

Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta

Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie

Studijní obor: Geografie – Kartografie



**Jan Tumajer**

Dendrochronologické datování rychlých svahových pohybů  
Dendrochronological dating of catastrophic slope movements

Bakalářská práce

Školitel

Mgr. Václav Treml, Ph.D.

Praha 2011

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovával samostatně a že jsem uvedl a řádně citoval všechny použité informační zdroje a literaturu. Tištěná verze je shodná s elektronickou verzí. Práce jako celek ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze 20. 05. 2011

Jan Tumajer

## Zadání bakalářské práce

### Název práce: Dendrochronologické datování rychlých svahových pohybů

#### Cíle práce

1. Zpracovat rešerši na téma:
  - a. anatomická stavba letokruhu,
  - b. vliv disturbancí spojených se svahovými pohyby na růst stromů, záznam disturbancí v letokruhových křivkách,
  - c. typy svahových pohybů datovatelných dendrochronologickou metodou;
2. Provést metaanalýzu studií využívajících dendrochronologii k datování svahových pohybů s tím, že bude vždy identifikován proces, metoda datování, úspěšnost (přesnost) datování;
3. Na konkrétních vzorcích identifikovat anatomické indikátory disturbancí.

#### Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

*Metody: rešerše, metaanalýza vědeckých studií, příprava mikroskopických vzorků a jejich analýza: řezání, barvení, tvorba trvalých preparátů, mikrofotografie;*

*Datové zdroje: rešerše prostřednictvím WOS, SCOPUS, ScienceDirect, Ingenta, Geobase, neopomenout domácí periodika a časopisy Dendrochronologia a Geomorphology.*

Datum zadání: 1.10. 2010

Jméno studenta: Jan Tumajer

Podpis studenta: .....

Jméno vedoucího práce: Václav Tremel

Podpis vedoucího práce: .....

Na tomto místě bych rád poděkoval Mgr. Václavu Tremlovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracovávání bakalářské práce, stejně jako za poskytnutí zpracovávaného materiálu a možnosti využít přístrojového vybavení Dendrochronologické laboratoře. Dále děkuji celé mojí rodině za podporu v průběhu dosavadního studia.

## **Abstrakt**

Svahové pohyby jsou jedním z přírodních procesů, které mohou představovat značná ohrožení pro člověka i jeho majetek. Dendrochronologie jako jedna z možností jejich rekonstrukce umožňuje zjištění celé řady parametrů minulých eventů, které lze následně využít při plánování bezpečnostních opatření. Možnosti použití rozličných dendrochronologických metod v aplikovaném výzkumu byly otestovány formou metaanalýzy odborných článků dostupných v elektronické i tištěné podobě a také prostřednictvím případové studie zaměřené na minulou aktivitu lavinové dráhy Schustlerův žlab (Labský důl, Krkonoše). Hlavním závěrem metaanalýzy je kromě jiného evidentní prostorová nerovnoměrnost recentních výzkumných dendrogeomorfologických aktivit – datování lavin je výsadou Montany (USA), v případě tekoucích svahových pohybů (mur) zase jednoznačně dominují jako zájmová oblast Alpy (v první řadě Švýcarsko). Vyhodnocení několika vzorků dřeva při vhodně zvolených indikátorech disturbance vedlo v rámci případové studie k dosažení výsledků s přesností odpovídající běžně publikovaným vědeckým článkům zaměřeným na dendrochronologické datování lavin a umožnilo v období mezi roky 1953-2007 vymezit v zájmovém území 14 roků s potenciálním výskytem lavin. To, i přes téměř úplné opomíjení dendrochronologických metod ve výzkumu lavin v pohořích České republiky, ukazuje na jejich velký potenciál pro možné budoucí aplikace.

**Klíčová slova:** anatomie dřeva, dendrogeomorfologie, disturbance, metaanalýza, svahový proces, svahový pohyb

## **Abstract**

Mass-movements are one example of natural processes that can pose a serious risk for human beings and their possessions. Dendrochronology, a method capable of their reconstruction, can provide parameters of former events, which can be used for planning protective measures. The possibilities for the application of dendrochronological methods have been tested by means of meta-analysis of electronic and printed scientific articles and a case study focused on former avalanche activity in Schustler's avalanche path (Labský důl, Krkonoše Mts.). The main conclusion of the first one is the clear spatial disproportion of the recent dendrogeomorphological research activities – e.g. the dating of avalanches is typical for mountains of Montana (USA); the Alpine region (mainly Switzerland), on the other hand, absolutely dominates in the research of debris-flows. In the case study, the analysis of material with well-chosen indicators led to high accuracy results comparable with the results of scientific articles focused on avalanches, and made the identification of 14 years (in the period 1953-2007) with potential avalanche activity possible. Although methods of dendrogeomorphology are usually neglected in the research of avalanches in the Czech republic, their great potential for future applications is shown.

**Keywords:** dendrogeomorphology, disturbances, mass-movement, meta-analysis, slope processes, wood anatomy

## Obsah

Abstrakt/Abstract.....	5
1. Úvod .....	7
2. Anatomická stavba a tvorba letokruhu .....	9
3. Vlivy disturbancí spojených se svahovými pohyby na růst stromů .....	14
3.1. Nesouměrný tvar letokruhů .....	14
3.2. Prudké růstové změny .....	16
3.3. Tvorba reakčního dřeva .....	20
3.4. Odhalené kořeny .....	22
3.5. Reakce na pohřbení části kmene, adventivní kořeny .....	24
3.6. Tvorba traumatických pryskyřičných kanálků .....	26
3.7. Jizvy na kmenech stromů .....	29
3.8. Stáří kolonizace .....	31
4. Typy svahových pohybů a specifika jejich datování.....	32
4.1. Sněhové laviny .....	33
4.2. Skalní řícení .....	36
4.3. Tečení (stékání) .....	38
4.4. Sesuvy.....	40
5. Metody.....	42
5.1. Metody metaanalýzy.....	42
5.2. Zájmové území, materiál a metody případové studie.....	43
6. Výsledky.....	49
6.1. Výsledky metaanalýzy.....	49
6.2. Výsledky případové studie .....	49
7. Diskuze .....	53
7.1. Diskuze metaanalýzy.....	53
7.2. Diskuze případové studie.....	57
8. Závěr.....	62
Seznam použité literatury a zdrojů .....	63
Seznamy obrázků, tabulek a příloh.....	66

## 1. Úvod

Pod pojmem svahové pohyby rozumíme jakékoliv pohyby podmíněné zemskou tíží, při kterých se přesouvá těžiště pohybující se masy po svahu dolů (ZÁRUBA, MENCL 1987). V podmínkách České republiky jsou spolu s povodněmi nejnebezpečnějšími přírodními ohroženími (KUKAL, POŠMOURNÝ 2005), která představují značné potenciální riziko pro lidské životy, obytné stavby i pro dopravní infrastrukturu. V některých oblastech světa způsobují různé kategorie gravitačních pohybů dokonce ještě mnohonásobně větší problémy než u nás. Základním předpokladem pro účinně a efektivně fungující ochranu před budoucími sesuvy, skálními říceními, bahnotoky i lavinami je co největší a nejpodrobnější znalost minulých svahových pohybů, které poskytují cenné informace pro územní plánování i předcházení ohrožení lidských životů. Z tohoto úhlu pohledu se jako nejdůležitější jeví vymezování oblastí a lokalit, ve kterých je předpokládáné riziko přírodního hazardu vzhledem k historickému a prehistorickému vývoji vysoké. Cenné informace poskytují také data o vlastnostech minulých svahových pohybů (např. množství uvolněného materiálu, rychlost pohybu), mezi kterými zaujímá klíčové postavení přesné časové vymezení dané události. Z ní lze totiž odhadnout periodicitu opakování daného jevu stejně jako poukázat na případnou souvislost s klimatickými (např. množství srážek) a jinými vlivy prostředí (STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2009).

Existuje celá řada metod sloužících pro časové vymezení svahového pohybu, z nichž se podle Langa et al. (1999) každá potýká s řadou omezení a nedostatků. Nedostatky radiokarbonové metody jsou velký rozptyl výsledků, fakt, že se jedná o destruktivní metodu (datovaný vzorek se spálí) a také celá škála procesů, které mohou druhotně změnit množství uhlíku v uloženém organickém materiálu po jeho deponování. Komplikaci také může představovat rozlišení vzorků organiky, které byly gravitačním pohybem deponovány a těch, které pouze redeponovány (tzn. jejich radiokarbonově datované stáří je vyšší než stáří svahového procesu, a takovéto datování ukazuje pouze na jeho minimální věk). Lichenometrie zase čelí problémům s odhadnutím množství lišejníkového pokryvu, který přečkal svahový pohyb, a jehož stáří je tedy vyšší než stáří procesu. To činí problém zvláště v případech jednoduchých translačních nebo rotačních sesuvů. Vzhledem k tomu, že během gravitačního procesu může, ale také nemusí, docházet k vnesení některých transportovaných materiálů na povrch a jejich osvětlení, je i aplikace metod opticky stimulované luminiscence problematická. Využití historických leteckých snímků je velmi výhodné, ovšem použitelné pouze v oblastech, které byly v minulosti takto zmapovány; navíc letecké snímky jsou

dostupné pouze pro několik posledních desetiletí, tedy zanedbatelnou dobu v porovnání s časovými horizonty geomorfologických procesů. Jako nejužitečnější se samozřejmě jeví přímé písemné záznamy kronikářů nebo pamětníků, ty jsou ale velmi nesouvislé a nekompletní, což je pravděpodobně důsledkem faktu, že nejčastější jsou svahové pohyby v horských oblastech, kde je relativně malá hustota osídlení. Dendrochronologie představuje další datovací metodu, a ačkoliv i ta se potýká s řadou omezení, je široce aplikovatelná (hlavně pro mladší období geologické historie) a umožňuje dosažení velmi přesných výsledků (LANG ET AL. 1999).

Dendrochronologie, která poskytuje přístupy pro celou škálu geografických disciplín (SCHWEINGRUBER 1996), využívá míry ročního přírůstu dřeva a proměn v jeho struktuře k rekonstrukci podmínek, za kterých vznikalo. Vzhledem k tomu, že v temperátní zóně obvykle vzniká jeden letokruh za jednu vegetační sezónu, je možné pomocí dendrochronologie datovat s přesností na konkrétní rok, u některých metod je dokonce možné i datování s větší přesností v rámci jednoho vegetačního období (LANG ET AL. 1999). Ačkoliv je délka života stromu z pohledu geologického času relativně krátká, je možné dendrochronologické přístupy aplikovat i pro dataci velmi starých svahových pohybů využitím starého stavebního dříví a pohřbených zbytků a jejich křížového datování (crossdating) s již existujícími letokruhovými chronologiemi (WILES ET AL. 1996). To dělá z dendrochronologie vysoce přesnou a široce aplikovatelnou datovací metodu.

Cílem této bakalářské práce je komplexně zhodnotit téma dendrogeomorfologického výzkumu rychlých svahových pohybů. Dílčími cíli jsou dále:

- Provést rešerši (i) anatomické stavby a mechanismu tvorby letokruhů, (ii) dopadů svahových pohybů na růst dřevin a (iii) možností využití jednotlivých ukazatelů disturbance pro dataci rozdílných gravitačních pohybů.
- Provést metaanalýzu dostupné odborné dendrogeomorfologické literatury za účelem zhodnocení vývoje a současného stavu výzkumu různých svahových pohybů ve světě i u nás.
- Na konkrétních vzorcích vizualizovat a zhodnotit jednotlivé růstové změny a anatomické anomálie indikující mechanické poškození nebo změny růstových podmínek související se svahovým pohybem.



## 2. Anatomická stavba a tvorba letokruhu

Dřevo vzniká sekundárním tloustnutím rostlinného těla, které je zajištěno činností dělivého pletiva kambium, což je skupina nediferencovaných buněk (tzv. iniciál), která si po celou dobu své existence zachovává dělivou funkci. Vytváří tak směrem do středu kmene buňky sekundárního dřeva (deuteroxylému) a směrem vně buňky sekundárního lýka (deuterofloému), tedy rostlinná pletiva s vodivou funkcí (VOTRUBOVÁ 2001).

Činnost kambia je omezena pouze na příhodné klimatické podmínky, jejichž sezónnost je závislá na geografické poloze. V tropech, kde je stav meteorologických prvků celoročně poměrně stabilní, funguje kambium po celý rok a struktury dřeva se během jednotlivých částí roku liší jenom minimálně (SCHWEINGRUBER 1996). Naopak v regionech s periodicky střídajícími se ročními dobami je tvorba xylému a floému omezena pouze na určitou část roku, kdy jsou pro růst rostlin vhodné klimatické podmínky (vegetační období) a po zbytek roku zůstává činnost kambia utlumena (období vegetačního klidu). Z biochemického hlediska je jeho aktivita vyvolávána vlivem některých enzymů a fytohormonů. Mezi nimi má jedno z nejdůležitějších postavení fytohormon auxin (SCHWEINGRUBER 1996). Ten se na jaře vytváří v mladých listech a rašících pupenech, putuje rostlinou směrem dolů do kořenů a při tom spouští aktivitu kambia (VOTRUBOVÁ 2001). Z dalších důležitých fytohormonů ovlivňujících činnost kambia a celkový růst rostliny lze uvést například kyselinu giberellovou, která ovlivňuje morfologickou strukturu hlavně letního dřeva, a etylen, jehož produkce je často důsledkem působení stresu (SCHWEINGRUBER 1996).

V podmínkách přechodného mírného klimatu České republiky je běžné, že k tloušťkovému přírůstu dřevin dochází přibližně po dobu 4 měsíců (od května do srpna) s největší aktivitou většinou v červnu (VOTRUBOVÁ 2001); existují ale i některé druhově specifické výjimky. Obecně platí, že kruhovitě pórovité listnáče přirůstají již od konce dubna, roztroušeně pórovité listnáče až od konce května, kambium jehličnanů je zase aktivní i na začátku září (DRÁPELKA, ZACH 2000).

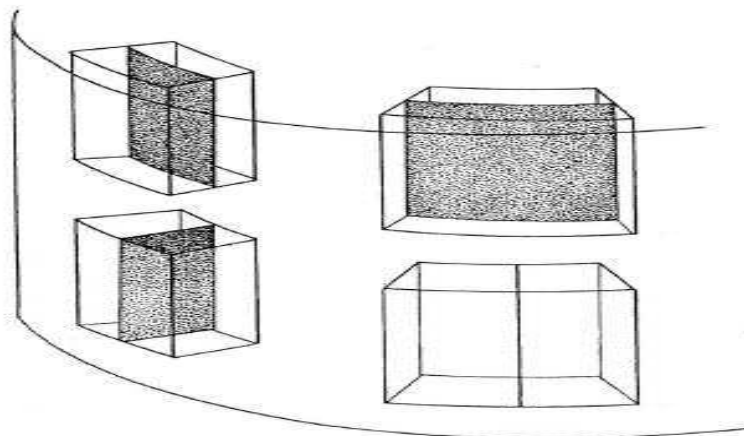
Vzhledem k tomu, že během vegetačního období se obvykle zásadním způsobem mění charakter počasí, probíhá tvorba buněk dřeva na začátku a na konci vegetační periody za zcela jiných podmínek, což má za následek změnu jeho makro- i mikrostruktury. Konkrétně v jarních měsících, kdy jsou teploty relativně mírné a je dostatek vláhy, vznikají buňky na příčném průřezu kulatého tvaru s tenkými buněčnými stěnami, které se na transversálním řezu kmenem jeví jako světlé. V horkých letních měsících zase dochází k tvorbě neisodiametrických buněk se zřetelně ztloustlou buněčnou stěnou; ty zase vytvářejí tmavší

vrstvu (VOTRUBOVÁ 2001). Toto střídání světlých a tmavých kruhů na příčném průřezu kmenem vytváří charakteristickou strukturu letokruhů, kdy vždy jedna dvojice sousedních vrstev jarního dřeva a na ni navazujícího letního dřeva (s různě ostrým přechodem) odpovídá jednomu roku (resp. vegetačnímu období). V letech „neobvyklého“ průběhu počasí nebo i v důsledku jiných vlivů ale může docházet k narušení tohoto systému tzv. nepravými (též dvojitými) letokruhy a chybějícími letokruhy (DRÁPELKA, ZACH 2000). První případ nastává, pokud se během jednoho roku vytvoří dva letokruhy, z nichž obvykle ten druhý je velmi úzký. To bývá zapříčiněno zlepšením růstových podmínek v závěru vegetačního období, např. vykácením okolních stromů nebo nástupem babího léta. S chybějícími letokruhy se setkáme nejčastěji u stromů rostoucích na chudých substrátech při velmi nepříznivých klimatických podmínkách přetrvávajících téměř po celou vegetační sezónu. Letokruh vytvořený v daném roce je následkem toho velmi úzký a na příčném průřezu téměř nezřetelný (DRÁPELKA, ZACH 2000).

Intenzita činnosti kambia (vyjádřená šířkou letokruhu) je dána souhrnem genetických a vnějších vlivů (SCHWEINGRUBER 1996). Pod pojmem genetické vlivy se rozumí faktory dané druhem stromu a jeho stářím. Rozdílné dřeviny rostou odlišnou rychlostí, dožívají se jiného stáří a mají různou citlivost na vnější podněty (STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2009), která obvykle ještě navíc klesá s věkem (SCHWEINGRUBER 1996). I samotná šířka letokruhu je silně geneticky závislá – obvykle totiž s rostoucím stářím mírně klesá, což lze považovat za důsledek rostoucího povrchu kmene, na kterém se dřevo tvoří. Z anatomického hlediska totiž musí při růstu dřeviny docházet k dvojímu typu dělení buněk kambia: nové buňky mohou vznikat rovnoběžně s osou meristému (periklinální dělení), což vede k tloušťnutí dřeviny, nebo vznikají kolmo k horizontální osní rovině buněk kambia (antiklinální dělení), které v důsledku rostoucího obvodu dělivého pletiva zajišťuje zachování jeho kontinuity a které k tloušťnutí nevede (VOTRUBOVÁ 2001; viz Obrázek 1). S rostoucím věkem a povrchem dřeviny musí zcela logicky docházet k zvyšování intenzity antiklinálního dělení buněk kambia a stagnaci až poklesu periklinálního dělení. Konkrétně hodnota ročního přírůstu je v spodní části kmene maximální okolo 30 roku růstu dřeviny a potom klesá, se stoupající výškou po kmene však dochází k posunu doby kulminace k nižšímu věku (SCHWEINGRUBER 1996).

Vnější vlivy, které ovlivňují tvorbu buněk xylému a floému, představují všechny impulzy působící na růst daného stromu, ale nemající s ním přímou příčinnou souvislost. Obvykle se podle svého původce rozdělují na biotické a abiotické (SCHWEINGRUBER 1996). Biotické faktory v sobě zahrnují nejenom činnost parazitů a herbivorů, ale i ovlivnění sousedními dřevinami (např. zastínění, kompetice o vodu a živiny). Velmi důležitý vliv na

růst stromů mají také abiotické faktory (např. světlo, vlaha, živiny, teplo, větrné proudění), jejichž význam je zcela zásadní pro celou škálu dendroekologických aplikací (SCHWEINGRUBER 1996).

