

# Tvorba mapy náchylnosti území české části Krkonoš k sněhovým lavinám

Suk, P.: Map Creation Identifying Avalanche Susceptibility in the Czech Part of the Krkonoše Mts. *Životné prostředí*, 2016, 50, 3, p. 141 – 148.

*The Krkonoše Mountains (Giant Mts.) are the highest Czech mountain range and the only Czech Republic area with high avalanche activity. This study describes geographic information systems (GIS) assessment of snow avalanche susceptibility in the Czech portion of the Krkonoše National Park instituted to protect the morphology and vegetation in this crucial area. The free and open-source software used in this study also enabled determination of possible release zones and approximate avalanche paths; and our final research results compare favourably with the actual state of the landscape.*

*Key words: snow avalanche, avalanche risk map, the Krkonoše Mountains, terrain morphology, avalanche released zone, GIS, geoinformatics*

Sněhové laviny jsou přirozeným jevem horských oblastí a je možné na ně nahlížet z mnoha různých pohledů. Mohou představovat život ohrožující nebezpečí návštěvníků zimních hor, ale také na ně lze nahlížet jako na procesy, které mají velký vliv na utváření celkového rázu krajiny, i jako na činitele umožňující výskyt některých rostlinných druhů na lavinových svazích.

V České republice (ČR) představuje Krkonošský národní park (KRNAP) jedinou oblast, ve které se lze setkat s významnou a relativně častou lavinovou činností. Ojedinele se sněhové laviny mohou vyskytovat v Hrubém Jeseníku a na Kralickém Sněžníku. Přestože je lavinová území v porovnání např. s alpskými zeměmi velmi malé, zaslouží si jistě naši pozornost. V Krkonoších jsou laviny důležitým přírodním činitelem, který ovlivňuje jejich krajinný ráz a také hraje zásadní roli při udržování vysoké geobiodiverzity. Důkazem je i fakt, že oblasti s lavinovými drahami patří k nejcennějším územím tohoto národního parku.

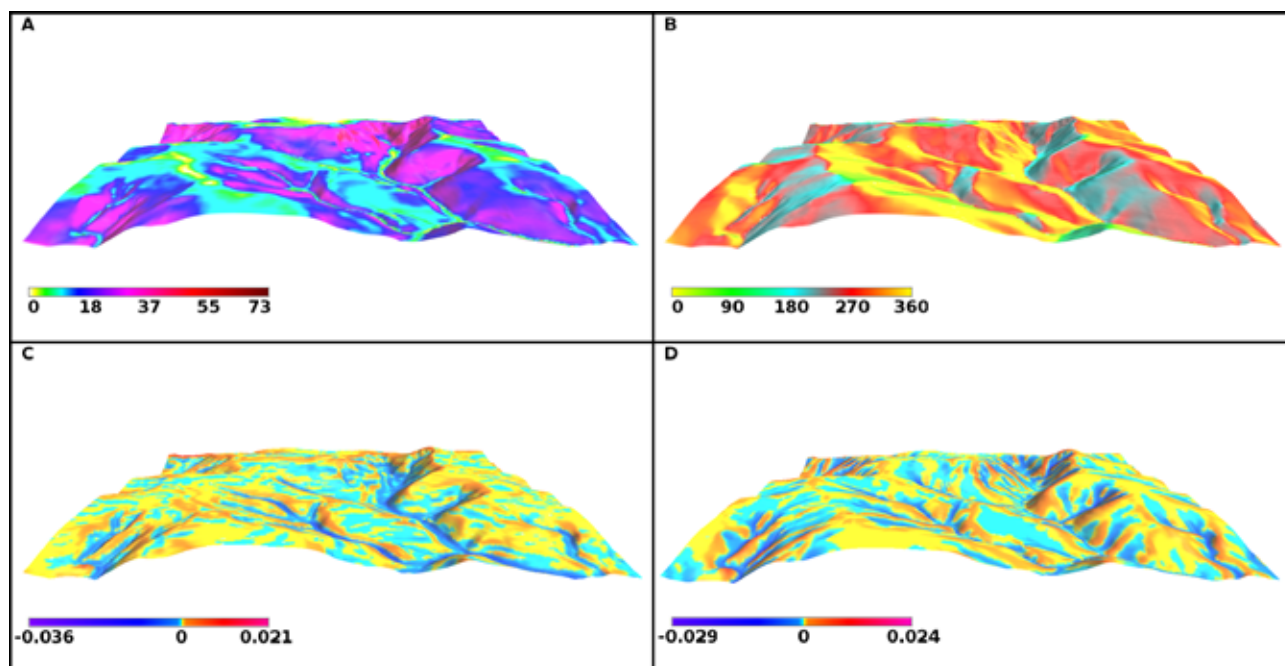
Na české straně Krkonoš se od roku 1962 evidují všechny spadlé laviny na dnes již více než 50 lavinových drahách. Za jednu zimní sezónu zde průměrně dojde k pádu 20 – 25 lavin. Za účelem evidence je správou KRNAP-u veden lavinový katastr, obsahující charakteristiky a popis všech drah, jejich prostorové zakreslení a také záznamy všech sesunů podle mezinárodní klasifikace.

Jako lavina je označován náhlý rychlý pohyb sněhu po svahu v délce nejméně 50 metrů. Kratší klouzavé pohyby se nazývají sněhové splazy. Místo, kde došlo k porušení soudržnosti sněhové pokrývky, se označuje za odtrh (odtrhová zóna). Dráha, po které se lavina pohybuje (lavinová dráha), závisí na terénních podmínkách a označuje se jako tranzitní zóna. Na čele laviny

(v tzv. akumulární zóně) se vytváří lavinový nános, který po zastavení laviny může dosáhnout výše až několika metrů. S rychlým pohybem sněhu souvisí stlačení okolního vzduchu a jeho zpětné nasávání, tj. vznik tlakové vlny. Ta zvyšuje ničivé účinky lavin, zvláště jde-li o laviny z prachového sněhu, které zasáhly lesní porosty (Spusta, 2006).

