UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE

Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie a kartografie

Ondřej Racek

MODELOVÁNÍ SNĚHOVÝCH LAVIN

Snow avalanche modelling

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce: Mgr. Jan Blahůt, Ph.D.

Praha, 2015

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval/a samostatně a že jsem uvedl/a všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 30. 6. 2015

Podpis

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce Mgr. Janu Blahůtovi, Ph. D. za pomoc, cenné rady a připomínky, které vedly ke zkvalitnění této práce. Dále děkuji konzultantovi RNDr. Michalu Jeníčkovi, Ph.D. za věcné připomínky ke struktuře a formální stránce práce, Mgr. Václavu Tremlovi, Ph.D za poskytnutá data.

Zadání práce

Cílem bakalářské práce je provést rešerši dosavadních přístupů k modelování sněhových lavin a aplikace vybraného modelu na lavinovou dráhu ležící na území Krkonoš. V rámci rešeršní části práce se existující modely posoudí z hlediska:

· měřítka modelování (lokální x regionální modely)

· dimenzionality (1D x 2D x 3D modely)

· podstaty modelování (empirické x statistické x fyzikální modely)

· vstupních dat

· aplikace (územní plánování, hodnocení ohrožení)

V aplikační části práce bude pomocí případové studie na vybrané dráze v Krkonoších otestován dostupný model a výsledky modelování budou následně porovnány a diskutovány s dostupnými historickými údaji.

Abstrakt

Modelování fyzickogeografických procesů je nedílnou součástí fyzické geografie a zároveň se velmi dynamicky rozvíjí. Stejně tak je tomu i v případě modelování sněhových lavin. Tato bakalářská práce podává ucelený přehled přístupů k modelování sněhových lavin a popisuje jejich základní principy. V aplikační části se práce zabývá využitím numerického modelu RAMMS pro modelování lavin v podmínkách Krkonoš, zejména možností použití koeficientů tření, které byly experimentálně stanoveny ve švýcarských Alpách a tabelizovány v uživatelském manuálu. Výsledky lavinového modelu RAMMS, vycházející ze 36-ti kombinací koeficientů tření jsou porovnávány z hlediska dosahu a plochy akumulace se skutečnou lavinou, jež spadla 10. 2. 2015. Z výsledků vyplývá, že koeficienty tření experimentálně určené ve švýcarských Alpách je možné využít i v podmínkách Krkonoš a pro jejich správné určení je vhodné řídit se dosahem skutečné laviny. Výsledky modelů rovněž ukazují na silné nadhodnocování plochy akumulace.

Klíčová slova: sněhové laviny, modelování, Krkonoše

Abstract

Modelling of dynamic processes in physical geography is its inherent part and it is quickly developing discipline nowadays. This trend is noticeable also in the case of snow avalanche modelling. This bachelor thesis summarizes existing snow avalanche modelling approaches and describes its principles. In the application part the thesis focuses on application of RAMMS numerical model in the area of the Krkonoše Mts. Special attention is paid on applying friction values experimentally set in the conditions of Swiss Alps to conditions of Central Europe middle mountain range. RAMMS modelling was calibrated using real case of avalanche fallen on February 10th 2015. Totally, 36 combinations of friction values were assessed and compared with snow avalanche run out and accumulation area. Results show, that friction values from Swiss Alps are applicable in the Krkonoše Mts. and its determination should be based solely on run out distance. It is because RAMMS results tend to overestimate the real accumulation area of the snow avalanches.

Key words: snow avalanches, modelling, Krkonoše Mountains

Obsah

Seznam obrázků 8

Seznam tabulek 9

1 Úvod a cíle práce 10

1.1 Témata a cíle práce 12

2 Typy lavin a jejich vlastnosti 13

2.1 Slovník pojmů 13

2.2 Definice laviny 14

2.3 Vlastnosti lavin 14

2.3.1 Síly působící uvnitř a vně laviny 14

2.3.2 Síly působící při odtrhu laviny 16

2.3.3 Pohyb laviny 17

2.4 Typy lavin 18

2.4.1 Laviny ze suchého prachového sněhu 18

2.4.2 Laviny z vlhkého prachového sněhu 18

2.4.3 Laviny z deskového sněhu 18

2.4.4 Laviny z pohyblivého sněhu 19

2.4.5 Firnové laviny 19

2.4.6 Laviny typu slushflow 19

2.5 Typy lavin z hlediska modelování 19

3 Historické a současné přístupy v modelování lavin 20

4 Typy lavinových modelů, jejich principy a přehled 23

4.1 Statistické modely 23

4.2 Empirické modely 25

4.3 Mass point modely 27

4.4 Hydraulické modely 28

4.5 Kinetické modely 30
4.6 DEM modely 32
4.7 Modely založené na mechanice kontinua 34
4.8 Analogové modely 35
4.8.1 Analogové modely deskových lavin 36
4.8.2 Analogové modely prachových lavin 38
4.9 Přehled používaných lavinových modelů 40
5 Fyzicko-geografická charakteristika modelového území 41
5.1 Geologické poměry 42
5.2 Geomorfologické poměry 43
5.3 Klimatické poměry 45
5.4 Hydrologické poměry 50
5.5 Půdy 50
5.6 Vegetace 51
5.7 Vlastnosti dráhy Modrý důl 53
5.8 Spadlé laviny na dráze v Modrém dole 53
6 Případová studie – Modrý důl v Krkonoších 54
6.1 Rekonstrukce (back calculation) pádu z února 2015 54
6.1.1 Vlastnosti laviny z 10. 2. 2015 55
7 Metodika 56
7.1 Použitá data 56
7.2 Postup zpracování 57
7.3 Použitý model 58
7.3.1 RAMMS lavinový modul 59
7.4 Výběr kombinací parametrů 59
7.5 Porovnání s délkou a plochou 60

8 Výsledky 61
8.1 Vliv koeficientů na modelovanou lavinu 61
8.2 Výsledky modelování laviny 10. 2. 2015 63
8.2.1 Modelování s parametry běhu modelu č. 11 (shodný dosah) 64
8.2.2 Modelování s parametry běhu modelu č. 24 (shodná plocha akumulace) 66
8.2.3 Modelování s automaticky generovanými parametry 68
8.2.4 Modelování plochy akumulace pomocí reklasifikace 69
9 Diskuze 70
9.1 Modely sněhových lavin 70
9.2 Model RAMMS 72
9.3 Modelování laviny v Modrém dole 72
10 Závěr 74
11 Použité zdroje 75
11.1 Literatura 75
11.2 Mapové a další zdroje 80
11.3 Použitý software 81

Seznam obrázků

Obr. 1: Sezónní počet obětí lavin v USA. 11
Obr. 2: Počet evidovaných lavin v České části Krkonoš. 12
Obr. 3: Základní morfologické části laviny. 14
Obr. 4: Schematické znázornění sil působících při suchém (Coloumbovském) tření. 15
Obr. 5: Schematické znázornění vertikálního profilu rychlosti proudění v lavině. 15
Obr. 6: Rozdělení lavinových modelů 23
Obr. 7: Statistický model maximálního dosahu laviny 24
Obr. 8: Schéma analogového modelu laviny 36
Obr. 9: Analogový model laviny ze skleněných zrn 37
Obr. 10: Analogový model laviny s překážkou 37
Obr. 11: Analogový model prachové laviny 39
Obr. 12: Lavinová dráha Modrý důl. Půdorys dle lavinového katastru Krkonoš 41
Obr. 13: Geologická mapa okolí lavinové dráhy Modrý důl 43
Obr. 14: Výšková členitost okolí lavinové dráhy Modrý důl. 45
Obr. 15: Průměrný měsíční úhrn srážek a průměrná měsíční teplota na stanici Pec p. Sněžkou v letech 1962 až 2014 46
Obr. 16: Průměrný měsíční úhrn srážek a průměrná měsíční teplota na stanici Luční bouda v letech 2004 až 2014 47
Obr. 17: Vývoj sněhové pokrývky na stanicích Pec pod Sněžkou a Luční bouda 48
Obr. 18: Roční vývoj větrného proudění na stanicích Pec pod Sněžkou a Luční bouda. ... 49
Obr. 19: Schéma podélného profilu AO systému ve Vysokých Sudetech. 50
Obr. 20: Přehledová půdní mapa Krkonošského národního parku 51
Obr. 21: Pohled na spadlou lavinu přes údolí Modrého potoka 55
Obr. 22: Rozdělený polygon odtrhu v programu RAMMS 57
Obr. 23: Schéma lavinového modulu v modelu RAMMS. 59
Obr. 24: Spádnice laviny, maximální rychlosti proudění v lavině a průnik skutečné a modelované laviny na lavinové dráze Modrý důl 61
Obr. 25: Závislost dosahu modelované laviny na parametrech ξ a μ 62
Obr. 26: Závislost plochy akumulace modelované laviny na parametrech ξ a μ 63
Obr. 27: Porovnání výsledků modelů, pracujících s parametry tření běhu 11, o rozlišení 3 a 5 m. 65
Obr. 28: Porovnání výsledků modelů, pracujících s parametry tření běhu 24, o rozlišení 3 a 5 m. 67
Obr. 29: Porovnání modelů s variabilní výškou odtrhu vycházejících z automaticky vygenerovaných koeficientů tření. 69

Obr. 30: Porovnání výsledné modelované akumulace s reklasifikovanou akumulací. 70

Seznam tabulek

Tab. 1: Přehled dostupných lavinových modelů.. 40

Tab. 2: Údaje o spadlých lavinách na dráze Modrý důl. 54

Tab. 3: Kombinace parametrů Mu a Xi, jejich rozdělení podle typu lavinové dráhy, nadmořské výšky a periody pádu laviny pro lavinu typu „medium avalanche“. 60

Tab. 4: Jednotlivé běhy modelů, jejich parametry a výsledky. Nejlepší shoda z hlediska délky zvýrazněna červeně, nejlepší shoda z hlediska plochy akumulace zvýrazněna modře. 64

Tab. 5: Výstupy modelů, vycházejících z parametrů tření běhu 11 s proměnnou výškou odtrhu a jejich porovnání. 66

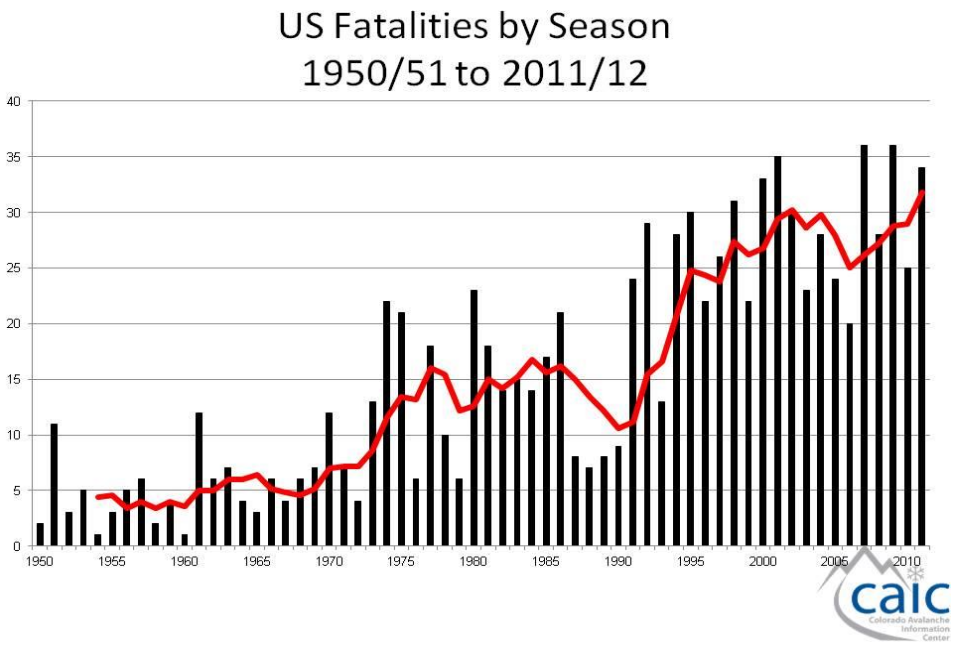
Tab. 6: Výstupy z modelů, vycházejících z parametrů tření běhu 24 s proměnnou výškou odtrhu a jejich porovnání 67

Tab. 7: Statistický model maximálního dosahu laviny 69

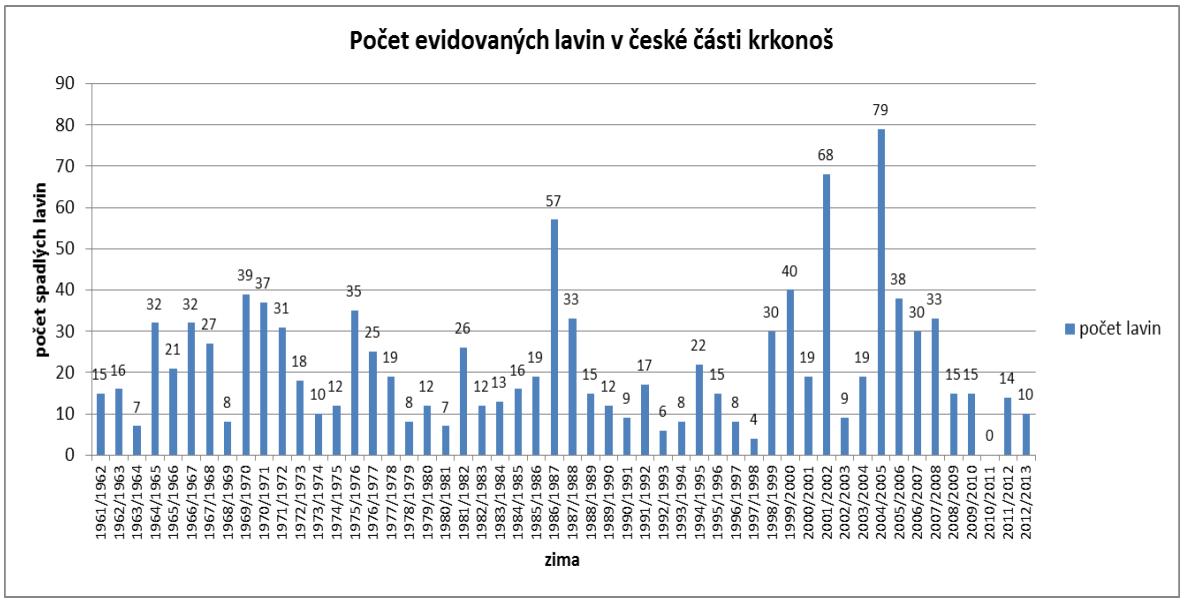
1 Úvod a cíle práce

Lavinová aktivita je běžnou součástí světových pohoří s trvalým i sezonním výskytem sněhové pokrývky. Omezeně se s ní setkáváme i v českých horách. Stálé lavinové dráhy se vyskytují v Krkonoších, Jeseníkách a Kralickém Sněžníku. Přes nevelký počet lavinových terénů má výzkum v Česku dlouhou tradici. Již na konci 18. století se objevují zmínky o krkonošských lavinách, které Gruber (1791) srovnává s lavinami alpskými. Tyto informace bývají součástí německy psaných turistických původců po Krkonoších. Velmi důležitým rokem pro výzkum lavin je rok 1954, kdy byl založen dlouhodobý systematický výzkum lavin v Krkonoších. Stáli za ním zaměstnanci Československého svazu tělovýchovy a sportu M. Vrba a B. Urbánek. K těmto výše zmíněným, se posléze připojili i členové Horské služby (HS) J. Kácovský a O.Štětka. Tento tým posléze zavádí pravidelné měření vlastností sněhu po celých Krkonoších. Bylo založeno středisko lavinové prevence, a postupně přibylo dalších 11 stanic pro měření výšky a vlastností sněhové pokrývky. Po M. Vrbovi, se problematice Krkonošských lavin začíná hlouběji věnovat V. Spusta. Vrcholem jejich snažení je v roce 1975 vydání prvního lavinového katastru Krkonoš (Vrba a Spusta, 1975). Katastr byl dále v roce 1991 revidován (Vrba a Spusta, 1991) a následně dochází v roce 1998 k vydání úplného lavinového katastru, na kterém V. Spusta již spolupracoval s M. Kociánovou (Spusta a Kociánová, 1998). Velké pozornost byla též věnována působení větru a orografie na proces ukládání sněhu. Těmto anemo-orografickým systémům se věnoval J. Jeník, který se také zabýval vlivem lavinové činnosti na vegetaci (Blahůt, 2006). Podrobnější informace o výzkumu lavin jsou k nalezení v publikacích výše zmiňovaných autorů, například (Jeník, 1961); (Vrba, 2003); (Spusta a Kociánová, 1998) a mnohé další. Na Přírodovědecké fakultě UK se problematice lavin věnoval J.Blahůt(2006). Dále v posledních letech vznikly práce na téma lavin, i na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci (Kohoutek, 2013). Problematikou lavinového nebezpečí se dále zabývá HS či KRNAP. V současnosti také probíhá projekt aplikovaného výzkumu, který podporuje Ministerstvo vnitra a zpracovává Fakulta životního prostředí České zemědělské univerzity v Praze, Intergraph CS s.r.o a Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR. Cílem tohoto projektu je vytvoření varovného systému pro vyhlašování stupňů lavinového nebezpečí a predikce možných pádů lavin, za pomocí matematických modelů(www.laviny.info). Za posledních asi 20 let dochází ve světě k trvalému nárůstu pádů lavin z důvodu

velkého rozmachu zimních sportů, zejména lyžování ve volném terénu (Ancey, Ancey, 2001). Zvýšení lavinové aktivity lze kvantifikovat například počtem lavinami usmrcených lyžařů či horolezců (Obr 1.). Tato hodnota se pohybuje okolo 200 úmrtí celosvětově za rok, nicméně vyskytují se i roky kdy počet úmrtí dosahuje 300 zemřelých pod lavinou pouze v Evropě (Ancey, Ancey, 2001). V Česku, tedy zejména v Krkonoších není nárůst smrtelných nehod způsobených lavinami tak markantní. Trend nárůstu počtu lavin utržených lyžaři se u nás také projevil (Pavlásek et al., 2015).



Obr. 1: Sezónní počet obětí lavin v USA. (Zdroj: CAIC, URL: http://snowbrains.com/wp-content/uploads/2013/05/Slide9.jpg)



Obr. 2: Počet evidovaných lavin v České části Krkonoš. (Zdroj: Pavlásek et al., 2015)

Z těchto důvodů je důležité se této problematice věnovat, porozumět zákonitostem vzniku lavin, principům jejich pohybu, pravidlům jejich výskytu a tyto vědomosti dále využít k vytvoření modelů pádů či varovných systémů. Z hlediska fyzické geografie, zejména pak geomorfologie, je nutné vzít v potaz, že lavinová činnost je poměrně významným reliéfotvorným faktorem (Kociánová, 2004). Také je znám pozitivní vliv lavin na druhovou rozmanitost na lavinových drahách. Lavinové dráhy například pozitivně působí na vznik typických smíšených lesů na lavinových drahách (Štursa et al., 1973).

1.1 Témata a cíle práce

Cílem této bakalářské práce je provést rešerši dosavadních přístupů k modelování sněhových lavin, vyhodnotit vhodnost modelů vzhledem k jejich potenciálu využití a provést vlastní modelováním vybraným modelem. V rámci rešeršní části práce se rovněž posoudí dostupné lavinové modely z hlediska měřítka modelování (lokální či regionální modely), dimenzionality (1D,2D,3D), samotné podstaty modelování (empirické, statistické a fyzikální modely), dále z hlediska vstupních dat a možností aplikace modelu, například pro potřeby územního plánování či hodnocení ohrožení v dané oblasti.

V aplikační části práce bude pomocí případové studie na lavinové dráze Modrý důl (č. 8 podle lavinového katastru) v Krkonoších otestován vybraný dostupný model. Výsledky modelování budou poté porovnány se skutečnou lavinou, která spadla dne 10. 2. 2015.

2 Typy lavin a jejich vlastnosti

V této kapitole jsou stručně popsány typy lavin a jejich základní vlastnosti. Dále jsou vysvětleny pojmy, které jsou používány v následujících kapitolách. Typy lavin jsou popisovány s ohledem na modelování. Úvodem je představen stručný slovník pojmů, které se dále v textu vyskytují.

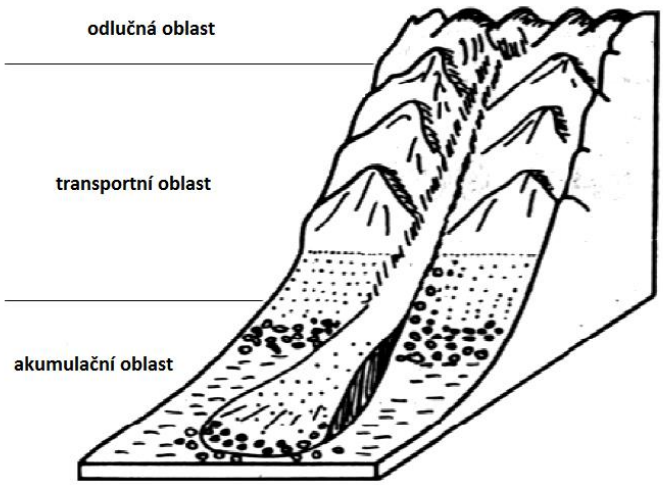
2.1 Slovník pojmů

- Skluzný horizont (*shear surface, bed*): Povrch, po kterém se lavina pohybuje. Může se jednat o povrch dráhy (u základových lavin), či o vrstvu sněhu či ledu (u lavin povrchových).
- Suché tření (*dry friction*): Smykové tření, u kterého je zanedbána závislost na rychlosti pohybu.
- Odtrhová/odlučná oblast (*crown, detachment zone):* Oblast či bod, kde dochází k uvolnění sněhové masy laviny.
- Dosah laviny (*run out)*: Bod nebo linie kam dosahuje akumulace sněhu po lavinové události.
- Hloubka laviny (*depth)*: Kolmá vzdálenost skluzného horizontu a rozhraní laviny se vzduchem.
- Transportní oblast (*transport zone)*: Část lavinové dráhy kde dochází pouze k transportu sněhu.
- Akumulační oblast (*depozition/acumulation zone*: Část lavinové dráhy kde dochází ke zpomalování laviny a uklídání sněhu.
- Úhel vnitřního tření (*friction angle)*: Veličina představující velikost tření mezi částicemi materiálu. Je to maximální úhel, při kterém sypký materiál zůstává v klidu.
- Soudržnost (*cohesion)*: Síla držící částice stejného materiálu pohromadě.
- Smyková pevnost (*shear strenght)*: Schopnost materiálu odolávat silám, které mohou způsobit posuny uvnitř tělesa.
- Střihové napětí (*shear stress*): Napětí vznikající při snaze dvou sousedních průřezů tělesa o vzájemné posunutí.

2.2 Definice laviny

Definice, jež je všeobecně uznávána, popisuje lavinu jako pohyb velkého množství sněhové hmoty, která má při vysoké rychlosti velké ničivé účinky. Zároveň je třeba brát v potaz délku dráhy pohybu, pokud je dráha kratší než 50 metrů, je toto těleso považováno za sněhový splaz (Houdek a Vrba, 1956). Tento pohyb vzniká narušením stability sněhové masy na terénním podkladu, kdy je sněhová pokrývka uvedena do pohybu a po následném zrychlení dochází k velkým škodám (Kňazovický, 1967). Laviny nemusí být složeny pouze ze sněhu, ale mohou být tvořeny dalšími příměsemi, jako jsou například úlomky hornin či vegetace (Demek, 1987).

Laviny mají obdobnou morfologii jako některé druhy svahových deformací, zejména proudového typu. Rozlišujeme oblasti odlučnou, transportní a akumulační (Obr. 3).



Obr. 3: Základní morfologické části laviny. (Zdroj: upraveno podle Demek, 1987)

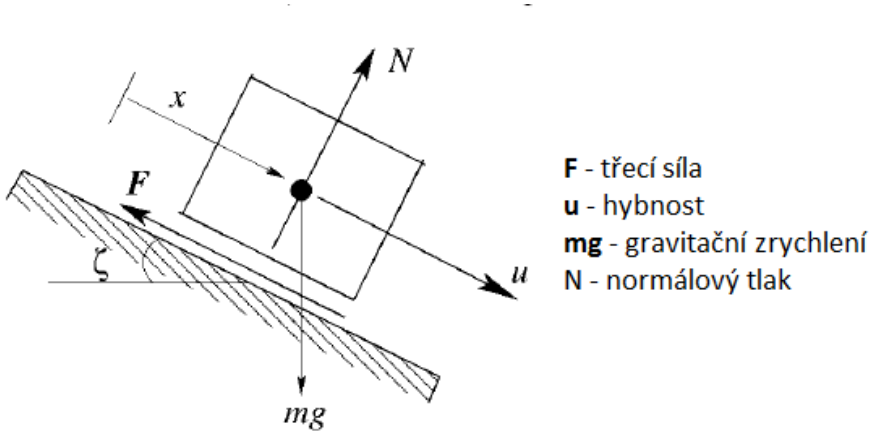
2.3 Vlastnosti lavin

Během vzniku a pohybu laviny působí uvnitř a vně sněhu mnoho sil. Dále na pohybující se lavinu působí rovněž vnější prostředí. Tato část práce velmi stručně popisuje tyto síly a vlastnosti. Rozděluje je na dvě části, a to síly působící při odtrhu laviny, a síly působící během pohybu (Ancey, Ancey, 2001).

2.3.1 Síly působící uvnitř a vně laviny

- **Tření na kluzném horizontu** je tření mezi pohybující se lavinou a kluzným horizontem. Obvykle bývá vyjádřeno pouze suchým (Coloumbovským) třením

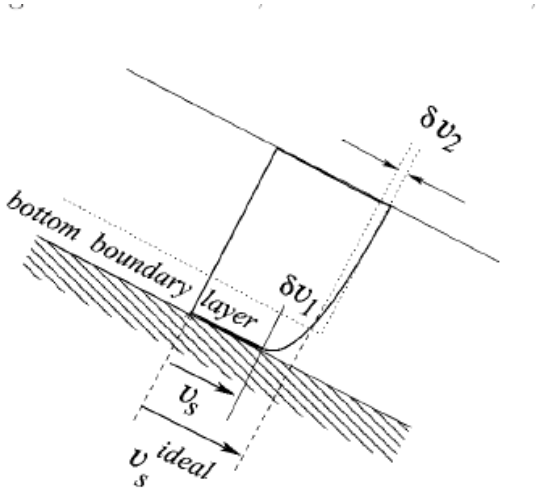
(Obr. 4). Toto tření ovlivňuje vertikální profil rychlosti proudění laviny (Obr. 5) (Pudasainy a Hutter, 2007).



Obr. 4: Schematické znázornění sil působících při suchém (Coloumbovském) tření. (Zdroj: upraveno podle: Pudasainy a Hutter, 2007)

$$|F| = \mu N \tag{1}$$

Kde: F – třecí síla, μ – součinitel klidového tření mezi materiálem a kluzným horizontem, N – normálový tlak



v_s – *skluzná složka*

δv_1 – *silné tření na skluzném* hor.

