza: zejście samorzutne
- Warunki pogodowe: dość pogodnie
- Rodzaj lawiny: Lawina powierzchniowa (deska śnieżna)
- Charakterystyka miejsca obrywu: szerokość obrywu ok. 10 m.
- Charakterystyka szlaku lawinowego: nachylenie 30^0, długość toru 200 m., tor płaski
- Opis stożka lawinowego: stożek ze śniegu bryłowatego o długości ok. 35 m. I szerokości ok. 25 m.
- Szkody: bez szkód

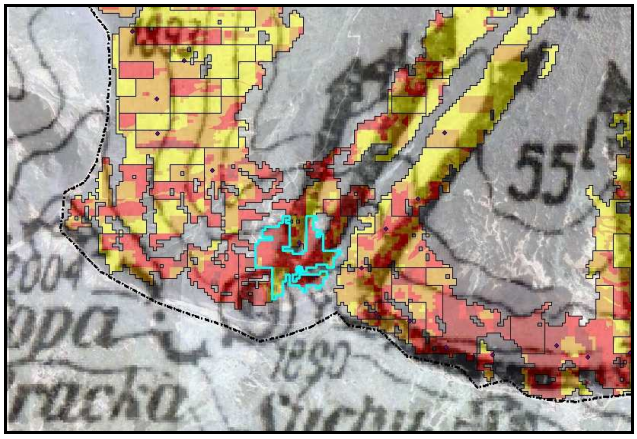


Ryc. 10.4 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 13 lutego 1960 roku

Na rysunku powyżej przedstawiono jasną obwódką obszar PRA z którego wystąpiła lawina. W podkładzie przedstawiono mapę z 1960r, oraz mapę stopnia zagrożenia w lutym. W tym przypadku ponad połowa (55%) wyznaczonego obszaru PRA posiada 3 klasę stopnia zagrożenia (zagrożenie duże), niewiele mniej bo 45% stanowią obszary w klasie 2 (zagrożenie znaczne). Typ obszaru PRA (płaski) odpowiada przypisanej charakterystyce toru lawiny.

Przykład drugi przedstawia lawinę z 29 marca 1960 roku. Na podstawie wytycznych pomiarowych PIHM z tamtego okresu, lawinie przypisano następującą charakterystykę:

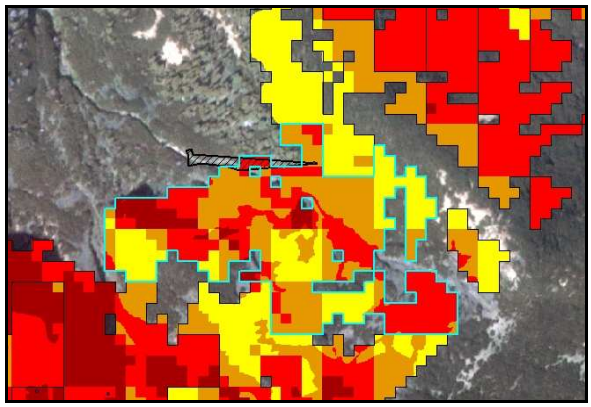
- Miejsce zejścia: Od Suchego Kondrackiego Wierchu (nad górną stacją wyciągu narciarskiego) w kierunku Kamienia.
- Geneza: lawina podcięta przez narciarza
- Rodzaj lawiny: Lawina o obrywie punktowym
- Charakterystyka szlaku lawinowego: długość toru od 50 do 300m.
- Opis stożka lawinowego: szerokość stożka od 10 do 30 m.
- Ogółem zeszły 4 lawiny.



Ryc. 10.5 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 29 marca 1960 roku

W tym przypadku również ponad połowa (53%) wyznaczonego obszaru PRA posiada 3 klasę stopnia zagrożenia (zagrożenie duże), aż 24% obszaru należy do najwyższej 4 klasy (zagrożenie b. duże). Do klasy 1 i 2 należy łącznie tylko 23%.

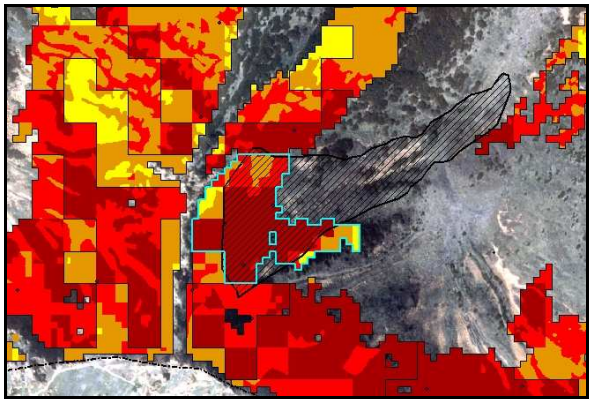
Przykład trzeci pochodzi z bazy danych Tatrzańskiego Parku Narodowego i przedstawia lawinę ze stoków Uhroci Kasprowych z 09 marca 2001 roku. Jedyną informacją na temat lawiny prócz daty jest informacja „mokry śnieg”.



Ryc. 10.6 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 09 marca 2001 roku

Na powyższej rycinie przedstawiono poligon obrysu lawiny wypełniony czarną szrafurą. Jasną obwódką przedstawiono odpowiadający jej obszar PRA. W tym przypadku największą powierzchnie zajmują obszary z klasy 2 i 3. Łącznie stanowią 69%. Najmniej przypada na klasę 4 – tylko 7%.

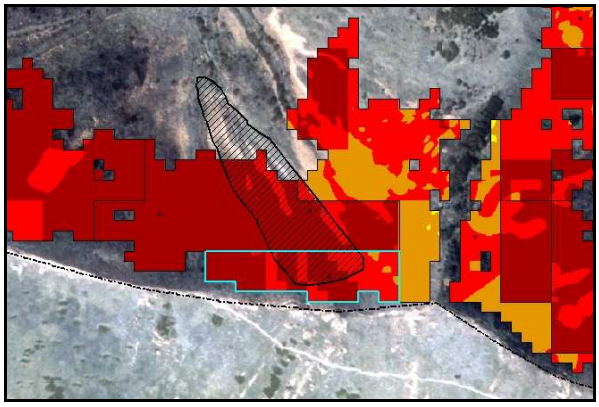
Przykład czwarty pochodzi z bazy danych Tatrzańskiego Parku Narodowego i przedstawia lawinę ze stoków Czuby Goryczkowej z 12 marca 2001 roku. Lawina zawiera dodatkowo informację o typie lawiny – „deska" i godzinie zejścia (14.30)



Ryc. 10.7 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 12 marca 2001 roku (ze stoków Czuby Goryczkowej)

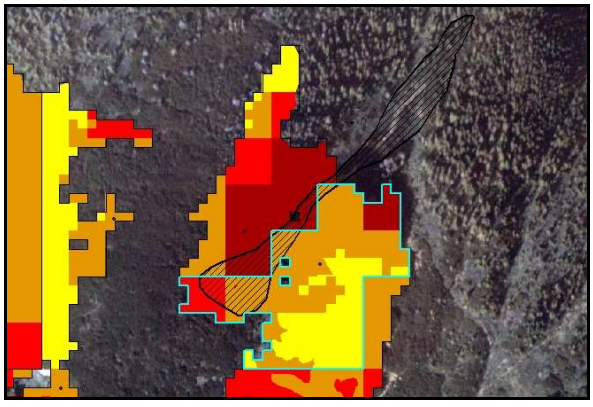
Ponad połowa odpowiadającego lawinie obszaru PRA (62%) to obszary przypisane najwyższej (4) klasie zagrożenia, do klasy 2 i 3 łącznie należy 32% obszaru. W najniższej klasie występuje tylko 6% powierzchni.