Sněhové laviny patří do skupiny přírodních rizik, jež dále zahrnuje kamenné laviny, sesuvy půdy, suťové sesuvy a ledopády, a která bývá souhrnně označována jako rizika horských svahů. Tato rizika představují pro návštěvníky a obyvatele horského terénu závažný problém. Z globálního hlediska však nedosahují takové významnosti jako pět hlavních přírodních rizik: zemětřesení, záplavy, tropické bouře, sucho a sopečná činnost. Jako měřítko významnosti lze použít dvou základních faktorů: schopnost postihnout velké množství lidí a vyčíslení způsobených škod. Sněhové laviny způsobují, bohužel, také ztráty lidských životů a škody na majetku, zdaleka ne ale takové, jako v případech pěti hlavních typů přírodních katastrof.

V rámci skupiny rizik horských svahů mají sněhové laviny dominantní postavení, protože četnost jejich výskytů je ve srovnání s ostatními druhy rizik mnohem větší. Tato skutečnost je dána specifickými vlastnostmi materiálu, z něhož se laviny formují, tedy sněhu. V porovnání s ostatními materiály zemského povrchu (půda, hornina, led) je sněh velmi slabý. Hlavním důvodem této slabosti je, že sněh formující laviny je nejčastěji tvořen z 80 % vzduchem a 20 % ledem a veškerá pevnost pochází pouze z vazeb mezi ledovými krystaly. Další důležitou charakteristikou sněhu při vzniku lavin je, že z více než 90 % je jeho teplota na bodu tání. To znamená, že dochází velmi snadno k deformaci sněhové pokrývky



**Obr. 1. Vizualizace sklonu, expozice a zakřivení reliéfu v oblasti Obřího dolu**

Vysvětlivky: A – sklon ( $^{\circ}$ ), B – expozice ( $0^{\circ} = 360^{\circ}$  – východ,  $90^{\circ}$  – sever,  $180^{\circ}$  – západ,  $270^{\circ}$  – jih), C – vertikální zakřivení ( $m^{-1}$ ), D – horizontální zakřivení ( $m^{-1}$ )

ky v důsledku její vlastní váhy, což způsobuje velmi rychlé změny v její struktuře a pevnosti. Sníh je tvořen z ledových částic, a tak jakékoliv přimíšení vody ať už ve formě deště, nebo povrchového tání značně ovlivňuje svahovou stabilitu sněžové pokrývky. Tato voda snižuje tření na potenciálních skluzných horizontech, přidává hmotnost a rozpouští sníh, což způsobuje ztrátu koheze a pevnosti (McClung, Schaerer, 2006).

Ve sněžové pokrývce působí množství faktorů a probíhá množství procesů, jejichž výsledkem jsou různé deformace. Tři hlavní typy jsou deformace z napětí v tahu, tlaku a ve smyku. Obvykle působí kombinovaně. Při tahu jsou částice od sebe odtrhávány, při tlaku stlačovány k sobě dohromady a ve smyku tlačeny přes sebe. Z hlediska lavinového nebezpečí je pro sněžovou pokrývky rozhodující pevnost ve smyku. Pokud totiž působící napětí ve smyku dosáhne smykové pevnosti nebo ji překročí, dojde k odtrhu laviny.

#### **Analýza lavinového rizika na území Krkonošského národního parku**

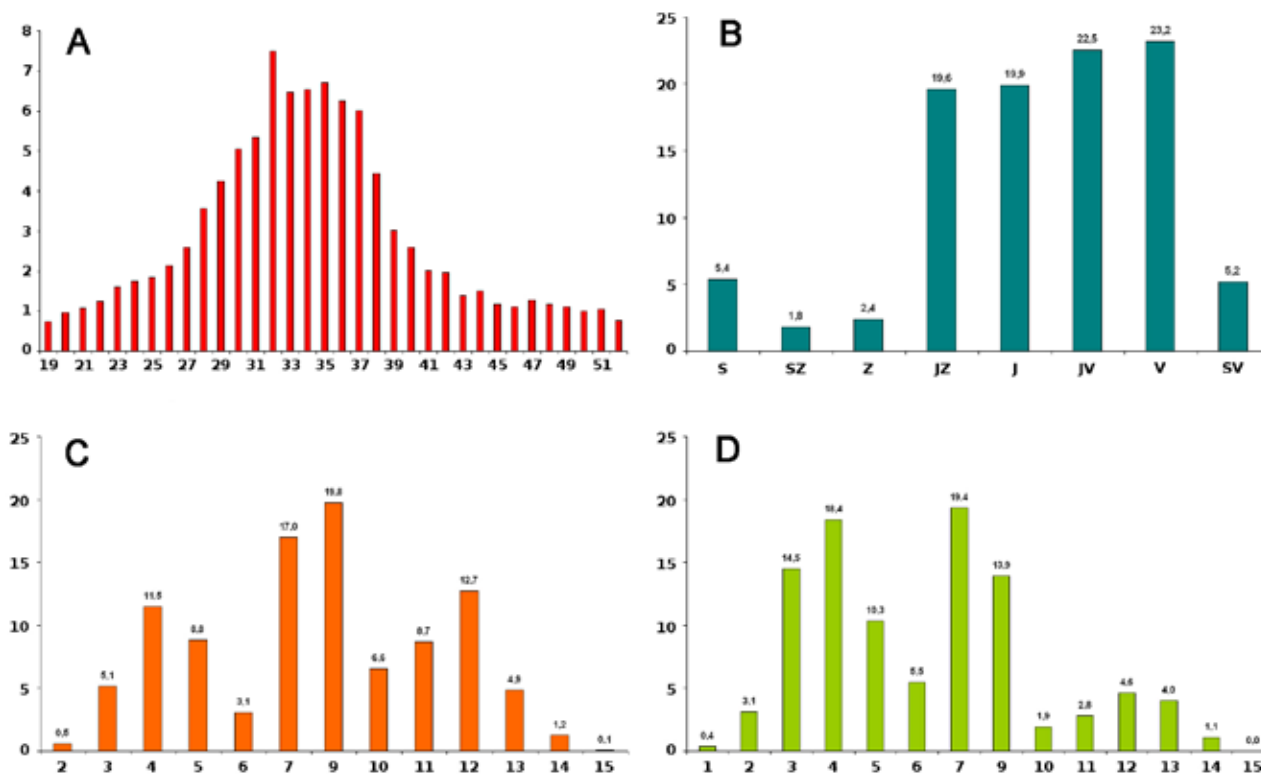
Tato studie je zaměřena na analýzu české části Krkonoš s cílem lokalizovat oblasti s potenciálním lavinovým rizikem. Nejedná se tedy o stanovení aktuálního lavinového nebezpečí, ale o určení rizikových svahů, na kterých v případě snížené stability sněžové pokrývky objektivně hrozí pád laviny.