δv_2 – *slabé tření na horní hranici*

v_s^{ideal} – *výsledná idealizovaná rychlost*

Obr. 5: Schematické znázornění vertikálního profilu rychlosti proudění v lavině. (Zdroj: upraveno podle Pudasainy a Hutter, 2007)

- **Kolizní interakce jednotlivých zrn (vnitřní tření)**: Tyto síly vznikají vzájemným třením jednotlivých částic.

- **Tření na hranici lavina/atmosféra:** Tato třecí síla vzniká působením vzduchové hmoty na pohybující se hmotu laviny. Je vyjádřena následující rovnicí (2).

$$\tau = \frac{c\rho_s u^2}{2} \quad (2)$$

Kde: τ – výsledné tření, ρ_s – objemová hmotnost sněhu, c – koeficient tření, u – rychlost

2.3.2 Síly působící při odtrhu laviny

Jednou z hlavních proměnných mající vliv na odtrh laviny je vrstvení různých druhů sněhu a vznik sněhových vrstev s rozdílnými fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Sněhové vrstvy vznikají a mění se z důvodu rozdílných meteorologických podmínek panujících na lavinové dráze. Rozdílné v mechanické vlastnosti sněhových vrstev, mají vliv zejména na soudržnost a smykovou pevnost. Zvrstvení sněhu společně s gravitací je zodpovědné za pohyby sněhových vrstev. Pokud střihové napětí překoná maximální hodnotu, jakou jsou sněhové vrstvy schopné vydržet, vznikají poruchy. Tyto poruchy vznikají obvykle bodově, a jsou dále šířeny do prostoru prostřednictvím puklin.

Stabilita sněhové vrstvy záleží na mnoha dalších faktorech, které vycházejí z vlastností lavinové dráhy, či z meteorologických podmínek. Mezi tyto parametry patří (Ancey, 2001):

- **Průměrný sklon odtrhové oblasti** se většině případů pohybuje od 27° do 50°
- **Drsnost lavinové dráhy** je klíčovým parametrem určujícím stabilitu sněhové vrstvy, ale i případný dosah laviny. S nárůstem drsnosti dochází ke stabilizaci sněhové vrstvy, například přítomností velkých balvanů nebo kleče. Drsnost je v čase a prostoru proměnlivá a může se měnit na základě různé mocnosti sněhové pokrývky.
- **Tvar a zakřivení odtrhové zóny** je jeden z hlavních parametrů, kterým je určena distribuce napětí ve vrstvě sněhu. Konkávní tvar odtrhové zóny způsobuje zpravidla vyšší mocnost sněhové pokrývky, kde se hromadí sníh i např. v důsledku převívání. Tudíž při odtrhu dochází k uvolnění většího množství sněhu, zatímco

konvexní tvar odtrhové zóny zapříčiňuje nižší stabilitu sněhové vrstvy a způsobuje vyšší pnutí ve sněhové vrstvě.

- **Orientace svahu směrem ke slunci** resp. k příjmu solární energie má velký vliv na stabilitu sněhové vrstvy. Více lavin padá na svazích orientovaných k severu, severovýchodu a východu.

Další faktory, které se v průběhu času mění, jsou obvykle faktory související s počasím. Jsou to následující proměnné parametry (Ancey, 2001).

- **Nový sníh.** Stabilitu sněhové vrstvy velmi ovlivňuje nově připadlý sníh. Pravděpodobnost odtrhu laviny roste úměrně s mocností nově připadlé vrstvy.
- **Vítr.** Vítr silně ovlivňuje distribuci sněhové pokrývky, zároveň vytváří rozdílně vrstvy ve sněhovém profilu. Působením větru dále vznikají sněhové převěje a jejich pád je často impulsem k odtržení laviny. Sníh ukládající se dále v nižších polohách zarovnává nerovnosti a vytváří mnohdy velmi mocné sněhové polštáře.
- **Déšť a obsah kapalné vody.** Déšť hraje důležitou roli v přeměně sněhu. Voda obecně přispívá ke snížení stability sněhové vrstvy. Lehký déšť dopadající na studenou sněhovou pokrývku, vytváří ledovou krustu, která může sloužit jako kluzný horizont. Silný déšť způsobuje ztěžknutí sněhové vrstvy a dále snižuje vnitřní tření sněhové vrstvy (Pudasainy a Hutter, 2007).
- **Struktura sněhového profilu.** Rozrůzněnost sněhového profilu vzniká nerovnoměrným připadáváním a přeměnou sněhu v čase. Vzniká tak sněhový profil, obsahující rozdílné typy sněhu, mnohdy s velmi odlišnými vlastnostmi (zejména tvrdostí), což přispívá k nesoudržnosti a nestabilitě sněhového profilu.

2.3.3 Pohyb laviny

Pro pohyb laviny je nutné zmínit dva druhy pohybu po svahu. Tyto dva druhy pohybu jsou dány především vlastnostmi sněhu (Ancey, 2001).

- **Tekoucí lavina.** Jedná se o lavinu, která má poměrně husté jádro, její trajektorie po svahu je řízena zejména tvarem reliéfu. Mocnost laviny obvykle nepřekračuje jednotky metrů. Rychlost se pohybuje mezi 5 až 25 m/s. Objemová hmotnost je udávána od 150 do 500 kg/m^3.

- **Prachová lavina.** Tento typ laviny se vyznačuje vysokou rychlostí (50 až 100 m/s). Jedná se o oblak tvořený vzduchem a vířícím sněhem. Reliéf má poměrně malý vliv na dráhu laviny. Mocnost laviny se pohybuje v rozmezí 10-100 m. Objemová hmotnost je udávána od 5 do 50 kg/m^3.

2.4 Typy lavin

V této kapitole jsou popsány základní typy lavin podle jakosti sněhu. Z hlediska modelování lavin je právě jakost sněhu jeden z nejdůležitějších faktorů, podle kterých se následně nastavují parametry modelu.

2.4.1 Laviny ze suchého prachového sněhu

Laviny tohoto typu obvykle vznikají při teplotách -3 až -15°C, zřídka i při teplotách nižších. Předchází jim husté sněžení, kdy napadnul suchý prachový sníh. I v tomto případě je soudržnost sněhu velmi nízká, tudíž pro vznik laviny stačí slabý impuls. Pokud to morfologické podmínky na lavinové dráze dovolují, klouže sněhová hmota nejprve jako soudržný deskovitý celek, který se postupně rozpadá na jednotlivé hrudky, jež vytvoří sypkou hmotu. Takto přeměněný sníh je následně akumulován v podobě poměrně kypré lavinové haldy. Laviny tohoto typu se vyznačují velkou rychlostí vnitřního vzdušného proudění (až 300 km/h) (Houdek a Vrba, 1956).

2.4.2 Laviny z vlhkého prachového sněhu

Tento typ lavin se vyskytuje při teplotách nad bodem mrazu. Jsou tvořeny vlhkým prachovým sněhem, či čerstvě napadlým vločkovým sněhem. K jejich odtrhu dochází buď bodově impulsem, nebo samovolně. Soudržnost sněhu ve vlhkých prachových lavinách je větší než u předchozích dvou typů. Vlhké prachové laviny již nevíří vzduchem, ale jejich hlavní proud se valí po zemi. Tyto laviny tvoří akumulační haldy, které jsou složeny z velmi vlhkých a upěchovaných hrud (Houdek a Vrba, 1956).

2.4.3 Laviny z deskového sněhu

Deskovitý sníh je charakteristický pro návětrné svahy, tento typ sněhu vzniká působením větru, který upěchuje sněhovou pokrývku. Na těchto svazích se tedy vyskytují laviny z deskového sněhu. Tyto laviny vznikají ve velmi širokém rozmezí teplot, od velmi záporných až do teplot několik málo stupňů nad bodem mrazu. K odtrhu deskových lavin

nedochází bodově, ale v širokém pruhu. Po uvolnění lavin dochází k pohybu velkých a těžkých desek, ze kterých se může část rozprášit do vzduchu, jelikož deskový sníh bývá velmi suchý. K rozpadu desek dochází na takzvaném prahu, což je nejbližší místo s malou mocností sněhové pokrývky se zpravidla konvexním tvarem. V akumulační zóně dochází k uložení velkých a tvrdých hrud. (Houdek a Vrba, 1956).

2.4.4 Laviny z pohyblivého sněhu

Pohyblivý sníh, který tvoří tyto laviny, se podobá vátému písku, je tvořen velmi sypkými krystaly. Laviny tohoto typu bývají velmi často způsobeny přítomností dutinové jinovatky. K sesunutí je však ve většině případů třeba impuls z vnějšku (Houdek and Vrba, 1956).

2.4.5 Firnové laviny

Firnové laviny jsou charakteristické pro období vyšších teplot. Vznikají ztekucením spodní vrstvy ve zfirnovatělém sněhu. Sníh tvořící tyto laviny je velmi těžký a vlhký, tudíž nedochází k téměř žádnému rozprachu sněhu do okolí. K uvolnění dochází většinou samovolně (Houdek a Vrba, 1956).

2.4.6 Laviny typu slushflow

Laviny tohoto typu vznikají podobně jako výše zmiňované firnové laviny, avšak mají vyšší objemovou hmotnost a vyšší obsah vody. K jejich vzniku dochází ve chvíli, kdy se ve sněhové pokrývce nahromadí velké množství tavné vody a sníh už ji není schopen nasáknout. Sníh tvořící laviny tohoto typu je velmi vlhký, z části lavinu tvoří i samotná tavná voda (Spusta a Kociánová, 1998).

2.5 Typy lavin z hlediska modelování

V modelování lavin v současnosti existují dva hlavní přístupy, závislé na způsobu pohybu modelované laviny. Jedná se o modelování lavin deskových (tekoucích) a lavin prachových (vířících vzduchem). Oba typy lavin jsou natolik rozdílné, že se k jejich modelování musí používat zcela odlišné přístupy. Toto rozdělení je natolik determinující, že se modely deskových lavin nedají použít pro modelování lavin prachových a naopak.

3 Historické a současné přístupy v modelování lavin

Ve třetí kapitole je stručně popsán vývoj zejména numerického modelování. Numerické modelování se v průběhu času vyvíjelo od jednoduchých jednorozměrných modelů, které se pak zejména díky vývoji výpočetní techniky zdokonalovaly až k dnešním trojrozměrným modelům. Jak bylo zmíněno v předchozí kapitole, je třeba rozdělit vlastní numerické modely do dvou větví, a to na modely suchých (prachových) lavin, které se používají méně často, kvůli jejich výpočetní složitosti a modely deskových č vlhkých lavin, které jsou požívány častěji.

Počátek modelování lavin je datován do třicátých let dvacátého století. Stalo se tak v bývalém Sovětském svazu, nicméně tyto informace nebyly distribuovány do západního světa. První model pádů lavin byl pravděpodobně sestaven v Tbilisi, v roce 1935 (Salm, 2004). Jednalo se o čistě matematický model, založený na principu chování laviny jakožto „hmotného bodu“. Jednalo se o modelování deskové laviny. Tento model využívá Coloumbův model tření, čímž ustanovuje trend využívání tohoto principu v lavinovém modelování a dále též sílu zvyšující se lineárně s rychlostí. (Salm, 2004). Tuto metodu později přepracoval Kozik (1962), který ve svých pracích bral v úvahu i prachové laviny. K určení koeficientů modelu (těžiště laviny, průměrná objemová hmotnost) použil jako tvar laviny parabolický válec, s danými hodnotami výšky a délky (Eglit, 1998). Jako síly působící na pohyb uvádí suché tření a dále sílu, kterou lavina působí ve své přední části na sníh a vzduch před sebou, která je úměrná druhé mocnině její rychlosti (Salm, 2004). Tyto výše zmíněné teorie ovšem nepopisovaly výkyvy v hustotě laviny a jejích rozměrů, které vychází z fyzikálních zákonů (Eglit, 1998). Coloumbův model tření je doposud jedním z nejdéle používaných přístupů v modelování lavinových procesů (Salm, 2004).

Další přínos do problematiky přináší v roce 1959 švýcarský inženýr Voellmy (Voellmy, 1955). Při navrhování ochranných staveb proti lavinové činnosti přichází s analogií k hydrodynamickým procesům. Tření vyjádřil mocninným výrazem, který je podobný Chézyho rovnici popisující turbulentní proudění vody (3) (Voellmy, 1955).

$$\tau_S \sim \frac{\gamma\, v^2}{\xi} \tag{3}$$

Kde: τ_s – objemová hmotnost, v – rychlost, γ – objemová hmotnost podkladu, ξ – koeficient drsnosti podkladu

K tomuto přístupu dále přidal výše zmiňované suché tření. Kombinace těchto dvou přístupů je nyní známa jako „Voellmyho kapalina“. Hodnoty těchto parametrů byly nadále předmětem výzkumu, avšak tento model byl dále hojně využíván v praxi. (Salm, 2004)

V roce 1966 se této problematice začíná věnovat Bruno Salm (Salm, 2004), který lavinový sníh definuje jako nesoudržný materiál s vnitřním třením. Toto tření je charakterizováno úhlem vnitřního tření. Následkem vnitřního tření v tomto pojetí modelování je podélné napětí v mase laviny. Salm (1966)dále udává, že pokud hodnota tohoto napětí nepřesáhne kritickou mez, tělo laviny se nedeformuje. Pokud však dochází k překročení kritických hodnot, dochází při zpomalování ke kompresi, a při zrychlování k protahování samotného tělesa laviny. Úhel vnitřního tření však nebyl nikdy přesně změřen, podle různých pozorování v terénu je ovšem uváděna hodnota kolem 25° (Salm, 2004).

Ruská škola v roce 1974 (Bakhvalov at al., 1974)přichází s modelem prachových lavin, který vnímá lavinu jako turbulentní proud o dvou složkách, kterými jsou sníh a vzduch. Tento model pracuje s Reynoldsovou turbulentní rovnicí, společně s hypotézou, že koeficienty vířivé viskozity a difuze jsou známé funkce vzdálenosti od podkladu, dosahu laviny a integrál svislého gradientu od průměrné rychlosti. Toto matematické vyjádření bylo využito z důvodu nesourodosti rychlostí v průběhu lavinové události. Model tedy pracuje s lavinou jako s oblakem zvířeného sněhu, jež má předepsaný tvar. Dále počítá s jeho těžištěm, rychlostí, průměrnou hustotou a změnami těchto hodnot v průběhu pohybu. Tvar tohoto tělesa je definován podélným profilem, jež má půl eliptický tvar s oběma hodnotami se nezávisle měnícími v průběhu pohybu. Základní rovnice tohoto modelu jsou tedy schopny vypočítat změny v těžišti, délce, šířce a v průměrné hustotě oblaku. Tento model byl poměrně často používán, a bylo popsáno mnoho zákonitostí v pohybu prachových lavin (Eglit, 1998).

V osmdesátých letech 20. století dochází k dalšímu zdokonalování numerických modelů i mimo SSSR. Američan R. I. Perla ve svém modelu vyjadřuje tření pomocí Coloumbova modelu tření, tření vzduchu na čele laviny, tření vzduchu na horní hranici laviny a jako

poslední uvádí tření hrnutého sněhu na čele. Poslední dvě zmíněné síly jsou dále úměrné druhé mocnině rychlosti. V tomto modelu se neuplatnila Chésyho rovnice.

Odlišný přístup v roce 1985 zvolili Salm a Gubler (Salm a Gubler, 1985). Jejich model vnímá vlhkou lavinu jakožto masu granulárního materiálu s náhodným pohybem a prouděním jednotlivých zrn. Z tohoto pohledu vymezili tři možné verze chování laviny a to klouzání, částečně kapalné chování laviny a úplné zkapalnění. V prvním případě je třecí síla vyjádřena pouze Coloumbovským třením, v případě druhém se k této síle přidává tření úměrné rychlosti a ve fázi plného zkapalnění je tato třecí síla úměrná druhé mocnině rychlosti. Tento model však nebyl využíván, z toho důvodu že v přírodních podmínkách není možné dosáhnout stádia plného zkapalnění sněhové masy (Salm, 2004).V druhé polovině osmdesátých let bylo pomocí měření Dopplerovým radarem zjištěno, že během lavinového pádu u deskové laviny dochází k přechodu z pouhého klouzání v horní části lavinové dráhy, k částečnému zkapalnění toku ve spodní polovině. To se projevilo změnou rychlosti pohybu v druhé části dráhy, a to aniž by se změnil sklon svahu (Salm, 2004). To umožnilo v modelech pracovat nejprve se suchou třecí silou na počátku lavinové dráhy, a složitější výpočty aplikovat až na spodní části.

Na konci devadesátých let byl vyvinut kvazi-jednorozměrný model (Bartelt et al. 1999), pracující na principu diferenciálních rovnic vycházejících z principů zachování hmoty a hybnosti. Tření je v tomto případě reprezentováno suchým třením a proudění pomocí Chézyho rovnice. Podélné napětí je v tomto modelu úměrné hydrostatickému tlaku s koeficientem vnitřního tření. Rychlost a hloubka proudění jsou v tomto modelu nestálé a nehomogenní. Tato skutečnost přispívá k tomu, že každá změna v topografii se správně odrazí ve výsledcích. Tento model je již schopen obsáhnout změny v hybnosti laviny i v případě že se lavinová dráha změní z rovné (plošné) na usměrněnou (channelled). Tento model následně nalezl široké využití, zejména v alpských zemích jako jsou Rakousko, Itálie a Švýcarsko (Salm, 2004).

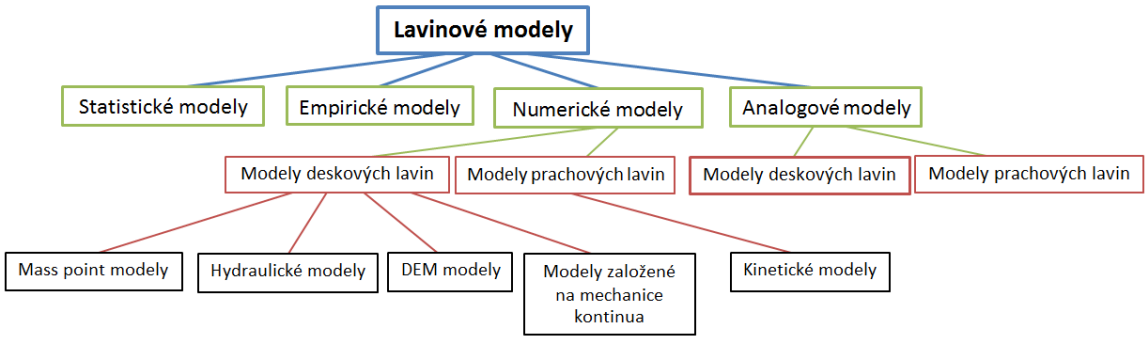
S rozvojem výpočetní kapacity počítačů, došlo k dalšímu rozvoji modelů. V současnost tedy můžeme rozlišit velké množství modelů a to jak podle dimenzionality, či podle přístupu k problému. Základní dělení na modely zabývající se buď lavinami deskovými či prachovými zůstává však stále zachované. Dále dochází k výraznému rozvoji geoinformačních systémů, tudíž většina nově vyvíjených modelů již umí s tímto softwarem

spolupracovat, či funguje pouze jako přídavné moduly ke globálně rozšířeným GIS. Mimo rozvoje numerických modelů je též v posledních letech zaznamenávám rozvoj modelů nenumerických (Salm, 2004).

4 Typy lavinových modelů, jejich principy a přehled

Přístupů k modelování je v současné době celá řada, nejčastěji se využívají geoinformační systémy či modely určené přímo k tomuto účelu. Potřebnost a využití těchto modelů potvrzuje například i skutečnost, že ve Švýcarsku v zimě roku 1999, jež byla velmi bohatá na lavinové události, se 97 % oblastí lavinového ohrožení navržených pomocí modelů shodovalo s oblastmi, kde k lavinám opravdu došlo (Salm, 2004).

V této části práce jsou podrobně popsány jednotlivé typy modelů, jejich výhody a nevýhody a také možnosti jejich využití. Nejprve jsou popsány jednoduché statistické a empirické modely, následují analogové modely a různé druhy numerických modelů.

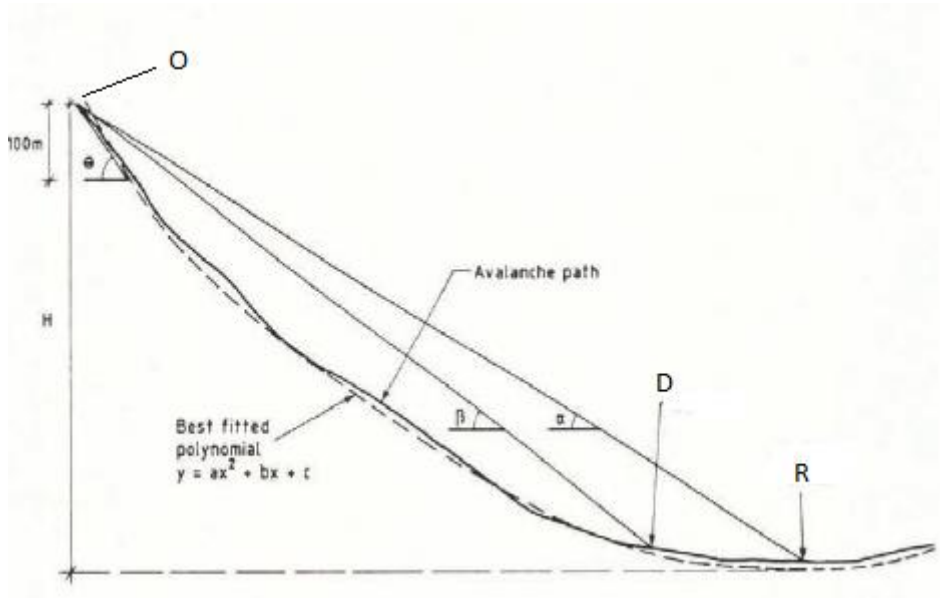


Obr. 6: Rozdělení lavinových modelů

4.1 Statistické modely

Statistické modely vycházejí z historických dat o lavinách na určité dráze a z metod, kterými je možné vypočítat dosah – délku laviny. Jejich využití je důležité zejména pro vytváření map lavinového nebezpečí, kdy se vypočítává možný rozsah lavin (Wawra, 2010). Jeho základní parametry jsou patrné z obrázku 7. Třemi hlavními body na jednorozměrné lavinové dráze v tomto modelu jsou, odtrh laviny O (odtrh), bod D (decelerace), ve kterém lavina začíná zpomalovat, obvykle se tento bod stanovuje na místě, kde sklon svahu klesá pod 10°, a bod R (run out), který označuje místo kde se lavina

zastavila. Úhel α udávaný ve stupních, který svírá vodorovná rovina a spojnice začátku a konce laviny. Úhel β, který svírá vodorovná rovina a přímka propojující bod D se začátkem laviny. Dále pak vzdálenost H, která udává výškový rozdíl mezi bodem odtrhu a místem kde se lavina zastaví, úhel θ, jež popisuje sklon prvních 100 metrů lavinové dráhy a y^n, což je druhá derivace polynomické funkce $y = ax^2 + bx + c$ které nejlépe odpovídá podélný profil svahu. Tyto parametry bývají zjištěny buďto přímo v terénu inklinometrem, či pokud to komplikovanost terénu nedovoluje, mohou být odečteny z map. V průběhu výzkumu bylo dokázáno, že model je nejcitlivější na změny parametru β. Naopak úhel θ měl na výsledný dosah laviny poměrně malý vliv. (Lied a Toppe, 1989) Za pomocí regresních metod může být úhel α vyjádřen jako funkce úhlu β. Model samotný může být zapsán ve tvaru $\alpha = \lambda\beta + \gamma$, kdy λ je regresní koeficient a γ konstantní úhel který udává sklon v místě odtrhu, obvykle se využívá úhel mezi rovinou a úsečkou spojující bod odtrhu a bod kde sklon svahu klesá pod 30° (Lied a Toppe, 1989). Tento model je využívám zejména pro predikci maximálního dosahu laviny. Tato hodnota vychází z regresně zjištěné nejmenší možné hodnoty úhlu α. Po zpracování velkého objemu historických dat na lavinové dráze je nakonec možné vyjádřit korelaci mezi hodnotou β a z ní vyplívající hodnotu α (McClung and Lied, 1987).



Obr. 7: Statistický model maximálního dosahu laviny.(Zdroj: upraveno podle Lied a Toppe, 1989)

Výhodou tohoto typu modelu je jeho jednoduchost i spolehlivost, a to zejména v místech se známou topografií. Na mnoha místech již byl mnohokrát využit v praxi. Za slabiny tohoto modelu musíme jmenovat jeho velkou náročnost na vstupní data, kdy na jednu

lavinovou dráhu je ideálně potřeba 100 letá datová řada, které se nám na většině světových lavinových drah nedostává (Wawra, 2010). Dalším poměrně velkým problémem je, že tento model nezahrnuje objem laviny, tento parametr ovšem dosah ovlivňuje. Nicméně v modelu, který je jednorozměrný a zohledňuje pouze topografii dráhy, není možné parametr objemu vyjádřit (Lied a Toppe, 1989). Tento typ modelů se ukázal přesnějším na středně dlouhých až dlouhých lavinových drahách, také vykazuje větší přesnost u lavin většího objemu (McClung a Lied, 1987). Dále je také pomocí statistického modelu komplikované vypočítat dosah laviny, jejíž dráha se v podélném profilu významně mění. Například lavina, která začíná ve volném terénu a následně je sevřena do koryta, mívá statisticky větší dosah, než kdyby byla dráha pouze ve volném terénu. Úhel α tudíž nabývá menších hodnot. Model rovněž není schopen popsat šířku odtrhu, což samozřejmě výsledky ve velké míře ovlivňuje (Lied a Toppe, 1989). Největší slabinou tohoto typu modelu je absence možnosti modelovat plošný rozsah případné laviny (Wawra, 2010).Tato skutečnost velmi komplikuje například využití modelu pro mapování oblastí, jež jsou případnou extrémní lavinovou událostí ohroženy. Nicméně model byl často v minulosti často využíván, a přinášel poměrně kvalitní výsledky v oblasti zjišťování možného dosahu extrémních lavin na známých lavinových dráhách.

4.2 Empirické modely

Mezi empirické modely se řadí poměrně hojně využívaný model Flow-R. Tento model byl navržen pro pohyby, jako je skalní řícení, povodně, čí blokovobahenní proudy (Horton et al. 2013). Avšak je možné ho využit pro modelování lavin. Model byl vytvořen tak, aby byl schopen komunikovat s GISovými programy. Samotné modelování procesu má dvě fáze, první, ve které dochází k identifikaci zdrojových oblastí, a krok druhý, což je samotné modelování pohybu masy směrem ze svahu. Objem a hmotnost materiálu model nebere v úvahu, jelikož se jedná o přesné údaje a je komplikované je v regionálním měřítku zjistit. Model slouží zejména k učení ohrožených oblastí, či k určení náchylnosti určitého území k pádu lavin. Výstupem modelu je pouze rozsah možných událostí na daném místě. Nabízí však možnost tyto výsledky porovnat s existujícími daty z již proběhlých událostí a následně model kalibrovat aby poskytoval přesnější výsledky.