Lawina w przykładzie piątym pochodzi z tego samego źródła i tej samej daty co przykład powyżej (lawina ze stoków Pośredniego Goryczkowego Wierchu). Również dodatkową informacją jest tu godzina (10.00) i typ lawiny („deska”). Obszary przypisane klasie 4 znowu stanowią ponad połowę analizowanego obszaru (56%) a łącznie z obszarami z klasy 3 stanowi aż 98%! Pozostałe 2% obszarów należy do klasy 2.



Ryc. 10.8 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 12 marca 2001 roku (ze stoków Pośredniego Goryczkowego Wierchu)

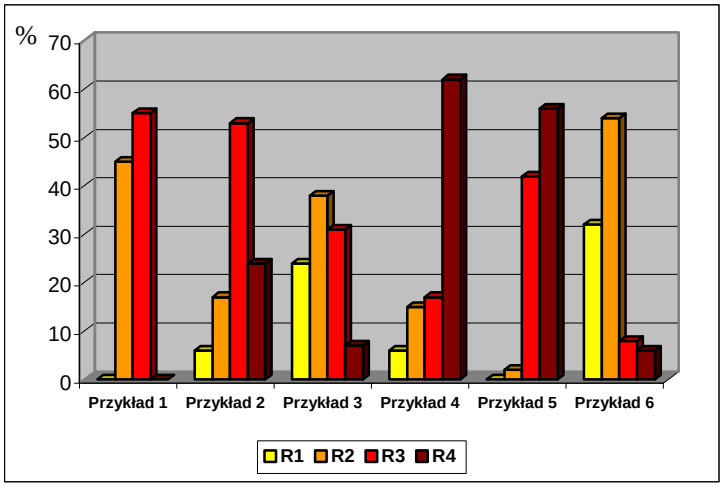
W ostatnim – szóstym przykładzie analizie poddano lawinę ze stoków Kondratowego Wierchu z 31 stycznia 2004 roku. Podobnie jak trzy ostatnie przykłady, dane lawiny pochodzą z bazy danych Tatrzańskiego Parku Narodowego i dodatkową informacją jest godzina (13.30) i typ lawiny („deska”).



Ryc. 10.9 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 31 stycznia 2004 rok

W przykładzie tym dla analizowanego obszaru PRA dominującymi klasami zagrożenia są klasa 2 – 54% (zagrożenie znaczne) i klasa 1 – 32% (zagrożenie umiarkowane), klasy 3 i 4 zajmują łącznie 14%.

Sumarycznie procentowy udział powierzchni o odpowiedniej klasie zagrożenia w analizowanych obszarach PRA przedstawiono na wykresie poniżej.



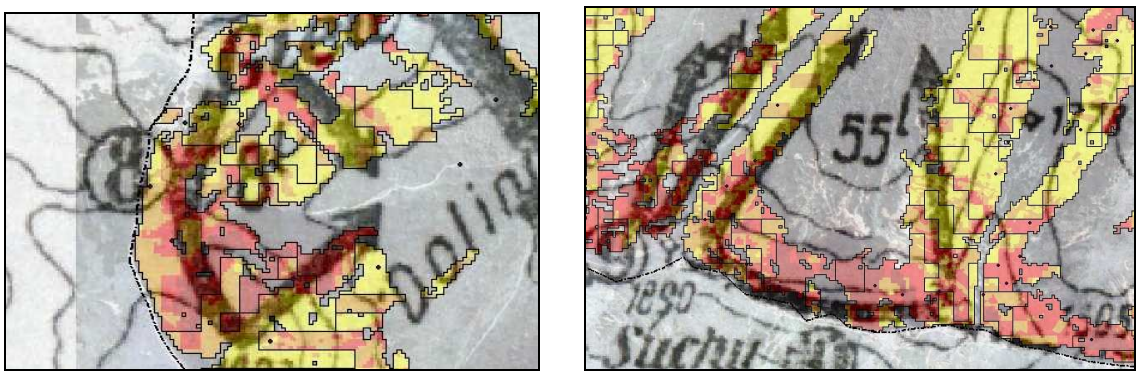
Rys. 10.3 Procentowy udział powierzchni o odpowiedniej klasie zagrożenia w analizowanych obszarach PRA

W powyższej analizie zwraca uwagę fakt (zwłaszcza w trzecim i szóstym przykładzie), że występują przypadki gdzie powierzchnia obrywu lawiny jest znacznie mniejsza od powierzchni całego obszaru PRA. Zauważyć można także zróżnicowanie przestrzenne obszarów o odpowiedniej klasie zagrożenia w obrębie pojedynczej jednostki PRA. Dla uściślenia analizy przedstawiono więc w tabeli 10.4, odpowiedni stopień zagrożenia dla punktu obrywu lawiny a nie dla całego obszaru PRA.

	Przykład 1	*Przykład 2*	*Przykład 3*	*Przykład 4*	*Przykład 5*	*Przykład 6*
Stopień zagrożenia w punkcie obrywu	**Klasa 3** (zagrożenie duże)	**Klasa 3** (zagrożenie duże)	**Klasa 2** (zagrożenie znaczne)	**Klasa 4** (zagrożenie bardzo duże)	**Klasa 4** (zagrożenie bardzo duże)	**Klasa 3** (zagrożenie duże)

Tab. 10.4 Stopień zagrożenia uwolnienia lawiny w punkcie obrywu przykładowych lawin

W weryfikacji map historycznych lawin nie zostały uwzględnione przykłady lawin, które posiadały datę zejścia, ale nie posiadały dokładnego punktu obrywu. W takich przypadkach na mapie zaznaczono orientacyjnie obszar, z którego w jednym dniu zeszło kilka lawin. Warto jednak przedstawić takie przypadki bo chociaż trudno dokładnie określić punkt obrywu to można zauważyć, że ogólnie teren ten charakteryzuje się według sporządzonych map, dużym zagrożeniem występowania lawin. Takie dwa przykłady pokazano na poniższych rycinach.



Ryc. 10.10 Przykłady obszarów występowania historycznych lawin bez określenia punktu obrywu pojedynczych lawin

Dwa przykłady pochodzą z mapy z 1960 roku i przedstawiają obszary lawin, które zeszły 29 marca (rycina lewa) oraz 29-30 marca 1960 roku (rycina prawa).

Pierwszy z nich to obszar z grani biegnącej na południe od Giewontu do Piekiełka. Największa lawina zeszła z przełęczy Kondrackiej, a długość jej toru wyniosła 400 metrów. Ogółem w obszarze tym zeszło 8 lawin.

W drugim przykładzie lawiny schodziły ze stoków grani łączącej Goryczkową Czubę i Suchy Kondracki do Doliny Suchej. Największa lawina zeszła z Czuby Goryczkowej a długość jej toru wyniosłą 500 metrów. Ogółem w ciągu dwóch dni zeszło aż 55 lawin!