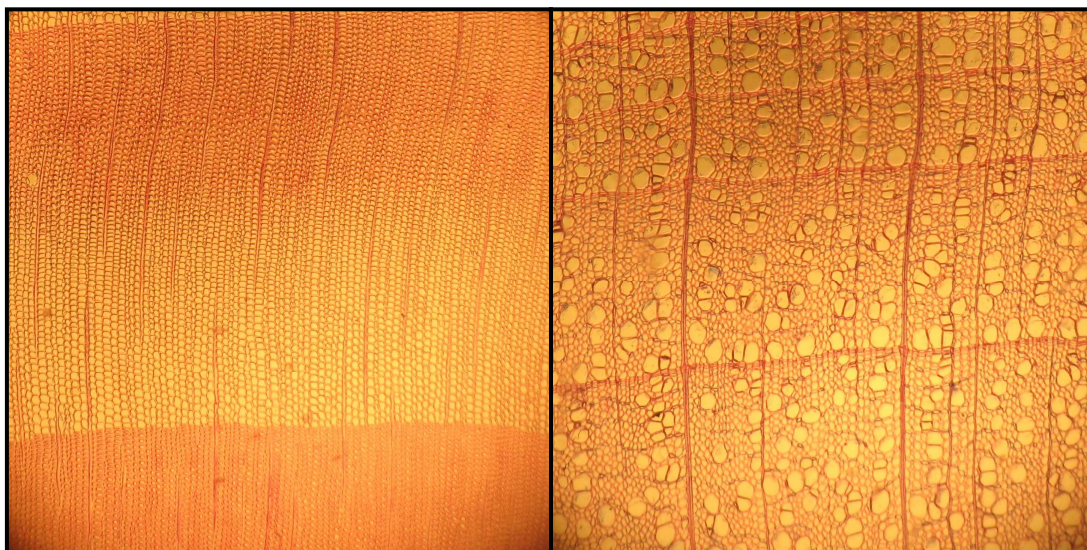


**Obrázek 1. Schéma vzniku buněčné stěny při periklinálním (nahore) a antiklinálním dělení kambia**  
Zdroj: Votrubová 2001

Podle Votrubové (2001) je z hlediska anatomické stavby možné xylém prohlásit za vodivé složené pletivo tzn. je tvořeno z většího počtu různých typů buněk. Konkrétně se jedná o cévní elementy, buňky parenchymu a sklerenchymu. Sklerenchymatické buňky mají hlavně mechanickou a ochrannou funkci, parenchym zase slouží k přivádění a odebírání vody do/z transportních drah a cévní elementy zajišťují samotnou vodivou funkci (v případě dřeva se jedná o vzestupný proud vody a v ní rozpuštěných minerálů od kořenů směrem nahoru, který je poháněn hlavně transpiračním proudem).

Do kategorie cévních elementů patří dva typy buněk – cévice (tracheidy) a články cév, které se dále spojují a vytvářejí tak cévy (tracheje). V obou případech se jedná o buňky s odumřelým protoplastem (VOTRUBOVÁ 2001). S tracheidami se setkáme u všech typů dřevin, tracheje se vyskytují pouze u krytosemenných (viz Obrázek 2). Způsob uspořádání trachejí na příčném průřezu kmenem listnatého stromu označujeme jako pórovitost a podle ní se rozlišují dřeva s kruhovitou, polokruhovitou a roztroušenou pórovitostí (VAVRČÍK 2002). Pro kruhovitě pórovité listnáče (*Quercus* sp., *Ulmus* sp., *Robinia pseudoacacia*) jsou typické zřetelné přechody mezi letokruhy i jarním a letním dřevem, v jarním dřevu se vyskytují široké tracheje, v letním dřevu jejich počet a velikost klesá. Naopak kresba letokruhů je velmi nezřetelná v případě roztroušeně pórovitých listnáčů (*Fagus* sp., *Carpinus betulus*), póry jsou malé a jsou nepravidelně rozmístěné po celé ploše letokruhu. Polokruhovitá pórovitost

(*Juglans* sp., *Prunus avium*) má některé znaky z obou předchozích skupin, poměrně malé póry se obvykle vyskytují ve vrstvě jarního dřeva (VAVRČÍK 2002).



Obrázek 2. Anatomická stavba dřeva jehličnanu (vlevo) a roztroušeně pórovitého listnáče, *Picea abies* a *Tilia platyphyllos* (přibližné zvětšení 50x)

Buňky parenchymu bývají na příčném průřezu kmenem nahloučeny do souvislých pásků kolmých na letokruhy, které označujeme jako dřevné paprsky. Jejich šířka se mezidruhově liší, rozdílná může být dokonce i mezi různými částmi jednoho stromu (např. kořen a nadzemní orgány). U některých dřev je charakteristické, že na přechodu letokruhů se šířka dřevného paprsku mění (obvykle roste), což může být využito jako jeden z determinačních znaků dřevin podle jejich mikrostruktury (VAVRČÍK 2002). Kromě již výše zmiňované pomocné vodivé funkce mohou mít i úlohu zásobní (VAVRČÍK 2002).

Na příčném průřezu některými dřevy (např. *Larix decidua*, *Pinus sylvestris*) je patrná náhlá změna zbarvení, kdy vnitřní část kotouče je znatelně tmavší a vnější část naopak světlejší (viz Obrázek 3). Tyto odlišné segmenty jsou potom označovány jako jádro (též duramen) a běl (VAVRČÍK 2002). Xylém tvořící jádro obvykle obsahuje neprůchodné tracheidy (případně i tracheje) a odumřelý parenchym v dřevných paprscích. Snížení průchodnosti cévních elementů má hlavně funkci ochrany před houbovými chorobami a infekcemi a je důsledkem vytváření thyl (*Robinia pseudoacacia*), deformací dvůrkatých ztenčenin buněčných stěn nebo ukládání tříslovin (VOTRUBOVÁ 2001). Intenzita vedení vody je v této části dřeva malá a funkce jádra je tedy spíše mechanická. Naopak běl je tvořena živým parenchymem a dostatečně průchodnými buňkami vodivých elementů (VOTRUBOVÁ 2001). Vývoj deuteroxylému je tedy takový, že po vzniku z kambia nejprve určitou dobu plní svoji vodivou funkci (běl) a poté je ucpán (jádro). Je tedy patrné, že počet letokruhů tvořících

jádro roste s rostoucím stářím stromu, zatímco počet letokruhů bělu zůstává po celý život dřeviny poměrně konstantní (VOTRUBOVÁ 2001). To představuje možnost, jak alespoň částečně odhadnout stáří stromu i v případě, že z určitého důvodu (např. jedná-li se o mrtvé dřevo v určitém stupni rozkladu) nemáme k dispozici všechny nejmladší letokruhy. Existuje ale i celá řada dřevin, které nemají na příčném řezu jádro a běl odlišené (např. *Picea abies*, *Abies alba*, *Alnus glutinosa*) (VAVRČÍK 2002).



Obrázek 3. Dřevo s vylišenou jádrovou a bělovou částí, *Robinia pseudoacacia*

### 3. Vlivy disturbancí spojených se svahovými pohyby na růst stromů

Základním předpokladem pro využití dendrogeomorfologických metod je, že energie svahových pohybů způsobuje změnu lokálních ekologických podmínek v zasažené oblasti, na které dřeviny reagují změnou parametrů jejich růstu (GÄRTNER 2007a). Tato zásadní myšlenka vychází ze Shroderova (1978) principu proces-událost-reakce (v originále Process-Event-Response). Procesem se v tomto případě rozumí geomorfologický činitel (např. gravitační pohyb, zemětřesení, povodňová vlna, eroze), který ve svém důsledku představuje klíčové ovlivnění přirozeného růstu a vývoje vegetace (např. naklonění, mechanické poškození kambia, změna kompetičního tlaku). Dřevina na nově vzniklé podmínky reaguje přízpusobením, které má za následek náhlé změny v míře přírůstu a ve strukturách nově vznikajícího dřeva, které vzhledem k tomu, že mezi procesem, událostí a reakcí je podle Shrodera (1978) jasná příčinná souvislost, je možné využít k rekonstrukci daného geomorfologického procesu. Jednotlivé reakce dřevin jsou tedy dobrým ukazatelem roků či období s výskytem vnější disturbance, a proto jim bude věnována pozornost v celé následující kapitole.

#### 3.1. Nesouměrný tvar letokruhů

Pro stromy rostoucí na svazích s častým výskytem svahových pohybů jsou typické bizarní tvary kmenů. V oblastech pomalého a soustavného sesouvání zeminy (ploužení) jsou obvykle ohnuté v části při patě stromu; tam, kde dochází k jednorázovým rychlým pohybům je variabilita jejich tvarů vyšší – často u nich dochází k vychýlení z vertikální pozice na různé strany (SCHWEINGRUBER 1996). Nejčastěji jsou skloněné směrem do údolí a v důsledku dalšího růstu u nich vzniká kmen ve tvaru písmene S, což se na příčných řezech projeví vznikem letokruhů eliptického tvaru (viz Obrázek 4). Schopnost tvarových změn kmene a letokruhů obvykle klesá s věkem, tzn. nejčastěji se setkáváme se zvláštními tvary u mladších stromů, respektive u stromů, které byly vystaveny tvarovým deformacím v nízkém věku (CASTELLER ET AL. 2007). I když deformace kmene může vyvolat i velké množství negeomorfologických vlivů, pro jejich odlišení při dendrochronologické analýze svahových pohybů však obvykle stačí základní zhodnocení lokálních podmínek (BRAAM ET AL. 1987).

Tvar letokruhů může být kvantifikován (a následně využit pro datování disturbance) prostřednictvím výpočtu tzv. indexu excentricity, který má ve své nejjednodušší podobě podle Schweingruber (1996: 192) tvar:

$$I_{ex} = \frac{R_D}{R_U} \quad (1)$$

kde  $R_D$  představuje šířku letokruhu měřenou ve směru inklinace kmene a  $R_U$  šířku letokruhu měřenou proti směru inklinace. Tento index ukazuje, jak moc se tvar letokruhu v daném roce blíží kruhu ( $I_{ex}=1$ ). Určení jeho hodnoty pro konkrétní rok ale nemusí být provedeno pouze podle výše uvedené rovnice, ale existuje i celá řada jiných vztahů pro jeho výpočet, například:

$$I'_{ex} = \frac{R_D - R_P}{R_D + R_P} \quad (2)$$

kde  $R_P$  značí šířku letokruhu naměřenou v pravém úhlu ke směru inklinace kmene (BRAAM ET AL. 1987). V tomto případě ovšem vyjde hodnota excentricity dokonalého kruhu  $I'_{ex}=0$ . Hlavní výhodou vzorce č. 2 oproti výše uvedenému je, že vylučuje možnost chyby způsobené nepřesným měřením šířek letokruhů na horní straně kmene, které jsou často velmi nahloučené a obtížně čitelné (BRAAM ET AL. 1987). Při datování pomocí listnatých druhů je navíc možné ho kosmeticky upravit a zohlednit tak fakt, že listnáče tvoří reakční dřevo na opačné straně než jehličnany (BURDA 2010). Jiný vzorec pro určení excentricity daného letokruhu navrhnul již Alestalo (1971 cit. in. BRAAM ET AL. 1987) a má podobu:

$$I''_{ex} = \frac{R_D}{R_D + R_U} \quad (3)$$

kdy pro letokruh mající tvar kruhu platí  $I''_{ex}=1/2$ .

Za účelem přesného vymezení roku, ve kterém došlo k vychýlení stromu z vertikální pozice a následnému zvýšení indexu excentricity, používá Casteller et al. (2007) vzorec odvozený z rovnice 1 (podobně by bylo ovšem možné operovat i s hodnotami  $I'_{ex}$  a  $I''_{ex}$  určenými pomocí rovnic 2 nebo 3):

$$\Delta I_{ex} = 100 \cdot \frac{I_{ex}(\text{rok 2}) - I_{ex}(\text{rok 1})}{I_{ex}(\text{rok 1})}, \quad \text{pro } (\text{rok 1}) < (\text{rok 2}) \quad (4)$$

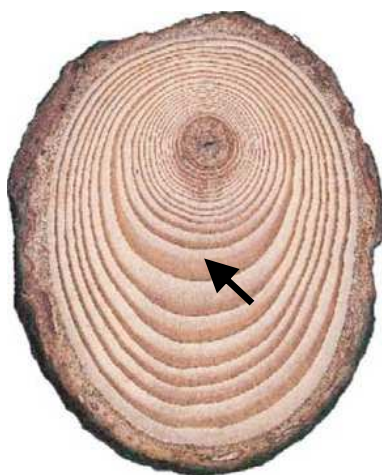
Vztah 4 tedy udává, o kolik procent se změnil index excentricity mezi dvěma sledovanými roky (stejně tak je možné místo jednotlivých roků uvažovat i delší víceletá období). Po vynesení hodnot  $\Delta I_{ex}$  do grafu je následně možné identifikovat roky, ve kterých došlo k náhlé změně excentricity. Například při výzkumu zaměřeném na dvě oblasti četného výskytu lavin ve švýcarských Alpách (CASTELLER ET. AL. 2007) dosahovaly hodnoty  $\Delta I_{ex}$  pro čtyřleté periody před (1995 až 1998) a po (1999 až 2002) pádu laviny v roce 1999 poměrně vysokých hodnot; konkrétně přímo v lavinové dráze se v průměru rovnaly 90 % a na jejím okraji až 336 %, což je výrazně více než v sousedních oblastech, které lavinou zasaženy nebyly (35,5 %).

Jiný způsob určení období s výraznou změnou excentricity z již vypočtených výstředností jednotlivých letokruhů představuje metoda tzv. „rozdělené pohyblivé masky“ (Split Moving Window). Tato maska má dvě stejně dlouhá okna, mezi kterými je mezera o



lichém počtu roků. Princip je takový, že v každém z obou oken se vypočte průměrná excentricita a následně se tyto dva průměry odečtou. Poté se získaná hodnota otestuje Studentovým t-testem proti nulové hypotéze, že mezi průměry oken není rozdíl (tzn. jejich rozdíl je roven 0). Pokud je na předem stanovené hladině  $\alpha$  tato hypotéza zamítnuta, znamená to, že v roce uprostřed mezery mezi okny došlo ke zvýšení excentricity (BRAAM ET AL. 1987). Šířka této prodlevy mezi okny je obvykle volena 1 rok, delší období je výhodné hlavně v případě, že analyzovaný vzorek vykazuje spíše postupný vývoj excentricity než její prudké změny (BRAAM ET AL. 1987). Rozdílné intenzity změny excentricity mohou být klasifikovány například na základě dosažené t-hodnoty.

Podobně užitečným dendrochronologickým ukazatelem pro studium svahových procesů jako excentricita letokruhů kmene může být i tvar letokruhů kořenů, ačkoliv jejich výzkumu bylo dosud věnováno málo pozornosti a názory na jejich přínos pro dendrochronologii se v minulosti i dnes značně liší (SCHWEINGRUBER 1996). Vzhledem k tomu, že kořeny jsou situovány v zemi, působí na ně zvláště při pomalých ale souvislých gravitačních pochodech na svahu (ploužení) stejné síly jako na svahovinu. Z tvaru kořenů lze potom určit, jaký měla daná síla charakter a také v jakém období působila (MATTHECK, BRELOER 1995 cit. in SCHWEINGRUBER 1996). Působení samotného tahu na kořen se na jeho letokruzích tvarově neprojeví; bude-li však kromě tahu působit i ohyb, pak dojde k vytvoření jejich excentrické eliptické struktury. Pouhé ohýbání má za následek, že se tvar kořene podobá osmičce.



Obrázek 4. Změna tvaru letokruhů z kruhových na eliptické  
zdroj: Gärtner 2007a

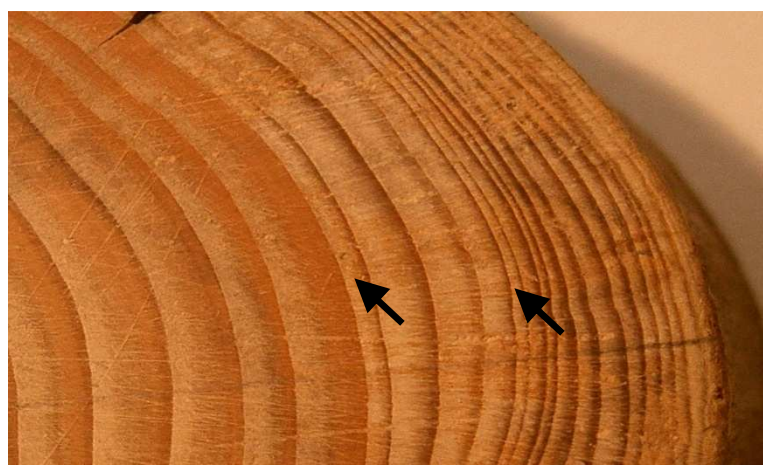
### 3.2. Prudké růstové změny

Nejčastěji sledovaným dendrochronologickým parametrem je míra ročního přírůstu dřeva vyjádřená jako šířka daného letokruhu. Vychází se přitom z předpokladu, že míra tohoto



přírůstu je kromě genetických vlivů ovlivněna i vnějšími (abiotickými i biotickými) faktory (SCHWEINGRUBER 1996). Jako příklady vnějších abiotických vlivů lze uvést změnu množství dopadajícího světla, mechanické poškození koruny, kmene nebo kořenů, působení větrného proudění, změny teplot a srážek a minerální složení půdy (SCHWEINGRUBER 1996). První dva jmenované mají často úzkou spojitost s gravitačními pochody.

Při rychlých pohybech hmoty po svahu dochází často k uvolnění velkého množství kinetické energie, která může mít velmi značnou ničivou sílu – například prachové laviny se mohou do údolí řídit až rychlostí 360 km/h (KUKAL, POŠMOURNÝ 2005). Takto prudký náraz obvykle zcela zničí starší stromy, které mají již nepružné kmeney, zatímco mladší stromky s výrazně flexibilními kmeny jsou schopny se ohnout a lavinovou událost přežijí s menším poškozením. V průběhu následujícího vegetačního období se k jejich asimilačním orgánům dostává díky odstranění nebo silnému poškození starších a vyšších stromů výrazně více světla (stejně tak získává daná dřevina i více živin a vody), což má za následek zvýšení míry jejich přírůstu (CASTELLER ET AL. 2007; ŠILHÁN, PÁNEK 2008; STOFFEL ET AL. 2005a, 2005b). Zrychlení přírůstu může být za určitých okolností způsobeno i akumulací přiměřeného množství živinami bohatého sedimentu v okolí paty stromu (GÄRTNER 2007a) nebo zvýšením obsahu vody v nanesených vrstvách (FANTUCCI, SORRISO-VALVO 1999).