V případě opomenutí aktuálních klimatických a sněžových podmínek lze za determinující faktory ovlivňující riziko pádu laviny považovat morfologii daného území,

vliv půdního pokryvu a především vegetace. S ohledem na tento fakt se analýza lavinového rizika na území KR-NAP-u dělí do dvou částí. První představuje vytvoření mapy morfologického rizika, která zohledňuje základní charakteristiky reliéfu mající vliv na pád laviny. Jsou to především sklon svahu a jeho změny, jeho expozice a zakřivení. Druhou částí je vytvoření mapy ochranného vlivu vegetace. Vzhledem k součinnosti obou skupin vlivů je závěrečným krokem spojení těchto map a vytvoření mapy potenciálního lavinového rizika.

Pro hodnocení lavinového rizika na zvolené lokalitě je třeba vycházet ze základních faktů o tomto fenoménu. Pád laviny zcela nepochybně ovlivňuje mocnost sněžové pokrývky, její struktura (vrstvy, vazby mezi nimi) a celá řada povětrnostních faktorů (teplota, vítr, radiační bilance apod.). Na druhou stranu jsou všechny tyto faktory naprosto irelevantní v případě, že působí na stanovišti nevhodném pro laviny. Jejich další společnou charakteristikou je skutečnost, že se v čase i prostoru poměrně snadno a rychle mění.

S lavinami se lze setkat výlučně v horském terénu na svazích s lavinově příznivými podmínkami, jež jsou primárně určeny morfologií terénu. Na příznivých svazích může být lavinové riziko částečně nebo zcela eliminováno přítomností překážek, například v podobě vzrostlého lesa nebo jiného druhu vegetace. Tvar terénu lze považovat za konstantní a také vegetační kryt je v porovnání s výše uvedenými faktory (jako např. teplota vzduchu) v čase i prostoru relativně stálý, pokud se neberou do úvahy různé kalamitní situace, jako jsou například požáry, polomy, imise, přemnožení škůdců nebo právě pád



**Obr. 2. Procentuální zastoupení sklonu, expozice a křivosti na testovacím souboru odtrhových zón v oblasti Obřího dolu**  
 Vysvětlivky: osa x: A – sklon (°), B – expozice, C – vertikální zakřivení (m<sup>-1</sup>), D – horizontální zakřivení (m<sup>-1</sup>); osa y – procenta

laviny. Z tohoto důvodu jsou tyto dvě skupiny vlivů hodnoceny při tvorbě mapy lavinového rizika.

### Mapa morfologického rizika

Tvorba mapy morfologického rizika představuje zohlednění významných vlastností reliéfu s ohledem na možnost lavinového rizika. Jak již bylo uvedeno, základním faktorem je sklon svahu a jeho změny. Dalšími charakteristikami terénu, které je možné pomocí nástrojů GIS dobře popsat, jsou expozice svahu a jeho zakřivení (horizontální a vertikální).

Všechny tyto charakteristiky je možné získat z digitálního modelu terénu (DTM – *Digital Terrain Model*). Z toho je jasné, že kvalita výsledné mapy závisí primárně na kvalitě vstupního DTM.

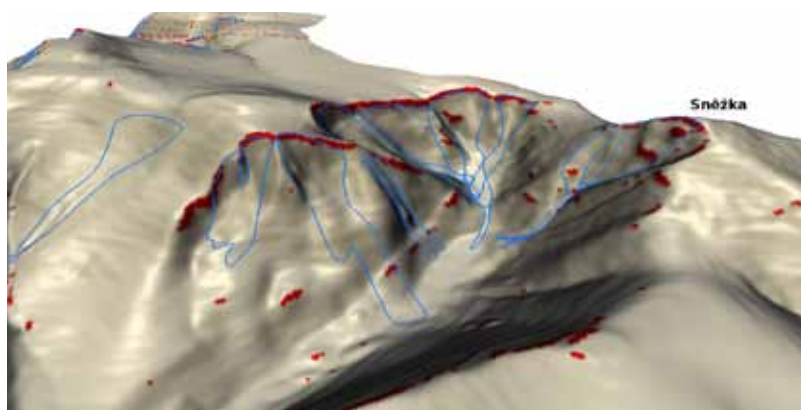
Pro odvození charakteristik odtrhových zón sloužila jako vstupní data vrstva lavinových drah lavinového katastru české části Krkonoš, z níž byla pro tyto potřeby odvozena vrstva odtrhových zón. Z takto vytvořených odtrhových zón o celkovém počtu 66 bylo náhodně vybráno 33 polygonů, které představují testovací soubor, z něhož byly získány jeho charakteristiky, na jejichž základě vznikl model pro tvorbu mapy morfologického rizika. Zbylých 33 polygonů bylo ponecháno jako validační soubor pro ověření výsledků modelu aplikovaného na celé území.

Doplňujícím krokem byla výpočtem provedená lokalizace odtrhových zón splňujících stanovenou podmínku, kterou, jak popisují Ciolli, Zatelli (2000), je změna sklonu svahu minimálně o 10°. V této studii je podmínka rozšířena o nutnost konvexního průběhu zmíněné změny. Na takových místech dochází jednak ke zvýšenému tahovému napětí sněhové vrstvy a v případě, že se jedná o závětrný svah, také k ukládání velkého množství sněhu (vznik převějí) a tím, samozřejmě, k narůstání zatížení. Obě tyto skutečnosti při splnění dalších podmínek, jako např. minimální sklon svahu, představují zvýšené riziko z hlediska lavinového nebezpečí.