10.3 Weryfikacja – podsumowanie

Zarówno weryfikacja lokalizacji obszarów PRA jak i weryfikacja map stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny, potwierdziły dużą skuteczność i zgodność zastosowanych metod z rzeczywistością.

Weryfikując poprawność lokalizacji obszarów PRA stwierdzono, że 85% badanych przypadków posiada punkt obrywu w wyznaczonych obszarach. Zauważono jednak, że wiele lokalizacji obrywu nie zawierających się w granicach PRA, występuję w bezpośrednim ich sąsiedztwie. Bardzo prawdopodobne jest, że wynika to z nieprecyzyjnej lokalizacji na mapie. Analiza przynależności historycznych lawin do odpowiedniego typu PRA potwierdza fakt, iż lawiny częściej występują w terenach o typie wklęsłym i płaskim rzadziej zaś w terenach wypukłych (Tab. 10.2). Liczba przypadków lawin na terenach o typie formy wypukłej rośnie więc w klasie o najmniejszej częstości występowania (Rys. 10.2).

Analizując przykłady lawin z różnych okresów pod kątem stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny wykazano prawidłowość, że odpowiednie PRA przyporządkowane danym przykładom posiadają przeważający odsetek powierzchni o zwiększonym zagrożeniu wystąpienia lawiny (Tab. 10.3). Dodatkowo sprawdzając stopień zagrożenia w samym punkcie obrywu stwierdzono iż w pięciu z sześciu analizowanych przykładów, stopień zagrożenia zaliczał się do klasy 3 i 4 (Tab. 10.4). W jednym przypadku punkt obrywu zawierał się w obszarze o 2 klasie zagrożenia. Analizując jednak dokładnie ten odstani przypadek, zauważono że do obszaru zawartego w 3 klasie zagrożenia dzieli go w terenie tylko 5m (Ryc. 10.6). Także i w tym przypadku możliwym jest fakt nieprecyzyjnego określenia lawiny na mapie, lub niedokładności na którejś z analizowanej warstw. Również w przykładach gdzie wskazano tylko orientacyjny obszar występowania kilku lawin, zauważyć można przeważający odsetek obszarów o najwyższym stopniu ryzyka.

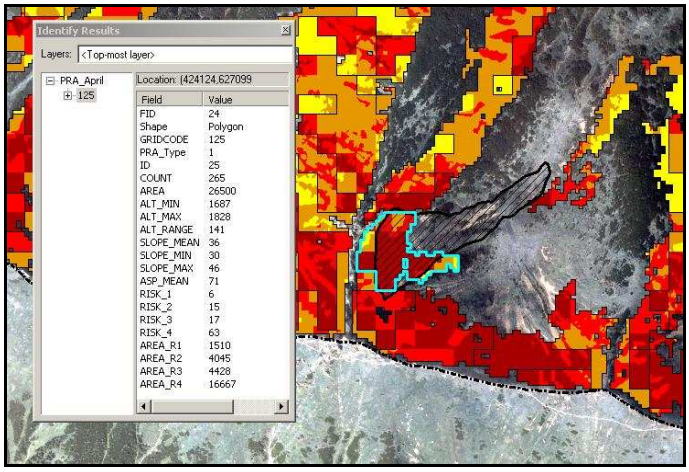
10.4 Praktyczne zastosowanie map wynikowych

Weryfikacja wykazująca dużą zgodność wyników z rzeczywistością pozwala na stwierdzenie, iż wyniki niniejszej pracy mogą być zastosowane do celów praktycznych.
Jak już wcześniej wspominano wyniki można podzielić na dwie części: pierwszą – mapa obszarów PRA i drugą - mapy stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny.

Wydaje się że wyniki części pierwszej mają większe zastosowanie do celów badawczych. Na podstawie przypisanych obszarowi PRA atrybutom, zarejestrowanym lawinom można przypisywać określone charakterystyki morfologiczne i topograficzne. Pozwala to na budowanie bazy danych na podstawie której można badać związki

i zależności pomiędzy różnymi parametrami. Przykładem może być tu badanie, zależność pomiędzy średnim nachyleniem terenu a typem lawiny lub też zależność pomiędzy średnią ekspozycją obszaru a częstością występowania lawin.

Na rycinie poniżej przedstawiono opisany już wcześniej przykład lawiny ze stoków Czuby Goryczkowej z 12 marca 2001r. Na podstawie wyznaczonych obszarów PRA skąpą informację o informację o typie lawiny – „deska" i godzinie zejścia (14.30) charakterystykę można np. wzbogacić parametrami z tabeli atrybutów przypisanymi odpowiedniemu poligonowi PRA.

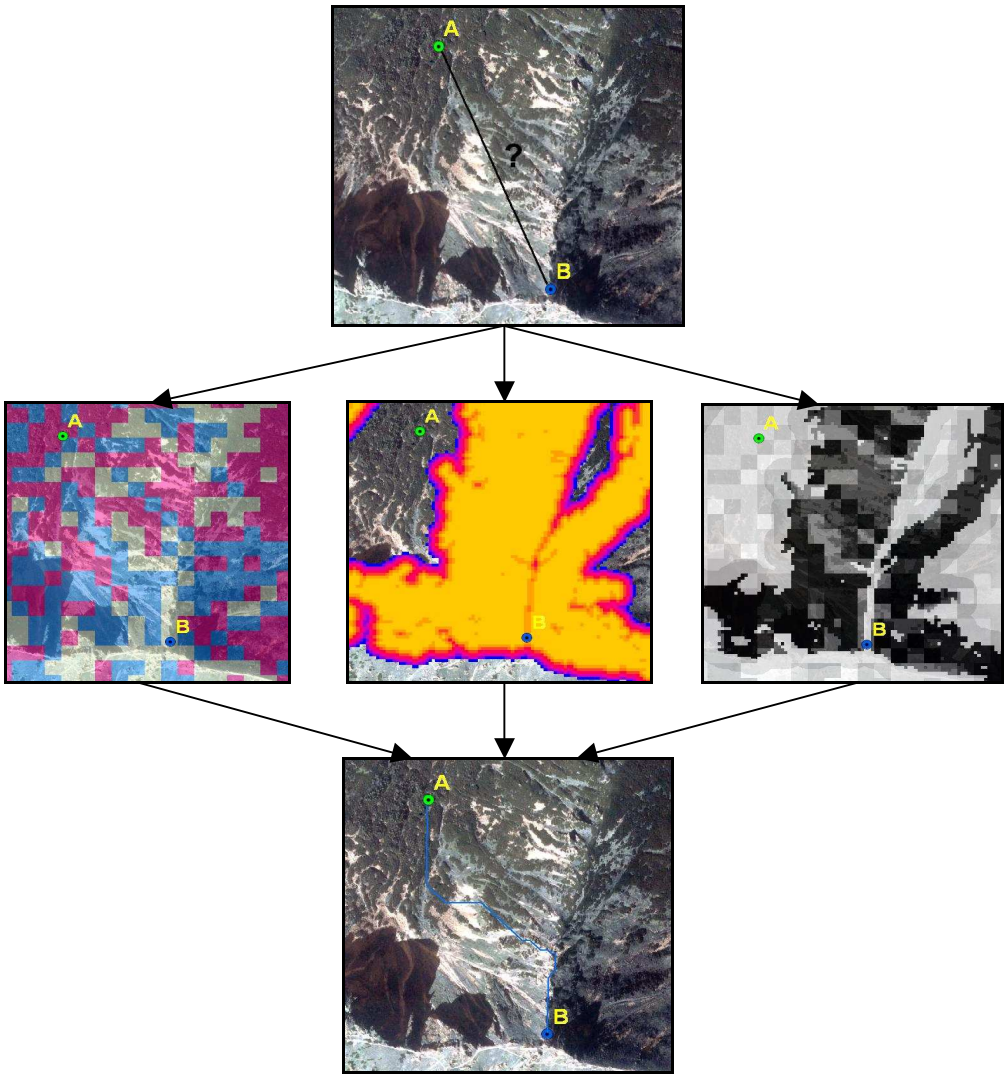


Ryc. 10.11 Charakterystyka jednostki PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 12 marca 2001 roku (ze stoków Czuby Goryczkowej)