Obrázek 5. Dva náhlé poklesy šířek letokruhů – možné důsledky disturbance, *Picea abies*

Ne všechny starší stromy jsou ovšem v důsledku svahového pohybu oslabeny tak silně, že umírají. Ty, které přežijí, jsou obvykle velmi výrazně poškozeny (např. ulomená část koruny, přetrhané a vyvrácené kořeny, lokálně poškozené kambium), takže dochází v dalších letech k drastickému zúžení šířky jejich letokruhů (SCHWEINGRUBER 1996, ŠILHÁN, PÁNEK 2008; viz Obrázek 5). Zpomalení růstu stromů na období několika let (než se strom adaptuje na nové podmínky) také může být vyvoláno uložením velkého množství materiálu v oblasti

paty kmene (GÄRTNER 2007a, STRUNK 1997). Tento jev má podle Strunka (1997) dvě hlavní příčiny: jedná se o omezení činnosti kořenů a mechanické důsledky zatížení akumulovanou hmotou. Vnější tlak na kambium omezuje a zpomaluje jeho činnost, tudíž za rok vzniká menší počet buněk a užší letokruh. Zhoršení podmínek pro činnost kořenů má zase za následek redukci příjmu živin a vody rostlinou. I pouhé naklonění kmene stromu má obvykle za následek alespoň mírný pokles šířky letokruhu měřené ve směru kolmém na směr uklonění (BURDA 2010), protože nakloněná dřevina musí vydávat relativně velké množství energie na tvorbu buněk reakčního dřeva a lignifikaci jejich buněčných stěn.

Jak již bylo výše zmíněno, prudké růstové změny jsou nejčastěji využívaným dendrochronologickým indikátorem. Ačkoliv většina odborných studií jich využívá pro datování, neexistuje dosud jednotná definice tohoto pojmu, a proto se v jednotlivých případech setkáváme s rozdílnými metodami jeho určení. Například Sorg et al. (2010) vymezují prudkou růstovou změnu, pokud je roční přírůst menší než 50 % nebo větší než 200 % přírůstu předcházejícího období a zároveň tyto hodnoty přetrvávají minimálně po následující 4 roky. Někdy bývají kritéria volena mírnější (zvláště pokud se jedná o studium projevů spíše menších svahových pohybů s lokálními dopady) – např. prudká růstová změna je pokud je průměrný přírůst během alespoň tří po sobě jdoucích let vyšší než 150 % nebo nižší než 60 % průměrného přírůstu v předchozích čtyřech letech (VAN DEN EECKHAUT ET AL. 2009). Tloušťka letokruhu ale nemusí být porovnávána jen s průměrnými tloušťkami letokruhů v letech předcházejících, ale lze ji vztáhnout i k letům okolním, například ke klouzavému průměru z okolních pěti let (NEUWIRTH ET AL. 2004<sup>1</sup>; CASTELLER ET AL. 2011). Existují také metodické přístupy, které zohledňují rozdílnou intenzitu prudké růstové změny. Při nich se na jednotlivých vzorcích vypočítá pro každý letokruh procentuální podíl k okolním/předcházejícím letokruhům a následně se tyto vypočtené hodnoty kategorizují podle předem určených hranic intervalů. Fantucci, Sorriso-Valvo (1999) doporučují tuto kategorizaci provést na čtyři intervaly pro zrychlení růstu a čtyři pro růstové redukce.

Vyhodnocení prudkých růstových změn má za cíl poukázat na hlavní změny v rychlosti růstu na celém území zasaženém určitým typem svahového pohybu. Proto nemůže být určení pouhé procentuální růstové odchylky jednoho stromu (pokud trvá méně, než je nutné pro vymezení prudké růstové změny, používáme označení pointer year), považováno za dostatečně věrohodný indikátor disturbance. Tím je až vymezení let nebo období, ve

---

<sup>1</sup> V tomto případě se ovšem jedná o studii dendroklimatologickou. Použití klouzavého průměru okolních tloušťkových přírůstů je v takových typech analýz výhodnější, protože lépe vystihuje dlouhodobější trendy ve vývoji klimatu (DRÁPELKA, ZACH 2000).

kterých je prudká růstová změna zaznamenatelná na celé svahovým procesem zasažené ploše (pokud nedosahuje délky prudké růstové změny, označujeme jako event year) (NEUWIRTH ET AL. 2004). Jednoduchou metodu přechodu od pointer years k event years používají ve své studii například Fantucci, Sorriso-Valvo (1999). Z počtů vzorků zařazených do jednotlivých intervalů podle velikosti odchylky v růstu od předcházejících letokruhů je možné pro každý rok vypočítat index růstových změn:

$$I_{rz} = 100 \cdot \frac{\sum_{x=1}^4 (N_{rz}(x)t \cdot X)}{N_t} \quad (5)$$

kde  $N_{rz}(x)t$  představuje celkový počet vzorků, který v roce  $t$  vykazuje růstovou reakci intenzity  $x$ ,  $X$  je koeficient odpovídající dané kategorii intenzity růstové reakce (nabývá hodnot celých čísel od jedné do čtyř) a  $N_t$  je celkový počet analyzovaných vzorků v roce  $t$  (FANTUCCI, SORRISO-VALVO 1999). Do vzorce č. 5 je také možné zahrnout buď pouze zrychlení, nebo zpomalení růstu, pokud má jedna z těchto podob přírůstových reakcí v souboru výraznou převahu. Hlavní výhodou indexu růstových změn je, že zohledňuje všechny zaznamenané růstové anomálie, ovšem každou s jinou vahou (FANTUCCI, SORRISO-VALVO 1999). Podobný přístup volí ve své studii například i Neuwirth et al. (2004).

V prvním odstavci této podkapitoly byla zmíněna celá řada vnějších vlivů, které potenciálně mohou být příčinou prudké růstové změny, z nichž některé (např. změny meteorologických prvků, herbivoři) nemají žádnou souvislost se svahovými pohyby. Důsledkem toho je, že v naprosté většině případů není možné automaticky každou růstovou změnu, která je v sérii zaznamenána, považovat za důsledek gravitačního eventu. Jejich odfiltrování se nejčastěji provádí pomocí porovnání letokruhových chronologií analyzovaných stromů s tzv. referenční (případně standardní) chronologií. Ta by měla být podle Burdy (2010) vytvořena ze stromů rostoucích v blízkosti disturbovaných dřevin (aby rostly ve stejných klimatických i edafických podmínkách), co možná nejstarších (aby standardní chronologie byla co nejdelší) a hlavně z takových stromů, které nevykazují žádné známky ovlivnění svahovým pohybem. Prudké růstové změny referenční chronologie jsou potom prokazatelně důsledkem jiných než geomorfologických vlivů a mohou být využity pro rozlišení původu prudkých růstových změn u vyhodnocovaných vzorků (SCHWEINGRUBER 1996). Další podstatný přínos referenční chronologie spočívá v tom, že jejím prostřednictvím je možné odhalit falešné a chybějící letokruhy letokruhových křivek disturbovaných stromů a tím pádem se vyvarovat závažných chyb (BOLLSCHWEILER ET AL. 2011).

Jiný zajímavý způsob vymezení prudkých růstových změn nabízí Malik, Owczarek (2009) ve formě tzv. koeficientu redukce přírůstu (Tree Growth Reduction Intensity

Coefficient; TGRIC). Jeho hodnota odpovídá podílu průměrné šířky tří po sobě jdoucích letokruhů daného disturbovaného stromu a průměrné šířky příslušné trojice letokruhů standardu. Čím více se výsledek liší od 1, tím větší je rozdíl mezi charakterem růstu daného stromu a referenční chronologií, což s největší pravděpodobností poukazuje na vnější disturbanci. Za výhodu lze považovat fakt, že již při samotném výpočtu je provedeno porovnání se standardem a tím pádem do značné míry odfiltrován klimatický šum. Na základě vypočtených hodnot koeficientu je následně možné provést i kategorizaci prudkých růstových změn podle jejich intenzity (MALIK, OWCZAREK 2009).

### 3.3. Tvorba reakčního dřeva

V případě, že na strom nebo jeho část působí mechanické vlivy (např. tlak nebo tah), dochází ke změně anatomické struktury dřeva a vytváří se tzv. tahové dřevo (listnáče) nebo tlakové dřevo (jehličnany), společně označované jako dřevo reakční (SCHWEINGRUBER 1996). Hlavní odlišností reakčního dřeva je jeho vyšší hustota, což se projevuje tmavším zbarvením, které je zvláště u jehličnanů velmi dobře rozeznatelné (HEINRICH, GÄRTNER 2008). Jeho výskyt je obvykle důsledkem naklonění kmene, a proto je obvykle velmi dobře patrná souvislost mezi jeho přítomností a změnami excentricity letokruhů (DUNCKER, SPIECKER 2008).

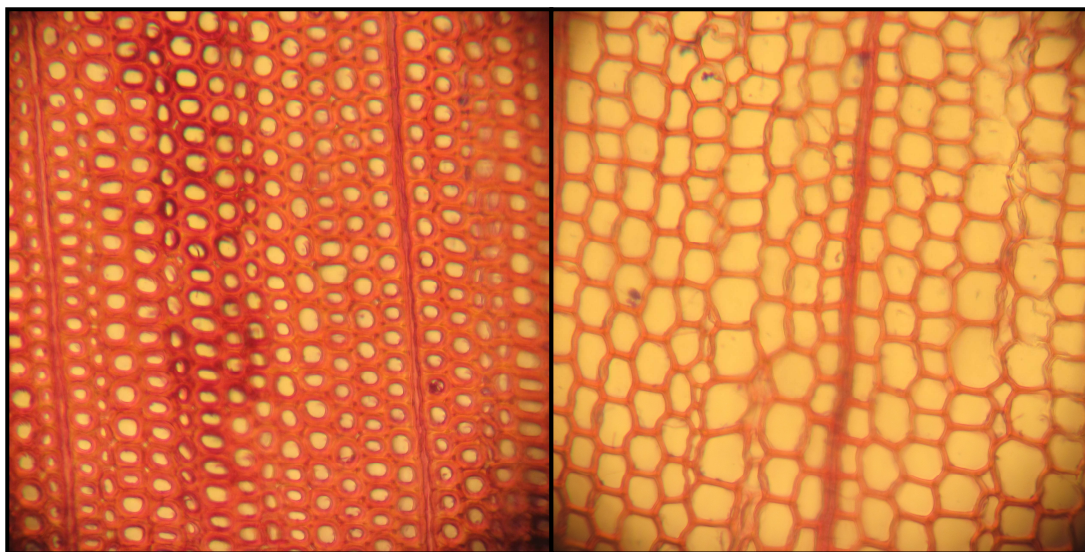
Buňky tlakového (kompresního) dřeva jehličnanů jsou obvykle kruhové se zřetelně silnější buněčnou stěnou (SCHWEINGRUBER 1996; viz Obrázek 6), která má za následek již výše zmiňované tmavé zbarvení. Mezi jednotlivými buňkami jsou při větších zvětšeních různě dobře patrné interceluláry. Typické je také zvýšené množství ligninu<sup>2</sup>, což je impregnační látka buněčné stěny, která způsobuje její zpevnění a umožňuje napřímení rostlinného těla, ale zároveň snižuje její pružnost a propustnost pro apoplastický transport (VOTRUBOVÁ 2001). K ukládání ligninu může docházet ve všech vrstvách buněčné stěny, tedy v primární a sekundární buněčné stěně i centrální lamelle (VOTRUBOVÁ 2001), což je příčina následného tmavého zbarvení. Jak sám název tlakové dřevo napovídá, tato struktura se vytváří v části kmene nebo větve, která je namáhána tlakem, tj. na spodní straně (STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2009).

Na druhou stranu tahové (tenzní) dřevo listnatých stromů vzniká na horní straně jako důsledek zvýšeného růstu právě v této části dřeva (HEINRICH, GÄRTNER 2008, STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2009). V jeho struktuře se objevují želatinová vlákna, typický je také nízký obsah ligninu a vysoký obsah celulózy (HEINRICH, GÄRTNER 2008). Celkově je ovšem optická

---

<sup>2</sup> Votrubová (2001) doporučuje hovořit spíše o ligninech, protože v jejich chemickém složení je velmi výrazná variabilita mezi jednotlivými taxony. Jedná se v první řadě o rozdíly ve vzájemném poměru tří stavebních alkoholů ligninu (kumarylalkohol, synapilalkohol a koniferilalkohol).

makroskopická odlišnost tahového dřeva od normálního často velmi malá, a proto je (pokud je to v dané lokalitě možné) pro dendrochronologické účely častěji využíváno dřevo tlakové.



Obrázek 6. Srovnání detailní anatomické struktury kompresního dřeva (vlevo) a „normálního“ dřeva, *Picea abies* (přibližné zvětšení 200x)

Podle prvního výskytu reakčního dřeva v letokruhové sekvenci je tedy možné určit rok, případně i část vegetační sezóny, ve které byl strom vystaven mechanickým tlakům souvisejícím s geomorfologickými procesy. To představuje velký potenciál jeho využití pro dendrochronologické datování, přičemž je ovšem nutné počítat i s možností časového zpoždění jeho tvorby. Je-li totiž dřevina velmi silně poškozena a zdeformována, obvykle dochází v první řadě k výraznému poklesu šířky letokruhu ve všech směrech (ve vztahu ke směru inklinace) a reakční dřevo potom vzniká jenom na velmi malém, často nepostřehnutelném, prostoru. Výrazná tvorba reakčního dřeva začíná až s odstupem několika let, až když se strom na silné poškození adaptuje jinými mechanismy (CARRARA, O'NEILL 2003). Pokud tedy prvnímu roku výskytu reakčního dřeva předchází několik let s výrazně sníženým přírůstem, je nutné věnovat interpretaci výsledků zvýšenou pozornost.

Intenzita reakčního dřeva může být v omezené míře použita pro rekonstrukci množství uvolněné energie při svahovém pohybu (HEINRICH, GÄRTNER 2008). Výzkum zaměřený na intenzitu tahového dřeva u *Alnus glutinosa* a *Fagus sylvatica* například zjistil, že při ohnutí stromu o 80 ° se tvoří tmavší fialové dřevo než při ohnutí pouze o cca 40 °. Celková intenzita reakčního dřeva není ovšem dána pouze vlivem náklonu kmene, ale i deformacemi koruny – nejvýraznější je jeho tvorba, pokud koruna zůstává rovnoběžná s kmenem. Pokud dojde k jejímu ulomení nebo ohnutí do vertikálního směru, nevzniká reakční dřevo tak intenzivně. Vliv má také poloha mechanického poranění kmene (nad nebo pod ohybem), ale ten je silně odlišný mezi jednotlivými druhy. Mezidruhově rozdílný je také efekt částečného poškození

kořenů – u *Alnus glutinosa* nedochází k prokazatelné změně intenzity tahového dřeva na tahové straně oproti situaci, kdy kořeny poškozeny nebyly; naopak u *Fagus sylvatica* je tvorba tahového dřeva při poškození kořenů méně intenzivní (HEINRICH, GÄRTNER 2008).

Výskyt reakčního dřeva má jako indikátor disturbance jednu zajímavou vlastnost a to ten fakt, že kromě informací o čase a intenzitě z něj lze získat i údaje o směru jejího působení (DUNCKER, SPIECKER 2008), podobně jako je to možné u excentricity letokruhů, případně i u povrchových jizev. Proto doporučují výše zmiňovaní autoři nakládat s daty o výskytu a rozsahu reakčního dřeva jako s vektory v polárních souřadnicích, které kromě velikosti (intenzity) umožňují rozlišit právě i směr. Při následném použití speciálních metod cirkulární a dvourozměrné statistiky lze rekonstruovat předpokládaný směr napětí působícího na dřevinu (DUNCKER, SPIECKER 2008), což může být klíčová informace z pohledu rozlišení procesu, který disturbance vyvolal.

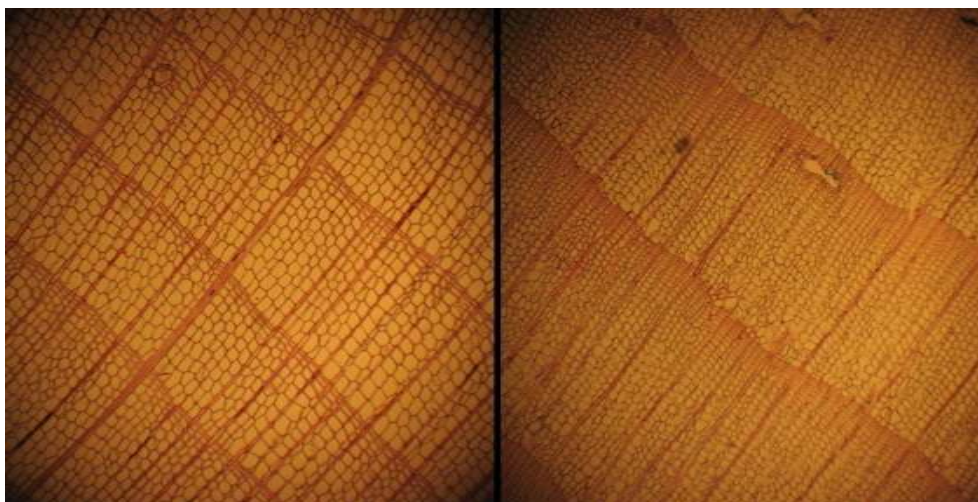
### 3.4. Odhalené kořeny

Odhalené kořeny jsou často využívaným dendrogeomorfologickým indikátorem disturbance, nejčastěji jsou ovšem používány pro dataci eroze břehů v důsledku zvýšeného průtoku při povodních (MALIK 2006; MALIK, MATYJA 2008) nebo pro určování míry plošné srážkové eroze (BODOQUE ET AL. 2005). K exhumaci některých kořenů dřevin může ovšem dojít i v důsledku náhlého svahového pohybu, přičemž nejvíce lze toto očekávat v jeho zdrojové oblasti ale i v transportní zóně. Tyto kořeny jsou potom vystaveny rozdílným abiotickým podmínkám, což má za následek změnu ve struktuře dřeva, která je náhle více podobná struktuře kmene (HITZ ET AL. 2007). Poněkud jinak se projevuje reakce na odkrytí kořenu u jehličnatých a listnatých stromů, přičemž vzhledem k jednoduchosti anatomické stavby je tendence pro dendrochronologické účely využívat spíše kořeny jehličnanů (HITZ ET AL. 2007).