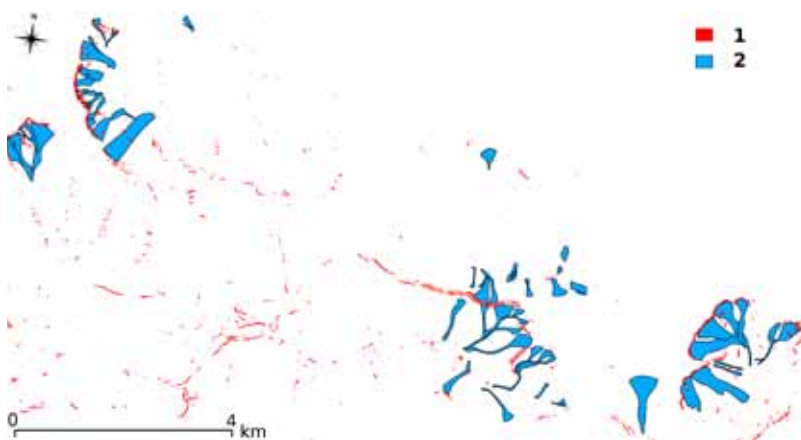
Takto získané plochy byly použity jako počáteční oblasti pro výpočet odtokových charakteristik, tedy po svahu dolů, a to do té doby, dokud je sklon svahu větší než 10°. Hodnota sklonu 10° pochází z matematických analýz a celosvětových zkušeností s většími lavinami, které se v typickém horském terénu obvykle zastavují při sklonu svahu právě okolo 10° (McClung, Schaerer, 2006). Je jisté, že pohybující se masa sněhu se nebude na svahu chovat stejně jako tekoucí voda. Nicméně základní princip pohybu po svahu směrem dolů cestou nejmenšího odporu zde zůstává, a právě toho je využito při počítání odtokových charakteristik. Takto získaná mapa podává informaci nejen o rizikových odtrhových zónách, ale i přibližnou informaci o průběhu lavinových drah.

Tab. 1. Morfologické charakteristiky

Sklon (°)	Faktor sklonu	Expozice	Faktor expozice	Třída vertikálního zakřivení (m <sup>-1</sup> )	Faktor vertikálního zakřivení	Třída horizontálního zakřivení (m <sup>-1</sup> )	Faktor horizontálního zakřivení
28 – 39	1	JZ – V	1	9 – 15	1	1 – 7	1
19 – 28; 39 – 52	0,9	SV – S	0,8	1 – 8	0,95	8 – 15	0,95
14 – 19; 52 – 60	0,6	SZ – Z	0,7				
10 – 14; 60 – 70	0,4						
0 – 10; 70 – 90	0						



Obr. 3. Detekované odtrhové zóny v oblasti Obřího dolu (plošná značka) a skutečné lavinové dráhy (linie)



Obr. 4. Detailní pohled na detekované odtrhové zóny v oblasti Obřího dolu  
Vysvětlivky: 1 – vypočítané odtrhové zóny (plošná značka), 2 – skutečné lavinové dráhy (linie)

Pro získání základních morfologických charakteristik odtrhových zón byla použita jejich vrstva, vytvořená na základě dat lavinového katastru české části Krkonoš, přesněji náhodně vybraná polovina z těchto lokalit. Druhá polovina byla ponechána pro vyhodnocení přesnosti analýzy celého území s pomocí vytvořeného modelu (obr. 1, 2).

V případě sklonitosti je patrné, že nejvíce jsou v odtrhových zónách zastoupeny sklony od 32° do 37° (celkem 39 %). Nejnižší hodnota sklonu je 19°, nejvyšší 52°. Nejčastější expozice odtrhových zón je od JZ směru až

po její vrchol ve V směru. Naopak, nejméně zastoupené jsou Z a SZ expozice.

Rozložení hodnot vertikálního zakřivení ukazuje, že nejvíce pixelů patří do tříd 9 a 7 (konvexní a konkávní,  $r > 1\,000$  m), ale významné zastoupení mají i některé další třídy. Naopak, jiné třídy zcela chybí. Z těchto výsledků, bohužel, nelze vyvodit přímou vazbu tohoto faktoru na lavinovou aktivitu.

U horizontálního zakřivení je situace trochu odlišná. Maximum sice také patří do třídy 7 (konkávní,  $r > 1\,000$  m), ale je zde výrazný nárůst u tříd 3 a 4 (konkávní,  $r = 100 - 500$  m). Naopak, u konvexních tříd má významné zastoupení pouze třída 9 ( $r > 1\,000$  m). Z toho lze usuzovat, že z pohledu horizontálního zakřivení jsou konkávní svahy o něco nebezpečnější.

Pro multikriteriální analýzu byly stanoveny třídy hodnot čtyř faktorů: sklon, expozice, vertikální a horizontální zakřivení. U všech faktorů kromě vertikálního zakřivení byly hodnoty rozčleněny do tříd na základě výsledků zonálních statistik testovacího souboru odtrhových zón. Rozdělení vertikálního zakřivení do dvou tříd bylo vzhledem k neprůkazným výsledkům zonální statistiky založeno na teoretickém podkladu vyššího tahového napětí na konvexních svazích. Hodnoty jednotlivých faktorů jsou patrné z tab. 1.

Naprosto rozhodující vliv na pád lavin má sklon svahu, proto i při multikriteriální analýze má tento faktor nejvyšší váhu. Druhou nejvyšší váhu, i když výrazně menší, má faktor expozice svahu. Faktory zakřivení svahů jsou spíše doplňující. Faktory nabývají hodnot v intervalu od 0 do 1. Hodnota 1 představuje maximální riziko, zatímco 0 reprezentuje jeho absenci. Stejná stupnice platí i pro výslednou mapu získanou součinem všech faktorů.

Vrstvy jednotlivých faktorů byly vytvořeny v prostorovém rozlišení 5 m, následně byla provedena multikriteriální analýza, a to vynásobením jednotlivých

vrstev mezi sebou, čímž vznikla mapa morfologického rizika s hodnotami od 0 do 1. Čím vyšší hodnota, tím vyšší morfologické riziko pádu laviny.