Jeśli chodzi o mapy stopnia zagrożenia lawiny jak już wspomniano na wstępie rozdziału 8.3.2 mogą być one wykorzystane niezależnie od wyznaczonej warstwy obszarów PRA. Mogą one być pomocne szerokiej rzeszy osób uprawiającej różne typy aktywności górskiej. Wprawdzie mapy te nie przedstawiają syntetycznej mapy zagrożenia lawinowego, uwzględniającej również zasięgi lawin to na pewno informacja o zagrożeniu w obszarze potencjalnego uwolnienia pozwoli na bezpieczniejsze planowanie tras.

Poniżej przedstawiono przykład zastosowania oprogramowania **ArcGIS** do planowania trasy przejścia na podstawie wyznaczonej mapy stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny.

W przykładzie zachodzi hipotetyczna konieczność względnie bezpiecznego przejścia w terenie zagrożonym z punktu A do punktu B.



Rys. 10.4 Przykład zastosowania oprogramowania ArcGIS do bezpiecznego planowania tras

Wyznaczając maksymalny obszar obliczeń analizie poddano przykładową mapę zagrożenia dla lutego. Biorąc pod uwagę niebezpieczeństwo na trasie zejścia lawiny wykorzystano dodatkowo mapę form terenu dla całego analizowanego obszaru (mapa analityczna z rozdziału 8.3.1.1). Mapie form nadano rangi zgodnie z zasadą, że tereny wklęsłe są bardziej zagrożone. Dodatkową rangę nadano, także obszarom wokół wyznaczonych obszarów zagrożenia uwolnienia lawiny (w buforze 50 m) w myśl tego, że w rzeczywistości granice pomiędzy obszarami zagrożonymi, a bezpieczniejszymi nie są ostre. Finalnie zsumowano rangi ze wszystkich warstw otrzymując mapę „kosztów” czyli mapę gdzie każdemu pikselowi odpowiada odpowiednia suma rang

Wykorzystując funkcje *Cost Weighted* i *Shortest Path* wygenerowano trasę o najmniejszym koszcie czyli w naszym przypadku o najmniejszej sumie wartości zagrożenia. Trasę tą na rysunku przedstawia linia niebieska (Rys. 10.4).

Wydaje się, że taki typ planowania znalazł by zastosowanie nie tylko wśród szerokiej rzeszy turystów, ale także w służbach ratowniczych. Znając miejsce wypadku można by w ten sposób zaplanować względnie najbezpieczniejszą trasę dotarcia do miejsca zdarzenia. Posiadając odpowiednio przygotowana bazę danych wygenerowanie takiej trasy nie stanowi większego problemu i może być wykonane bardzo szybko. Tak przygotowaną trasę z uwzględnieniem poprawek związanych z aktualną sytuacją pogodową i śniegową można wprowadzić do odbiornika GPS dzięki któremu nawigacja nawet w trudnych warunkach atmosferycznych staje się możliwa.

Nie mając do dyspozycji odpowiedniego oprogramowania trasę można także zaplanować z mapy analogowej, która zawierała by wygenerowaną warstwę stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny. Odczytane współrzędne trasy z mapy również można wprowadzić do odbiornika GPS który znacząco ułatwia nawigację.

10.5 Dyskusja na temat zastosowanych metod

Chociaż skuteczność metod oceniona w powyższych rozdziałach jest wysoka to wydaje się być jasnym fakt, że ze względu na dużą złożoność zagadnienia lawin śnieżnych, zastosowane metody w pełni nie oddają charakteru zjawiska. Poniżej przedstawiono, zdaniem autora, najbardziej znaczące etapy prac mogące wzbudzać dyskusje.

Jeśli chodzi o zastosowaną metodę definiowania obszarów PRA to omówione zostaną zagadnienia o których już sami autorzy wspomnieli w swoich badaniach.

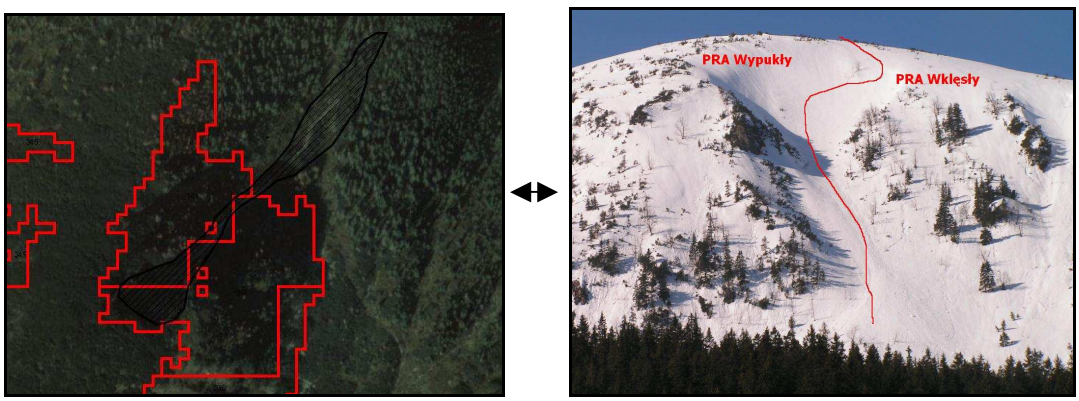
W badaniach przedstawionych w niniejszej pracy skuteczność poprawnej lokalizacji obszarów PRA wyniosła 85%, analizując próbę składającą się ze 108 przypadków. W badaniach prowadzonych w Szwajcarii skuteczność ta wyniosłą 79% przy czym analizowana tam baza była znacznie większych rozmiarów i dotyczyła przypadków z okresu ponad 50 lat (Maggioni, 2004).

Zaletą stosowanych metod jest zastosowanie automatycznych - obiektywnych narzędzi, które po dobraniu odpowiednich parametrów obliczeniowych stają się użyteczne również w innych rejonach badawczych, gdzie dostępne są podstawowe warstwy analityczne.

W wielu krokach procedury generowanie map analitycznych wynika z dobrania odpowiedniej wielkości danego parametru. W tej metodzie podstawowym parametrem badawczym jest wielkość nachylenia stoków, która zawiera się tutaj w granicach $30\text{-}60^0$. Wielkość ta jest pewnym uśrednieniem wielkości podawanych w literaturze. Czasem wielkość ta się nieznacznie różni od przyjętej, ale autorka metody udowadnia, że przykładowe przyjęcie granicy $28\text{-}50^0$ (często pojawiającej się w literaturze) nieznacznie wpływa na wyniki prac (Maggioni, 2004).