Hlavní odlišnosti letokruhů u kořenů oproti nadzemním částem rostliny jsou obvykle menší mocnost a nevýrazné přechody mezi nimi stejně jako mezi zónami jarního a velmi málo vyvinutého letního dřeva (viz Obrázek 7); časté jsou také značné rozdíly mezi strukturou dřeva kořenů v rámci jedinců stejného druhu (SCHWEINGRUBER 1996). Výzkum (HITZ ET AL. 2007) zaměřený na odkrytí podzemních částí *Fraxinus excelsior* kromě výše zmíněných znaků poukázal i na vzrůst počtu buněk v jednotlivých letokruzích (což lze dát do souvislosti s rostoucí šířkou letokruhu), změnu velikosti buněk (buňky v kořenech jsou plošně větší a mají slabší buněčnou stěnu) a také změnu porosity. Ačkoliv podle kmene můžeme *Fraxinus excelsior* řadit mezi kruhovitě pórovité listnáče, kořeny jsou obvykle polokruhovitě až roztroušeně pórovité. Změna tvaru a struktury jednotlivých buněk po odhalení (rozšíření



buněčné stěny a s tím související pokles plochy lumenu<sup>3</sup>) má za následek proměnu odstínu dřeva na tmavší. V kořenech je také obvykle významnější zastoupení nepravých a chybějících letokruhů než v nadzemních částech dřeviny, což výrazně komplikuje jejich analýzu a někdy dokonce zcela znemožňuje použití křížového datování (BODOQUE ET AL. 2005), a proto se pro co největší zjednodušení datace doporučuje odebírat vzorky z pokud možno živých kořenů (MALIK, MATYJA 2008).



Obrázek 7. Typická anatomická stavba dřeva kořenů (vlevo) a nadzemních částí, *Picea abies* (přibližné zvětšení 50x)

Určitou komplikaci pro rekonstrukci svahových pohybů pomocí odhalených kořenů představuje fakt, že k odkrytí kořene může dojít pouze vlivem jeho postupného růstu bez dalšího odnosu půdy exogenními činiteli. Tento problém lze spíše očekávat u stromů s mělce rostoucími kořeny (*Picea abies*) než u stromů s kořeny více vertikálními (*Pinus sylvestris*). Metodika navržená Gärtnerem (2007b) pro určení množství oderodovaného materiálu je dobře použitelná pro rozlišení těchto dvou případů. Na příčném průřezu kořenem se určí letokruh, u kterého je prokazatelná první náhlá změna struktury vlivem odhalení a změří se jeho průměr. Je-li tento průměr menší než hloubka deprese, ve které je kořen umístěn (předpokládáme, že kořen je stále v kontaktu se zemí), došlo k jeho odhalení vlivem jeho růstu a jako takový nemá s datovaným procesem žádnou spojitost. Za účelem vyvarování se odběru vzorku z části kořene, která se na povrch dostala výhradně v důsledku růstu stromu, doporučují Bodoque et al. (2005) jejich odběr provádět alespoň ve vzdálenosti 1,5 m od paty kmene. Tam je totiž pravděpodobnost, že k odkrytí došlo kvůli růstu kmene, výrazně nižší než v jeho těsném sousedství.

---

<sup>3</sup> Cell lumen area (CAL) – plocha ohraničená vnitřním okrajem buněčné stěny (DRÁPELKA, ZACH 2000)

V souvislosti s gravitačním pohybem také velmi často dochází k mechanickému poškození kořenů, přičemž to je nejčastěji lokalizováno do rozhraní mezi jeho odhalenou a neodhalenou část (MALIK 2006). To je pravděpodobně důsledkem toho, že část kořene, která již není pevně uchycena v půdě, je energií svahového pohybu ohýbána a deformována, zatímco část uvnitř půdy se nehýbe. Tyto jizvy je poté možné využít pro datování s přesností na rok, ovšem pouze za předpokladu, že je mezi jejich vznikem a svahovým procesem nějaká zřejmá souvislost. K jejich vzniku totiž může dojít i později po odhalení vlivem jiných činitelů, a takové jizvy potom mohou být použity pouze pro určení minimálního stáří odhalení (MALIK 2006). Mechanické poškození, kterému je kořen vystavován v době po své exhumaci, se obvykle koncentruje na jeho svrchní stranu (např. sešlapávání, okusování lesní zvěří). To má za následek odumření kambia na takto postižované části, zatímco na spodní části růst pokračuje dál, což ve svém důsledku vede ke vzniku excentrické struktury letokruhů (BODOQUE ET AL. 2005). Toto je potřeba mít na paměti při měření šířek letokruhů, které je nutné provádět na nedeformované části kotouče, nejlépe na spodní straně (MALIK, MATYJA 2008).

Zvláště ve zdrojových oblastech, ve kterých dochází k častému a periodickému vzniku svahových pohybů, může být u jedné dřeviny odkryto několik vrstev kořenů ležících v rozdílných vertikálních výškách. V takovém případě je nutné odebrat vzorky ze všech těchto vrstev, aby bylo možné rozlišit, zda k jejich odhalení došlo v důsledku jednoho velkého eventů nebo postupně. Z každé takovéto kořenové úrovně doporučují Malik, Matyja (2008) odebírat nejstarší (což je obvykle nejsilnější) kořen, protože u toho je možné provést dataci s největším časovým rozsahem. Odlišení kořenů, které byly odkryty během jednoho svahového procesu a těch, jejichž odkrytí souvisí s postupnou erozí (např. srážkovou nebo větrnou), je zase možné dosáhnout odebráním několika vzorků v malé vzdálenosti od sebe (cca. 10 cm) z jednoho kořene. Pokud došlo k jednorázovému gravitačnímu pochodu, měla by u všech (naprosté většiny) být patrná náhlá reakce ve stejném roce; pokud je odhalení důsledkem postupné eroze, reagují na něj různé části kořene postupně, podle toho, kdy došlo k jejich odkrytí (MALIK, MATYJA 2008)

### **3.5. Reakce na pohřbení části kmene, adventivní kořeny**

Po poklesu unášecí schopnosti svahového pohybu dochází k akumulaci neseného materiálu v oblasti úpatí svahu. Často tak dojde k zazemění spodních částí kmenů stromů, což se projevuje jednak prudkými růstovými změnami, ale také změnou ve struktuře dřeva. To je totiž vystaveno odlišným podmínkám, jejichž konkrétní podoba závisí na množství, fyzikální



strukturu a chemickém složení akumulovaného materiálu, periodicitě opakování svahového procesu a případně i na fenologické fázi, ve které k zasypání došlo (KENT ET AL. 2001).

Po pohřební části kmene se jeho struktura mění na strukturu dřeva kořenů (FRIEDMAN ET AL. 2005). Konkrétně se jedná hlavně o pokles šířky letokruhů a menší výraznost jejich přechodů; z hlediska mikrostruktury se tvoří tracheidy s větším průměrem a slabší buněčnou stěnou. Podle Friedmana et al. (2005) roste intenzita takových změn s hloubkou, tudíž je nejvýhodnější odebírat vzorky pro dendrochronologickou analýzu z oblasti původní zasypané paty kmene. Například u druhu *Salix exigua* a rodu *Tamarix* však již v hloubce v rozmezí 1-2 metry pod současným povrchem dochází k tvorbě zcela nerozeznatelných letokruhů, tudíž je pro datování disturbance nutné využít křížové datování (FRIEDMAN ET AL. 2005). Vztah mezi intenzitou proměny struktury dřeva a hloubkou zazemění je však značně závislý na druhu dřeviny a složení akumulovaného materiálu – například *Picea abies* reaguje i na zasypání pouhými 10 cm znatelným zúžením letokruhů a odumírá, pokud je jeho kmen zavalen do výšky 1,6-1,9 metru jemnozrnným materiálem tvořeným hlavně uhličitany (STRUNK 1997). Ačkoliv v současnosti nejsou k dispozici žádné studie ohledně maximální hloubky pohřbení materiálem jiné struktury, kterou je schopna dřevina tolerovat, lze usuzovat, že zasypání balvany z kyselých hornin bude na dřevinu působit méně stresově (STOFFEL, BOLLSCHWEILLER 2008). Pokud dojde k překročení kritické mocnosti nánosů, v jehož důsledku dřevina zahyne, je pro konkrétní dendrochronologické aplikace klíčová také znalost vztahu mezi množstvím naneseného materiálu a dobou, než dojde k definitivnímu odumření. Tato reakce totiž nemusí být okamžitá (YOSHIDA ET AL. 1997), což výrazně komplikuje dosažení roční přesnosti datování.

Hlavním důsledkem pohřbení části kmene je omezení přístupu kyslíku ke kořenovému systému, což vede k vytváření nových kořenů blíže k zemskému povrchu, které se označují jako kořeny adventivní (GÄRTNER 2007a). Nejčastější je jejich přítomnost u stromů s mělce rostoucími kořeny. Pro datování gravitačního procesu se používají přírůstkové kotouče kmene v místě nejstaršího adventivního kořenu v dané vertikální úrovni, na kterých se hledá místo prvního anatomického znaku jeho tvorby. Dříve využívaná datovací metoda předpokládající, že po vytvoření nové vrstvy adventivních kořenů dojde k odumření té původní, nyní hlouběji pohřbené, se ukázala jako nesprávná (STRUNK 1997). Problémem využití adventivních kořenů v dendrochronologii je fakt, že různé druhy dřevin je začínají v závislosti na složení akumulovaného materiálu vytvářet v různé době po zasypání kmene – za určitých okolností se může jednat o okamžitou reakci (*Picea abies*) nebo může docházet ke zpoždění až 5 let (GÄRTNER 2007a). Proto informace získané jejich výzkumem obvykle nelze interpretovat jako

přesnou dataci disturbance, ale pouze jako údaj o jejím minimálním stáří (GÄRTNER 2007a). I tato znalost ovšem může být značně hodnotná, zvláště v oblastech, kde dochází k periodickým obdobím gravitačních pochodů, a kde mohou stromy utvářet několik vrstev adventivních kořenů různého stáří nad sebou. Z jejich vertikální vzdálenosti lze také poměrně přesně určit a porovnat množství akumulovaného materiálu během jednotlivých svahových pohybů (STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2009), ačkoliv podle Strunka (1997) často nedochází k tvorbě pouze jedné vrstvy adventivních kořenů po jednom agradačním eventu, ale vzniká jich více v rozdílných hloubkách.

### 3.6. Tvorba traumatických pryskyřičných kanálků

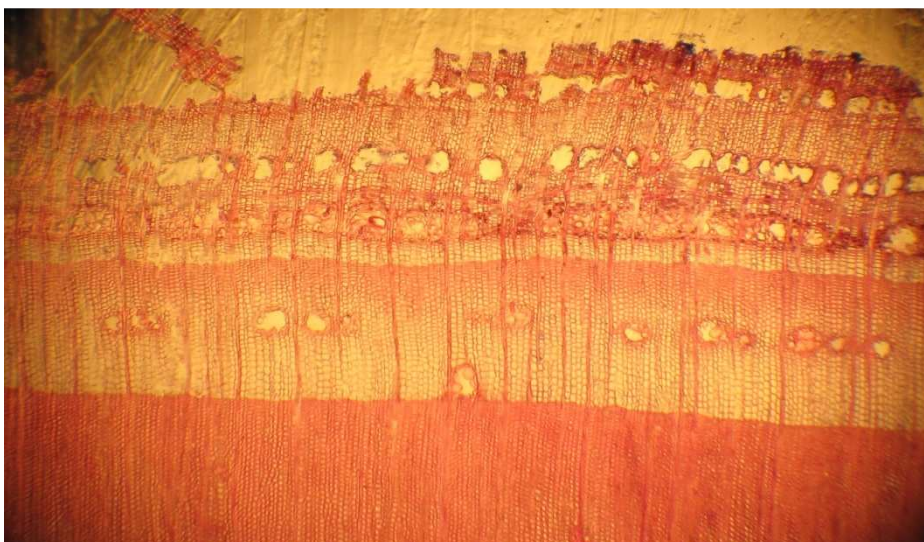
Pryskyřičné kanálky se zcela přirozeně vyskytují rozptýleně ve dřevě většiny jehličnatých stromů, u našich listnáčů se s nimi však neseťkáme (VAVRČÍK 2002). Jejich přítomnost může ale také být důsledkem mechanických impaktů a biotických vlivů způsobujících poranění kmenů a větví stromů (pryskyřice funguje jako obraná reakce dřevin na stres), díky čemuž je možné jejich využití k rekonstrukci gravitačních pochodů a jiných příčin těchto disturbancí (STOFFEL 2008).

Pokud není jejich vznik zcela přirozený, ale je vyvolán některým výše zmiňovaným vnějším vlivem, označujeme pryskyřičné kanálky jako traumatické (velmi často se označují z angličtiny pocházející zkratkou TRD). Obvykle se jedná o poměrně kompaktní a kontinuální tangenciálně orientované vrstvy kanálků začínající v části letokruhu přiléhající k poraněnému místu (STOFFEL 2008), které se s rostoucí vzdáleností od něj stávají méně souvislými a výraznými. Například podle výzkumu provedeného Schneuwly et al. (2009) má průměrné poranění kmenů *Larix decidua* způsobené skalním řícením velikost odpovídající zhruba 85,7 ° po obvodu kmene, přičemž pouze v cca 22 % neporaněné části kmene nejtěsněji přiléhající k ráně se tvoří souvislé vrstvy pryskyřičných kanálků, v dalších přibližně 12 % se kanálky vyskytují více či méně nesouvisle a dále po kmeni se s nimi v kompaktních vrstvách už neseťkáme. Tento relativně velký rozsah jejich výskytu umožňuje odhalení disturbance i v případech, že jiné reakce dřeviny (např. menší zacelené jizvy) nejsou na první pohled patrné (STOFFEL 2008; BOLLSCHWEILER ET AL. 2007). Výše uvedené relativní hodnoty jejich přítomnosti v rámci letokruhu jsou ovšem vztaženy k průměrnému stáří dřeviny 11,3 let a průměru 45 mm ve standardní výčetní výšce<sup>4</sup>; s rostoucím stářím a tloušťkou stromu totiž citlivost dřevin na mechanické impakty klesá a relativní intenzita tvorby traumatických pryskyřičných kanálků se také snižuje (SCHNEUWLY ET AL. 2009). S tím souvisí i to, že

---

<sup>4</sup> 1,3 metru nad patou stromu.

někteří dendrogeomorfologové (STOFFEL 2008, STOFFEL, BOLLSCHWEILLER 2008) doporučují nevyužívat pryskyřičné kanálky pro dataci v období první dekády růstu dané dřeviny, protože takto mladé stromy mají tendenci ke zvýšené tvorbě kanálků i bez vnějších příčin. Konkrétní podoba rozmístění TRD uvnitř letokruhu po poranění je však silně závislá na období poranění a také na druhu stromu, což činí problémy při snaze o datování disturbance s více než roční přesností (GÄRTNER, HEINRICH 2009).



Obrázek 8. Výrazně vyvinuté řady traumatických pryskyřičných kanálků, *Picea abies* (přibližné zvětšení 50x)

Při poranění způsobeném před začátkem vegetačního období (tzn. přelom března a dubna) následuje u *Larix decidua* tvorba pryskyřičných kanálků hned po jejím začátku pouze v těsném okolí rány. S rostoucí vzdáleností po letokruhu od místa poranění nejsou pryskyřičné kanálky tak hojné, přičemž často dochází k jejich přesunu směrem k vnějšímu okraji letokruhu (tzn. do zóny jarního dřeva, případně i do těsného kontaktu k letnímu dřevu). Naopak *Picea abies* je netvoří okamžitě po začátku vegetačního období v žádné části letokruhu, ani pokud byl strom vystaven kromě mechanického poškození i stresu spojenému s ohýbáním. Pryskyřice se objevuje až později v části letokruhu vytvořené v průběhu jara nebo až na začátku léta, což odpovídá tomu, že k jejímu výskytu dochází přibližně 4 týdny po propuknutí vegetačního období. Ve vzdálenějších částech letokruhu není výskyt pryskyřičných kanálků u *Picea abies* tak častý jako v případě *Larix decidua* (GÄRTNER, HEINRICH 2009).

Poněkud odlišná je situace, pokud k poranění dřeviny dojde na konci vegetačního období (přelom září a října). U *Larix decidua* dochází k okamžité reakci pouze u jedinců, kteří byli pouze poraněni, přičemž pryskyřice se u nich vyskytuje i v zóně jarního dřeva. U stromů,

kteře byly ovšem poraněny a zároveň ohnuty, nastávají velké rozdíly v prvním výskytu pryskyřičných kanálků, které se mohou objevit již jako okamžitá reakce po začátku vegetačního období, v zóně jarního dřeva nebo až v oblasti přechodu jarního dřeva do letního. Při poranění *Picea abies* na konci vegetační sezóny dochází k podobné reakci jako při poranění před jejím začátkem – první pryskyřičné kanálky se objevují v jarním dřevu. Pokud zároveň dojde k ohnutí stromu, je podobně jako u *Larix decidua* rozptýl období s jejich prvním výskytem mnohem více rozrůzněno, přičemž k němu může dojít až v zóně letního dřeva (GÄRTNER, HEINRICH 2009).

V případě, že k poranění stromu dojde v průběhu vegetační sezóny, začne tvorba traumatických pryskyřičných kanálků téměř okamžitě, což umožňuje dataci disturbance s měsíční přesností. Výše diskutované zpoždění jejich tvorby v částech letokruhu vzdálených od jizvy představuje ovšem další komplikaci pro dosažení této přesnosti, zvláště pokud jsou analyzována pouze vrtná jádra získaná pomocí Presslerova nebozezu (STOFFEL, BOLLSCHWEILLER 2008).

I přes výše zmiňovaná omezení a problémy spojené se snahami o datování s vyšší než roční přesností jsou traumatické pryskyřičné kanálky za tímto účelem nejčastěji využívaným indikátorem disturbance (STOFFEL ET AL. 2006; SZYMCZAK ET AL. 2010). Obecný princip vychází z úvahy, že vznik vrstvy traumatických pryskyřičných kanálků hned v prvních vrstvách buněk nového letokruhu je následkem disturbance způsobené v předcházejícím období vegetačního klidu. Vyskytují-li se naopak kanálky v druhé polovině jarního dřeva nebo v letním dřevu, ukazuje to na svahový pohyb během vegetačního období (STOFFEL ET AL. 2006; SZYMCZAK ET AL. 2010).

Kromě druhu poraněného jehličnanu, vzdálenosti od místa impaktu a období, kdy k poranění došlo, má na tvorbu kanálků vliv také mechanismus svahového pohybu. Pokud například porovnáme deformace způsobené sněhovými lavinami a skalními říceními (proběhnuvšími v období vegetačního klidu) u druhu *Larix decidua*, dojdeme k zajímavému zjištění. V následujícím letokruhu se kanálky v případě skalního řícení vyskytují hned v rámci první vrstvy buněk, zatímco v případě laviny až po 1-15 vrstvách tracheid jarního dřeva (STOFFEL, HITZ 2008). Přesná příčina této odlišnosti není známá, nabízí se ovšem vliv rozdílné doby trvání a míry koncentrace působící energie při obou typech disturbance, případně vliv lavinou akumulovaného sněhu na teplotní poměry kmene a tvorbu fytohormonů (STOFFEL, HITZ 2008). Další rozdíl představuje tangenciální rozsah výskytu kanálků, který bývá v důsledku laviny nižší než při reakci na říťivé procesy (STOFFEL, HITZ 2008).