Zdrojová oblast je určena pomocí kombinace rastrů, které reprezentují vlastnosti zdrojového území. Šíření materiálu je definováno algoritmy šíření, které určují trasu, kudy

se materiál pohybuje, dále pak třecími zákony které určují její dosah. Jako základní algoritmus šíření je využíván Holmgrenův algoritmus (4).

$$p_i^{fd} = \frac{(\tan \beta_i)^x}{\sum_{j=1}^{8}(\tan \beta_j)^x} \; \forall\{\tan \beta > 0 \; ; \; x \; \in [1 \; ; +\infty] \tag{4}$$

Kde: *i* a*; j* – směry proudění, p_i^{fd} – poměr setrvačnosti do směru *i, tanβ:* gradient sklonu mezi centrální buňkou a buňkou ve směru *i, x:* variabilní exponent šíření, když x=1 dochází k šíření mnoha směry více proudy, pokud x –> ∞ dochází k šíření jedním proudem

Tento algoritmus vyjadřuje setrvačnost proudu, tedy jeho schopnost setrvat v daném směru. Výsledkem je předpokládaná dráha pohybu po digitálním modelu reliéfu. Poté je pomocí zákonů tření vypočítán dosah. Tření také ovlivňuje boční dosah, tudíž plošný rozsah akumulace, pomocí vyjádření (5).

$$E_{kin}^{i} = E_{kin}^{0} + \Delta E_{pot}^{i} - E_f^i \tag{5}$$

Kde: E_{kin}^{i} – kinetická energie buňky ve směru i, E_{kin}^{0} – kinetická energie centrální buňky, ΔE_{pot}^{i} – změna potenciální energie buňky ve směru i, E_f^i – ztráta energie třením buňky ve směru i

Ztráta energie třením je obvykle vyjádřena pomocí Perlova dvou-parametrového modelu tření. Tento model je založen na nelineárním zákonu tření, který je řešením pohybové rovnice (6) a vede k rychlosti pohybu na konci segmentu i (V_i).

$$V_i = (a_i \omega (1 - expb_i) + V_0^2 expb_i)^{\frac{1}{2}} \tag{6}$$

kde: $a_i = g(\sin \beta_i \; - \mu \; cos\beta_i)$, $b_i = \frac{-2L_i}{\omega}$

μ – parametr tření, ω – hmotnostně-třecí poměr, β_i – sklon segmentu, V_0 – rychlost na začátku segmentu, L_i – délka segmentu, g – gravitační zrychlení

Model Flow-R je poměrně citlivý na kvalitu a rozlišení digitálního modelu reliéfu, nejčastěji se používá DMR o rozlišení 10m, nicméně uspokojivé výsledky byly dosaženy i při menším rozlišení, například 25m. DMR o podrobnějším rozlišení než 10 m způsobuje nestabilitu modelu a nepřesné výsledky. Výhodou modelu je zejména malá náročnost na vstupní data a silná provázanost s GIS. Základní vstupní proměnou je znalost dosahu a rozsahu spadlých lavinových drah, které umožní model správně kalibrovat i pro širší území. Jednoduchost tohoto modelu ho předurčuje ke studiu rozsáhlých území, a zejména k definování ohrožených oblastí. Model není však příliš vhodný k simulaci jednotlivých lavinových událostí, a to zejména proto, že není schopen dostatečně popsat specifika, která panují na konkrétní jedné lavinové dráze. Je však nutné vzít v úvahu to, že model je k dispozici zdarma ke stažení, a je velmi uživatelsky přívětivý (Horton et al. 2013).

4.3 Mass point modely

Do začátku devadesátých let 20. století byly tyto modely nejčastěji používané pro modelování lavin. Tento typ modelů je založen na práci švýcarského inženýra Voellmyho. V jeho práci Über die Zerstörungskraft von Lawinen (1955) uvádí, že smykové tření na podloží laviny je závislé na mocnině rychlosti laviny a k jeho působení přidává též suché tření. V této práci ovšem předpokládá jednotné a stálé podmínky, které v přírodních podmínkách na lavinové dráze nemohou nastat. Aby modelované lavinové události odpovídaly již v terénu naměřeným hodnotám, bylo nutné do tohoto modelu přidat množství předdefinovaných parametrů, jejichž hodnoty byly zjištěny studiemi v terénu. Pomocí těchto předem daných parametrů bylo možné popsat laviny jako prachové či tekoucí laviny, nicméně tato komplexnost způsobuje poměrně komplikované využití tohoto modelu (Hutter a Kirchner, 2003). Ve své práci Voellmy (1955) uvádí základní vlastnosti nutné pro studium jakékoliv laviny následovně:

Υ_o: průměrná objemová hmotnost uloženého sněhu v kluzném horizontu, Υ: průměrná objemová hmotnost sněhu v pohybu
h: hloubka sněhu, resp. hloubka skluzného horizontu
ψ_o: sklon v zóně odtrhu
ψ_u: sklon v zóně pádu laviny

Dále udává, že pokud je to možné přidává se i podélný profil lavinové dráhy (Voellmy, 1955). Jednotlivé hustoty různých druhů sněhu jsou v jeho práci tabuizovány a mají dané

hodnoty. Poměrně přesně popisuje též proudění sněhové masy v lavině, kdy udává skutečnost, že k laminárnímu proudění, které je nejjednodušeji popsatelné, dochází pouze v iniciálním stádiu pádu laviny. Proudění v lavině přirovnává k proudění vody v korytě, a přichází s rovnicí odporu podloží. Pomocí této rovnice (3) je pak možné vypočítat rychlost, kdy dochází k vzniku turbulentního proudění. Pro popsání veškerých typů proudění a vlastností sněhu bylo dále do rovnice přidáváno množství koeficientů, jako například výška laviny a další (Voellmy, 1955).

Tento koncept byl pak nadále vylepšován. Například Salm (1966) přináší do tohoto přístupu nové vlastnosti proudícího sněhu, který vnímá jako nesoudržný materiál s vnitřním třením, které je charakterizováno daným úhlem vnitřního tření. Z tohoto přístupu také vyplývá, že v průběhu lavinové události dochází k podélnému pnutí v tělesu laviny. Pokud tyto síly překročí kritickou hodnotu, dochází k rozpadu deskové laviny (Salm, 2004).

Přes všechnu snahu, se žádnému z těchto modelů nepodařilo vyjádřit změny proměnných v čase. Nebylo tedy možné vyjádřit změny v rychlosti proudění sněhu v průběhu pádu laviny, vývoj výšky laviny a jejího rozsahu. Tyto hodnoty sice mohly být vloženy do modelu jakožto konstanty, nicméně nebylo možná je počítat jako funkci měnící se v prostoru a čase. Tato komplikace patří mezi nejzávažnější problémy modelů tohoto typu. Hodnoty výše zmíněných proměnných totiž v průběhu pádu laviny konstantní nejsou (Hutter a Kirchner, 2003). Dále pomocí těchto modelů není možné přesně předpovědět dosah lavin a hlavně velikost akumulace. Je to přičítáno především nemožnosti adekvátně popsat fyzikální vlastnosti laviny, kluzné vlastnosti a rozměry pohybující se laviny (Hutter el al. 1993).

4.4 Hydraulické modely

Hydraulické modely idealizují proudění v lavině jako ideální Newtonowskou kapalinu. Toto zjednodušení umožňuje poté proudění numericky řešit pomocí Navier-Stokesových rovnic (Pokorný, 2014).

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \overrightarrow{u} \times \nabla \vec{u} = -\frac{1}{\varrho} \nabla p + v \Delta^2 \vec{u} + \vec{f} \qquad (8)$$

kde: $\vec{u}$ – rychlost, p – tlak, t – čas, ϱ – hustota, ν – kinematická viskozita, $\vec{f}$ – součet objemových sil

Jedná se o modely, které jsou založené na výpočtu usměrněného lavinového proudění, jejich základní proměnné jsou hloubka lavinového proudění a rychlost. Velmi často vychází z hydrologických modelů proudění, zejména z modelů proudění v mělkém korytě. Proudění počítají pro ideální, vyrovnaný, usměrněný tok pro nestlačitelnou kapalinu, u které je předpokládána přítomnost hydrostatického tlaku.

Tyto modely jsou vyvinuty jako souvislý, gravitací řízený tok po ukloněné rovině, který je obvykle omezen na neměnný pohyb, bez vertikálního proudění v tělesu laviny. Tento princip byl poprvé použit v osmdesátých letech Nory (Norem et al., 1989), kteří se snažili vyřešit problém výškového profilu rychlostí v lavinovém tělese. Profil se nedá vyjádřit kvadraticky, ale vykazuje silné střižná napětí u povrchu bazální roviny, a síly podobné brždění opačným proudem na horní hranici lavinového tělesa (Pudasainy a Hutter, 2007). Jako parametry hydraulických modelů jsou často uváděny průměrná hloubka proudění, hloubka proudu, koeficient tření na bazální ploše a koeficient funkce lokálního sklonu svahu, který umožňuje vyjádřit působení gravitace (Barbolini et al., 2000). Model dále pracuje s již dříve používanými koeficienty, jako je suché tření a vnitřní deformace v tělese laviny (Gruber a Bartelt, 2007).

Na rozdíl od předchozích modelů, jsou hydraulické modely schopny popsat rozsah laviny, a její postupný vývoj v průběhu pohybu po lavinové dráze, a tím jsou schopné daleko přesněji vyjádřit proces změn rychlostí lavinového proudu. Jsou tedy daleko vhodnější pro využití například ve vymezování ohrožených oblastí, které mohou být případnou lavinou zasaženy (Barbolini et al., 2000).

Hydraulické modely se však neobejdou bez nedostatků. Využívají se zejména v případě, kdy je potřeba zjistit geometrické vlastnosti laviny (Wawra, 2010) , nicméně jejich podstata stále nedokáže popsat procesy, které probíhají v lavině během pádu, tato skutečnost je dána především tím, že proud je považován za hydrostatický a laminární (Barbolini et al., 2000). Dále tyto modely nejsou schopny přesně popsat proudění z hlediska ztekucení sněhové masy. Ačkoliv byly pro různá stádia ztekucení granulárního

materiálu měřeny hustoty, nejsou tyto modely schopny popsat vlastnosti různých typů sněhu, a všechna stádia částečného zkapalnění (Pudasainy a Hutter, 2007).

4.5 Kinetické modely

Aplikace kinetických modelů leží v oblasti prachových lavin, kde dochází k silnému promísení sněhových částic a velmi častým kolizím mezi nimi. Tento stav lze popsat jako hustý zrnitý plyn (Wawra, 2010). Aplikovat však tyto teorie na těleso laviny je poměrně komplikované. Kinetická teorie obsahuje rovnice pro rovnováhu hmoty, momentu, které jsou definovány pro Savage-Huterův model následovně (Mangeney-Castelnau a Vilotte, 2003):

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathrm{div}\mathbf{F}(\mathbf{U}) = \mathbf{B}(\mathbf{U}),$$

kde

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ q_x \\ q_y \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} q_x & q_y \\ \frac{q_x^2}{h} + \frac{g}{2}h^2 & \frac{q_x q_y}{h} \\ \frac{q_x q_y}{h} & \frac{q_y^2}{h} + \frac{g}{2}h^2 \end{pmatrix}, \tag{8}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{U}) = \begin{pmatrix} 0 \\ \gamma_x gh + \frac{1}{\rho} T_x \\ \gamma_y gh + \frac{1}{\rho} T_y \end{pmatrix},$$

kde: q = hu – materiálový tok, t – čas, u – třírozměrný vektor hybnosti, h – mocnost laviny, g – gravitační zrychlení, γ – koeficienty funkce lokálního sklonu, T – napětí, ρ – hustota

Dále též pro fluktuaci energie, korespondující s proměnnými tělesa, kterými jsou hustota, hybnost a granulární teplota. Teplota je měřena fluktuující energií vycházející z kolizí jednotlivých částic. Pro zjištěná těchto proměnných je zapotřebí využít poměrně složitý systém hraničních podmínek pro granulární teplotu, hybnost a napětí v tělese (Pudasainy a Hutter, 2007). Tyto podmínky se podařilo stanovit pouze pro situaci ideálních sférických částic. Řešení rovnic se i v stálém kluzném proudění jeví jako velmi komplikované (Wawra, 2010).

Lavina je v kinetickém modelu uvažována jako jednofázový, suchý granulární proud, s coloumbovským chováním. Kinetické modely nejčastěji vychází ze Saint Venantových rovnic.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + div(hu) = 0 \tag{9}$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + div(hu \otimes u) + \nabla\left(\frac{g}{2}h^2\right) + gh\nabla Z = 0$$

Kde: t – čas, u – průtoková rychlost, g – gravitační zrychlení, Z – výška podkladu, q – průtok, q(t;x) = h(t;x) u(t;x)

Tyto rovnice jsou provázány s mechanikou kapalin, a s jejich pomocí je popisováno jak vlnové šíření, tak proudění v otevřeném korytu, zejména pak proudění mělké. (Mangeney-Castelnau a Vilotte, 2003). Tento typ lavinových modelů vychází zejména z práce T. Grevea a K. Huttera (Hutter, 1993). Lavina byla nejprve popsána dvourozměrně, jako mělké nestlačitelné kontinuum. Tření bylo vyjádřeno pomocí suchého tření (1) na bázi laviny a Mohr-Coloumbovo kritérium pro vnitřní vlastnosti granulární hmoty s konstantním úhlem vnitřního tření.

$$|S| = N tan\emptyset \tag{10}$$

kde: S – střihové napětí, N – normálové napětí/tlak, $\emptyset$ – úhel vnitřního tření

Pomocí těchto rovnic již bylo možné určit mocnost laviny, nicméně chyběl třetí rozměr pro plošný rozsah. Dále došlo ke zdokonalení tohoto modelu do třírozměrného, který je založen na zákonech rovnováhy hmoty a hybnosti (11), hraničních podmínkách pohybu a napětí na volném povrchu, tangenciálních podmínkách vektoru hybnosti na neproniknutelné pevné bázi, základních vztazích uvnitř granulárního materiálu a vztazích determinujících skluz na bázi laviny (Mangeney-Castelnau a Vilotte, 2003).

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{11}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u\right) = -\nabla \cdot \sigma + \rho g$$

kde: t – čas, u – třírozměrný vektor hybnosti, σ – Cauchyho tensor pnutí, g – gravitační zrychlení, ρ – hustota, ∇ – gradient, ∂ – parciální diferenciál

Další vývoj v této problematice provedl Jenkins (Jenkins a Askari, 1999), který rozdělil chování laviny do dvou částí. V horní části tělesa se lavina podle tohoto přístupu chová jako plastické těleso s vnitřním třením, zatímco ve spodní části, kde lavina přichází do styku s podložím zrna silně interagují navzájem, nebo se skluzným horizontem (Wawra, 2010). Uvažuje se tedy tok granulárního materiálu, který se skládá z identických, velmi elastických kulových částic, které postrádají tření. Dále udává koeficient návratnosti, který charakterizuje ztrátu energie hybnosti, normály k povrchu dvou kolidujících částic. Do modelu vstupuje měrná hmotnost, která je vypočítána pomocí hmotnosti částic, a průměrného počtu částic na jednotku objemu. Dále zjišťuje průměrnou hybnost, jelikož hybnost jednotlivých částic v průběhu času fluktuuje okolo této hodnoty. Jako poslední je udávána granulární teplota, která udává energii na jednotku hmotnosti kmitajících částic. Tyto vlastnosti platí pro většinu tělesa laviny kromě spodní málo mocné části, kde částice přicházejí do kontaktu s podložím (Straughan et al., 2001). Vztah mezi třecím napětím, kolmým napětím a relativní hybností, v tenké třecí zóně bývají předem určeny (Wawra, 2010).

4.6 DEM modely

Zkratka DEM vyjadřuje slovní spojení Discrete Element Model. Myšlenka DEM modelů je založena na simulaci pohybu jednotlivých částic v granulárním proudění, za využití Newtonova druhého pohybového zákona (Wawra, 2010).

$$F = ma \tag{12}$$

kde: m – hmotnost, a – vektor zrychlení

Chování granulárního materiálu závisí na chování jednotlivých zrn, a jejich interakci. V začátcích DEM modelování docházelo k dílčím zjednodušením, pracuje pouze v dvourozměrném prostoru a zrna jsou uvažována v kruhovém tvaru. Toto zjednodušení však vede k chybám, neboť dokonale kruhová zrna kladou při vzájemné interakci daleko menší odpor než zrna s nepravidelným tvarem. Chování jednotlivých zrn ve vzájemném

kontaktu je vyjádřeno pomocí kolmé deformace, střižné deformace a sklouznutím či prasknutím. Dále je v rovnici (13) začleněna i tvrdost jednotlivých zrn.

$$F_n = k_n n \tag{13}$$

kde: F_n – normálová síla, n – normálový posun, k_n – konstanta tvrdosti

DEM modely dokážou velmi kvalitně vyjádřit vliv velkého množství mikro parametrů, jako je například relativní hustota, vnitřní tření či laterární tlak na celkové chování velkého tělesa. Na makro chování celé struktury má největší vliv vnitřní tření mezi jednotlivými zrny. Tento parametr velmi silně ovlivňuje soudržnost a roztažitelnost celého tělesa. Pokud je vnitřní tření mezi jednotlivými zrny nulové, celá granulární makrostruktura se za jakýchkoliv okolností ustálí na maximální hodnotě relativní hustoty. V tomto stavu se chová jako tekutina a objem zůstává neměnný, což je velmi výhodné pro numerickou simulaci a nevyžaduje složité výpočty. Pokud idealizujeme vnitřní tření mezi zrny jako nekonečné, soudržnost celého tělesa nekonečná není, jelikož se snižuje rotací jednotlivých zrn. Z tohoto zjištění vyplývá, že pro DEM modelování je důležité zahrnout rotaci jednotlivých zrn, a to z toho důvodu že tato velmi silně ovlivňuje celkovou soudržnost tělesa (van Baars, 1996).

V typické DEM simulaci musí každá částice čelit na ní působícím silám, jedná se o gravitační sílu a kontaktní síly, které vychází z interakce se sousedními částicemi.
V modelování se obvykle uvažují částice nedeformovatelné, nicméně kontakt s ostatními částicemi je počítán jako pružný, což je vyjádřeno možností vzájemného překryvu částic. Pro vyjádření tření mezi částicemi je využívám Mohr-Coloumbův zákon tření. Pohyb každé částice v granulární sestavě je vypočítáván pomocí Newtonovy pohybové rovnice.

$$\begin{cases} \boldsymbol{F}_c - \boldsymbol{F}_d(\dot{\boldsymbol{x}}, \ddot{\boldsymbol{x}}) = m(\ddot{\boldsymbol{x}} - \boldsymbol{g}) \\ \boldsymbol{M}_c - \boldsymbol{M}_d(\dot{\boldsymbol{x}}, \ddot{\boldsymbol{x}}) = \boldsymbol{I}\dot{\boldsymbol{\omega}} + \boldsymbol{\omega} \times \boldsymbol{I}\boldsymbol{\omega} \end{cases} \tag{14}$$

kde: $\mathbf{F}_c = \sum_k \mathbf{F}_{c,k}$ – výslednice kontaktních sil působících na částici, kde k=(1,…,N) N=celkový počet kontaktů s ostatními částicemi, $\mathbf{M}_c = \sum_k \mathbf{M}_{c,k}$ – výsledný moment kontaktních sil vzhledem k těžišti částice, $\dot{x}$ – rychlost částice, $\ddot{x}$ – zrychlení částice, m – hmotnost částice, I – tensor setrvačnosti, g – gravitační zrychlení, F_d, M_d – výslednice tlumících sil a momentu, které vycházejí z rychlosti či zrychlení částice

Obě individuální rovnice pro pohyb a nelineární směrové rovnice na každém kontaktu mezi zrny, jsou sjednoceny v čase pomocí průměru vycházejících z konečného diferenciálního schématu. Tlumící síly a momenty jsou typicky představeny jako zdroj rozptylu energie v granulární hmotě. Přidávají se tedy k nepružnému klouzání na kontaktech zrn, a definují tak neelastickou podstatu kolizí jednotlivých zrn. Pro popsání podkladu se obvykle používá dokonale pevný povrch, jehož tření je charakterizováno Coloumbovým zákonem tření (1). Toto zjednodušení je vhodné použít zejména u základových lavin. Dále je třeba modelu udat velikost zrn, tato data se obvykle získají terénním měřením. Kritické pro správné fungování DEM modelu je určení interních parametrů granulární masy. Tyto mikromechanické parametry jsou úhel třecí síly mezi zrny, kontaktní tuhost a tlumící koeficienty.

Poměrně velký vliv na výsledné chování granulární masy má zjednodušení tvaru částic na dokonale kulový tvar. Toto způsobuje podstatné snížení hodnoty úhlu vnitřního tření, ke kterému dochází z toho důvodu, že model není schopen správně popsat třecí síly vznikající na kontaktech nepravidelných částic (Salciarini et al., 2010).

Nevýhodou modelu je jeho velká náročnost na výpočetní techniku. Jelikož je potřeba počítat vlastnosti pro každou jednotlivou částici, jsou tyto výpočty velmi časově náročné. Modelování vlastností sněhu je též velmi náročné, například modelování soudržnosti sněhu je v tomto modelu neproveditelné, zároveň získání parametrů soudržnosti, či relativní objemové hmotnosti sněhu je komplikované i s pomocí terénního výzkumu (Wawra, 2010).

4.7 Modely založené na mechanice kontinua

Většina numerických modelu tohoto typu vychází z teorie prezentované dvojicí Savage a Huttera (Wawra, 2010). Tyto modely navazují na práce v minulosti, které bývají někdy považovány za příliš zjednodušené. Za příliš zjednodušený model je považována například i průkopnická Voellmyho práce. Savage a Hutter (1989) vycházejí z faktů, že pomocí těchto převážně dvourozměrných modelů není možné přesně předpovědět dosah, či mocnost lavinové akumulace (Hutter et al., 1993). Tyto typy modelů umožňují popsat vývoj sněhové masy v průběhu jeho pohybu po ukloněné hrubé ploše. Bylo sice nutné do modelu zahrnout velké množství zjednodušení, nicméně stále jej můžeme považovat za realistické. Tato zjednodušení spočívají zejména v tom, že pohyblivá granulární masa je

považována za nesoudržnou, nestlačitelnou a neměnící svůj objem. Zákon zachování hmotnosti a hybnosti vyjadřují rovnice (15) Tření je vyjádřeno pouze pomocí Mohr-Coloumbovského tření, kde je vnitřní střihové napětí a normálový vztah ve vztahu který udává rovnice (10), a to jak uvnitř klouzající hmoty, tak i na bazálním povrchu.

$$\nabla \cdot u = 0 \qquad 15)$$

$$\varrho_0 \left\{ \frac{\partial u}{\partial t} + \nabla \cdot (u \otimes u) \right\} = -\nabla \cdot p + \varrho_0 g$$

kde: u – rychlost, p – tlakové napětí, g – gravitační zrychlení, ∇ – gradient funkce, ϱ_0 – konstantní objemová hmotnost

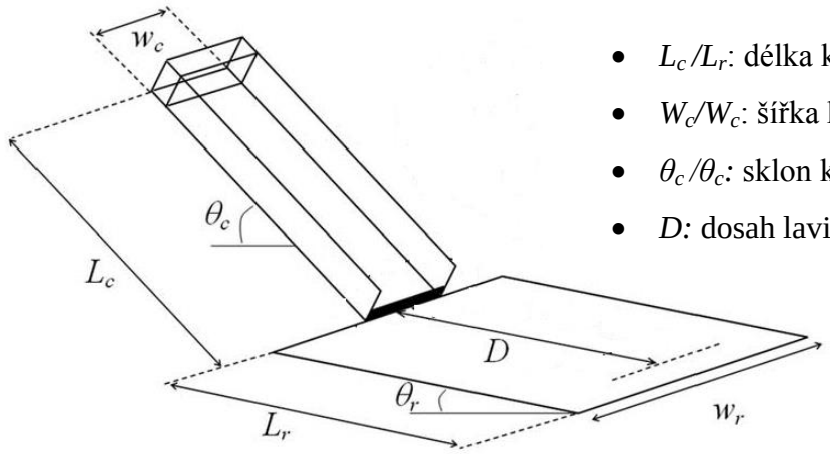
Geometrické vlastnosti laviny jsou také modifikovány, a to tak že vlastní pohybující se těleso laviny je mělké, a to z důvodu, že granulární laviny i v přírodním prostředí většinou mělké bývají. Objemová hmotnost laviny je brána jako velmi nízká, což vychází ze skutečnosti, že hustota podkladu na lavinové dráze je vždy vyšší než hustota samotné laviny. Pohybová složka laviny se skládá ze střižného tření, které nedeformuje vlastní masu laviny, a dále klouzavý pohyb po bazální rovině. Vzhledem k tomu že k střihovým deformacím dochází zejména v tenké vrstvě na hranici laviny a bazální roviny, byl stanoven nulový rozměr této hraniční oblasti. Dále byly tyto dvě pohybové složky zkombinovány do jednoho skluzového zákonu, ze kterého v modelech vychází vyšší kluzná hybnost. Tato zjednodušení však byla potvrzena jako správně zvolená, zejména proto, že výsledky modelů poměrně dobře korespondovaly s laboratorními experimenty (Pudasaini a Hutter, 2003). Pomocí tohoto modelu je možné simulovat laviny na zakřiveném povrchu, s malými překážkami v toku laviny.

4.8 Analogové modely

V modelování lavin, je stejně tak jako například v hydrologickém modelování více přístupů. Kromě výše zmiňovaného numerického modelování se využívá i modelování analogového. Jedná se o zmenšené laboratorní modely lavinových svahů. I v tomto přístupu se uplatňuje základní dělení na modely zabývající se deskovými lavinami, a modely které modelují laviny prachové.

4.8.1 Analogové modely deskových lavin

Počátek studia proudění granulárního materiálu pomocí analogových modelů spadá do sedmdesátých let dvacátého století (Wieghardt, 1975; Ridgway and Rupp, 1970). Tyto práce popisují základní vlastnosti granulárních materiálů a většina současných výzkumů vychází právě z nich. Většina studií se věnuje vlivu různých překážek na proudění a zejména dosahu deskových lavin. Tyto překážky totiž bývají většinou umísťovány na základě předchozích zkušeností z pádů lavin v minulosti, a expertnímu vymezení těchto lokací nebylo v minulosti věnováno úsilí (Caccamo et.al, 2012). Vlastní modely jsou oproti skutečným lavinovým drahám zmenšené, typicky v poměru pohybujícím se okolo hodnoty 1:300. Pro reprezentaci granulárního sněhového materiálu se obvykle využívá skleněných zrn o různém průměru. Princip modelů tohoto typu (Obr. 8) spočívá v náhlém vypuštění granulárního materiálu určitého objemu do ukloněného kanálu se známými rozměry, které reprezentuje lavinovou dráhu. Následně tento granulární materiál vytváří granulární proudění. Tento kanál následně ústí do plochy, která reprezentuje akumulační zónu laviny (Faug et.al,, 2008).