Podobnie jest z granicznym parametrem zakrzywienia („*plan curvanture*"), którego wielkość została zweryfikowana i zdaniem autorki wspólnie z dobranym przedziałem nachylenia stoków najlepiej oddaję zróżnicowanie form w trzech głównych typach (wklęsłym, wypukłym i płaskim). Ze względu na podobną morfologię terenu analizowanego w Szwajcarii i przedstawionego w niniejszej pracy, zastosowano te same parametry, które wydaje się także przynoszą pozytywne efekty.

Uwagę zwraca w metodzie dobór odpowiedniej rozdzielczości przestrzennej DEM. Dobór ten jak opisano w 8.2.3 znacząco może wpłynąć na wyniki. Szczególne znaczenie ma dobór rozdzielczości przy określaniu typu fory terenowej. Przyjęta w pracy zgodnie z metodą wielkość 50m daje generalnie pozytywny rezultat. Można jednak zauważyć, że pewne obszary PRA wygenerowane w niniejszej pracy nie odpowiadają w pełni rzeczywistej postaci.

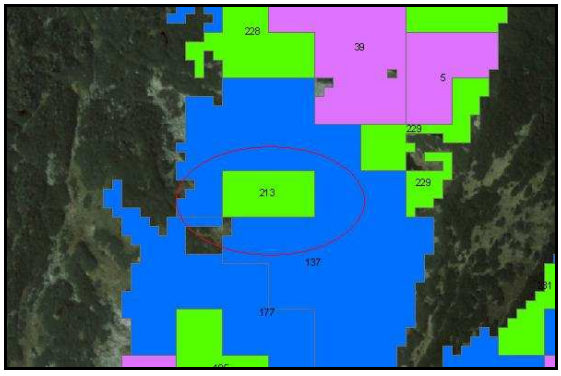


Rys. 10.5 Przykład niezgodności granic wygenerowanych PRA w odniesieniu do typu formy występującej w terenie

Powyżej przedstawiono taki przykład, ze stoków Kondratowego Wierchu, który wedle metody podzielony jest między formą wypukłą i wklęsłą (Rys. 10.5). Rycina po lewej przedstawia granicę obszarów PRA nałożoną na ortofotomapę, a rycina po prawej

fotografię z terenu z wyznaczoną orientacyjna linią podziału miedzy dwoma PRA. Jak widać w tym przypadku granica między obszarami PRA wymaga korekty co dodatkowo udowadnia obrys historycznej lawiny na lewej rycinie, który jest podzielony między PRA o odmiennej formie.

Uwagę zwracają także pojawiające się samodzielne obszary PRA wewnątrz innych samodzielnych obszarów. Metoda jednak nie wspomina o takich przypadkach i o ewentualnym ich sposobie łączenia. Przykładem może być PRA wklęsły o GRIDCODE równym 334 (na Ryc. 10.12 zaznaczonym elipsą).



Ryc. 10.12 Przykład jednostki PRA zawartej w granicach jednostki PRA o innym typie

Wpływ na tego typu niejasności ma nie tylko rozdzielczość przestrzenna DEM, ale także wielkość oddzielająca obszary PRA samodzielne od niesamodzielnych (w pracy przyjęta wielkość to - 5000m^2). W dalszych etapach znaczący wpływ na wyniki ma także kolejność przyłączania wyznaczonych obszarów niesamodzielnych do zdefiniowanych jąder PRA (Rys. 8.9). Wedle metody kolejność wynika tu z uznania formy wklęsłej i płaskiej za priorytetową, co wynika z udowodnionego również w niniejszej pracy faktu, że w tych formach lawiny występują częściej.

Wydaje się, że kwestią wymagającą udoskonalenia jest przyjęcie odpowiednich wielkości parametrów, do wyznaczania grzbietów głównych. Generalnie przyjęte parametry pozwalająca na poprawne wydzielenie grzbietów jednak podobnie jak w pracy autorów metody, istnieje problem w ich definiowaniu na grzbietach bardziej kopulastych. Wpływ na to ma zapewne sam charakter modelu DEM, który już w pierwotnej postaci powoduje „wygładzanie powierzchni". Na poniższej rycinie przedstawiono przykład, w którym wyłączenie grzbietów z analizy spowodowało częściowy ubytek obszaru PRA w którym zarejestrowano przypadek zejścia lawiny.

Ryc. 10.13 Przykład błędnej redukcji obszaru PRA na skutek zdefiniowania grzbietu głównego

Jeśli chodzi o metodę generowania map stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny to chociaż jest ona w całości propozycją autora i jest pierwsza tego typu próbą na badanym obszarze to wyniki weryfikacji zdają się być zadowalające.

Dyskusje może wzbudzać fakt że mapy określają stopnie zagrożenia z uśrednieniem miesięcznym, w przypadku gdy stopień zagrożenia uwolnienia jest bardzo zmienny w czasie. Należy jednak zaznaczyć, że w analizie dominującym parametrem jest nachylenie i forma terenu która nie zmienia się w czasie. Względnie niezmiennym w czasie jest także pokrycie terenu. Jeśli chodzi o stopień zacienienia obszarów to zmienia się on nawet w ciągu doby, jednak analizuję się go tutaj pod kątem przemian w pokrywie śnieżnej, które zachodzą zwykle długotrwale. Uznano więc, że uśrednienie miesięczne jest wystarczające.

Najbardziej zmiennym parametrem wydaje się być kierunek wiatru. Jest sprawą oczywistą, że silne wiatry połączone z silnymi opadami śniegu mogą nawet w ciągu doby zmienić diametralnie sytuację lawinową. Pozwolono jednak sobie na wzięcie pod uwagę tego parametru w metodzie, gdyż niewątpliwie pewna sezonowość cyrkulacji w ciągu roku występuje. Jest też sprawą jasną, że cyrkulacja w obszarach górskich jest bardzo zróżnicowana w różnych formach terenowych i występuje tu także zmienność dobowa cyrkulacji. Stwierdzono jednak, że obszar badań jest na tyle niewielki że bardzo znaczne różnice przestrzenne nie występują, tym bardziej że obszary zagrożone lawinami są tutaj usytuowane blisko najwyższych grzbietów a wysokość względnie pomiędzy grzbietami a dolinami też nie są znaczące.

W obliczaniu statystyk kierunków wiatru należało by się zastanowić nad doborem przypadków w odpowiednich przedziałach prędkości wiatru. Jak wspomniano w rozdziale 5.2.2.2, wielkość przenoszenia śniegu zależy w dużej mierze od prędkości wiatru. W niniejszej pracy nie podjęto próby klasyfikowania odpowiednich prędkości wiatru do

określonych klas ponieważ trudno tak naprawdę stwierdzić jaka jest minimalna prędkość wiatru wpływająca na stopień dostatecznego wpływu na sytuację lawinową. Wydaje się, że nawet powolne ruchy cząsteczek występujące przy małych prędkościach wiatru występujących w pewnym okresie mają wpływ na zwiększanie zagrożenia lawinowego na stokach zawietrznych. Poza tym wiatr ma wpływ na zagrożenie wystąpienia lawiny także bezpośrednio na stokach dowietrznych, poprzez utwardzanie pokrywy (stabilizacja pokrywy).