Mechanické poškození kmene představuje často tak silnou disturbanci přirozeného vývoje dřeviny, že její následky v anatomické a morfologické stavbě se neprojevují pouze v daném roce, ale přetrvávají i do dalších let. Tak je to i v případě pryskyřičných kanálků, které se často vyskytují i v letokruzích s několikaletým časovým odstupem po poranění. Jejich množství a kompaktnost uspořádání ale postupně klesá, ovšem opět různě rychle podle druhu dřeviny (SCHNEUWLY ET AL. 2009). U *Larix decidua* se s každým rokem snižuje počet vzorků, u kterých se pryskyřičné kanálky vyskytují, přibližně o 1/2, zatímco u *Picea abies* přetrvávají mnohem déle. Například již po prvním roce se nevytvoří pouze přibližně u 7 % vzorků a ještě po 5 letech jsou patrné u více jak 50 % vzorků smrkového dřeva, které je měly vyvinuté v roce disturbance. Autoři výše zmiňované studie nabízejí vysvětlení v rozdílné citlivosti těchto dvou druhů dřevin – *Larix decidua* má silnější kůru, která je schopná náraz částečně utlumit, jedná se také o pionýrský druh přizpůsobený na drsnější podmínky. Určitý problém a nejistotu představuje fakt, že k meziročnímu ubývání výskytu pryskyřičných kanálků dochází u stejného druhu dřeviny rozdílně rychle v závislosti na svahovém procesu, který jejich vznik způsobil. Porovnáním několika odborných studií se totiž ukázalo, že následky laviny a skalního řícení v podobě traumatických pryskyřičných kanálků pomíjejí relativně rychle oproti následkům tekoucích svahových pohybů (SCHNEUWLY ET AL. 2009). Rozdíl mezi lavinami a řícením není tak výslovný, přesto se ale zdá, že pryskyřičné kanálky mizí rychleji, pokud jsou následkem sněhové laviny (STOFFEL, HITZ 2008). Tyto odchylky představují dobrý potenciál pro dendrochronologické rozlišení jednotlivých svahových procesů v oblastech, kde dochází k jejich souběžnému vzniku.

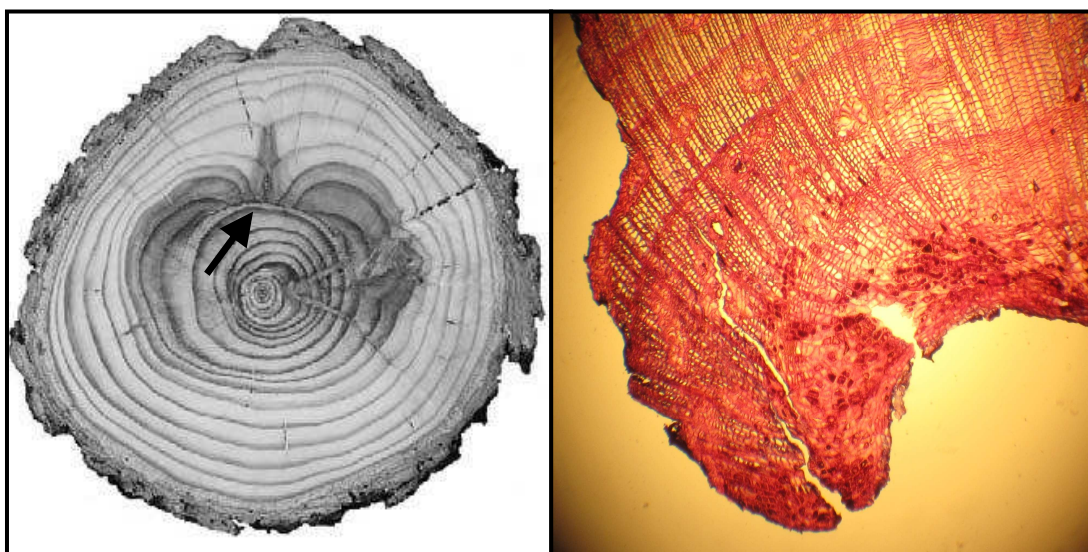
### 3.7. Jizvy na kmenech stromů

Klastické zvětraliny, klády a jiný materiál nesený svahovým pohybem vytváří na kmenech stromů při nárazech oděrky a jiná poranění vedoucí k lokálnímu poškození kambia. Okolní neporaněné kambium na to reaguje tvorbou buněk nepravidelného tvaru (kalus), které slouží k zacelení zasaženého místa (GÄRTNER 2007a, viz Obrázek 9). Plošná velikost kalusu je na transverzálním průřezu ovšem obvykle poměrně malá a těžko patrná, odpovídá v závislosti na druhu a stáří dřeviny přibližně 4 % neporaněného obvodu kmene v prvním roce po poranění (SCHNEUWLY ET AL. 2009). V případě menších poškození často dřevina místo zcela zacelí tímto hojivým pletivem, takže není na povrchu kmene vůbec zřetelné. Rychlost zacelování jizev závisí kromě jiného v první řadě na velikosti rány a rychlosti růstu dřeviny; důležitý je také vliv vlastností sekundární kůry, například její tzv. peeling<sup>5</sup> (STOFFEL, PERRET 2006).

---

<sup>5</sup> Různě časté přirozené odlupování nejsvrchnějších vrstev borky (STOFFEL, PERRET 2006)

Zarostlé rány je možné sledovat pouze na přírůstových kotoučích, protože při metodě odběrů vzorků pomocí Presslerova nebozezu a malém počtu vývrtů z jednoho stromu je jejich lokalizování čistě věcí náhody (BOLLSCHWEILER ET AL. 2007). V případě, že nelze odebrat celý kotouč ani klínovitý výřez místa jizvy, je pro přesnou analýzu nejvýhodnější vyvrtat minimálně dva vývrtů – jeden z kalusu uzavírajícího ránu a druhý z opačné strany než je jizva (STOFFEL, BOLLSCHWEILLER 2008). Na tvarech letokruhů se jizva projevuje zřetelnou deformací, kdy v době jejího zacelování vznikají neuzavřené letokruhy (viz Obrázek 9).



Obrázek 9. Tvar letokruhů v místě jizvy (vlevo) a chaoticky uspořádané buňky hojivého pletiva v okolí rány, *Picea abies* (přibližné zvětšení mikrosnímku 50x)  
zdroj obrázku vlevo: Stoffel et al. 2005

Zarůstání jizev představuje velké riziko chyby při dendrochronologickém datování, zvláště pokud je jeho cílem kromě prostého datování disturbancí i určení periodicity jejich výskytu v různých obdobích. Pokud by se totiž strategie odběru vzorků omezila pouze na jizvy viditelné a rozeznatelné na povrchu dřeviny (tj. jizvy obecně mladší, nebo způsobené nárazy větších klastů), byla by zjištěná perioda výskytu ve starších obdobích silně podhodnocena v důsledku nezohlednění již zarostlých jizev (STOFFEL, PERRET 2006). Proto doporučují výše citovaní autoři provádět odběr vzorků tak, aby jejich rozmístění ve studovaném území bylo spíše náhodné a neomezovalo se na místa sice zřejmých, ale zato pouze recentních, projevů disturbance. To je obzvláště důležité v případě datování skalního řícení, pro jehož dataci jsou jizvy často považovány za nejužitečnější, nejpoužitelnější a v některých studiích (STOFFEL, PERRET 2006; MOYA ET AL. 2010) dokonce jediný sledovaný indikátor.

Růstové jizvy a počátek tvorby kalusu mohou být využity podobně jako například traumatické pryskyřičné kanálky pro datování s vyšší než roční přesností. Toto je možné díky tomu, že poraněný strom začíná s tvorbou hojivého pletiva v podstatě okamžitě po poranění. Vyskytuje-li se tedy místo iniciace jizvy hned na začátku vegetačního období, značí to s největší pravděpodobností disturbance, která proběhla v předcházejícím období vegetačního klidu, je-li naopak uvnitř letokruhu, došlo k eventu někdy ve vegetační sezóně (SZYMCZAK ET AL. 2010). Toho lze velmi dobře využít pro rozšíření informací získaných dendrogeomorfologickým výzkumem svahového pohybu – na základě polohy jizvy v rámci letokruhu (v kombinaci s využitím podobného přístupu při studiu traumatických pryskyřičných kanálků) je možné rozlišit disturbance způsobené zimními sněhovými lavinami a převážně jarními murami (STOFFEL ET AL. 2006) stejně jako rozeznat více bahnotoků vyskytujících se v rámci jediného dendrochronologického roku (SZYMCZAK ET AL. 2010).

### **3.8. Stáří kolonizace**

V případě extrémně silných a ničivých svahových pohybů může docházet k eliminaci veškerého vegetačního pokryvu, tudíž není možné využít žádný z výše zmiňovaných indikátorů disturbance. Za určitých okolností může zůstat v transportní nebo akumulární zóně svahového pohybu mrtvé dřevo, jehož rok úmrtí je možné určit pomocí křížového datování (YOSHIDA ET AL. 1997; REARDON ET AL. 2008). Pokud ani to není možné, je nutné se zaměřit na věk stromů kolonizujících danou oblast – vedl-li totiž geomorfologický činitel skutečně k úplné destrukci lesa, potom stáří této události musí být logicky vyšší než stáří nejstaršího stromu dnes rostoucího na daném území. Počet letokruhů (určený co nejnižší nad povrchem země, případně opravený pomocí věkového faktoru – blíže viz kapitola 4.3.) tohoto nejstaršího stromu potom udává minimální stáří geomorfologického procesu (BOLLSCHWEILER ET AL. 2008), protože sukcesní procesy mohou začít na holém povrchu s různě velkým zpožděním po disturbance. Délka této prodlevy závisí na celé řadě faktorů, např. na klimatických a edafických podmínkách a dostupnosti semen (SORG ET AL. 2010). Takovýto způsob datování je ovšem v současném aplikovaném výzkumu využíván pouze velmi zřídka, ačkoliv někteří autoři (SORG ET AL. 2010) volají po zintenzivnění výzkumu sukcesních procesů v disturbovaných územích, zvláště v lesích s ochrannou funkcí.



#### **4. Typy svahových pohybů a specifika jejich datování**

Existuje celá škála svahových pohybů, které se od sebe liší svou rychlostí, měřítkem i dalšími parametry (KUKAL, POŠMOURNÝ 2005; ZÁRUBA, MENCL 1987), a které mají i odlišné dopady na vegetaci. Z tohoto úhlu pohledu je tedy zřejmé, že jedním z klíčových faktorů dendrogeomorfologického výzkumu je zvolení vhodných struktur dřeva pro datování, protože míra jejich použitelnosti se může značně lišit v závislosti na typu gravitačního pohybu. Každý geomorfologický proces (Process) totiž může být příčinou celé řady rozdílných zásahů do přirozeného vývoje dřeviny (Event), kdy se každá z nich může projevovat zcela jinými reakcemi dřevin (Response), které jsou pak různě vhodné pro dataci primárně působícího procesu (SHRODER 1978). Proto budou na následujících řádcích po velmi stručném zmínění některých všeobecných aspektů dendrochronologického výzkumu gravitačních pochodů a interpretace výsledků blíže popsány charakteristiky a specifika datování jejich rozdílných typů.

Změny ve strukturách dřeva a mechanická poškození částí dřeviny představují dobrou možnost pro dataci svahových pohybů, ovšem obvykle neumožňují rozlišit, jaký konkrétní gravitační pochod je způsobil (STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2008). Identifikace konkrétního geomorfologického procesu, který se v dané oblasti vyskytoval a který ovlivnil růst analyzovaných stromů, by tak měla předcházet samotnému dendrochronologickému výzkumu. Za tímto účelem je vhodné analyzovat topografické a geologické mapy, letecké snímky, ale i informace z médií a svědectví přímých svědků. Stejně tak by mělo dendrochronologickému průzkumu předcházet detailní geomorfologické mapování, které je obzvláště důležité při datování tekoucích svahových pohybů ve velehorských oblastech (STOFFEL ET AL. 2006). Veškeré obdržené informace o území jsou potom důležité pro správnou strategii výběru stromů pro odběr vzorků, protože u nich do jisté míry umožňují rozeznat, zda jejich růstová nebo anatomická anomálie má skutečně příčinnou souvislost s daným procesem (STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2008).

Pro dosažení správných výsledků je ovšem neméně důležité zjištěné výsledky správně časově interpretovat, což vzhledem k sezonalitě činnosti kambia může být poměrně komplikované. Některé disturbance vývoje dřevin, ke kterým dojde v průběhu období vegetačního klidu, se totiž jako růstová reakce projeví až různě dlouho po začátku dalšího vegetačního období. Takový problém je asi nejvíce typický pro sněhové laviny, ale v průběhu zimních měsíců dochází ke vzniku i ostatních typů gravitačních pohybů (např. skalní řícení, viz PERRET ET AL. 2006), a proto je podle Corominas, Moya (1999) vhodné výsledky uvádět



pomocí tzv. dendrochronologických let. Ty mají dvě části – začínají obdobím vegetačního klidu a končí koncem následujícího vegetačního období. Výhodou dendrochronologických let oproti klasickému kalendářnímu roku je, že jakékoliv narušení přirozeného vývoje stromu se projeví ještě ve stejném dendrochronologickém roce – např. disturbance způsobená lavinou v prosinci 1982 se projeví růstovou změnou na jaře 1983, což oboje spadá do dendrochronologického roku 1982-1983 (COROMINAS, MOYA 1999).

#### **4.1. Sněhové laviny**

Lavinu definujeme jako náhlý pohyb sněhu po svahu po dráze alespoň 50 m, ke kterému dochází vlivem poklesu soudržnosti sněhové pokrývky; je-li pohyb kratší, označujeme jej jako lavinový splaz (KUKAL, POŠMOURNÝ 2005). Významnější laviny mohou vznikat na svazích, jejichž sklon se pohybuje přibližně v rozmezí 25 až 60 ° (MCCLUNG, SCHAEERER 1993 cit. in KÖSE ET AL. 2010). V evropských i světových velehorách představují velké riziko pro turisty i pro horská sídla, jejich hrozbu ovšem nelze podcenit ani v České republice.

Základem studia lavin je přesné vymezení oblastí s jejich četným výskytem. Dendrochronologie při tom může využít rozdílné věkové složení lesa v různých částech svahu; vychází se při tom z předpokladu, že lavina je výrazná disturbance vývoje ekosystému, která z něj odstraňuje převážně starší stromy. Průměrné stáří dřevin je potom prokazatelně nižší v oblastech pravidelně postihovaných lavinami než v sektorech, kde k jejich pádům nedochází (CASTELLER ET AL. 2007). Zjištěná hodnota průměrného stáří ovšem obvykle výrazně převyšuje dobu od pádu laviny (celá řada stromů jej přečká), tudíž tento ukazatel není možné použít i pro časové datování vzniku nejmladší lavinové události (CASTELLER ET AL. 2007). Rušivá činnost lavin má také ekologické důsledky projevující se v druhovém složení ekosystému – snižuje výšku horní hranice klimaxového lesa (CORONA ET AL. 2010), čímž poskytuje prostor pro rozvoj cenných bylinných a křovinatých společenstev (REARDON ET AL. 2008). Následná nižší hustota zápoje korun dospělých stromů tím pádem představuje další možnost, jak vymežit hranice lavinové dráhy (MUNDO ET AL. 2007).

Jako důsledek laviny dochází k četným změnám struktury dřeva, které jsou vhodné pro časovou dataci jejího vzniku. Jedná se například o tvorbu reakčního dřeva v důsledku náklonu kmene a s tím související nárůst indexu excentricity. Pro jejich analýzu se doporučuje odebírat vzorek průřezu kmenem, který vykazuje mechanické poškození na straně do svahu, co nejbližší k patě stromu (do výše maximálně 2 m), čímž se sníží riziko, že tyto změny byly vyvolány jiným svahovým pohybem, např. řítivého charakteru (REARDON ET AL. 2008). Specifikou těchto dvou dendrochronologických indikátorů (excentricita a reakční dřevo) je, že

s jejich větší intenzitou se můžeme setkat spíše na okrajích lavinové dráhy než v jejím centru (CASTELLER ET AL. 2007). Tam je totiž ničivá síla laviny natolik velká, že se projevuje spíše celkovou devastací nebo alespoň vyvrácením stromu namísto jeho pouhého naklonění. Dalšími užitečnými a použitelnými indikátory lavin jsou pryskyřičné kanálky (výskyt po několika vrstvách tracheid jarního dřeva (STOFFEL, HITZ 2008)) a jizvy, stejně jako náhlé růstové změny. Může se jednat buď o drastické zúžení letokruhu v důsledku mechanického poškození, velmi časté je ale také zrychlení růstu hlavně mladších stromů vlivem odstranění okolních konkurujících rostlin (CASTELLER ET AL. 2007).

Pro dendrochronologickou rekonstrukci mohou být využity i stromy, které byly lavinou zcela vyvráceny a usmrceny. Za předpokladu, že jejich smrt byla skutečně zapříčiněna pohybující se sněhovou hmotou, je možné její stáří ztotožnit s posledním vytvořeným letokruhem daného stromu. Je ovšem nutné dbát zvýšené opatrnosti při odběru vzorků, protože v lavinové dráze se může nacházet celá řada zbytků dřeva, jejichž zničení s lavinou nesouviselo. Jako dobrý indikátor kmenů, které byly vyvráceny lavinou, se jeví směr jejich uložení, který je obvykle přibližně rovnoběžný s předpokládaným směrem šíření laviny (REARDON ET AL. 2008; CORONA ET AL. 2010).

Při vlastní rekonstrukci časového výskytu lavin doporučují Reardon et al. (2008) zohlednit intenzitu a výraznost jednotlivých dendrochronologických reakcí dřeva na danou událost. Toho lze docílit subjektivním rozřazováním analyzovaných vzorků do různých předem definovaných kategorií (např. podle souvislosti řad pryskyřičných kanálků, intenzity tvorby reakčního dřeva), s tím, že při následném statistickém vyhodnocování může být každé kategorii přiřazena jiná váha. Další zkvalitnění datovacího procesu představuje vypočtení indexu udávajícího podíl stromů, u kterých byla v daném roce zaznamenána reakce na gravitační proces (do tohoto výpočtu mohou být zahrnuty všechny stromy vykazující nějakou reakci; stejně tak může být index určen pouze pro určité kategorie podle intenzity reakce). Tento ukazatel bývá nejčastěji využíván právě při studiu lavin, s jeho aplikací se ale můžeme setkat i při vyhodnocování jiných typů svahových pohybů, např. sesuvů (STEFANINI 2004) nebo tekoucích pohybů (MAYER ET AL. 2010). Tvar vzorce pro jeho výpočet vypadá:

$$I_t = 100 \cdot \frac{\sum R_t}{\sum A_t} \quad (6)$$

kde  $R_t$  je počet stromů, který vykazuje v roce  $t$  reakci a  $A_t$  je celkový počet analyzovaných stromů rostoucích v roce  $t$  v daném území (SHRODER 1978). Za hlavní výhodu takového výpočtu lze považovat fakt, že jednoduše odstraňuje vliv rozdílů v počtu analyzovaných stromů v mladších a starších obdobích (SHRODER 1978), který v podstatě znemožňuje

vytvářet relevantní závěry o proměnách četnosti disturbancí v čase pouze na základě absolutního množství reakcí zaznamenaných ve vzorku pro daný rok.