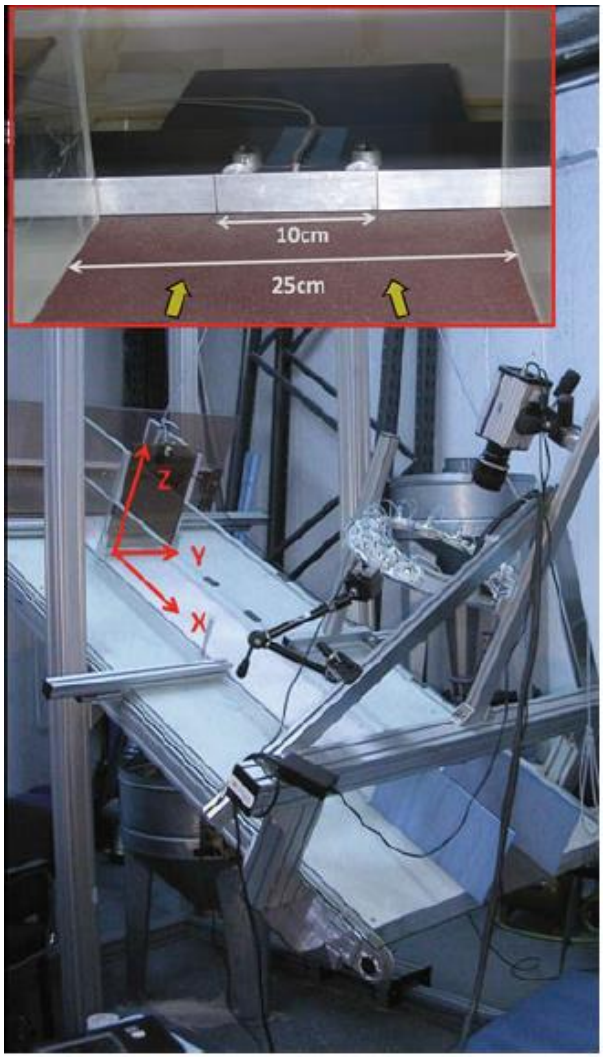


- L_c/L_r: délka kanálu/akum. zóny
- W_c/W_c: šířka kanálu/akum. zóny
- θ_c/θ_c*:* sklon kanálu/akum. Zóny
- *D:* dosah laviny

Obr. 8: Schéma analogového modelu laviny. (Zdroj: upraveno podle Faug et al., 2008)

Většina modelů tohoto typu je natolik sofistikovaná že je možné tyto parametry modelu měnit a přiblížit je tak skutečně existujícím lavinovým drahám. Je možné měnit i tvar výpusti, ze které se do kanálu uvolňuje granulární materiál. Jako materiál na stavbu modelů se používá dřevo, hliník, sklo, či různé typy plastů (Caccamo et.al, 2012). Vlastní provedení může být velmi různorodé viz. Obr. 9 a 10.

Obr. 9: Analogový model laviny ze skleněných zrn. (Zdroj: http://www.irstea.fr/)



Obr. 10: Analogový model laviny s překážkou. (Zdroj: Caccamo el al., 2012)

Tyto analogové modely nacházejí využití zejména v modelování vlivu záchytných zdí, či jiných překážek na dosah laviny. Tyto překážky se umísťují zejména do oblasti, kde přechází kanál do akumulační zóny nebo přímo do akumulační zóny. Výsledky pak vychází z porovnávání dosahu laviny bez použití překážky a z dosahu při použití překážky (Faug et.al,2008; Caccamo et.al, 2012).

4.8.2 Analogové modely prachových lavin

Modelování prachových lavin pomocí analogových modelů vychází ze stejné potřeby, jako modelování lavin deskových. Jedná se tudíž o modely, pomocí kterých se nejjednodušeji získá informace, jakým způsobem působí na šíření laviny případná překážka na lavinové dráze. K modelování prachových lavin se používají tři přístupy (Naaim-Bouvet et al., 2003).

4.8.2.1 Těžká tekutina ve vodě

Na konci sedmdesátých let dvacátého století byl vyvinut koncept modelování prachových lavin pomocí těžší kapaliny, která se rozptýlí v lehčí, obvykle ve vodě. Pomocí těchto modelů jsou prováděny dva typy simulací. Krátká simulace, kdy je do vody vypuštěno malé množství těžší kapaliny a simuluje se tak pouze chování čela laviny. Tímto způsobem je možné modelovat pouze krátké laviny. Druhý typ simulace je založen na kontinuálním vypouštění těžší tekutiny do vody, kde je pomocí ukloněného kanálu modelována lavinová dráha. Takto je možné modelovat dlouhé laviny, ve kterých je prodění v tělese laviny řízeno rychlostí čela. Tento typ modelu je možné použít pouze v případě, když je možné zanedbat usazování částic. Z tohoto faktu vyplívá, že tento typ fyzikálního modelu není příliš vhodný k modelování dosahu lavin, či jejich akumulaci (Naaim-Bouvet et al., 2003).

4.8.2.2 Dvoufázová simulace ve vodě

Dvoufázový model byl dvojicí Hermann a Hutter (1991) vyvinut pro simulování dosahu prachových lavin. Tento typ modelu je již schopen obsáhnout usazování částic. Pro simulaci byl použit turbulentní proud suspenze vody s polystyrenovými částicemi.

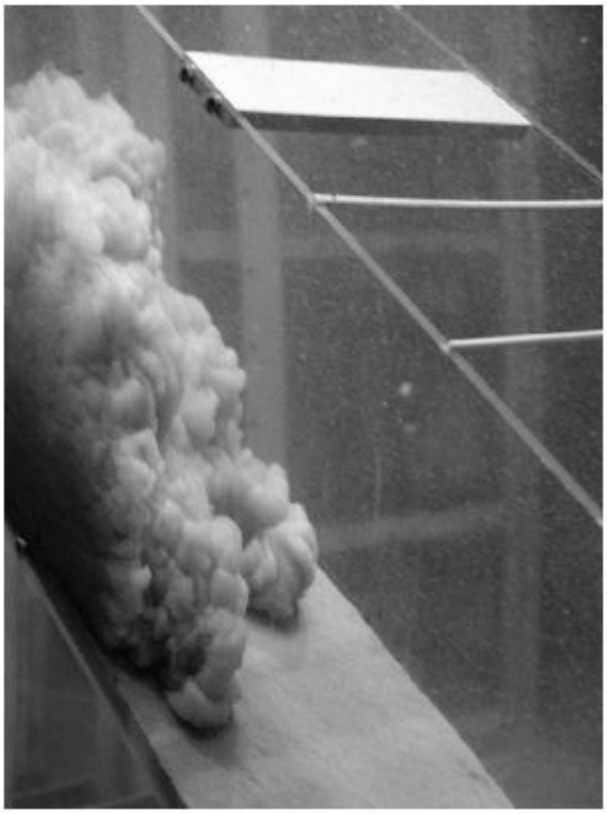
4.8.2.3 Dvoufázová simulace ve vzduchu

Simulace prachové laviny ve vzduchu byla vyvinuta Bozhinskim a Sukhanovem (1998). Pomocí suchého prachového materiálu modelovali formování lavinového prašného

„mraku“. Podařilo se poměrně úspěšně modelovat formaci „mraku“ v akumulační zóně (Naaim-Bouvet et al., 2003).

4.8.2.4 Konstrukce modelu

Pro simulaci se obvykle používá hustší slaná vody s příměsí kaolinu, aby ji bylo možné pozorovat. Experimentální lavina již začíná jako rozptýlená prachová lavina, na rozdíl od situace v přírodě, kdy se lavina stává prachovou až při dosažení určité rychlosti. Experiment probíhá v uzavřeném tanku, na ukloněné dráze. Hustší tekutina je vypouštěna z vnořené menší nádoby. Do kanalizované dráhy je možné vložit různé typy překáže, a pozorovat jak ovlivní formování, či dosah prachové laviny. Výsledky z tohoto typu modelů se obvykle používají jako zdrojová data pro numerické simulace, a to z toho důvodu, že terénní sběr těchto dat je velmi komplikovaný.



Obr. 11: Analogový model prachové laviny. (Zdroj: Rastello, 2002)

4.9 Přehled používaných lavinových modelů

V této části práce jsou uvedeny lavinové modely, které se v současnosti používají. Pomocí tabulky je u každého modelu uvedena jeho dimenzionalita, vhodné měřítko modelování a požadavky na vstupní data.

Název modelu	Dimenzionalita	Typ modelu	Princip	Vhodnost použití	Vstupní data	Měřítko modelování
RAMMS	2D (3D povrch)	numerický	Volellmyho rovnice	Simulace deskové laviny	DEM, polygon odtrhové zóny, mocnost sněhu v odtrhové zóně, přítomnost lesa	Lokální, regionální
ELBA+	2D (3D povrch)	numerický	Voelmyho /Mohr-Coloumbova rovnice	Simulace deskové laviny	DEM, polygon odtrhové zóny, mocnost sněhu v odtrhové zóně , výpočetní oblast modelu	lokální
AVAL 1D	1D	numerický	hydraulický princip u deskové laviny, kinetický princip u prachové laviny	Simulace deskové a prachové laviny	Hloubka sněhu v odtrhové zóně, objem laviny, ndm. výška odtrhu, nadm. výška odtrhu a dosahu	lokální
FLOW-R	2D	empirický		Zjištění ohrožených oblastí	DEM, přítomnost lesa (grid), přítomnosti sněhu (grid)	regionální
Samos AT	2D	numerický	hydraulický	Simulace prachové laviny	odtrhové zóny, hloubka+hmotnost+objem sněhu v odtrhové zóně	lokální
Alfa-Beta	1D	statistický		Modelování dosahu laviny	Nadm. výška odtrhu a dosahu, horizontální a vertikální vzdálenost, profil dráhy	lokální

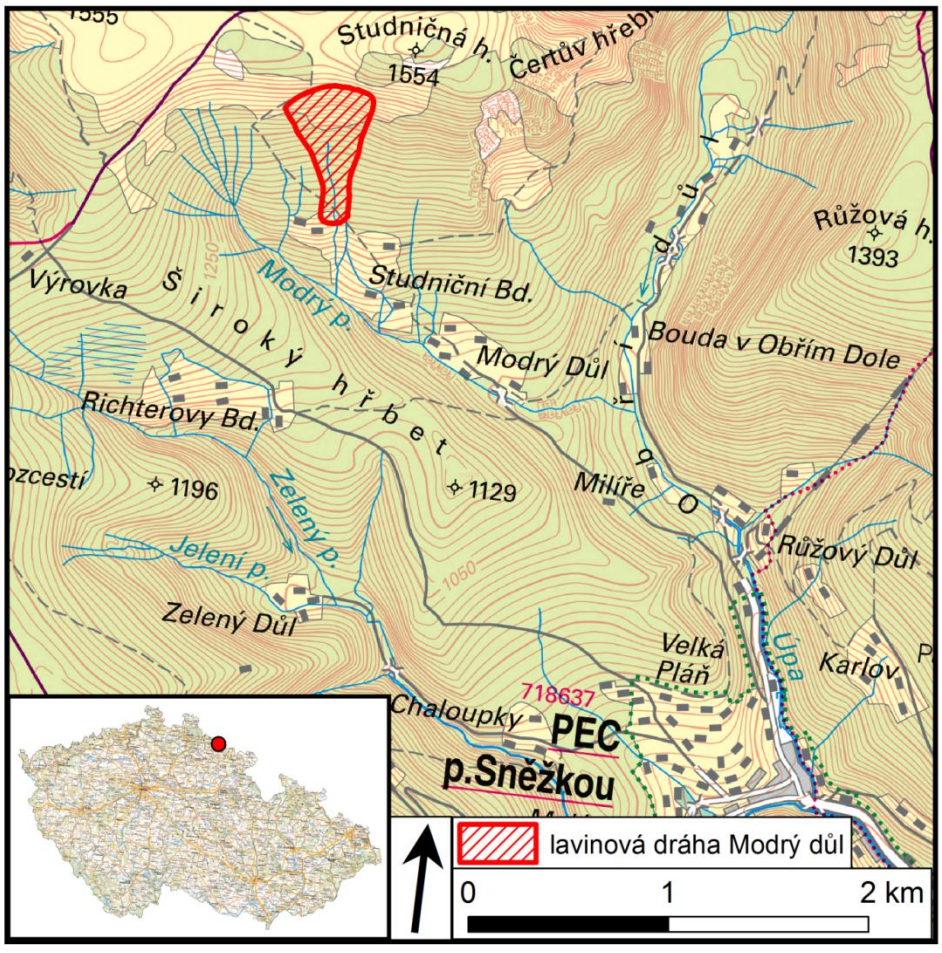
Tab. 1: Přehled dostupných lavinových modelů

Z tabulky je patrné, že většina v současnosti používaných modelů je primárně určena k modelování deskových lavin. Modelování lavin prachových je daleko složitější, zejména z důvodu, že rovnice, které popisují chování prachové laviny, jsou daleko složitější než rovnice popisující proudění laviny deskové. Používané modely jsou nejčastěji dvourozměrného či jednorozměrného charakteru, což umožňuje zjednodušit numerické operace. Vstupní data se liší podle typu modelu, obvykle však modely vyžadují popis reliéfu lavinové dráhy, který bývá vyjádřen digitálním modelem reliéfu, nebo pouze podélným profilem lavinové dráhy. Většina modelů též pracuje s hloubkou a objemem sněhu v odtrhové zóně. Měřítko modelů je determinováno dostupností dat, z toho je patrné že v malém měřítku jsou schopny operovat pouze empirické modely (Flow-R), zatímco fyzikální či deterministické modely jsou používány k modelování na jednotlivých lavinových drahách, ke kterým jsou k dispozici data z terénního měření. Modelování s regionálním měřítkem je využíváno zejména pro vymezení oblastí ohrožených lavinovou činností. Modely lokálního měřítka nacházejí využití zejména v územním plánování, kdy

je jejich pomocí možné zobrazit dosah či rozsah laviny z určité masy sněhu na známých lavinových drahách.

5 Fyzicko-geografická charakteristika modelového území

V rámci druhé části práce, byly formou případové studie modelovány pády lavin na lavinové dráze Modrý důl v Krkonoších. Lavinová dráha Modrý důl v Krkonoších se administrativně nachází v Královohradeckém kraji v okrese Trutnov na katastrálním území obce Pec pod Sněžkou. Z hlediska ochrany přírody se celá dráha nachází v 1. zóně Národního Parku Krkonoše. V lavinovém katastru Krkonoš má tato dráha číslo 8 (Spusta a Kociánová, 1998).

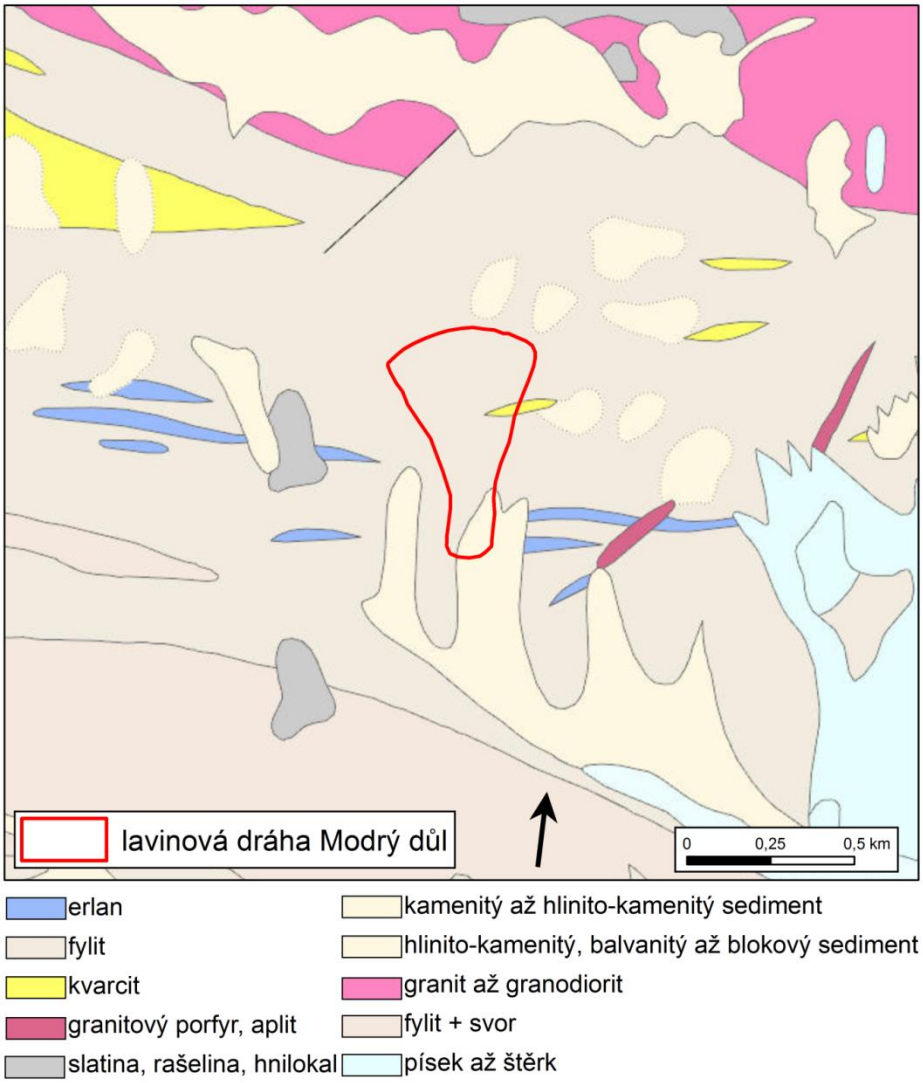


Obr. 12: Lavinová dráha Modrý důl. Půdorys dle lavinového katastru Krkonoš. (mapový podklad: ZM 50, Přehledové mapy ČR, Spusta a Kociánová, 1998)

5.1 Geologické poměry

Krkonoše z hlediska geologické regionalizace náleží do Krkonošsko-Jizerského krystalinika, které je součástí Lugické oblasti (lugikum) Českého masivu. V Krkonošsko-Jizerském krystaliniku je přítomné kadomské patro, dále téměř úplné hercynské patro s granitoidy a částečné kaledonské pásmo. Jedná se o nejdůležitější část lugické oblasti. Toto území je na povrchu ohraničeno na východu a jihu stykem se sedimenty limnického permokarbonu v několika samostatných pánvích. Na severu pokračuje krkonošsko-jizerské krystalinikum mimo naše území až k vnitřnímu zlomu lugika. Horniny jsou regionálně metamorfovány ve facii zelených břidlic, zřídka i ve facii amfibolitové. Dále se vyskytují i tělesa ortorul. Na kadomském pásmu leží horninový soubor ordovicko-silursko-spodno-devonského stáří, který je regionálně metamorfován ve facii zelených břidlic. Stejně tak i hojné metabazity s aktinolitem a amfibolitem (Mísař, 1983).

Oblast Krkonoš dále podle dílčího dělení náleží do krkonošského úseku (krystalinika). Podstatná část tohoto úseku náleží kadomskému patru. Další významnou část krkonošského krystalinika jsou albitické svory a fylity, které tvoří severní polovinu. Z metamorfitů se vyskytují facie albit-epidotických amfibolitů, subfacie křemen-albit-chlorit-muskovitické a facie modrých břidlic s alkalickými amfiboly. Hlavním zástupcem magmatitů je krkonošsko-jizerský pluton. Tektonicky je Krkonošské krystalikum řešeno jako stavba kaledonského stáří. Rozlišujeme dva příkrovy sudetský a subsudetský. Paleozoické patro spočívá mnohde tektonicky na patře kadomském. Stáří deformace je uváděno v starokaledonskou až mladokaledonskou fázi. Orientace vrásových struktur je generálně V-Z. Tato výstavba byla poté ovlivněna deformacemi hercynského stáří. V tomto případě mají vrásové osy směr SV- JZ (Mísař, 1983).



Obr. 13: Geologická mapa okolí lavinové dráhy Modrý důl. (mapový podklad: Geologická mapa 1 : 50000)

Dle geologické mapy 1 : 50 000 (obr. 13) tvoří podloží lavinové dráhy zejména fylity. V úzkém pruhu do dráhy zasahuje kvarcity, ve spodní části dráhy tvoří podloží kamenité až hlinito-kamenité sedimenty. Dále se v okolí vyskytují erlany a organogenní sedimenty - rašeliny. Hřebenové a vrcholové partie nad lavinovou dráhou jsou tvořeny granity až granodiority, či již zmiňovanými hlinito-kamenitými sedimenty.

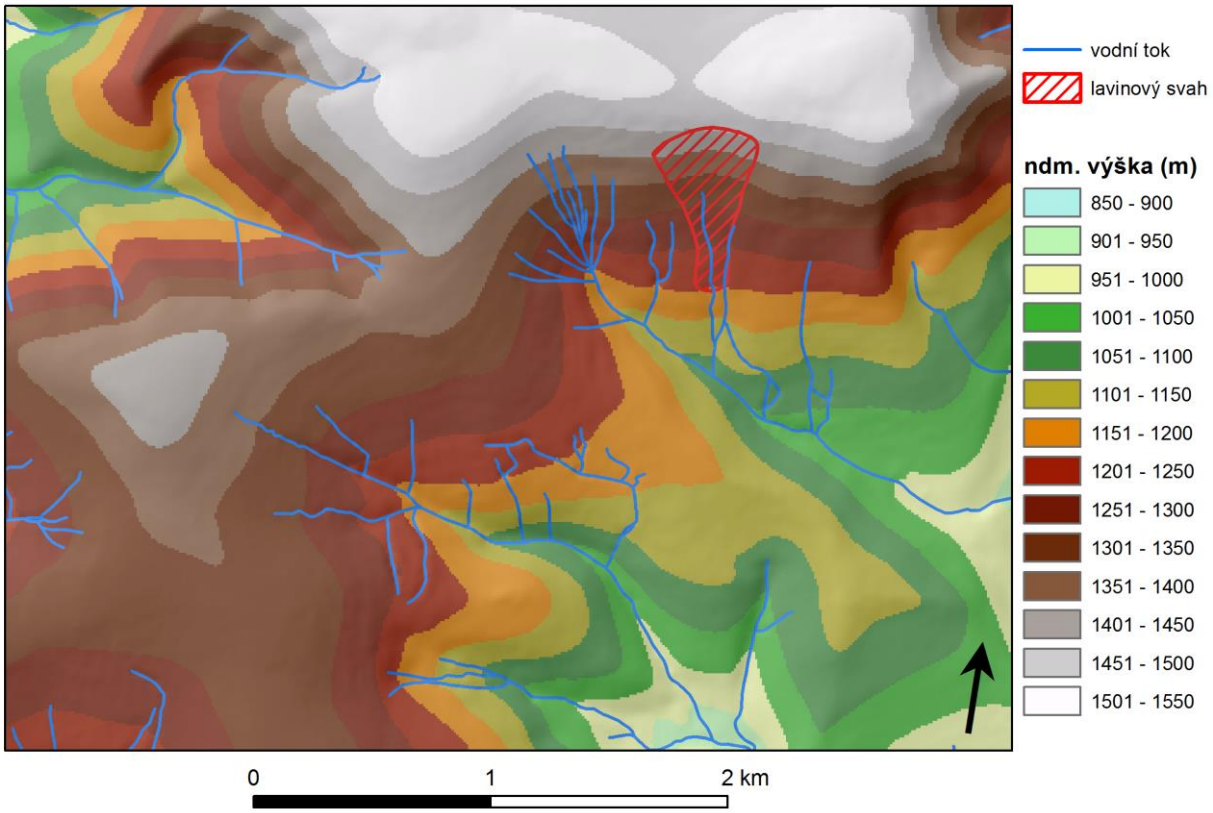
5.2 Geomorfologické poměry

Krkonoše v rámci geomorfologické klasifikace patří do provincie Česká vysočina, Krkonošsko-jeseniceké soustavy a Krkonošské podsoustavy. Krkonoše jako celek jsou charakterizovány jako členitá hornatina se střední výškou 901 m, která je složena z intenzivně zvrásněných proterozoických a prvohorních krystalických břidlic

krkonošského krystalinika, které tvoří rozsáhlou klenbu, do jejíhož středu pronikly žuly krkonošsko-jizerského plutonu. Dále pak kerná hornatina se zbytky etchplénu a starých mělkých depresí ve vrcholové části. Na SV omezena strmým zlomovým pásmem, zatímco na SZ svazích se nachází hluboké údolí svahových toků, z nichž byla mnohá přemodelována údolními ledovci. Četné jsou tvary periglaciální a glaciální modelace, jako například kryoplanačníé terasy, nivační sníženiny, izolované skály, strukturní půdy, ledovcové kary či trogy (Demek a Mackovčin, 2006).

K vyklenutí Krkonoš podél zlomových systémů dochází během třetihorního vrásnění. Krkonoše tak získávají přibližný tvar a výšku, nicméně bez výrazných údolí. Údolí se začínají formovat až působením zpětné eroze po výzdvihu pohoří (Chlupáč, 2011). Dnešní tvar Krkonoš vychází z pleistocéního zalednění, kdy sice kontinentální ledovec pohoří nepřekročil, byl vzdálen cca 8 km od hlavního hřebenu (Šebesta a Treml, 1978), nicméně vyvinulo se zde zhruba 30 údolních ledovců, které přemodelovaly údolí vytvořené vodními toky (Engel et al, 2014). Dnešní morfologie Krkonoš je tedy hlavně výsledkem denudačních procesu, které probíhaly na konci mladších třetihor. Povrch Krkonoš byl až do oligocénu nevýraznou okrajovou částí Českého masivu. V humidním klimatu dochází k peneplenizaci povrchu. K současnému výzdvihu dochází Saxonskými pohyby, které též aktivují již zmiňovanou říční erozi. Dále dochází k pleistocenní glaciální modelaci údolí, vzniku periglaciálních půdních forem, mrazových srubů, výchozů, kamenných moří apod. V současnosti mají rozhodující geomorfologickou roli laviny, sesuvy, blokovobahenní proudy – mury a samozřejmě antropogenní činnosti (Šebesta a Treml, 1978).

Samotná lavinová dráha Modrý důl se nachází na pomezí dvou podcelků, kterými jsou Krkonošské hřbety a Krkonošské rozsochy. Krkonošské rozsochy se vyznačují strukturně denudačními hřbety, se zbytky zarovnaných povrchů ve vrcholových částech. Krkonošské hřbety tvoří nejvyšší část pohoří s místně zachovanými zbytky kryoplénu a četnými skalními tvary periglaciální a glaciální modelace (Demek a Mackovčin, 2006). Modrý důl byl v minulosti formován malým údolním ledovcem, který navazoval jako visutý ledovec na větší ledovec v údolí Úpy (Engel, et al., 2014).