### Lokalizace odtrhových zón – terénní zlomy

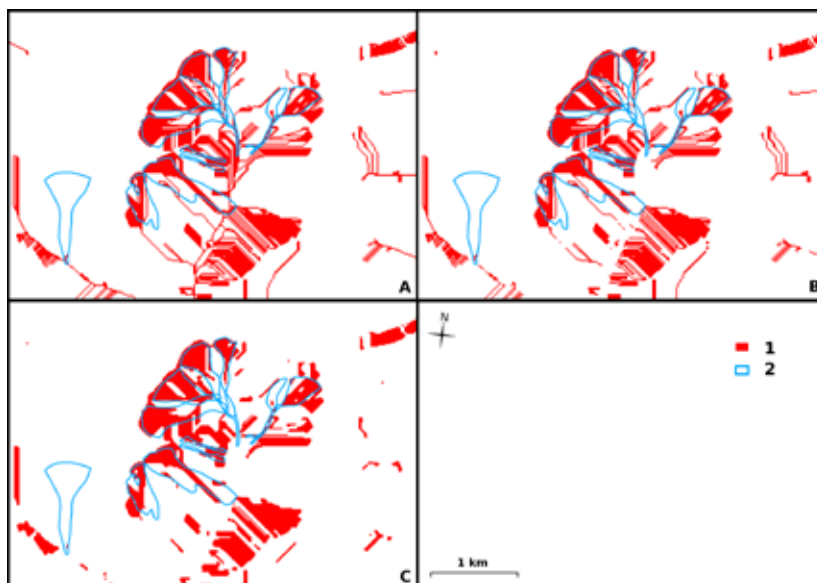
Z hlediska problematiky odtrhových zón jsou zajímavé také oblasti, na nichž dochází k výraznějším změnám ve sklonu svahu. Ciolli, Zatelli (2000) stanovují podmínku změny sklonu minimálně o  $10^\circ$ . V této studii je podmínka rozšířena o nutnost konvexního průběhu zmíněné změny. Jsou tedy hledána místa, kde méně příkrý svah nebo rovina přechází v prudší (ve směru po svahu dolů) a kde rozdíl ve sklonitosti přesahuje stanovenou hranici. Pokud jde o závětrné oblasti, může zde docházet k významné akumulaci sněhu a vzniku převějí, což z hlediska vzniku lavinových odtrhů může hrát zásadní roli.

Tento výpočet byl postupně zkoušen při různých hodnotách prostorového rozlišení DTM. Nejlepších výsledků bylo dosaženo při rozlišení  $15 \text{ m.px}^{-1}$ , čímž došlo k eliminaci menších terénních nerovností, ale větší významné terénní hrany byly zachovány.

Na obr. 3 je vidět, že většina horních partií lavinových drah v oblasti Obřího dolu splňuje stanovenou podmínku a že lze tento způsob výpočtu při hledání odtrhových zón použít. V případě lavinové dráhy č. 8 – Modrý důl (vlevo) ke splnění této podmínky nedochází (obr. 3). Obr. 4 ukazuje situaci na všech lavinových drahách na české straně Krkonoš. U většiny drah lze tímto způsobem lokalizovat odtrhové zóny, ale nelze tento výpočet považovat za zcela určující. Pokud se ovšem tyto výsledky zakomponují do již vytvořené vrstvy morfologického rizika, vzniká vrstva s vyšší vypovídací hodnotou.

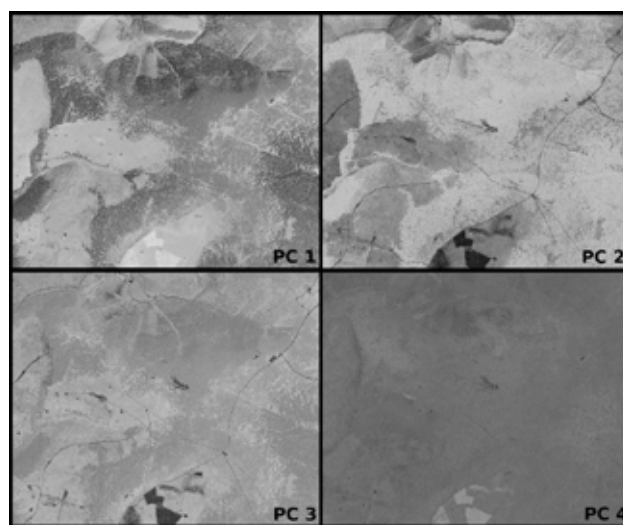
Pro sloučení vrstvy morfologického rizika s vrstvou odtrhových zón lze např. tuto vrstvu reklasifikovat do podoby, kdy detekované zlomy mají hodnotu 1,1 a zbytek území hodnotu 1. Vynásobením obou vrstev a následnou lineární transformací zpět do intervalu od 0 do 1 vznikne požadovaný výstup, ve kterém jsou tyto oblasti z pohledu morfologického rizika zvýrazněny oproti ostatnímu území.

Vrstvu zjištěných odtrhových zón lze dále použít pro orientační zjištění průběhu lavinových drah z takto vymezených lokalit. K tomu lze opět použít digitální model terénu a s jeho pomocí spočítat odtokové charakteristiky z těchto míst, které by měly poskytnout přibližný možný průběh lavinových drah. Samozřejmě, že dynamika sněhové masy je odlišná od povrchového



**Obr. 5. Vypočtené a skutečné lavinové dráhy v oblasti Obřího dolu**

Vysvětlivky: 1 – vypočtené odtrhové zóny, 2 – skutečné lavinové dráhy; Modely: A – neupravený výstup, B – pouze sklony  $> 10^\circ$ , C – po aplikaci modusového filtru

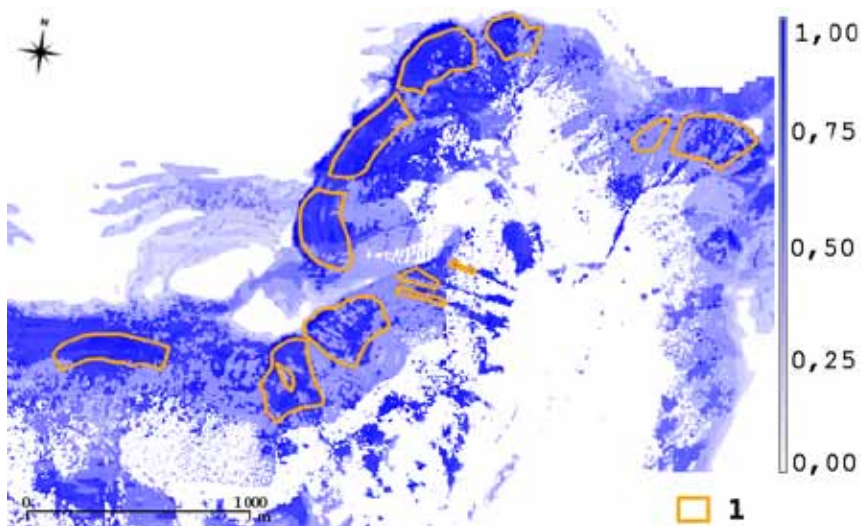


**Obr. 6. Analýza hlavních komponent (PCA) v oblasti Obřího dolu**

Vysvětlivky: PC1 – 1. komponenta, PC2 – 2. komponenta atd.

odtoku, základní (gravitační) mechanismus platí však i pro laviny, a proto lze tento postup pro získání orientačních průběhů lavinových drah použít.