Celem zaproponowanej metody rangowania warstw było zaznaczenie w możliwie najbardziej prosty sposób proporcji pomiędzy wagą odpowiednich warstw. Samo wagowanie jest tutaj subiektywne dla każdego miesiąca i opiera się o zasadę, że największe znaczenie ma tutaj morfologia terenu i czynniki wpływające na bezpośrednie wiązanie pokrywy z podłożem .

W ostatnim etapie wyznaczania map zagrożenia, sumaryczne mapy rang w każdym miesiącu podzielono na klasy wedle kryterium równej rozpiętości przedziałów. Może być to dyskusyjne jednak zdaniem autora sposób ten pozwala na najbardziej obiektywny podział.

Podsumowując należy przypomnieć, że metody wykorzystane w pracy zapewne nie wyczerpują całkowicie zagadnienia, a wyników nie należy traktować jako wyłączność w podejmowaniu decyzji czy opinii na temat sytuacji lawinowej. Ze względu na duży wpływ aktualnej sytuacji pogodowej i zmienność sytuacji lawinowej w czasie należy więc przed ich wykorzystaniem przyjąć odpowiednie poprawki np. na wielkość świeżej pokrywy w odpowiednim miejscu czy na dominujące kierunki i prędkości wiatru w ciągu ostatnich dni.

Analizy w przedstawionej pracy dotyczą jednak przede wszystkim niezmiennego parametru jakim jest powierzchnia terenu, co wydaje się czyni wyniki prac dobrą podstawą do oceny aktualnych warunków czy dalszych zaawansowanych badań.

11. Podsumowanie

Wykorzystując szwajcarską metodę zaproponowaną przez badaczy z Davos (Maggioni, Gruber 2002; Maggioni 2004), w obszarze badań o łącznej powierzchni 14,48 km^2 wygenerowano 245 samodzielnych obszarów potencjalnego występowania lawin (ang. Potential Release Area - PRA). W analizie uwzględniono takie elementy jak: nachylenie i ekspozycje stoków, pokrycie terenu, oraz kształt stoku w profilu poprzecznym. Elementy te wygenerowano na podstawie cyfrowego modelu rzeźby DEM o podstawowej rozdzielczości przestrzennej 10 m.

Przeprowadzona weryfikacja poprawności lokalizacji wykazała że 85% historycznych przypadków lawin posiada punkt obrywu w wyznaczonych obszarach PRA.

Przeprowadzone statystyki potwierdzają tezę, że lawiny częściej występują na stokach wklęsłych i płaskich w (profilu poprzecznym), rzadziej zaś na wypukłych.

Dodatkowo dla wyznaczonych obszarów wyliczono następujące parametry topograficzno – morfologiczne:

- powierzchnię obszaru,
- maksymalną wysokość bezwzględna,
- minimalną wysokość bezwzględną,
- zakres wysokości bezwzględnej,
- maksymalne nachylenie,
- minimalne nachylenie,
- średnie nachylenie,
- średnią wartość kąta ekspozycji,

Parametry te przyłączono do tabeli atrybutów warstwy poligonów PRA na podstawie unikalnej wartości ID przypisanej każdej jednostce.

Analizując wpływ czynników lawino twórczych takich jak: forma terenu, pokrycie terenu, wielkość dopływu bezpośredniej energii słonecznej, czy przeważające kierunki wiatrów na badanym obszarze wygenerowano mapy przedstawiające stopień zagrożenia uwolnienia lawiny przedstawiony w czterech następujących klasach:

1. Umiarkowane zagrożenie uwolnienia lawiny
2. Znaczne zagrożenie uwolnienia lawiny
3. Duże zagrożenie uwolnienia lawiny
4. Bardzo duże zagrożenie uwolnienia lawiny

W sumie wygenerowano 8 map rastrowych, odpowiednio do liczby miesięcy w analizowanym okresie od listopada do maja. Wykorzystano tutaj własną metodę opracowaną dla potrzeb niniejszej pracy.

Podobnie jak dla poligonów PRA wykonano weryfikację na podstawie historycznych danych zawierających informacje na temat daty zejścia lawiny, która wykazuję wysoką skuteczność zastosowanych metod.

Zastosowane Systemów Informacji Geograficznej w analizach potwierdza tezy zawarte w podręcznikach, iż owe systemy umożliwiają jednoczesne wykorzystanie wielu warstw danych znajdujących się w bazie danych. Cały interaktywny proces zadawania pytań przebiega bardzo szybko pozwalając w ten sposób oszczędzić czas a także wydajniej wykorzystywać nakłady finansowe przeznaczone na badania (Widacki 1997, Magnuszewski 1999).

W niniejszej pracy na podstawie kilku podstawowych warstw wykonano kilkadziesiąt map analitycznych, które w końcowym efekcie pozwoliły na wyznaczenie kilku tysięcy danych liczbowych zawartych w tabeli atrybutów.

Ponadto automatyzacja i ścisłe określenie procedur w systemach GIS, gwarantuje obiektywizm i precyzję całego toku postępowania. Umożliwia to powtórzenie procesu badawczego na innych obszarach. Podobnie metody przedstawione w niniejszej pracy wykorzystać można w innych obszarach, gdzie dostępne są odpowiednie dane cyfrowe.

Statystyki prowadzone przez polskie służby ratownicze jak i przedstawione możliwości praktycznego zastosowania wyników, nie pozostawiają wątpliwości co do potrzeb wykonywania tego typu analiz. Przedstawiona praca dowodzi także, że i w tej dziedzinie narzędzia GIS przedstawiają się jako potężne narzędzie, których możliwości jak powiedział kiedyś jeden z uczonych „ograniczone są tylko umysłem badacza”.

Jeśli chodzi o dostępność potrzebnych danych to wydaje się że w Polsce nie stanowi to większego problemu, gdyż każdy zagrożony lawinami rejon (Tatry, Karkonosze, Bieszczady, Beskidy) znajduje się w Parkach Narodowych, które dysponują tego typu bazą danych.

12. Literatura

ArcDoc, 2001: ArcInfo Online Help. ArcDoc Version 8.1 Service Pack 1. Copyright (C) 1982-2001 Environmental Systems Research Institute, Inc.

Chomicz K., 1963: Klasyfikacja śniegu i metodyka badań śniegowych w Polsce. Śnieg i Lawiny w Tatrach w 1960 roku, Prace PIHM, Warszawa.

Chomicz K., 1966: Śnieg i Lawiny w Tatrach w 1963 roku, Prace PIHM, Warszawa.

Chromow S. P., 1973: Meteorologia i Klimatologia, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Chrustek P., 2005: Avalanche risk assessment in the Tatra Mts., Kasprowy Mt. region, Poland; Nature – GIS. A European thematic network for Protected Areas/Nature Preservation and Geographical Information, Kraków – Genua. *http://www.gisig.it/nature-gis/usecases/docs/technical_usecase_avalanche.pdf*

Dubiński L., 1958: Od śnieżynki do lawiny, Wydawnictwo „Nasza Księgarnia", Warszawa.

Fyffe. A; Peter I., 2000: Podręcznik wspinaczki, wydawnictwo Galaktyka, Łódź.