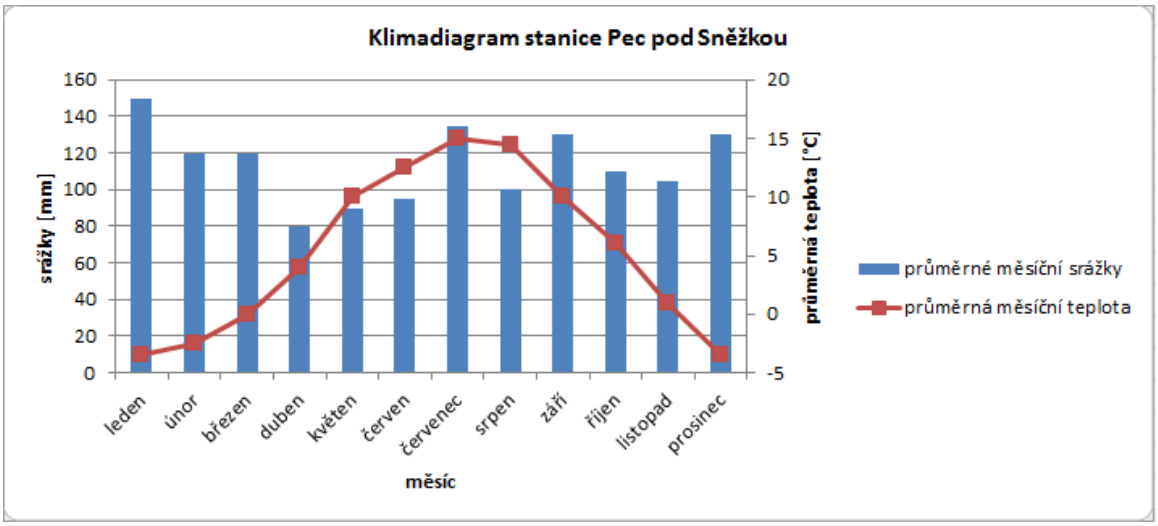


Obr. 14: Výšková členitost okolí lavinové dráhy Modrý důl. (Zdroje dat: Zabeged Spusta a Kociánová, 1998)

5.3 Klimatické poměry

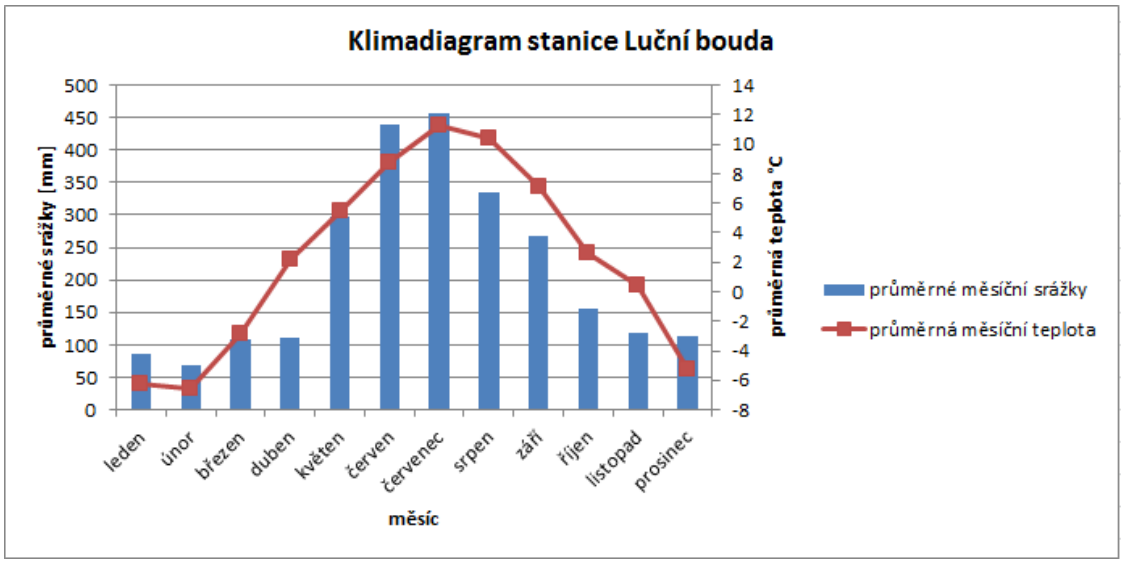
Quitt (1971) zařazuje hřebenové oblasti Krkonoš, kam spadá i oblast lavinové dráhy Modrý důl do kategorie CH4, což je velmi chladná oblast. Tato oblast je charakterizována velmi krátkým chladným létem, mírně chladným podzimem, chladným jarem a typická zima v této oblasti je velmi chladná s dlouhotrvající sněhovou pokrývkou.

Jako referenční stanice pro sledování klimatu v zájmové lokalitě je možné využít stanice Pec pod Sněžkou (Obr. 15), u které je nejdelší datová řada, dále pak stanici Luční bouda, která je nejblíže samotné lavinové dráze, datové řada je však pouze od roku 2004 kdy začalo automatizované měření a třetí stanice se nachází na Sněžce. U stanice Pec pod Sněžkou byly zaznamenány nejnižší průměrné teploty v lednu a v prosinci (-3,5°C), naopak nejvyšší průměrné teploty se vyskytují v červenci (15°C). Maxima srážek náleží do měsíce ledna (150 mm) a nejnižší jsou naopak v dubnu (80 mm) ("Klima Pec pod Sněžkou", 2015).



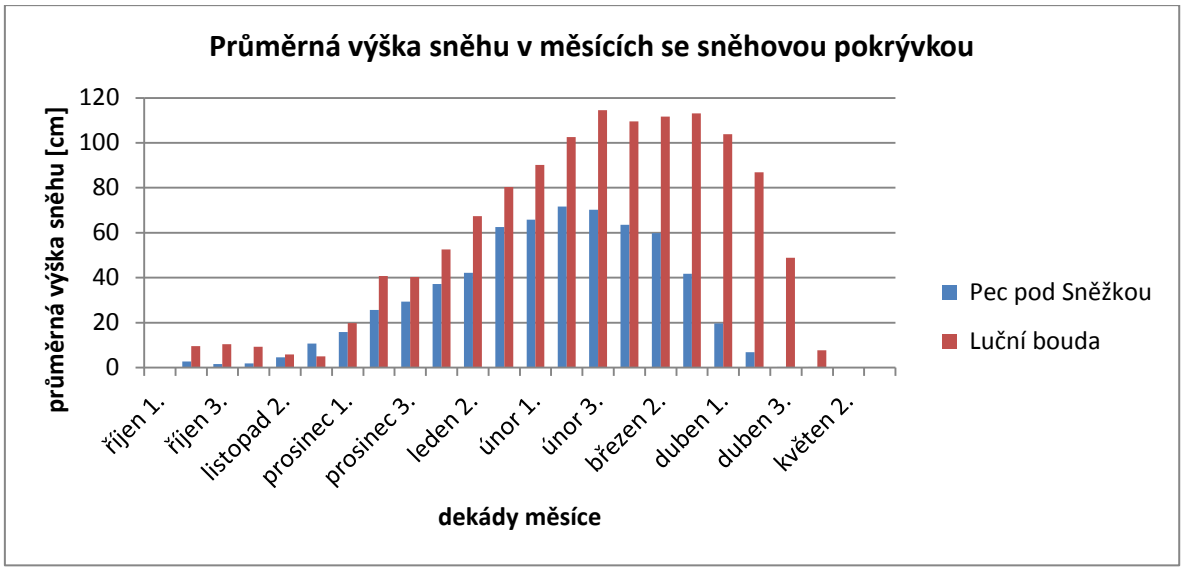
Obr. 15: Průměrný měsíční úhrn srážek a průměrná měsíční teplota na stanici Pec p. Sněžkou v letech 1962 až 2014 (Zdroj: upraveno podle "Klima Pec pod Sněžkou", 2015)

Klimatu zájmové oblasti Modrého dolu však mnohem lépe odpovídají hodnoty zaznamenávané automatickou stanicí Luční bouda (Obr 16). Z tohoto klimadiagramu je patrný rozdíl vůči stanici Pec pod Sněžkou a to zejména v případě srážek. Jejich roční rozložení je daleko více nerovnoměrné. Maxima jsou dosahovány v letních měsících, konkrétně v červenci (456 mm), minima naopak v únoru (69 mm). Celkový roční úhrn srážek činní 2554 mm a téměř 60 % dní v roce je srážkových. Průměrné měsíční teploty jsou oproti stanici v Peci pod Sněžkou celkově nižší, a to jak v případě zimních měsíců (únor: -6,5°C) tak v případě letních (červenec: 11,2°C). Za sledované období bylo 63,1 % dnů mrazových, 24,3 % dnů ledových a 1,2 % dnů arktických ("Staniční data ČHMÚ", 2014“).



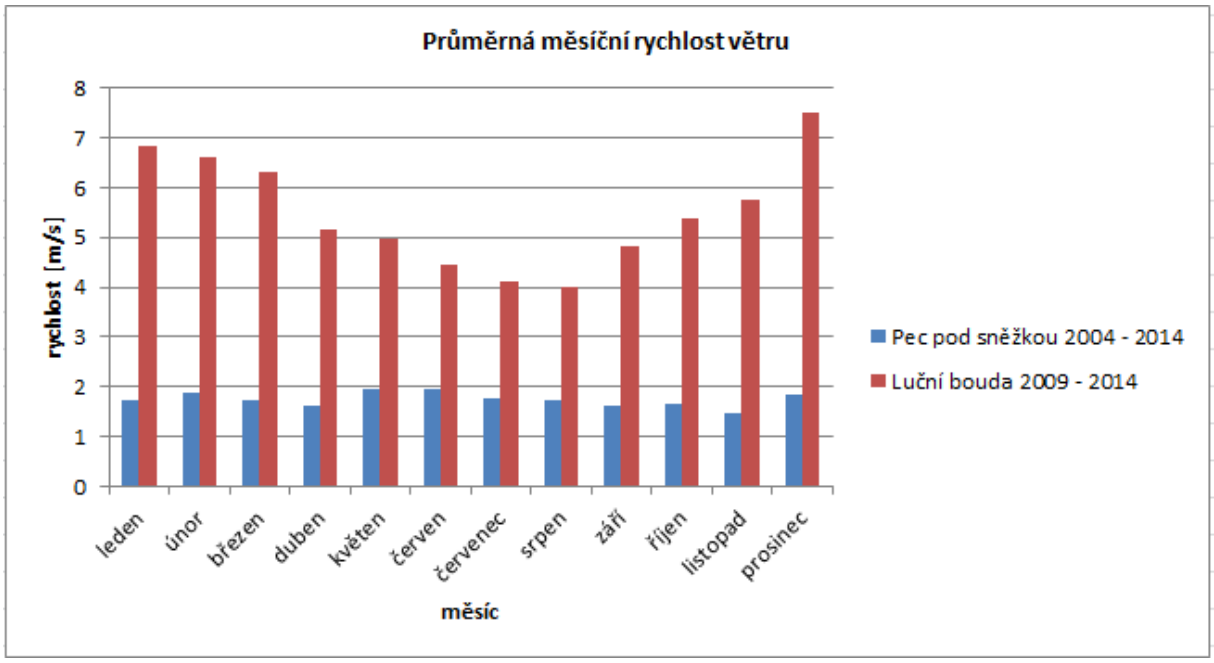
Obr. 16: Průměrný měsíční úhrn srážek a průměrná měsíční teplota na stanici Luční bouda v letech 2004 až 2014. (Zdroj: "Staniční data ČHMÚ", 2014“)

V zimních měsících padá většina srážek ve formě sněhu, který se udrží v některých oblastech Krkonoš i déle než polovinu roku. Dostatek sněhové pokrývky je velmi důležitý pro případný vznik laviny. Staniční data ohledně výšky sněhu jsou k dispozici na obou referenčních stanicích nicméně stav, který panuje na lavinové dráze, příliš přesně vykreslit nedokáží. V prostoru Modrého dolu, konkrétně v odtrhové oblasti studované lavinové dráhy dochází totiž k hromadění velkého množství sněhu vlivem působení anemoorografického systému Bílého Labe. Sněhová pokrývka zde dosahuje mocnosti i přes 10 m (Kociánová et al., 2004) a sníh se zde udrží i do následující zimy jako tzv. Mapa republiky. Pro ilustraci sněhových podmínek na hřebenech a v podhoří Krkonoš byl vytvořen graf (Obr. 17), který podrobně ukazuje vývoj během měsíců se sněhovou pokrývkou, a to na obou stanicích.



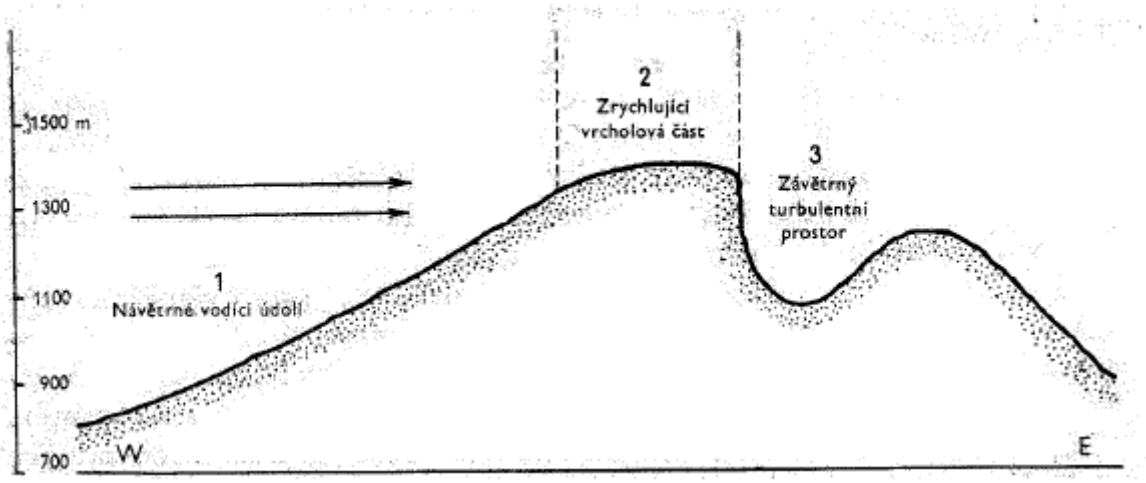
Obr. 17: Vývoj sněhové pokrývky na stanicích Pec pod Sněžkou a Luční bouda. (Zdroj: "Staniční data ČHMÚ", 2014“)

Větrné poměry v oblasti Krkonoš jsou vzhledem k členité povaze pohoří velmi proměnlivé. Obecně je však možné tvrdit, že převládají severozápadní až jihozápadní proudění, která jsou nejsilnější v zimních měsících. Rychlosti proudění větru a jejich roční rozložení se opět mezi stanicemi Luční Bouda a Pec pod Sněžkou liší (Obr. 18). Zatímco v Peci pod Sněžkou je průměrná roční rychlost větru 1,75 m/s a rozdíl mezi nejvyšší hodnotou (květen: 1,94 m/s) a nejnižší hodnotou (listopad: 1,48 m/s) je pouze 0,46 m/s, tak na stanici Luční bouda jsou tyto hodnoty daleko variabilnější, a po celý rok také vyšší (obr. 16). V oblasti Luční boudy je průměrná roční rychlost větru 5,49 m/s a rozdíl mezi největrnějším měsícem (prosinec: 7,51 m/s) a měsícem nejméně větrným (srpen: 4 m/s), činní 3,52 m/s"Staniční data ČHMÚ", 2014“.



Obr. 18: Roční vývoj větrného proudění na stanicích Pec pod Sněžkou a Luční bouda. (Zdroj: "Staniční data ČHMÚ" 2014“)

Větrné proudění v Krkonoších je podle Jeníka (1961) silně ovlivněno anemo-orografickými systémy (AO), které vymezuje tři a to AO Mumlavy, Bílého Labe a Úpy. Tyto systémy jsou definovány jako lokální systémy vzdušného proudění v závislosti na reliéfu. Každý AO systém se skládá z vodících návětrných údolí zrychlujících vrcholových částí, obvykle na bezlesých hřebenech a závětrných turbulentních prostor (Obr. 19). Závětrné prostory jsou v případě Krkonoš kary, a v těchto prostorech dochází během zimního období ke zvýšené akumulaci sněhu, což přispívá k lavinové aktivitě. Klima návětrných údolí stejně tak jako vrcholové partie má spíše oceánské rysy, zatímco v oblasti turbulentních prostorů dochází k větším výkyvům teplot. Na lavinovou dráhu Modrý důl má bezprostřední vliv AO systém Bílého Labe. Dochází zde k akumulaci velké sněhové vrstvy v oblasti Mapy republiky. Tento fakt je velmi důležitý pro lavinovou činnost.



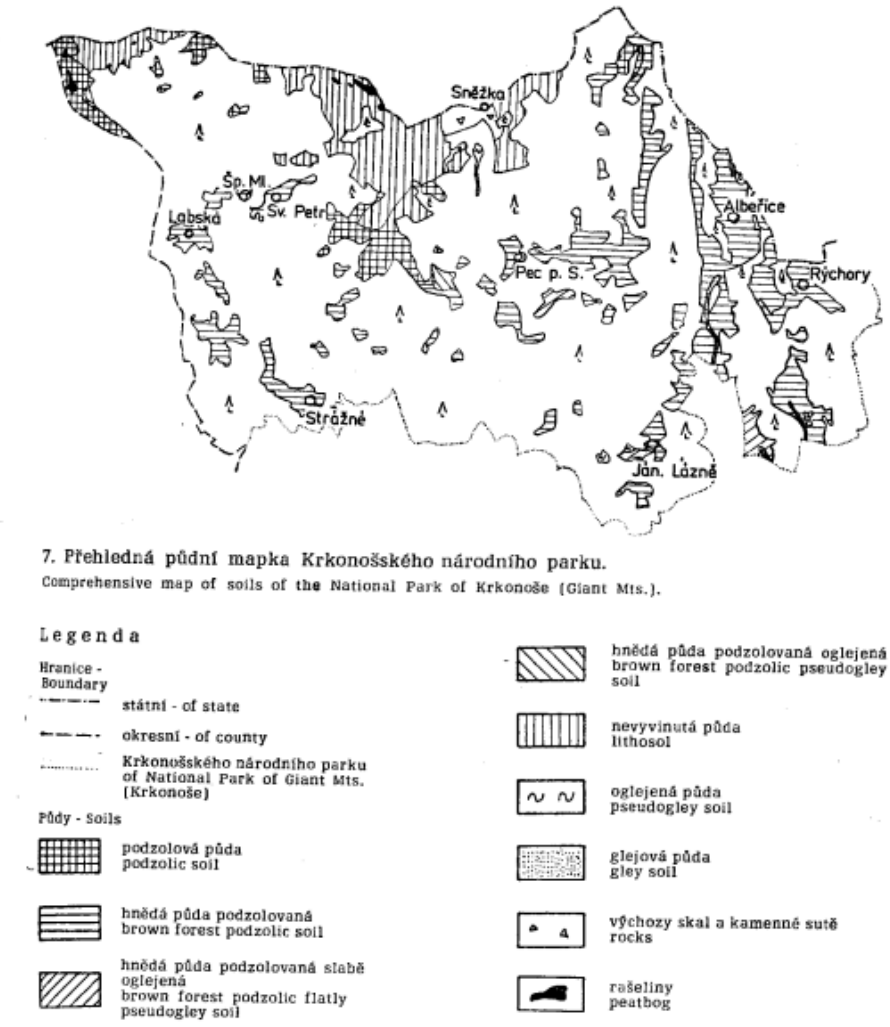
Obr. 19: Schéma podélného profilu AO systému ve Vysokých Sudetech. (Zdroj: Jeník, 1961)

5.4 Hydrologické poměry

Dráha Modrý důl se nachází pod hřebenovou oblastí Krkonoš, nachází se tudíž v pramenné oblasti. Náleží do povodí Modrého potoka (povodí III. Řádu), který se vlévá do Úpy (povodí II. Řádu), jež poté ústí do Labe (DIBAVOD, 2015). Vrcholové partie nad lavinovou drahou jsou tvořeny Úpským rašeliništěm. V těchto partiích Krkonoš s výjimkou vrchovišť, hodnoty odtokového koeficientu dosahují 50 %. Specifický odtok z této oblasti je též velmi vysoký a pohybuje se v hodnotách 10-50 l/s.km^2. ("Hydrologické poměry Královéhradeckého kraje", 2015).

5.5 Půdy

Pudy vyskytující se ve vrcholových partiích Krkonoš jsou obvykle alpinské formy nevyvinutých půd, jako jsou například rankery, litozemně či kryptopodzoly. Ve vrcholových partiích se pak lokálně můžeme setkat s organogenními půdami, které jsou podmíněny vysokými srážkami ve vrcholových partiích, které mají charakter náhorní plošiny. V nižších zalesněných částech KRNAPu se vyskytují zejména hnědé půdy podzolované či slabě oglejené. Pomezí mezi lépe vyvinutými půdami, zejména podzoly, a nevyvinutými půdami je stanoveno obvykle přítomností lesního porostu (Boháč, 1969). V nejvyšších partiích se vyskytují také alpinské půdní formy ovlivněné podzolizačním procesem, u kterých byly v glaciálních, či postglaciálních obdobích vyvinuty typické geomorfologické znaky. Jedná se zejména o Girlandové a polygonální půdy (Tomášek, 2003).



Obr. 20: Přehledová půdní mapa Krkonošského národního parku. (Zdroj: Boháč, 1969)

Půdní kryt je také ovlivňován AO systémy. Půda ve vrcholových částech AO systémů je dlouhodobě ochuzována, naopak půda v akumulačních oblastech je obohacována ukládáním eolických sedimentů. Tyto sedimenty však mohou pocházet i z geograficky velmi vzdálených oblastí. Půdy na lavinových drahách jsou v transportní části ochuzovány a naopak v části akumulační obohacovány erozním materiálem (Jeník, 1961).

5.6 Vegetace

Fytogeograficky oblast spadá do Českého oreofytika, do sdružené jednotky Východní Sudety. Dále pak do fytogeografického obvodu Krkonoše subalpinské (93b.) (Bohumil, Slavík, 1988). Vysoké Sudety se dělí na alpinské a horské pásmo. Tyto dvě pásma jsou odděleny horní hranicí lesa, která se nachází cca 1300 m n.m., toto pásmo je druhově poměrně chudé (Jeník, 1961). V lokalitě Modrý důl horní hranice lesa probíhá ve výšce

1300 – 1325 m n. m. (Treml, 2003). Na výšku horní hranice lesa mají vliv též AO systémy, které vytvářejí v závětrných oblastech enklávy kosodřeviny. Pokles horní hranice lesa přímo souvisí s lavinovou činností v těchto oblastech. Právě taková enkláva se nachází i v Modrém dole (Jeník, 1961). Alpínské biotopy nad horní hranicí lesa jsou alpínské trávníky, alpínská a subalpínská keříčková vegetace a kosodřevina. Pro tyto biotopy jsou nejvýznamnější druhy travin metlička křivolaká *(Avanella flexuosa)*, kostřava nízká *(Festuca supina)*, smilka tuhá (*Nardus stricta*), dále pak keříčkovité rostliny jako je vřes obecný (*Calluna vulgaris*) či brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillus*). Tento biotop má dále poměrně dobře vyvinuté mechové patro, které je tvořeno lišejníky rodů *Centraria* a *Cladonia* společně s mechy rodů *Polytrychum* a *Racomitrium* (Chytrý et al., 2010). Dřeviny v alpinském bezlesí zastupuje zřídka smrk (*Picea abies*) ve vlajkové formě, a borovice kleč (*Pinus mugo*), které je ovšem v těchto oblastech nepůvodní (Jeník, 1961). Dále se lokálně vyskytují horská vrchoviště s dominancí rašeliníku (*Sphagnum*) (Chytrý et al., 2010). Vliv AO systémů na botanickou bohatost území je také velmi znatelný. Vzhledem k poklesu horní hranice lesa, který je způsobený lavinovou činností, jsou zde příznivá stanoviště pro méně konkurence schopné druhy, které často bývají zároveň druhy vzácné. Na závětrné oblasti AO systémů je vázána akumulace sněhu, který poté tyto oblasti dotuje vláhou (Jeník, 1961). Lavinové dráhy bývají obvykle definovány jako biotopy subalpinské vysoko bylinné vegetace, skalní vegetace sudetských karů, či subalpinské listnaté křoviny. Na lavinových svazích se nejčastěji vyskytují v keřovém patře bříza karpatská (*Betula carpatica*), vrba laponská (*Salix lapponum*), zimolez černý (*Lonicera nigra*) či různé deformované formy smrku. V bylinném patře poté nacházíme rostliny, jako jsou sasanka narcisokvětá (*Anemone narcissiflora*), ovsíř dvouřízný (*Avenula planiculmis*), sleziník zelený (*Aplenium vinde*), hvězdice alpská (*Aster alpinus*), či papratka horská (*Athyrium distentifolium*). V Krkonoších se na těchto lokalitách vyskytují i endemitní druhy, kupříkladu jeřáb sudetský (*Sorbus sudetica*), nebo různé druhy jestřábníků (*Hieracium*).

U apeninského bezlesí je v současnosti často diskutováno, zda je na území Krkonoš původní. Současné názory se obvykle přiklánějí k tvrzení, že výška horní hranice lesa byla v minulosti, zejména v holocénu řízena především klimatickými změnami společně s aktivitami člověka. V Krkonoších jsou datovány zásahy člověka do lesních porostů zejména do období mladého Středověku (Novak et al., n.d.). V bližší minulosti též docházelo k degradaci lesního porostu vlivem extrémních lokálních imisí škodlivých látek.

Tato situace se však již od roku 1990 postupně zlepšuje a dochází ke zpětnému zalesňování poškozených lokalit (Schwarz, 1997). V oblasti Modrého dolu také v minulosti probíhala diskuze o vhodnosti umělého vysazování kosodřeviny. V případě vysazení silnějších sazenic by se již na těchto extrémních stanovištích udržely a bránili by hromadění sněhu v odtrhové oblasti lavin. Došlo by však k narušení přirozeného vývoje a k narušení přirozeného procesu ukládání sněhu (Spusta a Kociánová, 1998).

5.7 Vlastnosti dráhy Modrý důl

Pro samotný vznik laviny jsou nejdůležitější specifické vlastnosti, které panují na určité lavinové dráze. Tyto vlastnosti jsou sklon, expozice, obvyklá nadmořská výška odtrhu, obvyklá nadmořská výška dosahu laviny, jejich výškový rozdíl, délka lavin, šířka dráhy a šířka odtrhu. Dráha Modrý důl má sklon 40-35°, expozice směřuje na jih, výška odrhu je nejčastěji udávána 1480 m n. m., obvyklý dojezd se nachází ve výšce 1100 m n. m., což činní výškový rozdíl 380 m. Délka lavin se pohybuje v rozmezí 200-800 m, šířka dráhy je proměnná od 50 do 150 m a stejně tak i šířka odtrhu, která se pohybuje v hodnotách 50-200 m. (Spusta a Kociánová, 1998).