Z takto vytvořené vrstvy orientačního průběhu lavinových drah byly odstraněny oblasti se sklonem  $< 10^\circ$ , protože při tomto sklonu svahu obvykle dochází k zastavení lavin. Nakonec byl použit modusový filtr, který odstranil nežádoucí liniové prvky a, naopak, vyplnil menší díry v plošných prvcích (obr. 5).



Obr. 7. Náchylnost území k lavinám pro Obří a Modrý důl  
Vysvětlivky: 1 – odtrhové zóny; Lavinové riziko: 0 – bez rizika, 1 – největší riziko

### Mapa ochranného vlivu vegetace

Při tvorbě této mapy je stav pokrytí zemského povrchu klasifikován do zvolených kategorií s ohledem na význam určitého druhu vegetace z hlediska jeho ochranného vlivu. Zcela jistě představuje svah pokry-

tý smrkovým porostem naprosto jinou lavinovou situaci než svah holý nebo pokrytý trávou. Lesní porost je skutečně významným ochranným prvkem. Ani ten ale často není schopen zastavit mocnou lavinu, která se utrhla někde nad ním. Jeho význam spočívá především v tom, že v místě jeho výskytu brání vytvoření homogenní sněhové vrstvy a tím vzniku laviny právě na tomto území.

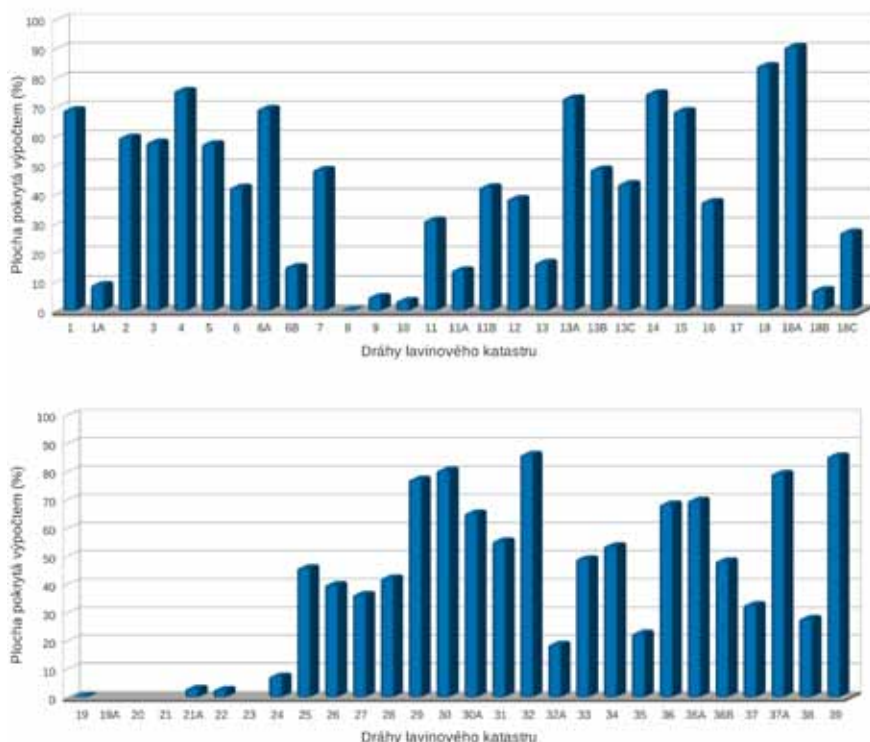
Při tvorbě mapy ochranného vlivu vegetace je tedy cílem rozčlenit zájmové území do předem definovaných tříd. S ohledem na účel členění a charakter vegetace na území KRNAP-u byly stanoveny tyto tři třídy:

- hustá stromová vegetace (především smrkový porost);
- nízká dřevinná vegetace (především kleč);
- traviny a plochy bez vegetace.

Takovou mapu lze vytvořit celou řadou způsobů, zahrnujících mapování přímo v terénu, ruční digitalizaci nad leteckými či družicovými snímky, reklasifikaci jiné vhodné existující mapy obsahující požadované informace nebo metodou použitou v rámci této studie, tedy řízenou klasifikací obrazových dat, v tomto případě spektroskopálních leteckých snímků.

Obecně lze za klasifikaci obrazových dat považovat třídění objektů do určitých tříd. Jednou ze základních metod dálkového průzkumu Země (DPZ) je tzv. příznaková klasifikace, která spočívá ve vytvoření spektrálních příznaků na základě multispektrálního obrazu. Spektrální příznaky představují změny radiční veličiny v závislosti na změně druhového či stavového parametru. Druhové parametry určují příslušnost objektu k nějakému druhu (voda, les, silnice apod.), zatímco stavové parametry popisují stav objektu (vlhkost, hustota, stáří, zdravotní stav apod.). Při klasifikaci tedy dochází k třídění obrazových pixelů na základě rozhodovacího pravidla (klasifikátoru) do skupin o podobných vlastnostech.

Počet pásem obrazových dat (v tomto případě leteckých snímků) určuje počet pixelů vstupujících do procesu klasifikace pro



Obr. 8. Hodnocení vypočtených lavinových drah v Krkonošském národním parku – srovnání se skutečným stavem popsáním v lavinovém katastru  
Vysvětlivky: 1, 1A, ... 39 – čísla lavinových drah

každou jednotku prostorového rozlišení. Množina těchto pixelů se označuje jako spektrální vektor. Klasifikační algoritmus poté separuje tyto spektrální vektory do předem stanovených tříd (voda, les, holá půda apod.). Při klasifikaci dojde nejprve k analýze podobnosti spektrálních vektorů v ohledu na spektrální odrazivost (naplnění příznakového prostoru) a poté k vlastní klasifikaci, tedy přiřazení k určitým třídám.

Pro klasifikaci byly použity spektrozónální letecké snímky poskytnuté Správou KRNAP-u. Z nich byly odvozeny ještě další dvě rastrové vrstvy. Byla to vrstva reprezentující normalizovaný diferenční vegetační index (NDVI) a analýza hlavních komponent (PCA).