Ghinoi A., 2003: A new contributiom to the assessment of snow avalanche suseptibility: Aplications in Tyrol (Austria) and in Aalta Val Badia (Dolomites, Italy). Ph. D. Dissertation, Modena.

Gruber U., 2001: Using GIS for Avalanche Hazard Mapping in Switzerland. Proceedings of the 2001 ESRI International User Conference July 9-13, 2001, San Diego. *http://www.esri.com/library/userconf/proc01/professional/papers/pap964/p964.htm*

Gruber U., Maggioni M., Stoffel A., 2002: Definition and characterisation of potential avalanche release areas. Proceedings of the 2002 ESRI International User Conference. *http://gis.esri.com/library/userconf/proc02/pap1161/p1161.htm*

Hess M., 1969: Główne problemy klimatyczne Karpat, Zeszyty naukowe U.J., Prace Geograficzne z. 25, Kraków.

Jakubowski R. [red.], 2000: Bedeker Tatrzański, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Jania J., 1997: Glacjologia: nauka o lodowcach, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Kłapowa M.,1980: Metamorfoza śniegu w zależności od warunków atmosferycznych i rzeźby terenu w Tatrach, IMGW, Warszawa.

Kondracki J., 2002: Geografia regionalna Polski, wyd. III, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Kosiba A., 1978: Śnieg , lodowce – lądolody, Wyd. Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa.

Maggioni M., 2004: Avalanche release areas and their influence on uncertainty in avalanche hazard mapping. Ph. D. Dissertation, Zurich.

Magnuszewski A., 1999: GIS w geografii fizycznej, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

McClung D.; Schaerer P., 2002: The Avalanche Handbook, The Mountaineers, Seattle – Washington.

Mietelski J., 2001: Astronomia w geografii, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Milata W., 1937: Badania nad pokrywą śnieżną w Karpatach, Wierchy, R. 15, Kraków.

Myczkowski A., 1962: Wpływ lawin śnieżnych na lasy Tatrzańskiego Parku Narodowego w dolinach Rybiego Potoku, Roztoki, Waksmundzkiej i Pańszczycy, Ochrona Przyrody R. 28, Warszawa.

Nyka J., 1994: Tatry Polskie: przewodnik, Wydawnictwo „Sport i Turystyka", Warszawa.

Poradnik ratownika GOPR, 1983, wydawnictwo PTTK „Kraj", Warszawa – Kraków.

Paryski W. H., 1948: Lawiny przy Morskim Oku, Taternik, R. 30, nr 1-2, Warszawa.

Pawlik W., 1931: Przyczynek do znajomości morfologii lawin tatrzańskich, Wiadomości Geograficzne, z. 3.

Przewodnik Geoinformatyczny, 1998, Erdas Field Guide, Geosystems Polska, Warszawa.

Sadowski M., 1971: Określanie zapasów wody w pokrywie śnieżnej lewego dorzecza Odry, Prace PIHM, Warszawa.

Sawicki L., 1910: Lawiny w Tatrach, Ziemia R.1 nr 23.

Trepińska J., 2002: Klimaty Górskie, Wydawnictwo Instytutu Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków.

Wężyk P.; Guzik M.; 2001 Techniki geomatyczne w badaniach czasowo – przestrzennych zmian szaty roślinnej Tatr na przykładzie rejonu Kasprowego Wierchu, Materiały „Ogólnopolskie Sympozjum Geoinformacji, Geoinformacja zintegrowanym narzędziem badań przestrzennych", Wysowa, 93.

Widacki W.; Bytnerowicz A.; Riebau A.; 2004: A message from the Tatra: Geographical Information Systems and Remote Sensing in Mountain Environmental Research, Jagiellonian University Press, Kraków.

Widacki W., 1997: Wprowadzenie do Systemów Informacji Geograficznej, wydawnictwo TEXT, Kraków.

Zaruski M., 1910: Jeden dzień przy Morskim Oku, Pamiętnik Towarzystwa Tatrzańskiego, T. 31, Zakopane

13. Spis tabel

Tab. 4.1 Klasyfikacja pokrywy śnieżnej i charakterystyka poszczególnych gatunków śniegu w Tatrach (wg Kłapowej, 1980 za Janią, 1997) 17
Tab. 5.1 Zależność pomiędzy kątem nachylenia stoku a typem występujących lawin 26
Tab. 5.2 Średnia wysokość pokrywy śnieżnej na odpowiedniej powierzchni zapewniająca względny stopień stabilizacji (Źródło: McClung, Schaerer; 2002) 29
Tab. 5.3 Zależność pomiędzy grubością pokrywy świeżego śniegu a stopniem zagrożenia lawinowego (Źródło: Materiały szkoleniowe GOPR) 32
Tab. 8.1 Średnie miesięczne wysokości i azymuty Słońca dla analizowanego okresu 68
Tab. 8.2 Procentowa częstość występowania wiatrów na określonym kierunku w wieloleciu 1984 – 2004 (Źródło: dane IMGW) 69
Tab. 8.3 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w listopadzie 73
Tab. 8.4 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w grudniu 74
Tab. 8.5 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w styczniu 75
Tab. 8.6 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w lutym 76
Tab. 8.7 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w marcu 76
Tab. 8.8 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w kwietniu 76
Tab. 8.9 Rangi zagrożenia wystąpienia lawiny w maju 78
Tab. 9.1 Liczba jednostek PRA w poszczególnych przedziałach powierzchniowych 84
Tab. 9.2 Atrybuty dla wybranej na rys.9.3 grupy obszarów PRA 86
Tab. 10.1 Punkty obrywu historycznych lawin w stosunku do jednostek PRA 90
Tab. 10.2 Liczba punktów obrywu lawin w odpowiednim typie PRA i w odpowiedniej klasie częstości występowania lawin 91
Tab. 10.3 Procentowy udział powierzchni o określonej klasie zagrożenia uwolnienia lawiny w PRA odpowiadającym wybranym punktom obrywu lawiny 92
Tab. 10.4 Stopień zagrożenia uwolnienia lawiny w punkcie obrywu przykładowych lawin 97

14. Spis rycin

Ryc. 6.1 Przykład strefowania obszarów na szwajcarskiej kompleksowej mapie zagrożenia lawinowego (Źródło: Gruber, 2001) 40
Ryc. 6.2 Fragment mapy częstości występowania lawin w Tatrach z okresu 1961 – 72r. (Źródło: Materiały IMGW) 41
Ryc. 7.1 Geograficzne położenie terenu badań 43
Ryc. 8.1 Cyfrowy Model Terenu (DEM) z nałożoną ortofotomapą 49
Ryc. 8.2 Model TIN 49
Ryc. 8.3 Mapa podstawowych obszarów PRA (z ortofotomapą w podkładzie) 56
Ryc. 8.4 Mapa grzbietów głównych (z ortofotomapą w podkładzie) 57
Ryc. 8.5 Mapa samodzielnych i niesamodzielnych obszarów PRA (z ortofotomapą w podkładzie) 59
Ryc. 8.6 Końcowa mapa samodzielnych obszarów PRA (z ortofotomapą w podkładzie) 62
Ryc. 8.7 Mapa pokrycia terenu 66
Ryc. 8.8 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w listopadzie (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000) 79
Ryc. 8.9 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w grudniu (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000) 79
Ryc. 8.10 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w styczniu (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000) 80
Ryc. 8.11 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w lutym (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000) 80
Ryc. 8.12 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w marcu (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000) 81
Ryc. 8.13 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w kwietniu (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000) 81
Ryc. 8.14 Mapa stopnia zagrożenia uwolnienia lawiny w maju (w podkładzie mapa turystyczna WZKart., w skali 1:30000) 82
Ryc. 9.1 Przykład niesamodzielnej jednostki PRA włączonej do mapy wynikowej 84
Ryc. 9.2 Przykładowa grupa obszarów PRA z określonym numerem ID 85
Ryc. 9.3 Charakterystyka przykładowej jednostki PRA z uwzględnieniem powierzchni zajmowanej przez odpowiednie klasy zagrożenia uwolnienia lawiny 87