5.8 Spadlé laviny na dráze v Modrém dole

Dráha Modrý důl (v lavinovém katastru č. 8) je jedna z nejznámějších drah v Krkonoších. Na této dráze dochází k pádům velkých lavin, které mívají velmi ničivé účinky a v minulosti si vyžádaly i lidské oběti. Ke smrtelným nehodám na této dráze došlo 7. 1. 1918 (1 osoba), 13. 11. 1931 (2 osoby), 2. 2. 1935 (2 osoby), 16. 2. 1942 (2 osoby) a 20. 2. 1952 (1 osoba). Laviny na tomto svahu jsou podmíněny hromaděním velmi mocné vrstvy sněhu (až 15 m) na JZ svahu Studniční hory (oblast „Mapa republiky“). Lavinová aktivita na této dráze se obvykle časově neshoduje s aktivitou na ostatních krkonošských drahách, padá naopak, když je většina drah bez aktivity. Lavina se uvolňuje při dostatku čerstvého sněhu, který je do oblasti odtrhu navátý z náhorní plošiny v okolí Luční boudy. K uvolnění tedy obvykle dochází přímo během velmi intenzivního sněžení, nebo bezprostředně poté (Spusta a Kociánová, 1998). Tabulka 2 ukazuje přehled lavin na lavinové dráze Modrý důl podle lavinového katastru (Spusta a Kociánová, 1998). Z tabulky je patrné, že většina lavin spadlých na dráze Modrý důl je deskového typu, povrchová, plošná tekoucí či klouzající, samovolně vzniklá ze suchého sněhu, tvořící hrubý nános, obvykle bez příměsi. Průměrná výška odtrhu má hodnotu 0,91 m, avšak setkáváme se i s daleko vyššími hodnotami. Délka

laviny málokdy překročila 500 metrů, počítáme-li mnou modelovanou lavinu z 10.2.2015 která byla svou délkou extrémní, došlo k překročení hranice 500 metrů pouze třikrát. Pokud tuto lavinu nezapočítáme do průměrné délky, tak dostaneme hodnotu 445 metrů. V minulosti byla lavina téměř vždy samovolná, nyní se hlavně díky větší popularitě skialpinismu vyskytlo více případů, kdy je lavina vyvolána lyžařem.

datum	zima	typ odtrhu	pozice skluz. horizontu	vlhkost sněhu v odt. zóně	tvar dráhy	typ pohybu	tvar částic lav. nánosu	vlhkost lav. Nánosu
26. 3. 1963	62/63	DL tvrdá	povrchová lavina	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	hrubý nános	kombinace vlhkosti
7. 12. 1964	64/65	DL měkká	základová lavina	vlhký sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	zaokrouhlené hroudy	kombinace vlhkosti
15. 2. 1965	64/65	DL tvrdá	odtrh nového sněhu	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	hrubý nános	suchý sníh
14. 1. 1966	65/66	DL měkká	povrchová lavina	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	zaokrouhlené hroudy	suchý sníh
14. 1. 1967	66/67	DL měkká	povrchová lavina	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	hrubý nános	suchý sníh
30. 1. 1970	69/70	DL měkká	povrchová lavina	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	hrubý nános	suchý sníh
3. 2. 1985	84/85	DL tvrdá	odtrh nového sněhu	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	hrubý nános	suchý sníh
5. 3. 1987	86/87	bodový odtrh	odtrh nového sněhu	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	hrubý nános	suchý sníh
25. 12. 1995	95/96	čárový odtrh	povrchová lavina	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	málé hranaté kvádry	suchý sníh
1. 2. 2001	00/01	DL měkká	povrchová lavina	kombinace suchý-vlhký	plošná lavina	tekoucí, klouzající	hrubý nános	mokrý sníh
8. 12. 2001	01/02	čárový odtrh	základová lavina	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	málé hranaté kvádry	suchý sníh
10. 4. 2003	02/03	čárový odtrh	odtrh nového sněhu	kombinace suchý-vlhký	plošná lavina	tekoucí, klouzající	málé hranaté kvádry	mokrý sníh
2. 2. 2004	03/04	čárový odtrh	povrchová lavina	kombinace suchý-vlhký	plošná lavina	tekoucí, klouzající	zaokrouhlené hroudy	kombinace vlhkosti
22. 12. 2008	08/09	DL tvrdá	odtrh nového sněhu	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	hrubý nános	suchý sníh
21. 1. 2010	09/10	čárový odtrh	povrchová lavina	suchý sníh	komb. plošná-žlabová	tekoucí, klouzající	hrubý nános	suchý sníh
12. 12. 2012	12/13	čárový odtrh	základová lavina	suchý sníh	plošná lavina	tekoucí, klouzající	málé hranaté kvádry	suchý sníh
datum	**zima**	**materiál lav. nánosu**	**příčiny vzniku**	**výška odtrhu [m]**	**šířka odtrhu [m]**	**šířka lav. dráhy [m]**	**délka lav. dráhy [m]**	**hloubka lav. Nánosu [m]**
26. 3. 1963	62/63	čistý sněhový nános	samovolná	1	150	150	500	3
7. 12. 1964	64/65	nános s příměsí	samovolná	1,5	150	100	200	3
15. 2. 1965	64/65	čistý sněhový nános	samovolná	2	140	100	450	3
14. 1. 1966	65/66	čistý sněhový nános	samovolná	1	150	100	200	2
14. 1. 1967	66/67	čistý sněhový nános	samovolná	1	200	150	300	3
30. 1. 1970	69/70	čistý sněhový nános	samovolná	1	200	150	250	3
3. 2. 1985	84/85	čistý sněhový nános	samovolná	3	180	150	600	2
5. 3. 1987	86/87	čistý sněhový nános	samovolná	3	150	100	300	4
25. 12. 1995	95/96	čistý sněhový nános	samovolná	0,5	50	50	280	1
1. 2. 2001	00/01	čistý sněhový nános	samovolná	0,3	40	50	100	0,8
8. 12. 2001	01/02	nános s příměsí	samovolná	0,8	70	70	200	1,5
10. 4. 2003	02/03	čistý sněhový nános	samovolná	0,8	80	80	100	2
2. 2. 2004	03/04	čistý sněhový nános	samovolná	0,3	40	40	200	0,7
22. 12. 2008	08/09	čistý sněhový nános	uměle vyvolaná	0,9	170	150	250	1,8
21. 1. 2010	09/10	čistý sněhový nános	samovolná	0,8	210	150	250	1,8
12. 12. 2012	12/13	čistý sněhový nános	uměle vyvolaná	0,8	120	100	250	1,4

Tab. 2. Údaje o spadlých lavinách na dráze Modrý důl. (Zdroj: Pavlásek et al., 2015)

6 Případová studie – Modrý důl v Krkonoších

V této části práce jsou popsány parametry lavinové dráhy Modrý důl a průběh modelování pádu laviny z 10. 2. 2015. Rovněž jsou zmíněny parametry již zaznamenaných lavin na této lavinového dráze, dále je popsána problematika vstupních dat a jejich zpracování. Jsou zde též popsány základní principy použitého modelu.

6.1 Rekonstrukce (back calculation) pádu z února 2015

Cílem případové studie bylo prověřit vhodnost lavinového modulu RAMMS, pro modelování lavin v Krkonošských podmínkách. Koeficienty μ a ξ byly testovány v podmínkách švýcarských Alp. Z toho důvodu bylo v rámci Krkonoš přistoupeno

k testování změn parametrů na výslednou přesnost modelu. Cílem bylo určit koeficienty modelu, které nejlépe odpovídají podmínkám, které panují v rámci Krkonoš. Tato studie tedy sleduje vliv změn parametrů na přesnost modelu. Jako referenční byla zvolena lavina z 10. 2. 2015. Při vlastním modelování byly brány v úvahu rovněž rozdíly v mocnosti akumulace sněhu v odtrhové zóně.

6.1.1 Vlastnosti laviny z 10. 2. 2015

Dne 10. 2. 2015 krátce po druhé hodině odpolední spadla na lavinové dráze Modrý důl lavina značných rozměrů (Obr. 22). Tato lavina zdevastovala lesní a klečový porost na dráze a o cca 10 metrů minula chatu Děvín. Svými parametry patřila mezi jednu z největších lavin zaznamenaných v Krkonoších za dobu fungování lavinového katastru (1961 – 2015). Jednalo se o plošnou, povrchovou, deskovou lavinu, u které délka odtrhu dosahovala přibližně 550 metrů, výška odtrhu je v případě této laviny velmi variabilní a pohybovala se v hodnotách 30 až 240 cm. Průměrná výška odtrhu měla hodnotu 107 cm. Tvar částic v akumulační zóně byl hrubý nános velkých kvádrů. Délka laviny dosáhla délky 1110 metrů a zastavila se až v údolí Modrého potoka. Plocha laviny činí dle údajů pořízených z UAV týden po pádu 154 740 m^2. Odhadovaný objem odtrhu vycházející z programu RAMMS má hodnotu 48 920 m^3.

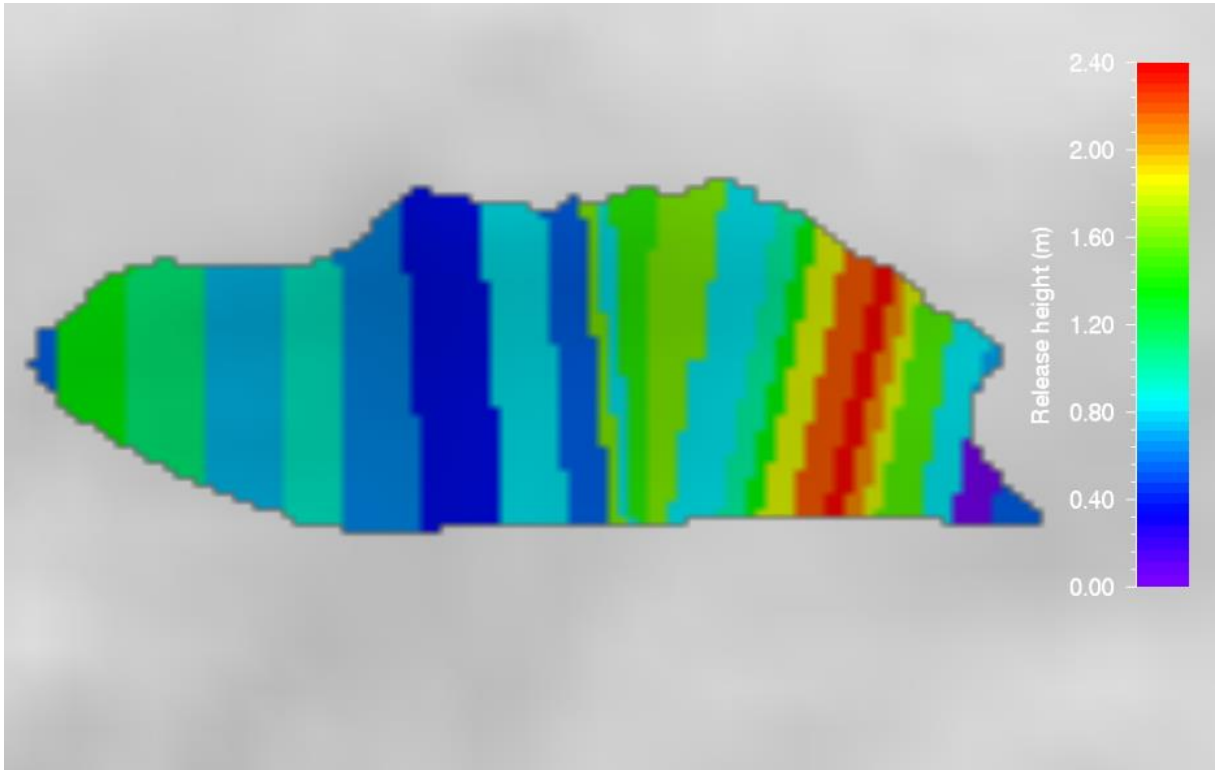
Obr. 21: Pohled na spadlou lavinu přes údolí Modrého potoka. (Zdroj: Viktor Kožišek)

7 Metodika

Vhodnost použitých parametrů Mu a Xi byla hodnocena pomocí porovnávání výsledných dosahů modelovaných lavin se skutečným dosahem laviny z 10. 2. Tyto parametry byly zvoleny podle tabulky určující parametry podle typu lavinové dráhy, nadmořské výšky lavinové dráhy a periody opakování lavinové události. Tyto parametry byly zadávány vždy ve dvojici, která vychází z tabuizovaných hodnot (Bartelt et al., 2013). Velikost laviny byla zvolena jako střední lavina (medium avalanche), pro kterou platí objem 25 000 až 60 000 m^3. Odhadnutý objem odtrhu činil 48 920 m^3.

7.1 Použitá data

Pro určení vhodných parametrů k samotnému modelování, byl použit odtrh s fixní výškou 107 cm. Tento polygon byl vytvořen z ortofoto snímku v programu ArcGis vektorizací. Použité DMR o rozlišení 1 m který byl vytvořen v ÚSMH AV ČR v.v.i., vychází z lidarový dat KRNAP. Jako vstupní informace o přítomnosti lesa byl použit ASCII rastr KRNAP, který byl dále oříznut pomocí horní hranice lesa z roku 2011, kterou poskytl Václav Treml z PřF UK (Treml a Chuman, 2015). Pro zjištění mocnosti sněhové vrstvy v zóně odtrhu byly použity bodová data z terénního měření od Vojtěcha Tryzny, stejně tak jako půdorysný profil ve formátu shapefile celé laviny, který byl vytvořen z GPS terénního měření a upraven pomocí ortofota spadlé laviny pořízené pomocí UAV. Tento polygon byl využit pro oba typy odtrhů, pouze pro 6 závěrečných modelů byl rozdělen na jednotlivé polygony (Obr. 23), kterým byla následně určena výška sněhové vrstvy v odtrhové zóně, takovým způsobem že byl rozdělen na 25 jednotlivých polygonů, kterým byla následně přiřazena výška sněhové vrstvy z bodových měření. Hranice jednotlivých polygonů byly vedeny po spádnici.



Obr. 22: Rozdělený polygon odtrhu v programu RAMMS.

7.2 Postup zpracování

V lavinovém modulu RAMMS bylo postupně spuštěno 36 modelů, každý s fixním odtrhem o výšce 107 cm. Tato hodnota byla zvolena, protože se jedná o průměrnou hodnotu z bodových měření výšky odtrhu. Každý z těchto modelových pádu lavin měl nastaven stejné výchozí podmínky, rozlišení DMR 5 metrů, stejné rozšíření lesního porostu, konečný čas 300 sekund, dump step 2, měrná hmotnost sněhu 300 kg/m^3 a koheze sněhové hmoty 150 Pa. Měněny byly pouze parametry Mu a Xi. Po zpuštění těchto 36-ti modelových situací s fixní výškou otrhu 107 cm, byly dále výsledné rastry ve formátu ASCII převedeny pomocí ESRI ArcMap do float rastru. Z těchto dat byly dále pomocí reklasifikace vytvořeny polygony pro změření plochy akumulace. Výsledky těchto modelových situací byly následně porovnávány s lavinou z 10. 2. z hlediska dosahu laviny, který byl měřen po spádnici modelované laviny, (Obr. 24) a z hlediska plochy akumulace. Z těchto dat byly následně zvoleny dvě dvojice parametrů Mu a Xi, se kterými byly spuštěny 4 modely s odtrhem nesoucím informaci o proměnné výšce sněhu. Pro každou dvojici parametrů μ a ξ byly spuštěny dva modely, první o rozlišení 5m a druhý o rozlišení 3m. Takto bylo zjištěno jaký vliv má na přesnost modelu jeho rozlišení. Pro kohezi byla ponechána hodnota 150 Pa, stejně tak pro objemovou hmotnost sněhu v odtrhové zóně 300

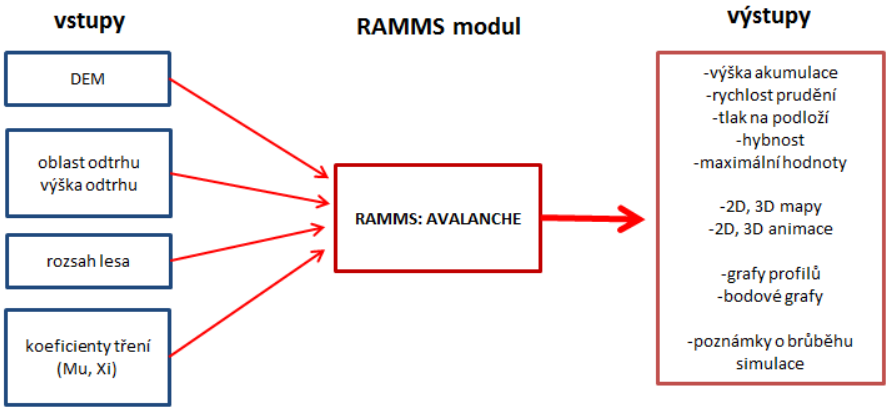
kg/ m^3. Na závěr byla zpuštěna dvojice modelů, pro které byly parametry tření vygenerovány z DMR programem RAMMS, tak že byla zvolena odtrhová zóna ve výšce 1000 až 1500 m n. m. a perioda opakování 10 let. Perioda opakování byla zvolena takto, protože nejlépe odpovídající modely jak z hlediska dosahu, tak z hlediska plochy akumulace spadaly právě do této kategorie. Výsledky těchto šesti modelů byly následně porovnány se skutečnou lavinou z hlediska délky a plochy nánosu. Dále byla zjištěna závislost dosahu, a plochy akumulace laviny na parametrech Mu a Xi, a provedena analýza vhodnosti používání tabulek vycházejících z dat které byly naměřeny v odlišných podmínkách ve švýcarských Alpách.

7.3 Použitý model

Pro vlastní modelování v mé práci jsem využíval model RAMMS (Rapid Mass MovementS). Samotný model byl vyvinut ve švýcarských Alpách k modelování blokovobahenních proudů sněhových lavin a nově i skalního řícení. Slouží k simulaci dosahu dosahu, rychlosti proudění a vyvolaných tlaků. To vše v trojrozměrném modelu terénu ("Why RAMMS?", 2010). Vstupní data modelu jsou počáteční podmínky, které v případě lavinového modelu tvoří jedna nebo více oblasti ve kterých dochází k uvolnění sněhové masy, u kterých je definována výška mobilizované sněhové pokrývky. Tyto oblasti je možné vytvořit v běžně používaných GIS softwarech, jako je například ESRI ArcGIS nebo GRASS. Dále je pro simulaci nezbytný digitální model terénu (DMR). Jeho rozlišení je dáno způsobem jeho vytváření, nejvyšší rozlišení obvykle mají DMR vytvořené lidarovým snímkováním. U takto vytvořených rastrů dosahuje velikost jednoho pixelu běžně kolem méně než 1 m. Pro modelování lavinových událostí je nejčastěji používán DMR o rozlišení 5 m. Každý modul modelu RAMMS má specifické volitelné parametry, snahou je jejich počet minimalizovat, při zachování poměrně kvalitní přesnosti. Minimalizace počtu parametrů souvisí s uživatelskou přístupností programu. Následné numerické řešení průběhu sněhové laviny, blokovobahenního proudu či skalního řícení je pro každý modul řízeno specifickými rovnicemi. Následná vizualizace výsledků je prováděna pomocí map, grafů, profilů a animací. Tento způsob vizualizace výsledků činí výsledky čitelnější i pro uživatele, kteří nemají velké zkušenosti s numerickými modely (Christen et al., 2012).

7.3.1 RAMMS lavinový modul

Lavinový modul řeší dvourozměrné rovnice hmoty a hybnosti průměrované do hloubky, na trojrozměrném modelu terénu. Pracuje v systému zachování objemu odtržené akumulace. Model simuluje rychlosti v lavině a výšku laviny. Iniciální stádium je reprezentováno odtrhovým polygonem, či více polygony, s daným objemem mobilizovaného sněhu. Vlastní numerický model vychází z Voellmyho modelu tření a obsahuje dva parametry: Coloumbovské tření μ (Mu) a rychlostí umocňované, tudíž na rychlosti závislé turbulentní tření ξ (Xi). Tyto dva parametry je možné fixně určit pro celý průběh simulace, nebo je generovat v závislosti na změnách vlastností podloží. Ty se mohou měnit i díky přítomnosti, či nepřítomnosti vegetace. Výpočet je automaticky zastaven v okamžiku, kdy tok masy dospěje do stádia, kdy jsou třecí síly vyšší než hybnost masy. Tento model je využívám zejména pro modelování deskových lavin, ale jelikož na modelu tým jeho tvůrců stále pracuje, tak se v budoucnosti pravděpodobně dočkáme i možnosti modelovat prachové laviny (Christen et al., 2012). Jednoduché schéma fungování modelu zobrazuje obrázek 21.



Obr. 23: Schéma lavinového modulu v modelu RAMMS. (Zdroj: upraveno podle (Christen et al., 2012))

7.4 Výběr kombinací parametrů

Kombinace parametrů Mu a Xi byly zvoleny podle tabulky z manuálu RAMMS. Nejprve bylo určeno, že modelovaná lavina patří do kategorie medium avalanche (25 000 až 60 000 m^3), dále byly z této tabulky vyřazeny všechny kombinace, které náleží tvaru dráhy „gully“, jelikož v tomto případě se jedná o lavinovou dráhu sevřenou ve žlabu. Tento tvar

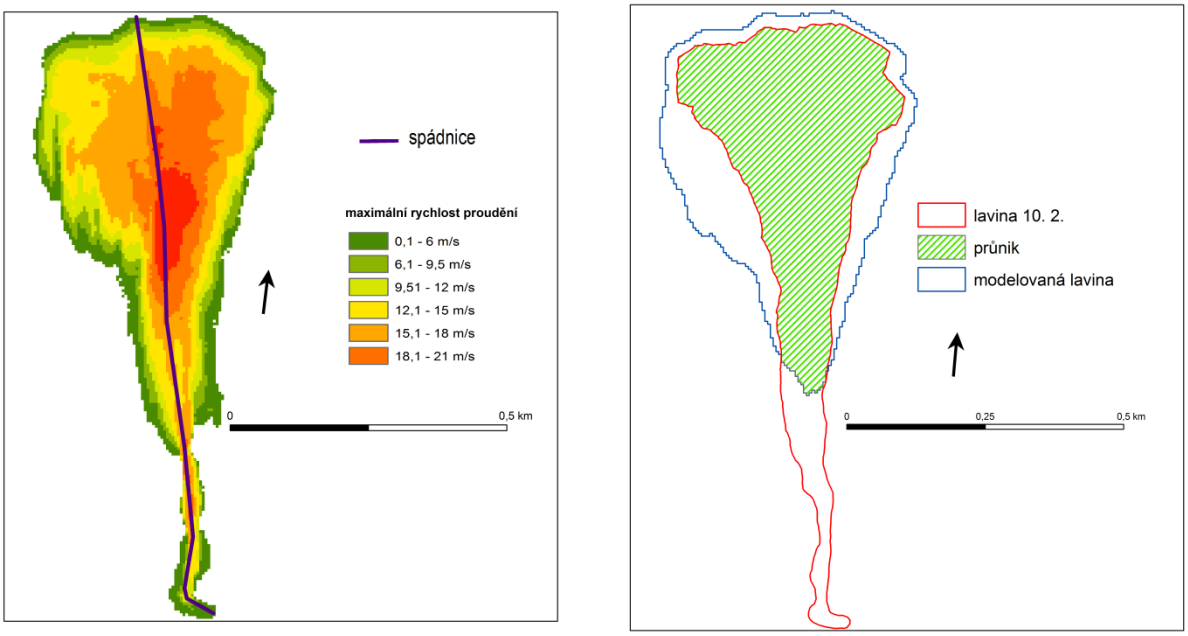
lavinové dráhy byl vyřazen z důvodu, že vůbec neodpovídá tvaru lavinové dráhy Modrý důl. Pro samotné otestování parametrů byly tedy zvoleny pouze 3 kategorie a to „unchannellled“, „channeled“ a „flat“. Tyto kategorie jsou v tabulce dále rozděleny podle toho, v jaké nadmořské výšce se dráha nachází do tří kategorií nad 1500 m n. m., 1000 – 1500 m n. m., a pod 1000 m n. m.. Dále je pro správné zvolení parametrů třeba určit s jako periodou dochází k opakování pádu modelované laviny, na což jsou čtyři možnosti 300, 100, 30 a 10 let. Tímto způsobem je tedy možné dosadit 36 kombinací parametrů Mu a Xi (tab. 3). Tyto parametry byly vždy dosazeny v pevné dvojici, jak jsou v tabulce uvedeny. Tyto kombinace jsou výsledkem terénních měření, pozorování a výpočtů autorů modelu.

medium avalanche			300 let			100 let			30 let			10 let	
	nadmořská výška [m]	běh	μ (Mu)	ξ (Xi)	běh	μ (Mu)	ξ (Xi)	běh	μ (Mu)	ξ (Xi)	běh	μ (Mu)	ξ (Xi)
unchannelled	nad 1500	1.	0,195	2500	4	0,205	2500	7.	0,215	2500	10.	0,225	2500
	1000 - 1500	2.	0,21	2100	5.	0,22	2100	8.	0,23	2100	11.	0,24	2100
	pod 1000	3.	0,23	1750	6.	0,24	1750	9.	0,25	1750	12.	0,26	1750
channelled	nad 1500	13.	0,25	1750	16.	0,26	1750	19.	0,27	1750	22.	0,28	1750
	1000 - 1500	14.	0,27	1530	17.	0,28	1530	20.	0,285	1530	23.	0,295	1530
	pod 1000	15.	0,28	1350	18.	0,29	1350	21.	0,3	1350	24.	0,31	1350
flat	nad 1500	25.	0,17	3250	28.	0,18	3250	31.	0,19	3250	34.	0,2	3250
	1000 - 1500	26.	0,19	2900	29.	0,2	2900	32.	0,21	2900	35.	0,22	2900
	pod 1000	27.	0,21	2500	30.	0,22	2500	33.	0,23	2500	36.	0,24	2500

Tab. 3: Kombinace parametrů Mu a Xi, jejich rozdělení podle typu lavinové dráhy, nadmořské výšky a periody pádu laviny pro lavinu typu „medium avalanche“. Upraveno podle: Bartelt et. al., 2013

7.5 Porovnání s délkou a plochou

Vhodné koeficienty byly vybrány tak, aby lavina modelované pomocí těchto koeficientů nejlépe odpovídala lavině spadlé 10.2. To bylo zjištěno tak, že modelové laviny byly porovnávány z hlediska dosahu a z hlediska plochy akumulace. Dosah laviny byl měřen po spádnici (Obr. 23), zatímco shodnost povrchu akumulace byla porovnávána tak, že byl spočítán průnik polygonu skutečné laviny a polygonu laviny modelované (Obr. 23).
Z výsledků této analýzy byly zvoleny dvě dvojice parametrů, které odpovídaly nejlépe dosahu laviny a ploše akumulace laviny. Z hlediska dosahu laviny vychází jako nejpřesnější kombinace z hlediska dosahu laviny běh 11(μ=0,24, ξ=2100) a z hlediska plochy akumulace běh 24 (μ=0,31, ξ= 1350). Je však nutné zmínit že laviny, které nejlépe odpovídají skutečné lavině z hlediska plochy akumulace, naopak nedosahují takové délky jako skutečná lavina.