Za rok, ve kterém došlo k pádu laviny, lze obvykle prohlásit takový, ve kterém platí  $I_t \geq 10\%$  (REARDON ET AL. 2008). Tuto hraniční hodnotu ovšem nelze přijímat dogmaticky, ale je nutné ji určovat pokaždé znovu v závislosti na charakteru lavinou postižené lokality (BUTLER, SAWYER 2008). Hodnota  $I_t$ , při jejímž překročení se v daném roce usuzuje vznik laviny, je u většiny odborných dendrogeomorfologických výzkumů volena mezi 10 až 40 %, přičemž tato hodnota je často ve velmi úzkém vztahu k počtu odebraných vzorků (BUTLER, SAWYER 2008). Obecně platí, že čím více stromů je v dané oblasti analyzováno, tím nižší může být použita hodnota  $I_t$  a naopak. Například při počtu deseti analyzovaných stromů by při použití hranice  $I_t = 10\%$  stačil pouze jeden vzorek vykazující reakci pro zařazení daného roku mezi lavinové, a proto je v tomto případě vhodnější zvolit hraniční hodnotu vyšší. Pokud je naopak datování prováděno v rozsáhlejší oblasti s desítkami až stovkami odebraných vzorků, je použití nižší mezní hodnoty zcela postačující (REARDON ET AL. 2008). Zajímavý výzkum této problematiky vytvořili Butler, Sawyer (2008). Na dvou lavinových svazích v Montaně (USA), u kterých je historie lavin dobře písemně zdokumentována a zaznamenána, provedli dendrochronologickou analýzu. Z obou lokalit bylo odebráno přibližně po deseti vzorcích mrtvého dřeva, které byly následně použity pro určení hodnot  $I_t$  pro období od roku 1945. Následně bylo cílem určit pro tyto dvě oblasti mezní hodnoty  $I_t$  tak, aby roky lavin vymezené dendrochronologicky co nejlépe korelovaly s roky lavin v písemných záznamech. Jako nejlepší hranice se podle tohoto výzkumu jeví spíše 20 %.

Zajímavou alternativní metodu vymezení let, ve kterých laviny ovlivňovaly růst vegetace, používají Casteller et al. (2011). Vychází z úvahy, že každý indikátor disturbance je různě vhodný pro dataci lavin a na základě toho jim poté přiřazují určité množství bodů – např. jizva je hodnocena 10 body, přítomnost reakčního dřeva a excentrické letokruhy jsou oboje za 5 bodů a 3 body udělují za prudkou růstovou změnu. Jako lavinový lze potom považovat takový rok, kdy je průměr udělených bodů na celém sledovaném území vyšší než 10 strom<sup>-1</sup>. Takovýto přístup v sobě skrývá určitě dobrý potenciál pro budoucí aplikace nejenom při studiu lavin, ale i jiných typů svahových pohybů; před tím bude ovšem nutné exaktně otestovat a určit nejvhodnější velikosti vah jednotlivých indikátorů disturbance (výše citovaná studie byla například založena pouze na listnatých druzích, a proto její autoři neřeší problematiku váhy traumatických pryskyřičných kanálků).

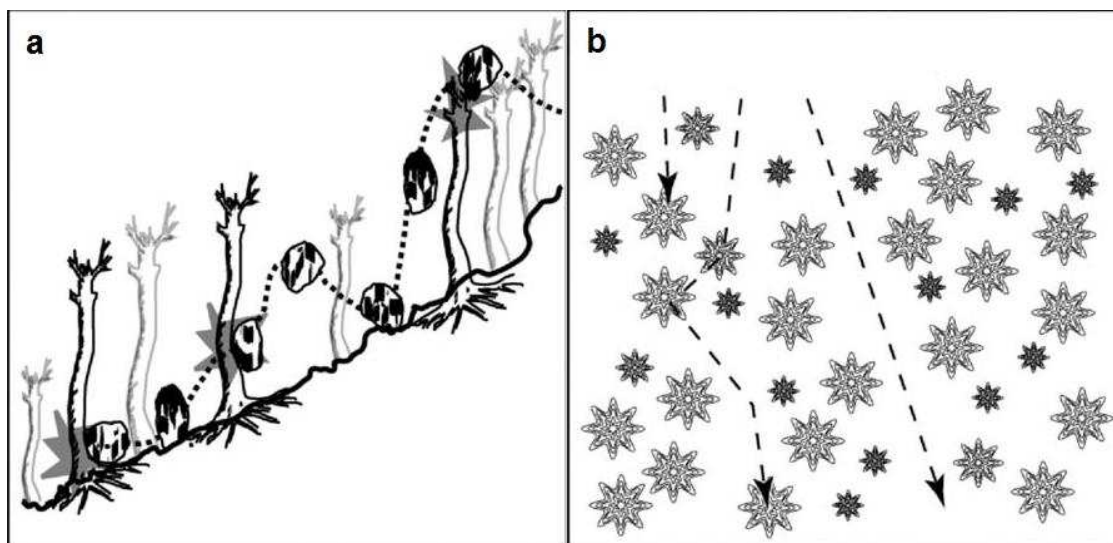
## 4.2. Skalní řízení

Tento gravitační pohyb patří bezpochyby spolu s lavinami mezi ty nejnebezpečnější - riziko spočívá hlavně v jeho rychlosti (jak vzniku, tak následného pohybu). Řízení definujeme jako náhlý pohyb uvolněných bloků nebo vrstevních komplexů ze strmých skalních stěn, při kterém dochází ke ztrátě kontaktu s podložím a převládá tedy volný pád (ZÁRUBA, MENCL 1987). V podmínkách našeho státu se s ním setkáme v různých oblastech (viz např. ZÁRUBA, MENCL 1987), hodně medializovaná je například problematika zaříznutého údolí Labe v severozápadních Čechách (KUKAL, POŠMOURNÝ 2005).

Skalní řízení má velmi silný destrukční charakter, tudíž se v zasažených lesích obvykle setkáváme s převahou tvarově zdeformovaných stromů. Jedná se v první řadě o ulomené koruny a větve, ohnuté nebo nalomené kmeny a povrchové jizvy (spojené s výskytem kalusu); na příčném řezu může danou událost pomoci identifikovat i přítomnost pryskyřičných kanálků, reakčního dřeva nebo náhlých změn v excentricitě a rychlosti růstu (STOFFEL ET AL. 2005b).

Pokud se zaměříme na jizvy a jejich rozmístění po kmeni, je možné konstatovat, že ty se (na rozdíl od ostatních rychlých svahových pohybů) v případě skalního řízení mohou vyskytovat v jakékoliv výšce (viz Obrázek 10a) v závislosti na odrazových vlastnostech podloží a padajícího klastického materiálu (STOFFEL, PERRET 2006), na základě čehož může docházet k mechanickému poškození i vrcholových partií stromu. V případě, že dojde k odlomení (setnutí) koruny, přebírají postraní větve z adventivních pupenů hlavní část růstu a stáčí se pozitivně fototropicky nahoru. Taková forma stromu potom připomíná pouliční lampu, a proto bývá označována jako kandelábrovitá (SCHWEINGRUBER 1996, STOFFEL ET AL. 2005b). Ke vzniku tohoto tvaru může ale také docházet při poškození spodních částí kmene, kdy mechanická energie valících se balvanů způsobí rozkmitání celého stromu (STOFFEL, BOLLSCHWEILLER 2008), což vede k jeho zlomení v rozdílných výškách nad povrchem země (STOFFEL ET AL. 2005b). Tento jev bývá někdy označován podle sinusoidálního šíření kmitů kmenem nahoru (DORREN, BERGER 2005) jako „hula-hoop“ efekt. Zda takovýto kmitavý pohyb způsobí skutečně zlomení kmene nebo bude energie padajícího klastu absorbována závisí na celé řadě parametrů, v první řadě na druhu dřeviny, dále na jejím průměru, upevnění v podloží, výšce impaktu nad zemí a také směru zásahu. Obecně platí, že listnáče mají odolnější dřevo než jehličnany, mezi nejodolnější v Evropě dnes běžně rostoucí dřeviny patří *Robinia pseudoacacia* a *Quercus* sp. (DORREN, BERGER 2005). Pokud valící se materiál kmen nezlomí, ale způsobí jeho ohnutí až k zemi, dojde k následnému růstu větví směrem vzhůru, takže výsledný habitus stromu bude připomínat harpunu (SCHWEINGRUBER 1996). Ať už se

jedná o dekapitaci nebo o harpunovitý tvar, výmladky, kterými strom na tento vnější zásah reaguje, lze využít k určení jeho minimálního stáří (DAŇHELKA 2001).



Obrázek 10. Rozmístění jizev po kmeni u skalního řícení (a) a možné trajektorie padajících klastů v zalesněném území (b)  
zdroj: Stoffel, Perret 2006

Skalní řícení se obtížně datuje a analyzuje dendrochronologicky, protože na rozdíl od ostatních svahových procesů nepostihuje kompaktní oblast, ale spíše se jedná o nárazy jednotlivých padajících klastů do jednotlivých stromů (STOFFEL ET AL. 2005b). Řícení také nevytváří žádné charakteristicky stratifikovatelné vrstvy, takže pokud k němu dochází často a periodicky, lze jen velmi komplikovaně určit, které z kamenných bloků pocházejí z kterého eventu (MOYA ET AL. 2010). Dřeviny v zasažené oblasti jsou jím postihovány v rozdílné míře – obecně lze očekávat, že nejvýrazněji bude deformována ta část lesa, na kterou skalní řícení udeří jako první, zatímco dále nebudou dopady tak silné v důsledku ztráty energie valčího se materiálu při předchozích nárazech do kmenů (MOYA ET AL. 2010). Problém činí i fakt, že každý strom má v reálu jinou pravděpodobnost být zasažen v závislosti na jeho průměru (STOFFEL ET AL. 2005b). Proto je výhodnější pro vyhodnocování frekvence řícení nevyužívat pouze absolutní počty růstových reakcí a anatomických změn, ale spíše jejich četnost ve vztahu k celkové možné zasažené ploše, jak udává vztah:

$$RR_{dt} = \frac{\sum GR_{dt}}{\sum ED_{dt}} = \frac{\sum GR_{dt}}{\sum \left( \frac{DBH}{A} \cdot T_{dt} \right)} \quad (7)$$

kde  $GR_{dt}$  je celkový počet růstových a anatomických reakcí na skalní řícení za dekádu  $t$  a  $ED_{dt}$  je tloušťka stromů v zasažené oblasti na začátku dekády  $t$ , a dále  $DBH$  představuje současný průměr dřeviny na příčném řezu ve standardní výčetní výšce,  $A$  je současný počet letokruhů zaznamenaných ve standardní výčetní výšce a  $T_{dt}$  počet letokruhů vytvořených ve

standardní výčetní výšce na začátku dekády  $t$  (STOFFEL ET AL. 2005b). V případě potřeby přesnějšího časového vymezení je místo desetiletí možné použít i kratší časová období (PERRET ET AL. 2006; SCHNEUWLY, STOFFEL 2008). Pro další zpřesnění výsledků by také bylo možné hodnotu  $E_{dt}$  neurčovat na začátku dekády, ale spíše ji nahradit tloušťkou stromu v pátém roce dekády, případně průměrem hodnot za první a poslední rok daného desetiletého období. Jisté omezení výše uvedeného vzorce představuje také fakt, že uvažuje průměrnou (tedy konstantní) roční míru přírůstu dřeviny a nezohledňuje věkový trend.

Geomorfologický charakter skalního řícení má za následek, že výsledky jeho dendrochronologického výzkumu musí být téměř vždy interpretovány pouze jako minimální frekvence výskytu (SCHNEUWLY, STOFFEL 2008). Existuje totiž určitá nenulová pravděpodobnost, že padající klastický materiál studovaným zalesněným územím projde, aniž by zasáhl alespoň jednu dřevinu a zanechal tak datovatelnou stopu (viz Obrázek 10b). Moya et al. (2010) doporučují tento problém ošetřit odebráním vzorků ze všech stromů z předem definovaných pásů lesa o určité minimální šířce. Je pochopitelné, že s rostoucí hustotou a tloušťkou dřevin v daném pásu riziko průchodu balvanu bez zásahu do stromu klesá. Tak například při průměrném průměru dřeviny (*Quercus robur*) 10 cm ve standardní výčetní výšce a hustotě 1500 stromů.ha<sup>-1</sup> stačí pás široký 15 m, aby v něm byla dostatečná pravděpodobnost zaznamenání všech skalních řícení. V případě, že bude hustota lesa pouze 800 stromů.ha<sup>-1</sup>, neměla by být šířka pásu nižší než 20 m (MOYA ET AL. 2010). Pokud je to možné, měla by při určení minimální šířky pásu být zohledněna i průměrná velikost klastů při minulých říceních, případně i reliéfové charakteristiky území. Další problém je, že většina využívaných přístupů velmi těžko odlišuje větší počet disturbancí vyskytujících se během jednoho dendrochronologického roku, které často bývají považovány za jednu jedinou událost (SCHNEUWLY, STOFFEL 2008); jejich rozlišení může být dosaženo například důkladným studiem možných trajektorií pohybujících se klastů (MOYA ET AL. 2010).

### **4.3. Tečení (stékání)**

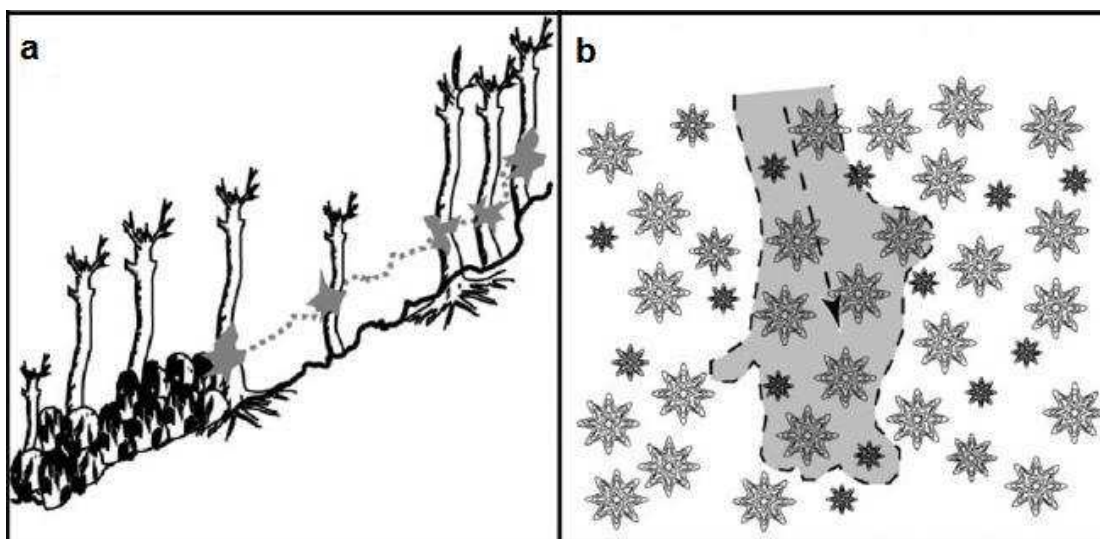
Do této kategorie svahových pohybů řadíme takové gravitační pohybující se masy, které obsahují značné množství vody, takže transportní fáze má charakter tečení (ZÁRUBA, MENCL 1987). Přesun hmot se může odehrávat v různých rychlostech - od relativně pomalých v případě proudových sesuvů (metry za den) až po opravdu katastrofické v případě přívalových suťových proudů a bahnotoků, které bývají v horských oblastech s vysokou energií reliéfu nazývány podle původně alpského regionálního označení jako mury (ZÁRUBA, MENCL 1987). Naopak v místech mírnějšího sklonu (2-6 °) se můžeme setkat s podobným

tekoucím svahovým pohybem, který bývá označován jako „debris-floods“ (BLAIR, MCPHERSON 1994 cit. in MAYER ET AL. 2010). Mezi tekoucí svahové pohyby lze částečně zařadit i lahary vázané na oblasti projevů vulkanické činnosti, principy jejich dendrochronologického datování jsou však téměř totožné jako v případě studia klasických mur (BOLLSCHWEILER ET AL. 2010).

Množství transportovaných hmot je v případě těchto svahových pohybů často tak veliké, že zcela pokryje povrch v akumulární zóně. Z tohoto úhlu pohledu se tedy jako nejužitečnější indikátory disturbancí jeví datování stáří adventivních kořenů, případně stáří dřevin klíčících po eventu na uloženém materiálu (SORG ET AL. 2010). Takto určená data ovšem představují pouze informaci o minimálním stáří. Při datování stáří klíčení je navíc nutné odebrat vývrt co nejnižší k patě stromu (kde je vytvořeno nejvíce letokruhů), což v případě opakovaných agradačních eventů nemusí být v dané lokalitě možné, protože spodní část kmene může být zakryta materiálem mladšího bahnotoku. V takovém případě je nutné provést odkryv, což je obvykle časově náročné a v případech velmi hlubokých výkopů dokonce i nebezpečné. Proto Sorg et al. (2010) doporučují odebrat vzorky z nejnižší možné nezasypané výšky a následně provést opravu stáří přidáním věkového faktoru – u blízko stojícího nezazaměného stromu stejného druhu (v případě výše citovaného výzkumu se jedná o *Larix decidua*), který má přibližně stejnou výšku se určí rozdíl mezi počtem letokruhů u země a ve výšce vzorku odebraného ze zkoumaného stromu. O tuto hodnotu je následně stáří zkoumané dřeviny opraveno. Pokud není žádný vhodný pomocný strom k dispozici, je pro určení stáří u některých druhů možné využít počtu přeslenů větví (SORG ET AL. 2010). Jiný způsob určení hodnoty této opravy vychází z vypočtení průměrného výškového přírůstu dřeviny za jednu vegetační sezónu. Při znalosti této hodnoty a alespoň přibližné mocnosti zazemění je následně možné odvodit, jak dlouho dřevina rostla, než dosáhla výčetní výšky (STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2008).