Ryc. 10.1 Fragmenty map częstości występowania lawin w Tatrach w wieloleciu 1961-72 (po lewej) i w roku 1960 (po prawej) 89
Ryc. 10.2 Punkty obrywu lawin na podstawie historycznych map lawinowych 89
Ryc. 10.3 Przykład punktów obrywu lawin poza jednostkami PRA..... 91
Ryc. 10.4 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 13 lutego 1960 roku 93
Ryc. 10.5 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 29 marca 1960 roku 94
Ryc. 10.6 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 09 marca 2001 roku 95
Ryc. 10.7 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 12 marca 2001 roku 95
Ryc. 10.8 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 12 marca 2001 roku 96
Ryc. 10.9 Jednostka PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 31 stycznia 2004 rok 96
Ryc. 10.10 Przykłady obszarów występowania historycznych lawin bez określenia punktu obrywu pojedynczych lawin 98
Ryc. 10.11 Charakterystyka jednostki PRA odpowiadająca przykładowi lawiny z 12 marca 2001 roku (ze stoków Czuby Goryczkowej) 100
Ryc. 10.12 Przykład jednostki PRA zawartej w granicach jednostki PRA o innym typie 104
Ryc. 10.13 Przykład błędnej redukcji obszaru PRA na skutek zdefiniowania grzbietu głównego 105

15. Spis rysunków

Rys. 4.1 Uwarunkowania termiczne i wilgotnościowe powstawania kryształków śniegu w atmosferze (wg Magano Lee'go, 1966 za Janią, 1997) 14
Rys. 4.2 Międzynarodowa klasyfikacja śniegu i opadów zestalonych (za Janią, 1997). 15
Rys. 5.1 Podział obszaru spływu lawiny (kolor czerwony – obszar potencjalnego wystąpienia lawiny, kolor zielony – szlak lawinowy, kolor żółty - obszar akumulacji). Fot. P. Chrustek . 20
Rys. 5.2 Siły deformacyjne w pokrywie śnieżnej (Źródło: McClung, Schaerer; 2002) 25
Rys. 5.3 Siły działające w pokrywie śnieżnej w zależności od formy terenowej (Źródło: Fyffe, Peter; 2000) 30
Rys. 5.4 Rodzaje wywiewania śniegu z pokrywy śnieżnej (Źródło: Trepińska; 2002) 33
Rys. 5.5 Forma kryształu „szronu wgłębnego" silnie destabilizująca pokrywę śnieżna. (Źródło: Fyffe, Peter; 2000) 37
Rys. 8.1 Okno o wymiarach 3x3 stosowane do obliczeń nachylenia i ekspozycji każdego piksela (Źródło: Erdas Field Guide,1998) 50
Rys. 8.2 Okno o wymiarach 3x3 stosowane do obliczeń „zakrzywienia powierzchni" każdego piksela 51
Rys. 8.3 Klasy form terenu reprezentowanych przez siatkę GRID Cyfrowego Modelu Terenu 52
Rys. 8.4 Wpływ rozdzielczości modelu rastrowego na określanie klasy formy morfologicznej (Źródło: Maggioni, 2004) 52
Rys. 8.5 Procedura definiowania obszarów PRA: **(a)** Definiowanie PRA, **(b)** Podział PRA, **(c)** Łączenie PRA (Maggioni, Gruber 2003 – wersja zmodyfikowana) 54
Rys. 8.6 Procedura definiowania maski pokrycia terenu 55
Rys. 8.7 Procedura definiowania grzbietów głównych 58
Rys. 8.8 Procedura określania średniej ekspozycji dla obszarów PRA 60
Rys. 8.9 Procedura przyłączania niesamodzielnych obszarów PRA 61
Rys. 8.10 Procedura charakteryzowania obszarów PRA 63
Rys. 8.11 Procedura oceny stopnia zagrożenia wystąpienia lawiny: **(a)** Generowanie warstw, **(b)** Rangowanie warstw, **(c)** Wyprowadzanie mapy wynikowej 65
Rys. 8.12 Sposób generowania mapy zacienienia obszarów 67
Rys. 8.13 Przekrój sfery płaszczyzną południka dla $\varphi = 55^0$ (Źródło: Mietelski; 2001) 68
Rys. 8.14 Wykresy częstości występowania wiatrów na określonych kierunkach w analizowanym okresie listopad – maj (Źródło: dane IMGW) 70

Rys. 8.15 Generowanie mapy ekspozycji na podstawie danych meteorologicznych 71
Rys. 9.1 Procentowy udział obszarów PRA w stosunku do powierzchni obszaru badań ... 83
Rys. 9.2 Procentowy udział obszarów o określonej klasie zagrożenia uwolnienia lawiny. 86
Rys. 10.1 Procentowy udział punktów obrywu lawiny w odpowiednim typie PRA 90
Rys. 10.2 Wykres liczby punktów obrywu lawin w odpowiednim typie PRA i w odpowiedniej klasie częstości występowania lawin 92
Rys. 10.3 Procentowy udział powierzchni o odpowiedniej klasie zagrożenia w analizowanych obszarach PRA 97
Rys. 10.4 Przykład zastosowania oprogramowania ArcGIS do bezpiecznego planowania tras 101
Rys. 10.5 Przykład niezgodności granic wygenerowanych PRA w odniesieniu do typu formy występującej w terenie 103

16. Spis fotografii

Fot. 3.1 Stacja Badań Niwalnych IMGW na Hali Gąsienicowej (fot. P.Chrustek)..... 11
Fot. 5.1 Strefa obrywu lawiny „deski śnieżnej” ze śniegu osiadłego na stokach Goryczkowej Czuby. (Fot. P. Chrustek) 22
Fot. 5.2 Wiosenna lawina gruntowa na stokach Suchego Kondrackiego Wierchu..... 23
Fot. 5.3 Wylesienie w Tatrach spowodowane zejściem lawiny..... 28
Fot. 5.4 Kosodrzewina na stromym stoku stabilizująca pokrywę śnieżna (Fot. P. Chrustek) 28
Fot. 5.5 Nawisy śnieżne na grani w pobliżu Skrajnej Turni (Fot. P. Chrustek)..... 35
Fot. 5.6 Pęknięcie nawisu prostopadłe do linii grani na stokach Beskidu (Fot. P. Chrustek) 36
Fot. 6.1 Akcja ratunkowa na lawinisku w Tatrach (Źródło: Materiały archiwalne GOPR) 42