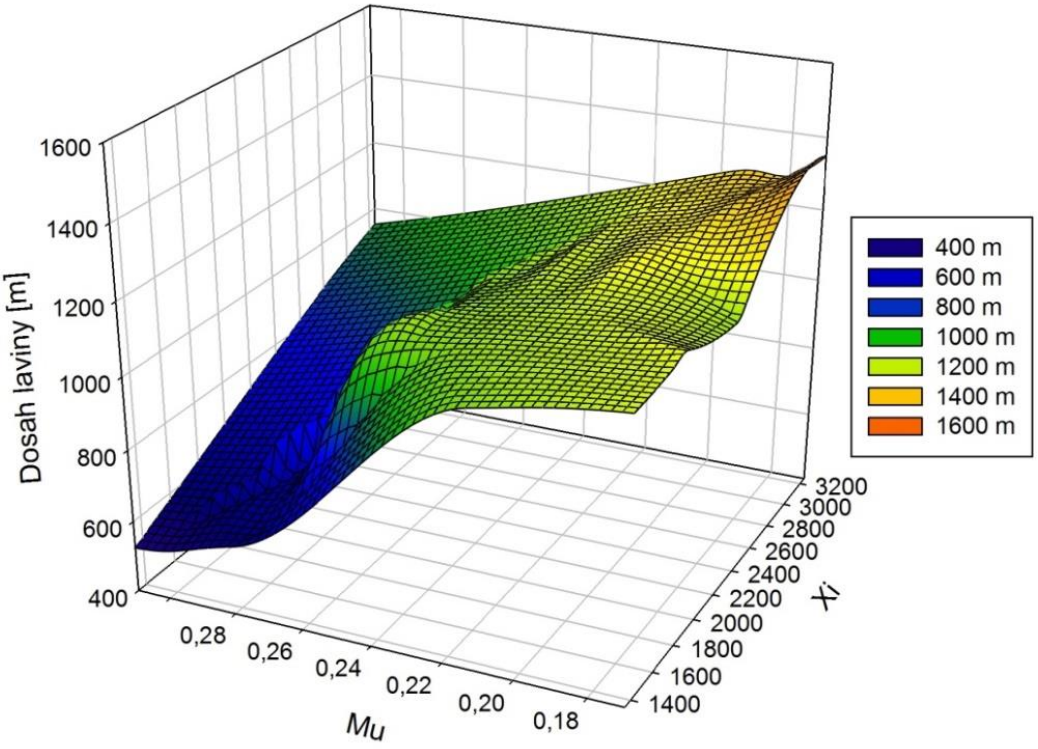
Obr. 24: Spádnice laviny, maximální rychlosti proudění v lavině a průnik skutečné a modelované laviny na lavinové dráze Modrý důl.

8 Výsledky

V této části práce je popsán vliv koeficientů Mu a Xi na dosah a plochu laviny. Dále zde jsou prezentovány výsledky vlastního modelování laviny z února 2015 a jejich porovnání se skutečnou lavinou a vliv rozlišení modelu na přesnost výsledků.

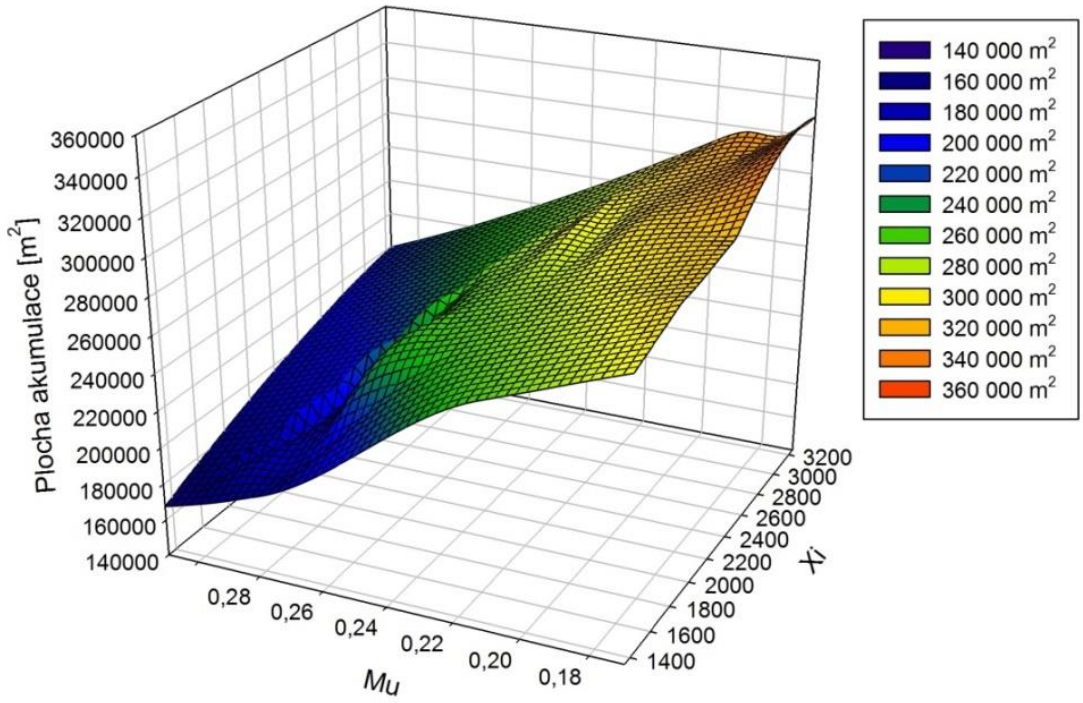
8.1 Vliv koeficientů na modelovanou lavinu

Po vyzkoušení 36-ti kombinací koeficientů tření, je již zřejmé jakým způsobem jejich hodnoty ovlivňují dosah a plochu akumulace laviny. Ze získaných dat o dosahu modelovaných lavin je patrné že při růstu parametru ξ dochází k zvyšování dosahu modelovaných lavin, zatímco zvyšování parametru μ vede ke zkracování lavin (Obr. 25). Je tedy naprosto logické, že tabuizované hodnoty ξ jsou nejvyšší u lavinových drah typu „flat“ a naopak nejnižší u drahy typu „gully“. Naopak u parametru μ je tomu naopak. Stejnou závislost můžeme sledovat i u nadmořské výšky kdy s výškou ξ stoupá a μ klesá.



Obr. 25: Závislost dosahu modelované laviny na parametrech ξ a μ.

Podobnou závislost je možné sledovat u plochy akumulace. V tomto případě vede nastavení parametrů na nižší tření (nízká hodnota Mu a vysoká hodnota Xi) k tomu, že se zvětšuje plocha akumulace (Obr. 26). Plocha se zvětšuje jak větším dosahem modelované laviny, tudíž delší dráhou, ale i větším plošným rozptýlením akumulace, tudíž dráhou širší.



Obr. 26: Závislost plochy akumulace modelované laviny na parametrech ξ a μ.

8.2 Výsledky modelování laviny 10. 2. 2015

Z hlediska dosahu laviny vychází jako nejpřesnější kombinace parametrů dvojice ξ =2100 a μ=0,24 (běh 11). Tyto hodnoty odpovídají dráze o tvaru „unchannelled" s odtrhovou zńou ve výšce 1000 až 1500 m n. m., s lavinou opakující se v periodě 10 let. Při modelování laviny s fixním odtrhem s těmito koeficienty, modelová lavina dosáhla shodné délky 1110 m. Při porovnávání plochy akumulace vychází jako nejpřesnější dvojice parametrů ξ =1350 a μ=0,31 (běh 24). V tomto případě se jedná o lavinovou dráhu typu „channelled" s odtrhem v nadmořské výšce pod 1000 metrů a perioda opakování je udávána 10 let. Plocha akumulace skutečné laviny a modelované laviny je v tomto případě shodná v 72,5 % (Tab. 4).

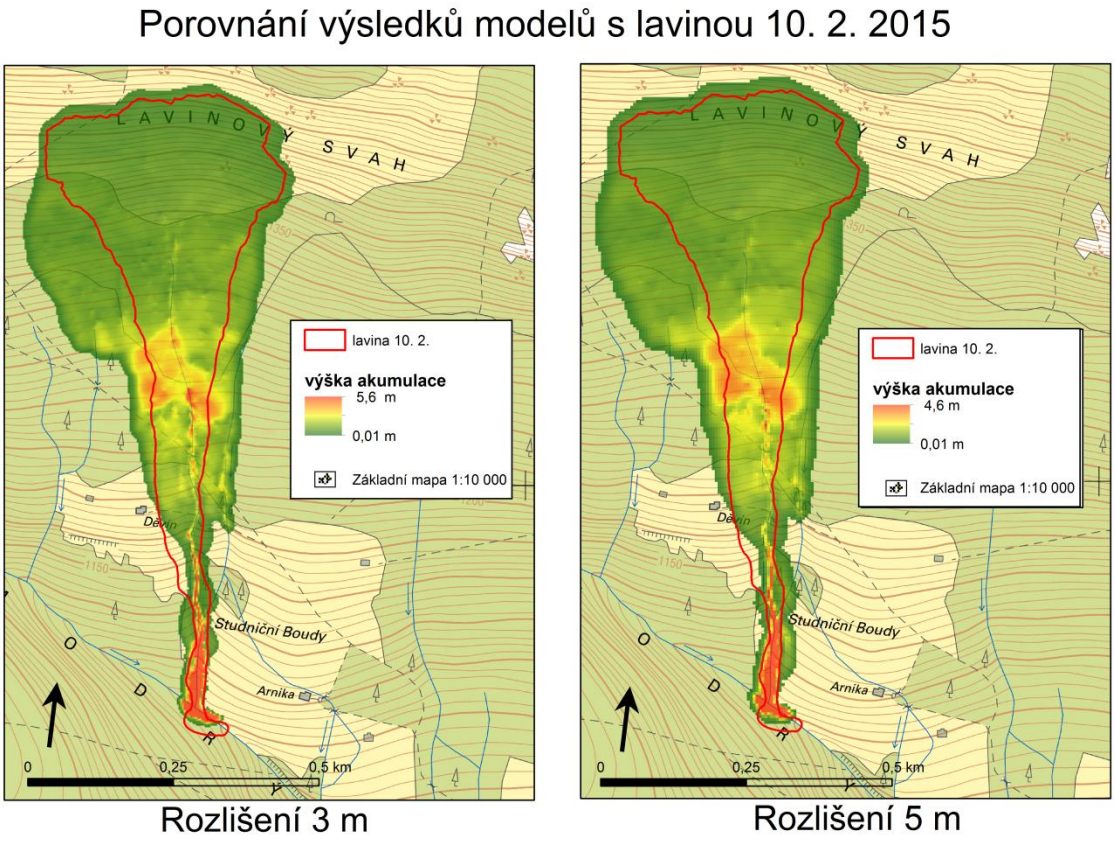
Běh	Mu	Xi	Dosah [m]	plocha akumulace [m^3]
1	0,195	2500	1201	300000
2	0,21	2100	1155	280950
3	0,23	1750	1109	260125
4	0,205	2500	1205	294650
5	0,22	2100	1141	275025
6	0,24	1750	1093	253875
7	0,215	2500	1163	284050
8	0,23	2100	1124	269250
9	0,25	1750	1066	247425
10	0,225	2500	1162	284050
11	0,24	2100	1110	262850
12	0,26	1750	984	236025
13	0,25	1750	1071	247425
14	0,27	1530	670	198950
15	0,28	1350	592	184550
16	0,26	1750	987	236025
17	0,28	1530	616	189975
18	0,29	1350	565	178175
19	0,27	1750	749	211500
20	0,285	1530	616	189975
21	0,3	1350	536	172525
22	0,28	1750	652	196850
23	0,295	1530	584	183225
24	0,31	1350	524	167600
25	0,17	3250	1350	330375
26	0,19	2900	1262	309725
27	0,21	2500	1185	289125
28	0,18	3250	1280	317700
29	0,2	2900	1226	302775
30	0,22	2500	1159	284050
31	0,19	3250	1281	317700
32	0,21	2900	1205	297225
33	0,23	2500	1137	278750
34	0,2	3250	1261	310600
35	0,22	2900	1182	291250
36	0,24	2500	1118	271750

Tab. 4 Jednotlivé běhy modelů, jejich parametry a výsledky. Nejlepší shoda z hlediska délky zvýrazněna červeně, nejlepší shoda z hlediska plochy akumulace zvýrazněna modře.

8.2.1 Modelování s parametry běhu modelu č. 11 (shodný dosah)

Parametry tohoto běhu nejlépe odpovídají skutečné délce laviny, je tomu tak i v případě modelování s proměnou výškou akumulace v odtrhové zóně (Obr. 23). V případě použití modelu o rozlišení 3 m, modelovaná lavina vykazuje dosah 1112 metrů a plochu

akumulace 243 342 m^2. Model však v obou případech nadhodnotil plochu akumulace laviny. V případě modelu o rozlišení 3 m dochází k nadhodnocení akumulace o 57%. Průnik skutečné a modelované laviny tvoří 62,06 % modelované laviny. Z toho je patrné značné nadhodnocení modelované plochy akumulace. Tento problém je více patrný při použití modelu o rozlišení 5 m, kdy sice dochází k zpřesnění dosahu laviny o 1 m, nicméně plocha akumulace laviny je nadhodnocena o 67%. V tomto případě tvoří průnik skutečné a modelované laviny 58,8 % modelované laviny. Z těchto výsledků je patrné že využití modelu s vyšším rozlišením má vliv zejména na zpřesnění modelace akumulace laviny, však co se týče dosahu je vliv rozlišení takřka zanedbatelný.



Obr. 27: Porovnání výsledků modelů, pracujících s parametry tření běhu 11, o rozlišení 3 a 5 m. Podkladová mapa: ZM 10

Jak je patrné z grafického zobrazení na mapě, oba modely získávají nepřesnosti zejména v horní pasáži lavinové dráhy, kde na pravé (západní) straně dochází k poměrně výrazné akumulaci, se kterou se ovšem u skutečné laviny nesetkáváme, v této oblasti se na lavinové dráze nachází konvexní tvar, na kterém se skutečná lavina zastavila. Modelovaná lavina však tuto nerovnost překonala a následně akcelerovala. Obě laviny jsou však z hlediska

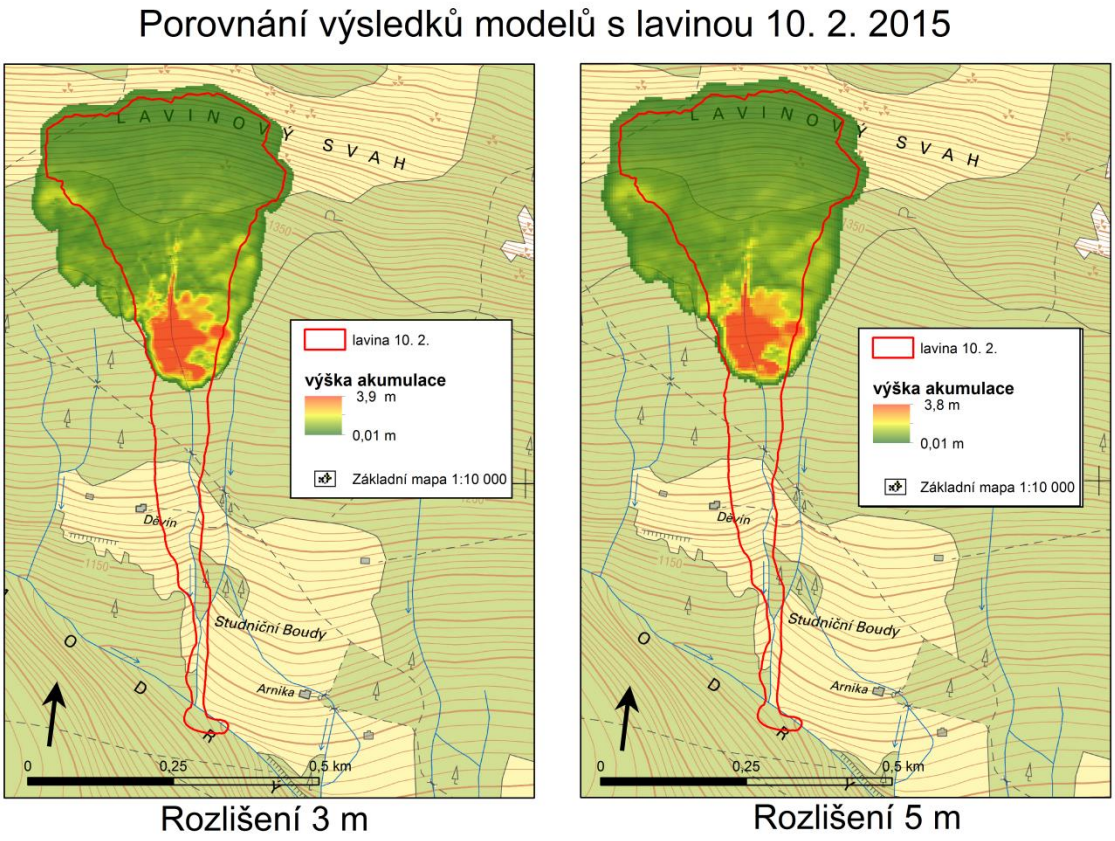
plochy akumulace silně nadhodnocené. Je však patrné že model s vyšším rozlišením popisuje lavinovou událost přesněji. Dále tento model podává více informací o výšce výsledné akumulace, kdy i maximální hodnota je o 1 m vyšší.

rozlišení modelu [m]	dosah [m]	plocha akumulace [m^2]	plocha průniku s lavinou 10.2. [m^2]	plocha průniku/plocha akumulace
3	1112	243342	151023,72	62,06%
5	1111	258025	151735,46	58,81%

Tab. 5: Výstupy modelů, vycházejících z parametrů tření běhu 11 s proměnnou výškou odtrhu a jejich porovnání.

8.2.2 Modelování s parametry běhu modelu č. 24 (shodná plocha akumulace)

Běh modelu č. 24 sice vyjadřuje větší schodu co plochy akumulace, nicméně tento fakt vychází zejména z toho, že výsledky těchto modelů jsou velmi nepřesné, co se týče dojezdu. Průnik laviny z 10. 2. 2015 a modelované laviny, u modelu s rozlišením 5 m tvoří 73% akumulace a u modelu s rozlišením 3 m dokonce 76% akumulace, ale obě tyto laviny se neshodují s modelovanou lavinou, co se týče dosahu. V případě pětimetrového rozlišení má lavina dosah 515 m a v případě rozlišení 3 m 518 m. Jak je patrné z obrázku 28, shoda v ploše akumulace vychází zejména z faktu, že modelovaná lavina má malý dosah, tudíž nedochází k takovému plošnému rozprostření akumulace. To je dáno parametry tření, které povrch charakterizují jako velmi drsný, a lavina se tedy šíří daleko méně. I v tomto případě dochází k nadhodnocení akumulace, které již není tak markantní.



Obr. 28: Porovnání výsledků modelů, pracujících s parametry tření běhu 24, o rozlišení 3 a 5 m. Podkladová mapa: ZM 10

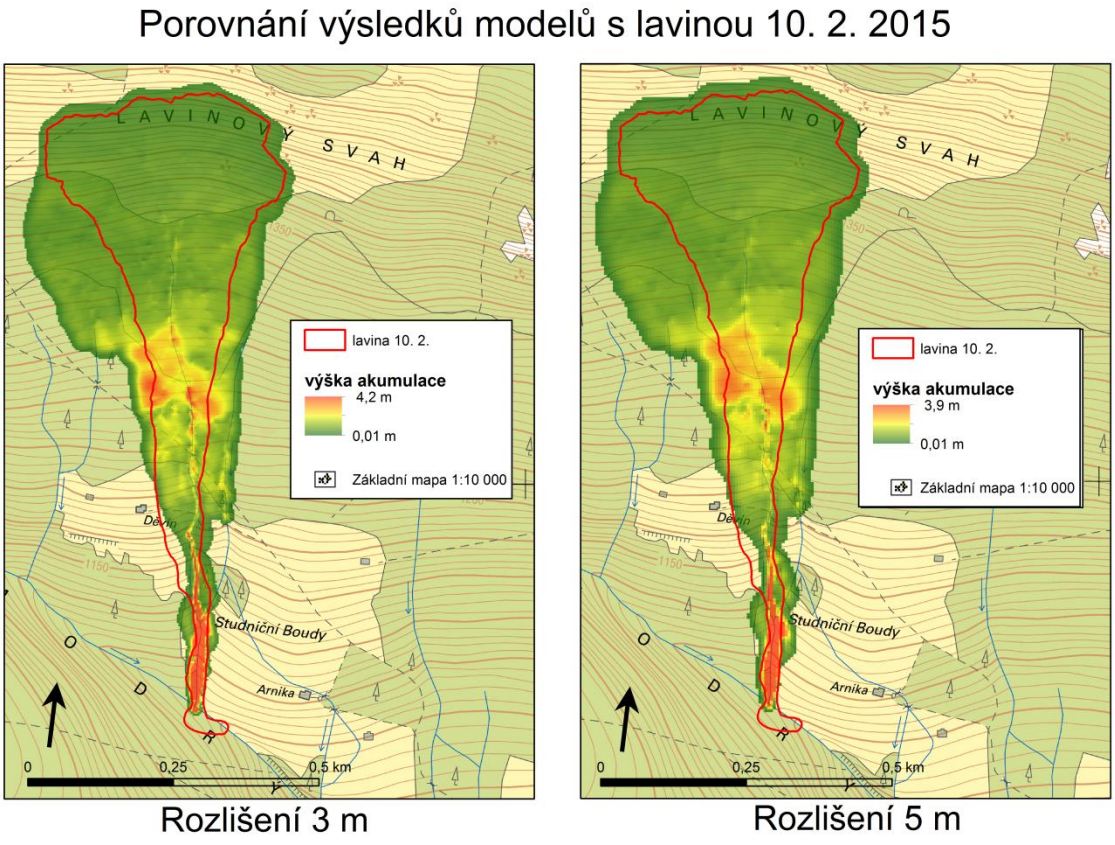
Stejně tak jako u dvojice výstupů kde byly použity koeficienty z modelového běhu č. 11, tak i zde dochází k chybám zejména v pravé (západní) horní části lavinové dráhy. Mnohem větší chyby však můžeme pozorovat v dolní části dráhy, kdy celkový tvar modelových výstupů neodpovídá modelované lavině. I zde je patrné nadhodnocení akumulace, šíří lavinové dráhy. Celkově je však patrné, že koeficienty ξ a μ mají na výsledek daleko větší vliv než rozlišení modelu. Při použití nesprávných koeficientů, se výsledky použitím modelu o vyšším rozlišení nezpřesnily.

rozlišení modelu [m]	dosah [m]	plocha akumulace [m^2]	plocha průniku s lavinou 10.2. [m^2]	plocha průniku/plocha akumulace
3	518	158058	119940,20	75,88%
5	515	164375	120015,34	73,01%

Tab. 6: Výstupy z modelů, vycházejících z parametrů tření běhu 24 s proměnnou výškou odtrhu a jejich porovnání.

8.2.3 Modelování s automaticky generovanými parametry

Lavinový modul RAMMS nabízí také možnost vygenerovat koeficienty tření podle DMR. Tato funkce vygeneruje pro celý DMR rozdílné hodnoty parametrů Mu a Xi. S takto vygenerovanými parametry tření byly opět spuštěny dva modely o rozlišení 3 m a 5 m. V případě použití modelu o třímetrovém rozlišení modelovaná lavina vykazuje dosah 1074 a plochu akumulace 239 130 m^2. Stejně tak jako v obou předchozích případech i zde model plochu akumulace silně nadhodnocuje, v prvním případě o 54 % a v případě druhém dokonce o 64 %. Modelovaná lavina o rozlišení 3 m vykazuje větší průnik se skutečnou lavinou než model o rozlišení 5 m (Tab. 6). V tomto případě se vliv rozlišení modelu na přesnost modelování akumulace projevuje více než při konstantních hodnotách parametrů tření. Z hlediska dosahu laviny obě modelové laviny nedosáhly dosahu laviny skutečné, lépe odpovídá model o rozlišení 3 m (1074 m), nicméně model o rozlišení 5 m vykazuje dosah pouze o 4 metry nižší.