Další velmi častou vlastností dřevin postihovaných tekoucími svahovými pohyby je ohnutí, které může být podle Sorg et al. (2010) důsledkem buďto silového působení transportovaného materiálu, jeho tlakem po uložení nebo celkovou destabilizací dřeviny rostoucí na okrajích proudu. Kromě výše uvedených dendrochronologických indikátorů vykazují stromy v oblastech výskytu tohoto typu svahových pohybů i odhalené kořeny, traumatické pryskyřičné kanálky, prudké změny v míře přírůstu a jizvy (BOLLSCHWEILER ET AL. 2007; SORG ET AL. 2010). Četnost výskytu posledního jmenovaného indikátoru ovšem do značné míry závisí na průměrné velikosti proudem transportovaných klastů, a je proto

v případě „debris-floods“ obvykle unášejících spíše jemnozrnnější frakce poměrně vzácný (MAYER ET AL. 2010).



Obrázek 11. Rozmístění jizev po kmeni u bahnotoku (a) a plošný rozsah zasaženého území (b)  
zdroj: Stoffel, Perret 2006

Z výše uvedeného schématu (viz Obrázek 11) je patrné, že charakter rozmístění jizev po kmeni a celkový plošný rozsah postiženého území je v případě bahnotoku zcela odlišný od skalního řícení. V případě tekoucích svahových pohybů se s jizvami a jinými následky mechanického poškození dřeviny setkáváme téměř výhradně ve spodní části kmene do určité maximální výšky nad zemí, která odpovídá mocnosti proudu (Obrázek 11a). Tento typ gravitačního pochodu také postihuje poměrně kompaktní oblasti, ve kterých lze očekávat mechanické poškození téměř všech dřevin (Obrázek 11b), což umožňuje kromě datování provést i dendrochronologické prostorové vymezování bahnotoků (BOLLSCHWEILER ET AL. 2007). Neplatí to ale stoprocentně – například bylo zjištěno, že v případě bahnotoků, které obsahují výrazně zvýšené množství vody (přesycené proudy), nevykazuje podstatná část dřevin v zasažené oblasti vůbec žádné projevy disturbance. Pravděpodobně je to tím, že tyto stromy nebyly zasaženy transportovaným tvrdým materiálem, ale pouze ovlivněny proudící vodou a bahnem (BOLLSCHWEILER ET AL. 2007). Podobně i informace zjištěné o „debris-floods“ musí být vzhledem k charakteru tohoto tekoucího svahového pohybu (v první řadě menší množství uvolněné energie) nejčastěji interpretovány pouze jako minimální frekvence výskytu (BOLLSCHWEILER ET AL. 2011).

#### 4.4. Sesuvy

Ačkoliv bývá pojem sesuv často v široké veřejnosti ztotožňován s nadřazeným pojmem svahový pohyb, jedná se pouze o ty pohyby hornin po svahu, při kterých je pohybující se



masa od podloží oddělena zřetelnou smykovou plochou (ZÁRUBA, MENCL 1987). Tyto časté terminologické záměny mohou být částečně důsledkem vlivu odborné anglofonní literatury, kde dochází ke stírání rozdílů mezi pojmy Mass movement a Landslide velmi často; je to dobře patrné například z názvu odborného periodika Landslides, které se zaměřuje na všechny typy svahových pohybů, tedy nejenom sesuvy (VILÍMEK – ústní sdělení při přednášce Přírodní ohrožení a rizika). Podle charakteru smykové plochy bývají sesuvy v pravém slova smyslu rozdělovány na translační, rotační, případně i rotačně-translační; proudové sesuvy představují přechodnou kategorii mezi sesuvem a tečením (ZÁRUBA, MENCL 1987). Smysl a důležitost výzkumu sesuvných oblastí tkví hlavně v tom, že na horách a velehorách se obvykle jedná o poměrně hladké rovné povrchy, často obklopené prudkými svahy a ostrými hřebeny (STEFANINI 2004), což v minulosti vedlo ke zvýšené koncentraci obyvatelstva projevující se dnes na míře rizika. Maximální míry společenské důležitosti potom dosahují výzkumy zaměřené na časoprostorovou analýzu reaktivací zdánlivě dočasně stabilizovaných sesuvů (VAN DEN EECKHAUT ET AL. 2009).

Charakteristickou vlastností stromů postihovaných sesuvy je naklonění jejich kmene z vertikální pozice, což ve svém důsledku vede ke vzniku eliptických letokruhů a reakčního dřeva. To, jakým směrem je kmen odkloněn, je do jisté míry ukazatelem mechanismu sesuvu. Stromy nakloněné směrem k údolí vznikají při translačních sesuvech, pokud rychlost pohybu hmot klesá s rostoucí hloubkou, a zároveň nedochází k žádnému nebo jenom minimálnímu rotačnímu pohybu. Pokud je dřevina skloněna směrem k vrcholu svahu, případně pokud vykazují stromy v území bimodální až multimodální rozdělení azimutů naklonění, indikuje to naopak spíše rotační pohyby (VAN DEN EECKHAUT ET AL. 2009; FANTUCCI, SORRISO-VALVO 1999). Kromě klasicky ohnutých kmenů se v oblastech sesuvů můžeme setkat i s jinými typy deformací, například kolenovitými deformacemi, rozšířenými bazálními částmi kmene („opuchliny“), spirálně stočenou kůrou nebo různými typy záhybů (VAN DEN EECKHAUT ET AL. 2009). Pouhá analýza vnějšího habitu dřevin tak poskytuje cenný a užitečný nástroj, jak odhadnout hranice sesuvem zasaženého území. Jako u všech ostatních typů svahových pohybů jsou i v případě rekonstrukce sesuvů velmi často využívaným indikátorem disturbance prudké růstové změny (STEFANINI 2004), ačkoliv je často tato metoda omezena na vyhodnocování pouze prudkého zúžení letokruhů (VAN DEN EECKHAUT ET AL. 2009). Sesuvy totiž vedou k totální eliminaci stromu jenom velmi zřídka, takže příčinu případného zrychlení růstu je obvykle potřeba hledat v jiných vlivech než je pokles kompetičního tlaku.

## 5. Metody

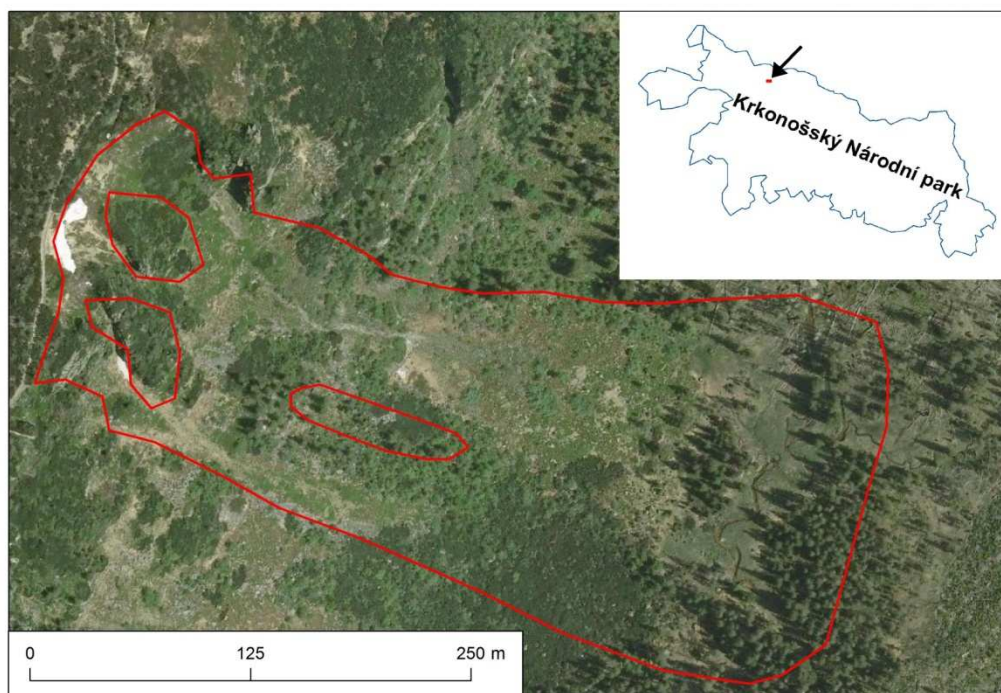
Na předcházejících stránkách byl formou rešerše poskytnut kromě základních informací o anatomii dřeva i přehled jednotlivých dendrochronologických indikátorů disturbance a specifik jejich použití v závislosti na druhu datovaného svahového pohybu. V následujících kapitolách bude jejich potenciál pro využití v aplikovaném výzkumu doložen formou jednak metaanalýzy odborné dendrogeomorfologické literatury zaměřené na rychlé svahové pohyby, a dále praktickým vyhodnocením konkrétních vzorků dřeva.

### 5.1. Metody metaanalýzy

Metody dendrogeomorfologie zažívají velký vzestup a během posledních dekad byly často využívány pro rekonstrukci celé řady rychlých svahových pohybů v různých částech světa (STOFFEL, BOLLSCHWEILLER 2008). Odborné články popisující použité metody i výsledky aplikovaných výzkumů jsou poměrně dobře dostupné a na jejich základě si je možné udělat alespoň základní přehled o vývoji např. používaných metod nebo dosahovaných přesností výsledků. Smyslem a cílem metaanalýzy provedené v rámci této bakalářské práce je vytvořit takový přehled studií, který umožňuje jejich objektivní srovnání a zhodnocení rozdílů v metodice datování jednotlivých typů svahových pohybů. Hlavním zdrojem, ze kterého pocházejí odborné články prezentované ve výsledkové části, jsou licencované elektronické databáze dostupné z počítačových účtů Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze (např. Elsevier, Scopus, Ingenta). Další studie byly čerpány přímo z webových stránek některých dendrogeomorfologických laboratoří (dendrolab.ch; dendroman.zlykluk.cz) a pochopitelně také z tištěných publikací. Nastupující rozvoj dendrochronologie v rozdílných částech zeměkoule téměř vylučuje možnost postihnouti všech publikovaných odborných článků - tato část bakalářské práce si tedy neklade za cíl vytvoření jejich zcela kompletního výčtu, ale spíše zmínění těch klíčových a nejaktuálnějších. Do metaanalýzy jsou z rozsahových důvodů také zahrnuty výhradně aplikované studie v pravém slova smyslu, některé zásadní články (převážně pionýrské práce staršího data), které by spíše spadaly do kategorie základního výzkumu, jsou ovšem ve výsledkové části alespoň telegraficky zmíněny taktéž. Bližší pozornost je naopak věnována dendrochronologickému výzkumu svahových pohybů (i pomalých) v České republice, stejně jako studiím publikovaných v českých odborných časopisech.

## 5.2. Zájmové území, materiál a metody případové studie

Možnosti dendrochronologie pro datování rychlých svahových pohybů byly dále otestovány skrze analýzu indikátorů disturbance zjištěných na vzorcích ze stromů rostoucích v dojezdu lavinové dráhy Schustlerova žlabu. Schustlerův žlab je jednou z deseti lavinových drah, které jsou tradičně v krkonošských lavinových katastrech vymezeny v oblasti Labského dolu (viz Obrázek 12). Odtrhová zóna se nachází ve výšce přibližně 1275 m n. m. a je rozčleněna na 3 segmenty, z nichž vypadávají samostatné laviny, které se občas mohou během transportu spojovat a na sběrnou oblast na Labské louce potom dojíždět současně. Pády větších lavin jsou obvykle vázány na období déletrvajících silného sněžení za spolupůsobení intenzivního západního proudění, které vede k akumulaci velkého množství sněhové hmoty v odtrhové zóně. Výškový rozdíl mezi pásmem odtrhu a akumulací je 250 m, přičemž průměrný sklon odtrhové zóny se v zimě pohybuje v rozmezí 40-45 ° (v závislosti na množství napadaného či navátého sněhu). Převládající expozice lavinového svahu je východní (SPUSTA, KOCIÁNOVÁ 1998).



**Obrázek 12. Ortosnímek Schustlerova žlabu a jeho poloha v rámci NP Krkonoše**  
Mapový podklad: Národní geoportál INSPIRE (letecký snímek) a mapový server KRMAP (vymezení lavinové dráhy)

V lokalitě byly v průběhu listopadu 2007 školitelem odebrány vzorky dřeva (*Picea abies*): čtyři vývrty a dvě výseče, které byly následně autorem bakalářské práce podrobeny laboratorní dendrochronologické analýze. Většina z analyzovaného materiálu pochází z výrazně morfologicky zdeformovaných dřevin, velmi častý je např. „kandelábrovitý“

habitus. Pro laboratorní zpracování je dvojice vývrtů pocházející z jednoho stromu označena číslem 5 a je dokladem o velmi výrazné míře excentricity letokruhů sledované dřeviny. První z vývrtů (označený jako 5B) je vyvrtaný skrz nakloněný kmen stromu ve směru jeho inklinace, druhý (5A) prochází taktéž skrz a je kolmý na vývrt 5B. Oba jsou bohužel vyvrtány lehce excentricky, tudíž na nich není zachycena dřev a nejstarší letokruhy, a tak jsou získané informace omezeny jenom na mladší roky. Další z vývrtů označený jako číslo 1 je podobně jako vývrt 5 odebrán v předpokládaném směru disturbance, ovšem z jiného stromu, a taktéž je z něj patrná velmi výrazná míra excentricity. Bohužel je ale mechanicky poškozen, konkrétně je zlomený v místě letokruhu z roku 1986. Poslední vývrt (číslo 2) pochází z bajonetové větve dalšího výrazně zdeformovaného stromu, ovšem neprochází jí zcela skrz (viz Obrázek 13).

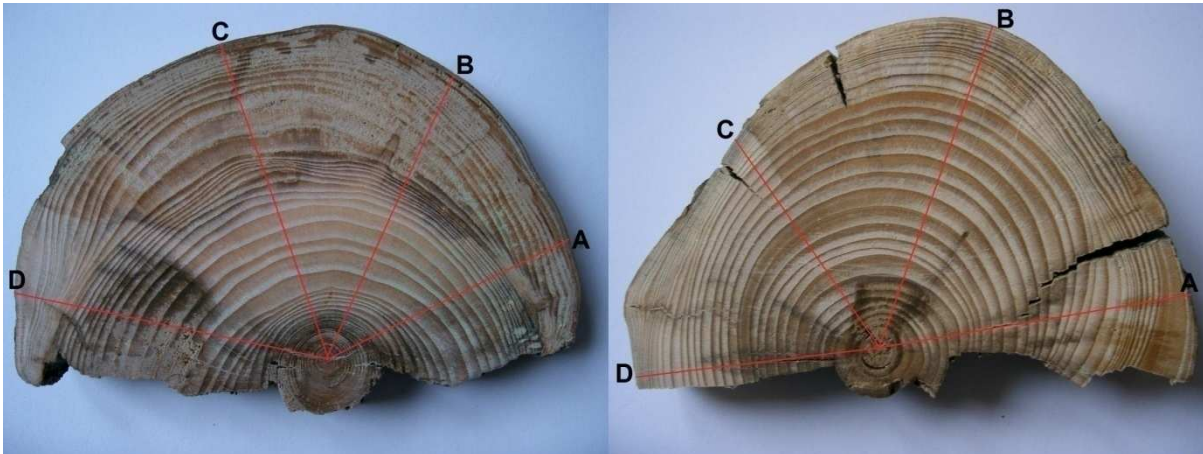


Obrázek 13. Analyzované vývrty (odshora) 1, 2, 5B a 5A (fotografovány v nestejných měřících)

Klínovité výseče jsou pro potřeby této práce označovány jako vzorky č. 3 a 4, přičemž obě pocházejí z horní větve, která se po urazení koruny stočila vzhůru (viz Obrázek 14). Výseč č. 3 byla odebrána z místa mezi ohybem a kmenem a č. 4 nad ohybem. Společným znakem byla bohužel hniloba přibližně třech krajních letokruhů, která byla přítomna vždy alespoň v jednom měřeném směru. To mělo za následek, že většina koeficientů indikátorů disturbance nemohla být určena právě pro tato nejmladší období. Pokaždé se ale našel alespoň jeden směr, ve kterém bylo možné změřit všechny letokruhy, tudíž nebylo nutné pro vytvoření letokruhové křivky aplikovat křížové datování.

Před makroskopickou analýzou byl nejprve všechn odebraný materiál zbrúšen sérií smirkových papírů s postupně se zjemňující hrubostí (P60 - P100 - P180), aby se tak zlepšila viditelnost hranic letokruhů. V případě vývrtů bylo toto provedeno manuálně, výseče byly naopak zbrúšeny pomocí elektrické brusky. Následně byly pod binokulární lupou připojené k měřicímu stolu VIAS TimeTable a počítači změřeny šířky letokruhů. Pro zpracování

získaných dat byl použit program PAST 4. V případě vývrtů bylo měření prováděno ve směru inklinace a proti směru inklinace kmene (vývrt 2 a 5B) a ve směru kolmém na inklinaci (5A); u vývrtu 1 z bajonetové části stromu nebyla informace o směru podstatná. Klínovité výseče byly měřeny každá ve čtyřech předem vymezených směrech, které mezi sebou svíraly úhel přibližně 40-60 ° (viz Obrázek 11). U letokruhů, u kterých byla navíc makroskopicky patrná přítomnost reakčního dřeva, byla tato informace zaznamenána.



Obrázek 14. Analyzované výseče č. 3 (vlevo) a č. 4 s vyznačenými směry jednotlivých měření

Dvojice letokruhových křivek ve směru a proti směru inklinace naměřených z vývrtů procházejících skrz kmen byly využity k výpočtu míry excentricity (podle vzorce č. 1) a také meziroční změny míry excentricity (vzorec č. 4). Určení excentricity na výsečích je velmi obtížné, protože jejich velikost obvykle neumožňuje měřit šířky letokruhů z opačných a často ani pravouhlých směrů. Pro účely této bakalářské práce byl proto navržen vzorec, který i přesto do jisté míry umožňuje míru excentricity kvantifikovat:

$$I'''_{ex} = \frac{R_B + R_C}{R_A + R_D} \quad (8)$$

kde R označuje naměřenou šířku letokruhu a dolní indexy představují směry tohoto měření. Logika tohoto vzorce vychází ze způsobu, jakým jsou výseče vyřezávány – obvykle v místech jizev nebo výrazných uklonění kmene. U správně odebraného vzorku lze tedy předpokládat, že ve střední části výseče je anomálie ve struktuře dřeva (v tomto případě excentricita) největší, zatímco na okrajích odebrané výseče nejmenší. Vzorec č. 8 tedy vlastně dává do poměru součet šířek letokruhů ve směrech s největší a nejmenší očekávanou excentricitou a do jisté míry tak umožňuje určit její míru, i když vzorek neposkytuje dostatečné množství informací pro aplikaci vzorců č. 1, 2 ani 3. Pro dosažení správných výsledků je ovšem nutné zajistit, aby (i) úhlové rozestupy mezi jednotlivými měřeními směry byly zhruba řádově



stejně a (ii) osa výseče (s očekávanou nejvyšší mírou deformace) ležela přibližně uprostřed mezi směry B a C. I tyto míry excentricity byly přepočteny na meziroční procentuální změny, na základě kterých byly následně vymezovány potenciální lavinové roky, přičemž jako prahová hodnota byla zvolena  $\Delta I_{ex} = 100 \%$ .