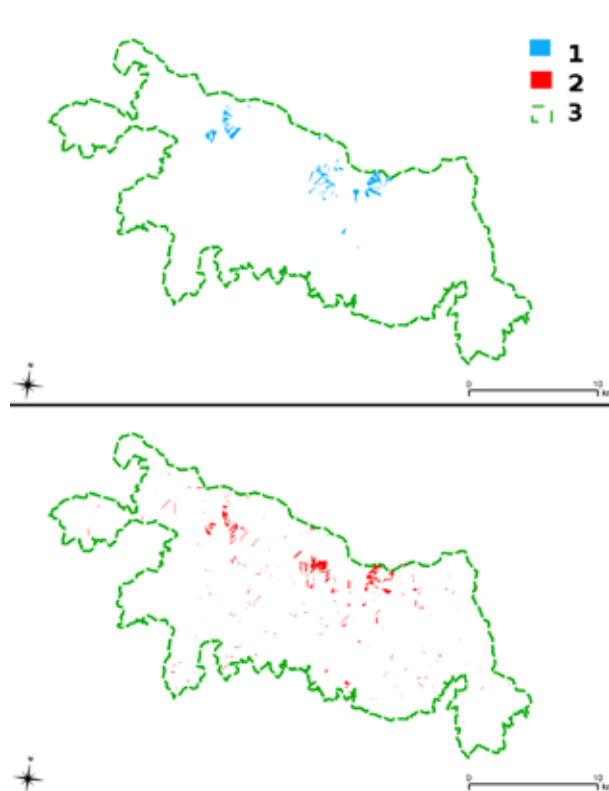
Vegetační indexy se řadí k metodám zvýrazňování obrazu právě za účelem zvýraznění zeleně v obraze. Jde o operace s pásmy multispektrálního obrazu, nejčastěji s pásmem červeným (RED) a blízkým infračerveným (NIR). Pásmo NIR je obecně považováno za nejdůležitější, pokud se s daty DPZ mají provádět analýzy vegetačního krytu. V něm totiž vegetace velkou část záření odráží, a jsou tedy lépe postřehnutelné rozdíly mezi jednotlivými typy vegetace nebo změny v jejím zdravotním stavu (Mísáková, 2009).

Analýza hlavních komponent je další metodou zvýrazňování obrazu pomocí vícepásmových manipulací s multispektrálním obrazem. PCA je statistická metoda, která stanovuje nové osy vícerozměrného prostoru (multispektrálního snímku), a to ve směru maximálního rozptylu dat (Mísáková, 2009). Je tak vytvořen nový souřadný systém, jehož osy se nazývají hlavní komponenty. První a druhá hlavní komponenta obvykle obsahují kolem 95 % informací ze všech pásem. Komponent lze vytvořit tolik, kolik je pásem obrazu, přičemž poslední komponenty obsahují převážně šum. Metoda PCA se tedy používá k odstranění šumu, de-korelaci dat pro automatickou klasifikaci a redukci pásem pro následné analýzy (Mísáková, 2009; obr. 6). Výsledkem řízené klasifikace s použitím všech pěti pásem (NIR, RED, GREEN, NDVI a 1. komponenta z PCA) je nová mapová vrstva, reprezentující tři zvolené třídy vegetačního krytu s příslušnou hodnotou faktoru lavinového rizika. Jsou to hustá stromová vegetace ( $f=0$ ), nízká dřevinná vegetace ( $f=0,5$ ) a traviny a plochy bez vegetace ( $f=1$ ).

### Tvorba výsledné mapy lavinového rizika

Jak již bylo uvedeno výše, výslednou mapu lze získat kombinací jejích dvou složek – mapy morfologického rizika a mapy ochranného vlivu vegetace. Vzhledem k tomu, že obě tyto mapy nabývají hodnot od 0 do 1 s tím, že čím vyšší číslo, tím vyšší riziko, lze výslednou mapu získat jejich vynásobením. Získaná mapa lavinového rizika bude mít stejný rozsah hodnot a také stejný způsob interpretace (obr. 7).

Vzhledem k tomu, že v oblastech s hustou stromovou vegetací je riziko odtrhu tak malé, že je možné ho teoreticky vyloučit, lze také omezit vypočítané odtrhové zóny



**Obr. 9. Porovnání vypočtených a skutečných lavinových drah v Krkonošském národním parku se zákresem lavinového katastru**

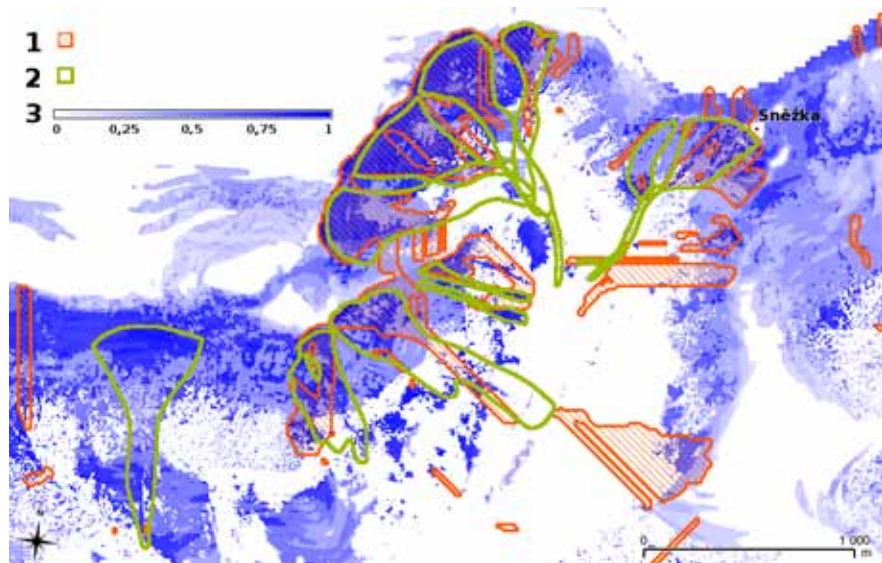
Vysvětlivky: 1 – vypočítané lavinové dráhy (horní obrázek), 2 – skutečné lavinové dráhy (dolní obrázek), 3 – hranice národního parku

(na základě výrazné změny sklonu) pouze na zbylé dvě kategorie, tedy oblasti bez vegetace, traviny a kleč, a pro ně zopakovat výpočet lavinových drah.