Obr. 29: Porovnání modelů s variabilní výškou odtrhu vycházejících z automaticky vygenerovaných koeficientů tření. Podkladová mapa: ZM 10

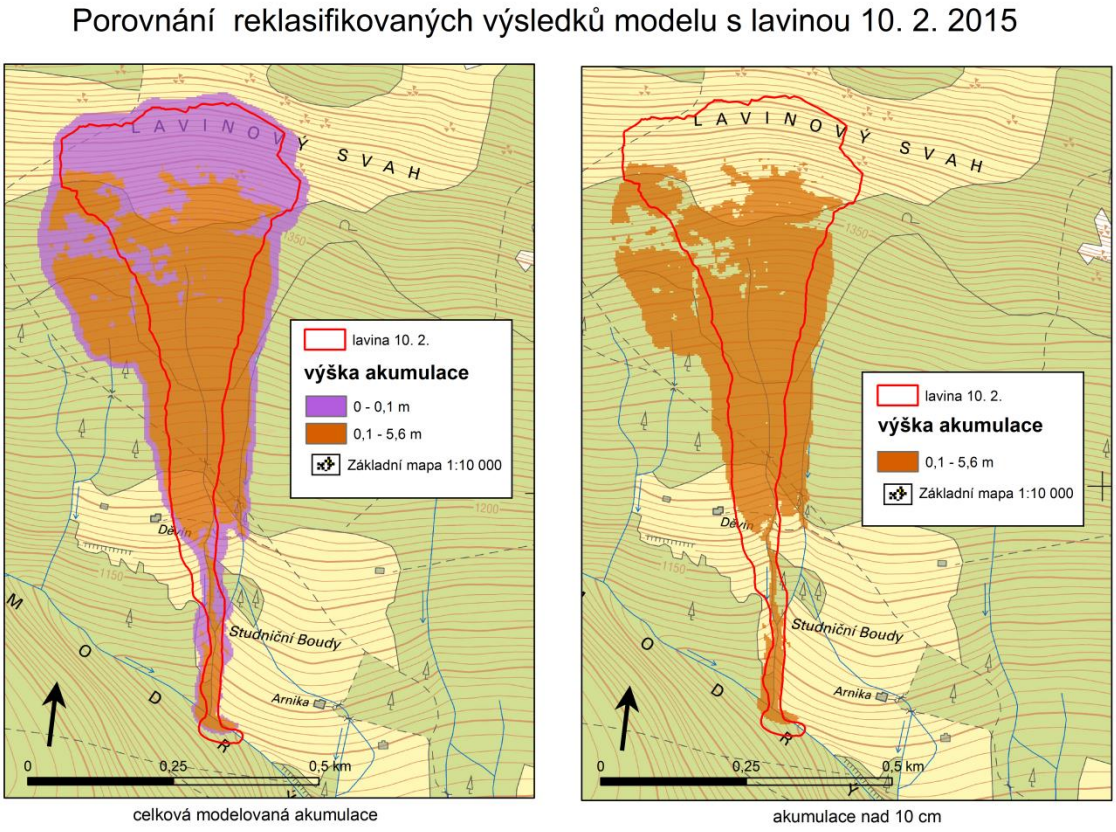
Z přiložených map je patrné, že výsledky modelů řízených automaticky generovanými koeficienty tření jsou méně přesné, než modely které využívají fixní, správně zvolené koeficienty. Pokud však tyto výsledky porovnáme s výsledky modelů, jejichž koeficienty tření vycházejí ze shody plochy akumulace, jsou tyto výsledky daleko přesnější. I zde se setkáváme se silným nadhodnocením plochy akumulace. Toto nadhodnocení je však o poznání menší při použití vyššího rozlišení modelu. Nejmarkantněji se toto zpřesnění projevuje ve spodní části lavinové dráhy. Ovšem i těchto modelů dochází k největšímu nadhodnocení v pravé (západní) horní části lavinové dráhy. Použití automaticky vygenerovaných parametrů má tedy smysl v případě nedostatku informací o lavinové dráze, nebo v případě malé zkušenosti uživatele. Výsledky z těchto modelů jsou přesnější než v případě dosazení naprosto chybných parametrů, avšak nedokáží nahradit výsledky z modelů vycházejících z fixně dosazených koeficientů tření. Uživatel, který se tedy v problematice orientuje je schopen model řídit nejpřesněji.

rozlišení modelu [m]	dosah [m]	plocha akumulace [m^2]	plocha průniku s lavinou 10.2. [m^2]	plocha průniku/plocha akumulace
3	1074	239130	149884,69	62,68%
5	1070	253075	120015,34	47,42%

Tab. 7: Výsledky modelů s automaticky vegenerovanými parametry.

8.2.4 Modelování plochy akumulace pomocí reklasifikace

Vzhledem k tomu že modely, jejichž plocha akumulace nejlépe odpovídá ploše akumulace skutečné laviny, neodpovídají skutečné lavině z hlediska dosahu, byl proveden výpočet plochy akumulace z výstupů vycházejících ze shody dosahu. Výpočet byl proveden pomocí reklasifikace, kdy byl výsledný rastr akumulace reklasifikován tak aby zobrazoval pouze hodnoty akumulace vyšší než 10 cm. Z takto vytvořeného rastru vytvořen polygon, ze ktrého byla vypočítána plocha akumulace. Pro tuto úpravu byl zvolen rastr akumulace z modelového běhu č. 11. Takto vytvořený polygon má plochu 141 795 m^2, což je 92% celkové plochy skutečné laviny. Je tedy zřejmé, že akumulace uvažovaná tímto způsobem vykazuje daleko vyšší shodu se skutečností.



Obr. 30: Porovnání výsledné modelované akumulace s reklasifikovanou akumulací. Podkladová mapa: ZM 10

Z mapy je patrné, že i reklasifikovaná modelovaná akumulace vykazuje poměrně malou shodu, co se týče tvaru. I po reklasifikaci zůstává poměrně významná plocha chybné akumulace v pravé (západní) části lavinové dráhy. Tyto výstupy však lépe odpovídají skutečnost z toho hlediska, že již nevykazují akumulaci v odtrhové zóně. Ve spodních partiích lavinové dráhy však reklasifikované výsledky vykazují vyšší míru podhodnocování akumulace. Lze tedy shrnout, že reklasifikace výstupů vede k zpřesnění modelace plochy akumulace, nicméně takto upravená akumulace stále neodpovídá tvaru akumulace skutečné laviny.

9 Diskuze

9.1 Modely sněhových lavin

V současnosti se můžeme setkat s celou řadou přístupů k modelování lavin. Z této skutečnosti vyplývá, že i lavinových modelů je v současnosti k dispozici velké množství.

Žádný z těchto modelů však není univerzální a z toho důvodu je u nich třeba počítat s omezeními. Statistické modely jsou sice schopny podávat velmi přesné výsledky na jednotlivých drahách, nicméně nezahrnují plošný rozměr laviny a jsou velmi náročné na vstupní data, tudíž nepoužitelné k predikci lavinových událostí. Naopak modely empirické nekladou na vstupní data takový nárok, ovšem není možné je využít pro modelování událostí ve velkém měřítku. Pro určení ohrožených oblasti jsou empirické modely nejvíce vhodné. Mass point modely přinesly do problematiky modelování sněhových lavin velmi důležité koncepty, avšak v současnosti jsou již překonány a téměř se nepoužívá. Na hydraulickém principu pracuje dnes většina lavinových modelů deskových lavin, jejich princip je totiž poměrně přesný z hlediska popsání proudění granulárního materiálu a zároveň není tak výpočetně náročný jako například u DEM modelů. Současný vývoj dále spěje ke složitějším modelům a to zejména v případě modelování prachových lavin. Ačkoliv je využití kinetického schématu pro modely velmi výpočetně náročné, je toto schéma využíváno stále častěji, i z důvodu velkého pokroku ve výpočetní technice. Modely založené na mechanice kontinua dále posunují základní principy DEM modelů, avšak i u nich je patrné poměrně velké zjednodušení. Navíc se u těchto typů modelů musí brát v úvahu jejich výpočetní náročnost (Savage a Hutter, 1989). Ačkoliv by se mohlo zdát, že analogové modely jsou v současnosti překonané numerickými, není tomu tak, jejich přínos tkví zejména v simulaci proudění sněhové masy okolo překážek různého tvaru, či k zjištění zákonitostí granulárního proudění. Umožňují též poměrně přesně měřit tlaky, kterými proudící granulární masa působí na případnou překážku. Analogové modely prachových lavin se využívají zejména pro asimilaci dat do numerických modelů. V tom to využití jsou téměř nenahraditelné a to z důvodu že měření těchto veličin přímo v terénu je velmi složité a mnohdy i životu nebezpečné.

Obecně je tedy možné tvrdit, že vývoj lavinových modelů je velmi dynamicky se vyvíjející obor, stejně tak jako obecně modelování ve fyzické geografii. Mezi hlavní problémy dnešních komerčně využívaných modelů, jako je například RAMMS, ELBA+ či Flow-R je v absenci třetího rozměru. Modely sice pracují na 3D terénu, jejich výpočty však probíhají v prostředí dvourozměrném. Tyto modely jsou však při dodržení kvality vstupních parametrů schopny poskytovat poměrně kvalitní výsledky. V případě programů využívaných k simulaci prachových lavin, kterými je například Samos AT též chybí třetí rozměr. U tohoto typu modelů jsou numerické výpočty daleko složitější, tudíž jejich vývoj

probíhá pomaleji. K těmto modelům se ovšem v současnosti pozornost vrací, tudíž je jejich vývoj poměrně perspektivní.

9.2 Model RAMMS

Numerický model RAMMS je v současnosti nejpokročilejší nástroj pro modelování lavinové činnosti. Velkou výhodou tohoto modelu je jeho velmi přívětivé uživatelské rozhraní, a jeho schopnost komunikace s GISovými nástroji. Jeho hydraulický princip vycházející již z Vöellmyho práce je sice v současnosti mírně zastaralý, ale i přes tento limit model dokáže poměrně kvalitně numericky vyjádřit proudění deskových lavin. Velmi přínosné u tohoto modelu je možnost plné uživatelské kontroly na parametry tření.
V případě dobré znalosti lavinové dráhy je možné definovat i více oblastí s rozdílnými drsnostními vlastnostmi, a tím se co nejvíce přiblížit parametrům skutečné lavinové dráhy. Zároveň v případě málo známé lavinové dráhy umožňuje vygenerovat tyto parametry automaticky. Model též umožňuje vytvářet poměrně kvalitní mapové výstupy, či animace proběhlých modelových lavin. Nevýhodou tohoto modelu je zejména to, že není k dispozici zdarma ke stažení. Další nevýhodou tohoto modelu je že v odtrhovém polygonu je poměrně komplikované vyjádřit změny vlastností sněhových vrstev ve sněhovém profilu. Tento model je v současnosti možné využít pouze pro modelování deskových lavin. Tento nedostatek by měl být v blízké budoucnosti eliminován, neboť modul pro modelování prachových lavin, je v současné době ve vývoji.

9.3 Modelování laviny v Modrém dole

Výsledky modelů vycházejí z numerické kalkulace a z této skutečnosti již vychází prvnotní nepřesnosti. Vzhledem k té skutečnosti, že samotný model nedokáže přesně popsat složité podmínky panující jak uvnitř, tak na povrchu, či na hranicích tělesa laviny, určité nepřesnosti vznikají již zde. Dalším problémem v modelování této lavinové události je bezpochyby skutečnost, že v případě zpětné modelace laviny (back calculation) neznáme přesný objem akumulovaného sněhu v zóně odtrhu. Polygon, který byl použit pro modelování výsledných modelů, byl sice rozdělen na jednotlivé části, což reprezentovalo nerovnoměrnost uložení sněhu v odtrhové zóně, avšak ve skutečnosti jsou tyto podmínky daleko složitější. Bez velice komplikovaného terénního výzkumu, jenž by umožnil získání velkého množství dat o výšce sněhové pokrývky v odtrhové zóně před pádem laviny není možné vytvořit modelový odtrh, který by rozložení sněhové pokrývky detailně

reprezentoval. Přihlédneme-li k výsledkům kalibračních modelování, je u všech modelů patrná velká chyba v pravé (západní) horní části lavinové dráhy, lze tedy předpokládat, že tuto chybu zapříčiňuje změna v místní topografii, jež může být reprezentována vyšším vzrůstem lesa, který není plně zahrnut v datech AHL z roku 2011, či ve vrstvě lesa KRNAP. Digitální model reliéfu je sám o sobě zdrojem nepřesností, i přes to že s rozlišením 1 m dokáže popsat reliéf poměrně přesně, není možné pomocí něj zachytit tvary, které jsou sice menších rozměrů než 1 metr, ale lavinu jsou schopné ovlivnit, jako jsou například padlé kmeny stromů, či kameny. Mezi další zdroje nepřesností modelových výstupů vstupuje celková homogenizace lavinového tělesa. Model jako takový pracuje s kompaktní měrnou hmotností pro celou lavinu, je však známé, že ve sněhovém profilu se vyskytují vrstvy sněhu s naprosto odlišnými vlastnostmi, což vede k změně jeho chování během pádu laviny a stejně tak ovlivňuje i kohezi sněhové hmoty. Dále model jako takový vůbec nebere v úvahu změny povrchu. Tato skutečnost vkládá do modelování další nejistotu. Zejména na dlouhých lavinových drahách se může podloží měnit poměrně podstatně od skalního podloží až po fluviální akumulace štěrku či měkké půdy. Ke zkreslení výsledků dochází také z důvodu, že výsledné akumulace vypočítané modelem nabývají velmi malých hodnot. S hodnotami jednotek centimetrů, které je model schopný spočítat se v praxi u lavinových událostí nesetkáváme, a v případě ohrožení lidského majetku, či života jsou takové hodnoty zanedbatelné. Pro zpřesnění modelování je tedy třeba zpřesňovat zejména vstupní informace a to zejména určení správných koeficientů tření, které vycházejí ze správného určení typu lavinové dráhy a jejího zařazení do výškového stupně. Menší vliv na případnou přesnost výstupů má určení periody opakování pádu laviny. Co se týče výsledné přesnosti, nejpřesněji vycházely modely s koeficienty tření odvozenými ze shody dosahu laviny, poté modely s koeficienty automaticky vygenerovanými programem RAMSS a jako nejméně přesné se ukázaly modely, jejichž koeficienty tření byly zvoleny na základě shody plochy akumulace. Tento výsledek pramení ze skutečnosti, že model ve všech případech silně nadhodnotil plochu akumulace modelované laviny a z toho důvodu modelované laviny, které odpovídaly z hlediska dosahu, byly mnohonásobně plošně rozsáhlejší. Modelování akumulace, která více odpovídá skutečnosti, se dá docílit reklasifikací výsledného rastru tak, aby zobrazoval pouze hodnoty akumulace vyšší než 10 cm. Takto vytvořený rastr ovšem stále neodpovídá tvaru laviny, i když jeho plocha akumulace je daleko přesnější. Pro určení shody s tvarem skutečné laviny je tedy reklasifikovaný rastr nepoužitelný.

10 Závěr

Z provedené studie na lavinové dráze Modrý důl lze odvodit následující závěry:

- Lavinový modul modelu RAMMS je možné použít pro modelování lavin v podmínkách Krkonoš.
- Parametry tření doporučované podle manuálu RAMMS jsou použitelné i pro podmínky panující v Krkonoších.
- Při použití vhodných parametrů tření model RAMMS podává přesné výsledky v případě modelování dosahu laviny.
- Na správné určení koeficientů tření má největší vliv správné přiřazení tvaru lavinové dráhy a nadmořské výšky jejího odtrhu.
- V případě nedostatku dat o pádech lavin na lavinové dráze je možné využít parametry tření vygenerované z DMR, avšak výsledky zejména modelovaného dosahu laviny vykazují vyšší nepřesnosti, než při expertním určení parametrů tření.
- Model RAMMS v podmínkách Krkonoš obvykle nadhodnocuje plochu akumulace, z důvodu výsledných akumulací pohybujících se v jednotkách centimetrů.
- Při použití vhodných parametrů tření je možné modelovat tvar laviny, je však nutné brát v úvahu možné nadhodnocení plochy akumulace.
- Pomocí reklasifikace výsledků je možné modelovat plochu akumulace laviny. V tomto případě však neodpovídá tvar laviny.
- Model o vyšším rozlišení podává kvalitnější výsledky pouze v případě kvalitních vstupních dat, a správně zvolených koeficientů tření.
- S rozlišením modelu roste maximální výška modelované akumulace.
- Výpočetní doba modelu stoupá s jeho rozlišením mnohonásobně, ovšem přesnost výstupů pouze v řádu několika procent.

Model RAMMS lze bez větších úprav tabulky pro určování parametrů tření využít pro modelování lavin v podmínkách panujících v Krkonoších. Zejména co se týče předpovědi dosahu případné laviny je to poměrně přesný nástroj a i pokud máme k dispozici malé množství dat, je schopen podávat uspokojivé výsledky. Větší chybovost však model vykazuje v případě modelování plochy akumulace, kdy dochází k silnému nadhodnocování z důvodu výpočtu akumulace o výšce několik centimetrů.

11 Použité zdroje

11.1 Literatura

Ancey, C., Ancey, C., 2001. Snow Avalanches, in: Geomorphological Fluid Mechanics. Springer, Berlin, pp. 319-338.

Bakhvalov, N., and other, ., 1974. Motion of snow avalanches. Tr. Sredn. Reg Neuchno-Issled. Gidrometeor. Inst. 15.

Barbolini, M., Gruber, U., Keylock, C.J., Naaim, M., Savi, F., 2000. Application of statistical and hydraulic-continuum dense-snow avalanche models to five real European sites. Cold Regions Science and Technology 31.

Bartelt, P., Salm, B., Gruber, U., 1999. Calculating dense-snow avalanche runout using a Voellmy-fluid model with active/passive longitudal straining. Journal of Glaciology 45.

Bozhinskiy,, Sukhanov, 1998. Physical modelling of avalanches using an aerosol cloud of powder materials. Annals of glaciology 26.

Blahůt, J., 2006. Laviny Labského dolu v Krkonoších (Diplomová práce). Praha.

Boháč, J., 1969. Půdy východních Krkonoš. Opera corcortica 8.

Slavík, B., 1988. Regionálně fytogeografické členění, in: Květena ČSR I.. Academia, Praha, pp. Regionálně fytogeografické členění - mapa.

Caccamo, P., Chanut, B., Faug, T., Bellot, H., Naaim-Bouvet, F., 2012. Small-scale tests to investigate the dynamics of finite-sized dry granular avalanches and forces on a wall-like obstacle. Granular Matter 14, 577-587.

Demek, J., 1987. Obecná geomorfologie. Academia, Praha.

Demek, J., Mackovčin, P., 2006. Zeměpisný lexikon ČR, Vyd. 2. ed. AOPK ČR, Brno

Eglit, M., 1998. Mathematical and physical modelling of powder-snow avalanches in Russia. Annals of glaciology 26, 281-284.

Engel, Z., Braucher, R., Traczyk, A., Laetitia, L., 2014. 10Be exposure age chronology of the last glaciation in the Krkonoše Mountains, Central Europe. Geomorphology 206.

Faug, T., Gauer, P., Lied, K., Naaim, M., 2008. Overrun length of avalanches overtopping catching dams: Cross-comparison of small-scale laboratory experiments and observations from full-scale avalanches. Journal of Geophysical Research vol. 113.

Gruber, A., 1791. Psychykalische und eryktologische aus dem Reisengebirge gesammelte Bemerkungen In: Jirasek, Haenke, Gruber et Gerstner: Beobachtungen auf Reisen nach dem Reisengebirge. Walther, Dresden.

Gruber, U., Bartelt, P., 2007. Snow avalanche hazard modelling of large areas using shallow water numerical methods and GIS. Environmental Modelling & Software 22.

Hermann, F., Hutter, K., 1991. Laboratory experiments on the dynamics of powder-snow avalanches in the run-out zone. Journal of Glaciology 37.

Horton, P., Jaboyedoff, M., Rudaz, B., Zimmermann, M., 2013. Flow-R, a model for susceptibility mapping of debris flows and other gravitational hazards at a regional scale. Natural Hazards and Earth System Science 13.

Houdek, I., Vrba, M., 1956. Zimní nebezpečí v horách. STL, Praha.

Hutter, K., Kirchner, N., 2003. Dynamic Response of Granular and Pourous Materials unde Large and Catastrophic Deformations. Springer, Berlin.

Hutter, K., 1993. 2-dimensional similarity solutions for finite-mass granular avalanches with coloumb type and viscous-type frictional resistance. Journal of Glaciology 39.

Hutter, K., Siegel, M., Savage, S.B., Nohguchi, Y., 1993. Two-dimensional spreading of a granular avalanche down an inclined plane Part I. theory. Acta Mechanica 100.

Hydrologické poměry Královéhradeckého kraje [WWW Document], 2015. [WWW Document]. chmi.cz.. URL http://portal.chmi.cz/files/portal/docs/poboc/HK/hpomery.pdf (accessed 06.03.2015).

Christen, M., Bühler, Y., Bartelt, P., Leine, R., Volkwein, A., Glover, J., 2012. Integral hazard management using a unified software environment: Numerical simulation tool "RAMMS" for gravitional natural hazards, in: 12Th Congress Interpravent 2012 - Grenoble / France. INTERPRVENT, Grenoble.

Chlupáč, I., 2011. Geologická minulost České republiky, Vyd. 2., opr. ed. Academia, Praha.

Chytrý et al., 2010. Katalog biotopů České republiky = Habitat catalogue of the Czech Republic, 2. vyd.nd ed. Agentura ochrany přírody a krajiny ČR, Praha.

Jenkins, J.T., Askari, E., 1999. Hydraulic theory for a debris flow supported on a collisional shear layer. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science 9.

Jeník, J., 1961. Alpinská vegetace Krkonoš, Králického Sněžníku a Hrubého Jeseníku: Teorie anemo-orografických systémů. ČSAV, Praha.

Klima Pec pod Sněžkou [WWW Document], 2015. [WWW Document]. Meteonews.de.. URL http://meteonews.de/de/Klima/M11643000/Pec_pod_Sn%C4%9B%C5%BEkou (accessed 06.07.2015).

Kňazovický, ., 1967. Lavíny. SAV, Bratislava.

Kociánová, M., 2004. Základové a smišené laviny ve vztahu k přemisťování svahovin a dynamice vegetace. Opera corcortica 41.

Kociánová, M., Dvořák, I., Treml, V., Vaněk, J., Hejcman, M., 2004. Vztah mezi geo- a biodiverzitou na příkladu sněhového pole "Mapa republiky". Opera corcontica 41.

Kohoutek, ., 2013. Laviny jako přírodní rizikový jev se zaměřením na začlenění do výuky v rámci geografického vzdělávání (Rigorózní práce). Olomouc.

Kozik, S., 1962. Computing Snow Avalanche Motion. Gidrometeoizdat.

Lied, K., Toppe, R., 1989. Calculation of maximum snow-avalanche run-out distance by use of digital terrain models. Annals of glaciology 13, 164-169.

Mangeney-Castelnau, A., Vilotte, J.-P., 2003. Numerical modeling of avalanches based on Saint Venant equations using a kinetic scheme. Journal of Geophysical Research 108.

McClung, D., Lied, K., 1987. Statistical and geometrical definition of snow avalanche runout. Cold regions science and technology 13.

Mísař, Z., 1983. Geologie ČSSR. Státní pedagogické nakladatelství, Praha.

Naaim-Bouvet, F., Pain, S., Naaim, M., Faug, T., 2003. Numerical and Physical Modelling of the Effect of a Dam on Powder Avalanche Motion: Comparison with Previous Approaches. Surveys in Geophysics 24.

Norem, H., Irgens, F., Schieldrop, B., 1989. Simulation of snow-avalanche flow in run-out zones. Annals of Glaciology 13.

Novak, J., Petr, L., Treml, V., 2010. Late-Holocene human-induced changes to the extent of alpine areas in the East Sudetes, Central Europe. The Holocene 20.

Pokorný, M., 2014. Navier-Stokesovy rovnice. Praha.

Pudasainy, Hutter, K., 2007. Avalanche dynamics: Dynamics of Rapid Flows of Dense Granular Avalanches. Springer, Berlin.

Quitt, E., 1971. Klimatické oblasti Československa.

Rastello, ., 2002. Etude de la dynamique des avalanches de neige en aérosol (Disertační práce). Grenoble.

Ridgway, K., Rupp, R., 1970. Flow of granular material down chutes. CPE. Chemical & process engineering 51.

Salciarini, D., Tamagnini, C., Conversini, P., 2010. Discrete element modeling of debris-avalanche impact on earthfill barriers. Physics and Chemistry of the Earth 35.

Salm, B., Gubler, H., 1985. Measurement and analysis of the motion of dense flow avalanches. Annals of glaciology 6.

Salm, B., 2004. A short and personal history of snow avalanche dynamics. Cold regions science and technology 83-92.

Salm, B., 1966. Contribution to avalanche dynamics. International Association of Scientific Hydrology.

Savage, S., Hutter, K., 1989. The motion of a finite mass of granular material down a rough incline. Journal of Fluid Mechanics vol. 199, 177-.

Schwarz, O., 1997. Lesní hospodárství jako prostředek k záchraně biodiverzity lesních systémů Krkonoš. Opera corcortica 34.

Straughan, B., Greve, R., Ehrentraut, H., Wang, 2001. Continuum Mechanics and Applications in Geophysics and the Environment. Springer, Berlin.

Spusta, ., Kociánová, M., 1998. Lavinový katastr české části Krkonoš v období 1961/62 – 1997/98. Opera corcontica 35.

Šebesta, J., Treml, V., 1978. Glacigenní a nivační modelace údolí a údolních uzávěrů Krkonoš. Opera corcortica 13.

Štursa, J., Jeník, J., Kubíková, J., 1973. Sněhové pokrývka západních Krkonoš v abnormální zimě 1969 - 1970 a její ekologický význam. Opera Concortica 10.

Tomášek, M., 2003. Půdy České republiky, 3. vyd. ed. Česká geologická služba, Praha.

Treml, V., 2003. Recentní dynamika alpinské hranice lesa v Krkonoších. Opera corcontica 41.

Treml, V., Chuman, T. 2015. Ecotonal dynamics of the altitudinal forest limit are affected by terrain and vegetation structure variables: An example from the Sudetes Mountains in Central Europe. Arctic, Antarctic, and Alpine Research 47.

van Baars, S., 1996. Discrete Element Modelling of Granular Materials. Heron 41.

Voellmy, A., 1955. Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung 73.

Vrba, M., 2003. V lavinách a vánicích. Altituda, Vsetín.

Vrba, M., Spusta, V., 1975. Lavinový katastr Krkonoš. Opere corcortica 12.

Vrba, M., Spusta, V., 1991. Lavinový katastr Krkonoš. Opera Corcontica 28.

Wawra, M., 2010. Numerical modelling of snow avalanches: Interaction between granular flow and obstruction (Disertační práce). Wien.

Why RAMMS? [WWW Document], 2010. [WWW Document]. http://ramms.slf.ch/.. URL http://ramms.slf.ch/ramms/index.php?option=com_content&view=article&id=46&Itemid=53 (accessed 06.08.2015).

Wieghardt, K., 1975. Experiments in Granular Flow. Annual Review of Fluid Mechanics 7.

11.2 Mapové a další zdroje

DIBAVOD (2015): Digitální báze vodohospodářských dat, VÚV TGM, dostupné na URL: http://www.dibavod.cz/

Geologická mapa 1 : 50 000: ČGS, dostupné na URL: http://www.geologicke-mapy.cz
Půdní mapa 1 : 50 000: ČGS, dostupné na URL: http://mapy.geology.cz/pudy

ZM 200: Základní mapa ČR 1: 200 000, ČÚZK, dostupné na URL: http://geoportal.cenia.cz

ZM 10: Základní mapa ČR 1: 200 000, ČÚZK, dostupné na URL: http://geoportal.cenia.cz

ZM 50: Základní mapa ČR 1: 200 000, ČÚZK, dostupné na URL: http://geoportal.cenia.cz

2015. Klima Pec pod Sněžkou [WWW Document]. Meteonews.de. URL http://meteonews.de/de/Klima/M11643000/Pec_pod_Sn%C4%9B%C5%BEkou (accessed 06.07.2015).

2014. Staniční data ČHMÚ Pec pod Sněžkou, Luční bouda.

2014. Laviny.info [WWW Document]. URL http://laviny.info/ (accessed 06.29.2015).

014. Irstea [WWW Document]. URL http://www.irstea.fr/ (accessed 06.29.2015).

2012. Snow brains [WWW Document]. URL http://snowbrains.com/ (accessed 06.29.2015).

Pavlásek, J., Blahůt, J., Juras, R., 2015. Digitální lavinový katastr Krkonoš 1961/62-2014/15. Soubor XLS.

11.3 Použitý software

ESRI (2010): ArcMap 10.0
Microsoft (1999): Excel 2010
Slf (2013) RAMMS 1.5
SigmaPlot 11.0