Srovnání vypočítaných drah bylo provedeno se zákresy lavinového katastru, z nichž byly odfiltrovány spodní části s hodnotou sklonu svahu menší než  $10^\circ$ , kterou byl omezen výpočet odtokových charakteristik. Tyto oblasti reprezentují extrémní dojezdy zaznamenané pouze ve výjimečných případech během sledovaného období (často pouze jednou).

Výsledky hodnocení ukazuje obr. 8. Z něj je patrné, že výsledky výpočtu jsou pro konkrétní dráhy lavinového katastru různé. V 10 případech je výpočtem pokryto více než 70 % drah lavinového katastru. V dalších 20 případech je to 40 – 70 %, ve 13 případech 10 – 40 % a ve 14 případech včetně 5 drah, jež nebyly výpočtem zasaženy vůbec, méně než 10 %.

Vzhledem k způsobu výpočtu (odtokové charakteristiky) jsou spodní části některých vypočítaných drah užší než dráhy skutečné, protože pohybující se sněhová masa se na rozdíl od vody tolik nesoustřeďuje do koncentrovaného odtoku, což částečně snižuje hodnotu procentuálního vyjádření správně vypočítané plochy.



**Obr. 10. Náchylnost území k lavinám v oblasti Obřího dolu**  
 Vysvětlivky: 1 – vypočítané lavinové dráhy, 2 – skutečné lavinové dráhy, 3 – stupeň náchylnosti k lavinám: 0 – bez náchylnosti, 1 – maximální náchylnost

Dráhy, u nichž byla vypočítána jen velmi malá nebo žádná plocha, představují případy, ve kterých nebyla splněna základní podmínka tohoto výpočtu, již je změna sklonu nejméně o 10°. V odtrhových oblastech všech těchto drah je ovšem hodnota náchylnosti terénu ke sněhovým lavinám (výsledná mapa lavinového rizika) buď střední, anebo vysoká v závislosti na přítomné vegetaci (obr. 8, 9).

Na závěr byly takto vypočítané dráhy převedeny do vektorového formátu a zakomponovány do výsledné mapy lavinového rizika, čímž vznikla konečná mapa obsahující stupeň rizika výskytu odtrhových zón včetně orientačního průběhu některých možných lavinových drah. Ukázka takové mapy z oblasti Obřího dolu je na obr. 10. Součástí mapy je pro srovnání také zakreslavinových drah lavinového katastru české části Krkonoš.

Výsledná mapa náchylnosti území ke sněhovým lavinám, do níž byly zakomponovány vypočítané lavinové dráhy a pro srovnání také dráhy dokumentující skutečnou situaci za posledních 50 let, poskytuje informaci o lavinovém riziku na české straně Krkonoš s ohledem na morfologii tohoto území a vegetační kryt. Z mapy je patrné, že oblasti, na kterých již byla zaznamenána lavinová aktivita, skutečně vykazují především vysoké, v některých případech středně vysoké lavinové riziko. Na první pohled je však také z mapy zřejmé, že je v Krkonoších podle tohoto modelu mnoho oblastí s vysokým stupněm náchylnosti, ale od roku 1962, kdy začalo v našem nejvyšším pohorí pečlivé sledování lavinové aktivity, na těchto místech k žádnému pádu nedošlo. Nelze ale vyloučit, že k tomu nedošlo někdy dříve v minulosti nebo se tak nestane někdy v budoucnu. Nicméně nedojde-li např. k nějaké výraznější změně ve vegetačním krytu sledovaného území, pravděpodobnost vzniku zcela nové lavinové dráhy není

příliš velká. S největší pravděpodobností by se již během 50 sledovaných zimních sezón projevila (na některých drahách spadnou laviny i několikrát do roka). Spíše dochází, např. v důsledku odumírání smrkových porostů v odtrhových oblastech, k rozšiřování odtrhových zón již popsaných lavinových drah, a tím ke vzniku jejich nových variant.

\* \* \*

Oblasti s vysokým rizikem, ale dosud nezaznamenaným pádem laviny poukazují na fakt, že morfologické a vegetační faktory jsou pro vznik lavin sice zásadní, ale nejsou jediné. Rozhodující vliv mají, samozřejmě, povětrnostní faktory, a to především výška a vlastnosti sněhové pokrývky.

Tyto faktory však patří k hodnocení aktuální lavinové situace, což není předmětem tohoto modelu. Nicméně některé povětrnostní jevy, např. převládající větrné proudění, které má zásadní vliv na distribuci sněhu, by bylo jistě možné do modelu také zakomponovat. Převládající směr větru je částečně zohledněn faktorem expozice svahu. V horském terénu jsou ale anemo-orografické systémy mnohem složitější. Právě jejich kvalitní zpracování by mohlo být dalším krokem, který by možnosti tohoto modelu rozšířil.

Celá studie byla provedena pomocí nástrojů geografických informačních systémů (GIS). V dnešní době je k dispozici celá řada programů z této kategorie. Za zmínku jistě stojí fakt, že v tomto případě byly použity výhradně volně dostupné programy zaštitěné organizací *The Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo), konkrétně GRASS GIS a qGIS.

#### Literatura

- Ciulli, M., Zatelli, P.: *Avalanche Risk Management Using GRASS GIS*. In: Brovelli, M. A. (ed.): *Geomatics Workbooks Nr. 1*. Como: Geomatics Laboratory – Politechnic of Milan, 2000, p. 12.
- McClung, D., Schaerer, P.: *The Avalanche Handbook*. Seattle: The Mountaineers Books, 2006, 344 p.
- Misáková, L.: *Vliv prostorové rozlišovací schopnosti na výsledky klasifikace dat DPZ, návrh využití pro mapování vegetace*. Disertační práce. Brno: Ústav geoinformačních technologií LDF Mendelovy univerzity, 2009, 110 s.
- Spusta, V.: *Laviny v Krkonoších. Vrchlabí: Správa Krkonošského národního parku, 2006, 32 s.*

**Ing. Petr Suk, Ph.D., petr@suk@gmail.com**  
**CleverAnalytics, spol. s r. o., Vídeňská 101/119, 619 00 Brno, Česká republika**