Informace o šířkách letokruhů ve směru pravouhlém na naklonění kmene (vývrt 5A) a v bajonetové větvi (vývrt 2) byla využita hlavně pro vymezení prudkých růstových změn – ta byla definována jako rok, ve kterém byl reálný přírůst vyšší než 200 % nebo nižší než 50 % průměrného přírůstu za předchozí 3 roky. *Sensu stricto* se tedy nejedná o prudké růstové změny, ale pouze o pointer years, jejichž použití jako indikátoru ovšem v tomto konkrétním případě považuji za zcela dostačující a při takto malém počtu vzorků (ještě navíc s relativně krátkým časovým rozpětím) za téměř nezbytné. Stejným způsobem byly vyhodnocovány i pointer years klínovitých výsečí a to pro křivky představující pro danou výseč průměr z šířek letokruhů naměřených ve všech čtyřech vymezených směrech.

Další ze způsobů vyhodnocování naměřených dat spočíval ve výpočtu letokruhových indexů, který byl proveden pro vývrty 5A a 2 a pro obě průměrné letokruhové křivky výsečí. Index udává podíl reálné vůči modelované šířce letokruhu, přičemž v tomto případě byl jako model zvolen pětiletý klouzavý průměr. Stejným způsobem byly určeny i indexy standardní (referenční) letokruhové křivky, která vznikla zprůměrováním hodnot šířek letokruhů z 16 stromů druhu *Picea abies* rostoucích v Labském dole a jejíž časový rozsah (1870-2009) značně překrývá rozsah analyzovaných vzorků. Navíc v období vymezeném nejstarším analyzovaným vzorkem (1953-2007) je replikace v rámci standardu maximální, tzn. na jeho hodnotě se podílí všech 16 dřevin. Předpokládá se, že do standardu jsou zahrnuty pouze stromy bez vnějších známek vlivu mechanických disturbancí, tedy z vnějších faktorů ovlivňované dominantně pouze klimatickými vlivy, případně jinými faktory taktéž postihujícími téměř celou zájmovou oblast (např. přemnožení vysoce mobilního škůdce). Poté byl pro jednotlivé roky a jednotlivé vzorky vypočten podíl z indexu zkoumané dřeviny a indexu standardu (podobně postupují i Malik, Owczarek (2009) v případě TGRIC). Pokud se výsledná hodnota výrazně odchyluje od čísla 1, znamená to, že růst se významně liší od průměrného charakteru růstu dřevin v daném území. Roky s hodnotou výsledného podílu nižší než 0,6 nebo vyšší než 1,4 byly tedy považovány za možná období výskytu lavin.

Standardní letokruhová křivka byla navíc sama podrobena určení prudkých růstových změn podle stejného postupu, jako je popsán výše. Pokud se totiž přírůstová odchylka vyskytne v daném roce ve standardu, ukazuje to na její podmínění jinými vlivy než je lavina

(např. klimaticky). Proto v letech, ve kterých byla vymezena prudká růstová změna na určitém vzorku a zároveň i na standardu, nebyl výskyt disturbance uvažován (BURDA 2010).

Po dokončení makroskopické analýzy byly vývrty 5A a 5B a klínovité výseče rozsekány na menší kousky tak, aby z nich bylo možné připravit trvalé preparáty. Konkrétně pro vývrty byly vytvořeny 3 (směry do svahu, ze svahu a v pravém úhlu) a pro výseče dohromady 5 (převážně okraje výsečí, kde na základě makroskopické prohlídky bylo možné očekávat výskyt zajímavých anatomických struktur, např. kalusu nebo traumatických pryskyřičných kanálků). Postup byl takový, že po důkladném navlhčení vodou byly vzorky seříznuty na mikrotomu GSL 1 na dostatečně malou tloušťku (cca 20-25  $\mu\text{m}$ ). Pro zvýraznění anatomických struktur byla použita směs barviv Safraninu a AstraBlue, ve které byly preparáty ponechávány přibližně 5-6 minut. Následné odvodnění bylo provedeno postupným promýváním etanolovou řadou s postupně rostoucí koncentrací (70 % - 96 % - 100 %) a zakončeno propláchnutím xylénem. Ten má tu vlastnost, že při kontaktu s vodou pění, a proto ve chvíli, kdy ze vzorku neodkapával zcela čirý, byla aplikace etanolové řady opakována. Jako montovací médium byl použit kanadský balzám, po jehož aplikaci byl vzorek umístěn minimálně na 8 hodin do sušičky s teplotou 65 °C. Před mikroskopováním bylo podložní a krycí sklíčko preparátu mechanicky očištěno od nečistot (např. přebytečného balzámu), samotné pozorování bylo prováděno na mikroskopu L2030.

Hlavním výstupem mikroskopické analýzy bylo kromě pořízení mikrofotografií také získání možnosti do výsledného vymezení lavinových roků zahrnout i informaci získanou studiem traumatických pryskyřičných kanálků, ačkoliv jich bylo nakonec využito pouze při vyhodnocování vývrťů 5A a 5B. Letokruhy s jejich zaznamenaným výskytem se obvykle u různých preparátů zcela diametrálně odlišovaly, i když pocházely z různých směrů stejného vzorku. Do dalšího výpočtu byly proto uvažovány pouze ty roky, ve kterých byla řada kanálků přítomna minimálně dvakrát ve stejném letokruhu, ovšem ve vývrtech pocházejících z odlišných směrů. To totiž znamená, že se jedná o důsledek silné disturbance (tedy např. laviny), zatímco slabší disturbance zůstávají odfiltrovány. Při vyhodnocování byla také věnována pozornost jejich konkrétní pozici v rámci letokruhu – jak již bylo výše zmiňováno, v důsledku laviny lze jejich výskyt očekávat v zóně jarního dřeva, ovšem ne v jeho první vrstvě (STOFFEL, HITZ 2008).

Závěrečné vymezení roků s lavinovou činností bylo provedeno pomocí modifikovaného přístupu navrženého Castellerem et al. (2011). Při splnění kterékoliv z níže uvedených podmínek byl danému roku přiřazen 1 bod: (i) překročení hraniční míry změny excentricity, (ii) podíl letokruhového indexu vzorku a standardu se nachází mimo interval 0,6-

1,4 (iii) překročení hodnoty potřebné pro vymezení prudké růstové změny (pokud nebyla zároveň překročena u standardu) a (iv) přítomnost traumatických pryskyřičných kanálků alespoň na dvou preparátech z různých směrů. Informace o výskytu reakčního dřeva zohledněna nebyla vzhledem k tomu, že analyzované vzorky vykazovaly jeho nadměrnou tvorbu (hlavně některé vývrty), tudíž použití tohoto indikátoru by mohlo výrazně znehodnotit výsledek. Navíc vyhodnocení excentricity do značné míry může vynechání reakčního dřeva suplovat (DUNCKER, SPIECKER 2008). Za lavinový byl považován takový rok, ve kterém byl počet přidělených bodů alespoň  $\frac{2}{3}$  vzorek<sup>-1</sup>. Tato hodnota byla volena jednak kvůli použití nízké váhy jednotlivých ukazatelů disturbance a hlavně jako důsledek malého množství analyzovaného materiálu (např. Casteller et al. (2011) pracovali s cca 20krát větším statistickým souborem, čemuž odpovídá i použitá hraniční hodnota). Množství analyzovaných vzorků v daném roce udává hloubku souboru (z anglického Sample depth), která nabývala v tomto konkrétním případě i jinak nezvyklých neceločíselných hodnot – u vývrtů totiž nastávala situace, že nestejný počet letokruhů zaznamenaných ve směru disturbance a ve směru kolmém umožňoval pro některé roky určit pouze omezený počet indikátorů. Hloubka souboru tedy odpovídala součtu podílů známých indikátorů na celkovém množství zjišťovaných indikátorů pro jednotlivé vzorky (viz Tabulka 1). Aby byla alespoň řádově zachována váha indikátorů určených na rozdílných vzorcích, byly informace zjištěné z vývrtů 1 (excentricita) a 2 (prudké růstové změny a podíl k indexu standardu) uvažovány jako data z jednoho vzorku se třemi vypočtenými indikátory.

Vzorek	Materiál	Indikátor	Časový rozsah	Váha při určování hloubky
A	vývrt 1	excentricita	1979-1985 1988-2007	$\frac{1}{3}$
	vývrt 2	prudké růstové změny	1973-2007	$\frac{1}{3}$
		podíly indexů	1972-2005	$\frac{1}{3}$
B	výseč 3	excentricita	1954-2004	$\frac{1}{3}$
		prudké růstové změny	1956-2004	$\frac{1}{3}$
		podíly indexů	1955-2002	$\frac{1}{3}$
C	výseč 4	excentricita	1974-2004	$\frac{1}{3}$
		prudké růstové změny	1976-2004	$\frac{1}{3}$
		podíly indexů	1975-2002	$\frac{1}{3}$
D	vývrt 5	excentricita	1972-2007	$\frac{1}{4}$
		prudké růstové změny	1982-2007	$\frac{1}{4}$
		podíly indexů	1981-2005	$\frac{1}{4}$
		TRD	1971-2007	$\frac{1}{4}$

Tabulka 1. Analyzovaný materiál a parametry jednotlivých indikátorů



## 6. Výsledky

Na následujících řádcích je poskytnut přehled výsledků dosažených prostřednictvím metaanalýzy a případové studie.

### 6.1. Výsledky metaanalýzy

Metaanalýzou dendrogeomorfologické literatury bylo vyhodnoceno dohromady 45 odborných článků, z toho 9 je z českého prostředí. Z tohoto celkového počtu se jich 9(0 českých) zaměřuje na laviny, 7(2) na skalní řícení, 11(2) na bahnotoky a 12(4) na sesuvy. Ostatní výzkumy se zabývají více rozdílnými svahovými pohyby najednou, případně jejich z pohledu dendrogeomorfologie méně často zkoumanými typy (např. 2 výzkumy datující výskyt „debris-floods“ a 1 zaměřený na lahary). Základní parametry jednotlivých studií jsou uvedeny v tabulce, která je řazena v sekci příloh.

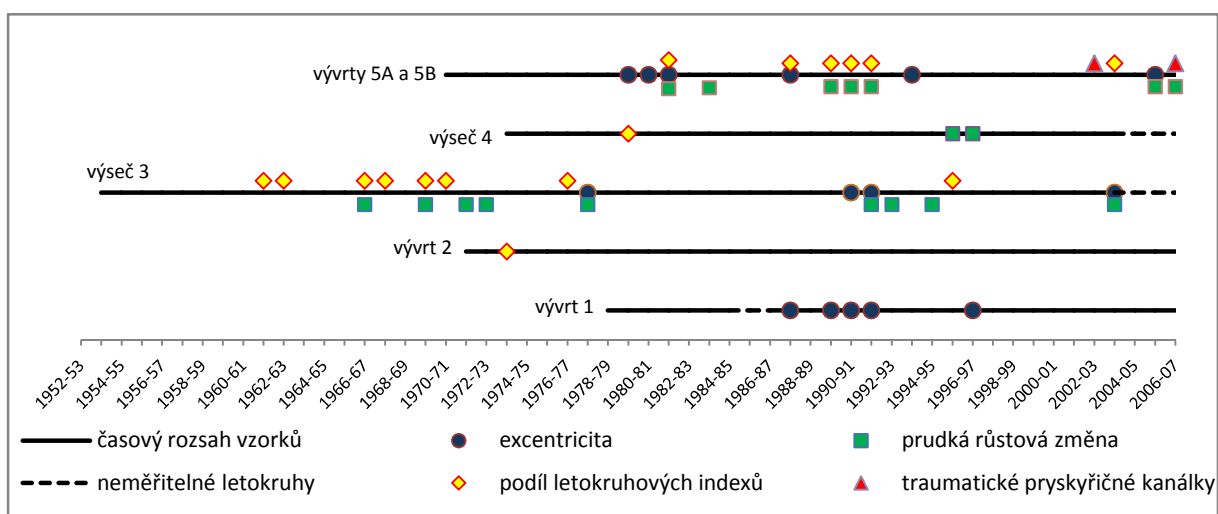
### 6.2. Výsledky případové studie

Analýza excentricity byla provedena jak pro vývrty, tak pomocí nově navrženého vzorce i pro výseče. Její hodnoty pro jednotlivé letokruhy se značně lišily – u vývrtů se zřídka vyskytovaly i lehce nižší než 1, maximální zaznamenaná hodnota zase činila 32,25 (dendrochronologický rok 1987-1988 u vývrtu 5B). V případě výsečí byly míry excentricity celkově nižší, poměrně časté byly i hodnoty menší než 1. Spíše než tato absolutní čísla byla ovšem pozornost věnována jejich relativním meziročním změnám, na základě jejichž míry byly následně vymezovány roky s potenciálním výskytem lavin. Kritická hodnota byla překročena u vývrtů v 11 letech a u výsečí ve 4 letech (viz Obrázek 15). Za zmínku určitě stojí opět dendrochronologický rok 1987-1988 u vývrtu 5B, u kterého byl zaznamenán velmi prudký nárůst excentricity o 764 %. Z celkem čtyř vzorků, pro které byla změna excentricity kvantifikována, byla v jednom roce překročena její kritická hodnota maximálně u dvou současně. Jednalo se o roky 1987-1988, 1990-1991 a 1991-1992. Nejdéle bez přerušení byla u jednoho vzorku kritická míra překročena po dobu tří let, a to v letokruzích 1990-92 (vývrt 1) a 1980-82 (vývrt 5B).

Vyhodnocování prudkých růstových změn bylo provedeno na čtyřech vzorcích, v případě vývrtu 2 ovšem nebyla zaznamenána ani jedna. Na zbylé trojici byla ale jedna z definovaných kritických hodnot překročena dohromady v 18 případech, což je absolutně nejvíce ze všech použitých indikátorů (viz Obrázek 15). Nejvýraznější záporná změna dosáhla hodnoty -76 % (2005-2006, vývrt 5A), naopak maximální kladná anomálie byl meziroční vzrůst o 287 % (1971-1972, výseč 3). Kritická hodnota byla v jednom roce překročena u více

než jednoho vzorku pouze jedenkrát, konkrétně se jednalo o kladné prudké růstové změny zjištěné na vzorcích 3 a 5A v roce 1992. Pokud se zaměříme na délku trvání, potom nejdelší souvislé období s vymezenou prudkou růstovou změnou trvalo tři roky a bylo zaznamenáno pouze jednou v období let 1990-92 (vývrt 5B). Zajímavostí ovšem je, že první dva roky této periody vykazují zápornou růstovou změnu, zatímco rok třetí velmi výraznou kladnou. To vede k otázce, zda je vhodnější ve všech třech letech uvažovat možný vznik laviny, nebo pouze v roce prvním vznik silné laviny, která vedla k redukci růstu po dobu dvou let, po kterých se strom adaptoval na nové podmínky a byl schopen prudce zrychlit svůj přírůst. Na referenční letokruhové křivce byly zaznamenány pouze dvě slabé záporné prudké růstové změny v dendrochronologických letech 1882-1883 a 1979-1980. Druhý ze zmiňovaných roků sice spadá do zájmového období, na ani jednom z analyzovaných vzorků však v něm nebyla přítomnost prudké růstové změny zaznamenána.

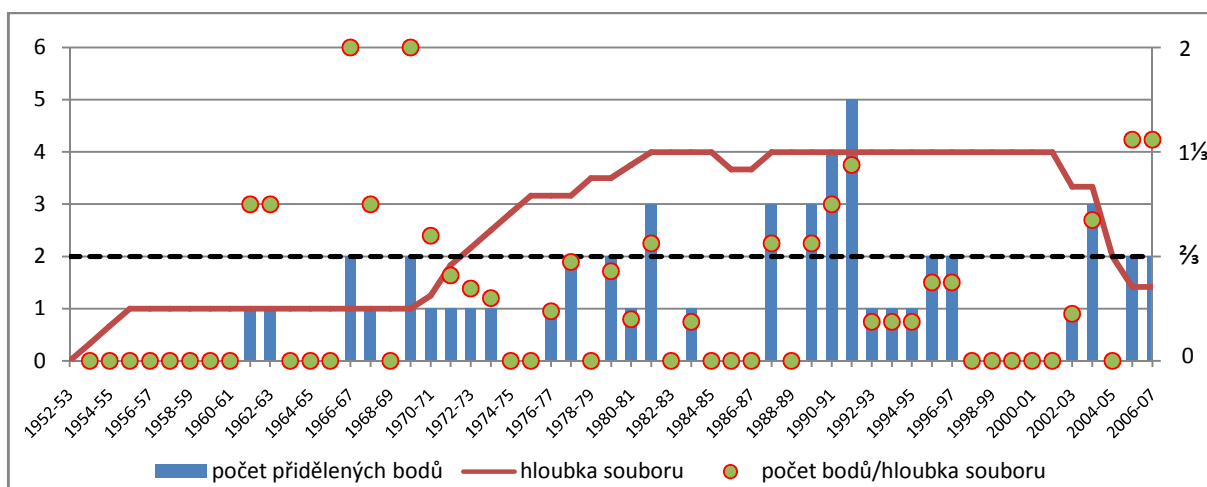
Mimo zvolený interval se při analýze podílů indexů ocitlo dohromady 16 letokruhů (viz Obrázek 15), minimální podíl nabýval hodnoty přibližně 0,3 (1989-1990, 5A), naopak maximum přesahovalo 2,2 (1981-1982, 5A). V žádném roce nenastala situace, že by byla anomálie na základě indexů zaznamenána zároveň alespoň na dvou vzorcích. Ačkoliv byly dvojice po sobě se vyskytující let s anomálií zachycenou pomocí této metody poměrně hojné v mládí stromu, ze kterého pocházela výšeč 3, ke třem po sobě jdoucím odchylkám došlo pouze jednou. Opět se jednalo o letokruhy vytvořené v letech 1990-92 u vývrtu 5A. Stejně jako v případě prudkých růstových změn poukazovala odchylka v prvních dvou letech na redukci růstu, zatímco v roce posledním dokládala naopak prudké zrychlení. To ještě více staví do popředí důležitost otázky zformulované v předchozím odstavci.



Obrázek 15. Časový rozsah vzorků a zaznamenané indikátory disturbance

Vyhodnocování traumatických pryskyřičných kanálků (viz Obrázek 8) bylo realizováno výhradně pro vývrty 5A a 5B, a proto celkový počet takto zaznamenaných disturbancí byl velmi nízký. Ačkoliv byly traumatické pryskyřičné kanálky pozorovány v různě orientovaných částech vývrtů dohromady v 8 letokruzích, jako indikátory byly považovány, pouze pokud se v daném roce nacházely zároveň alespoň ve dvou ze třech směrů. Tato podmínka byla splněna jenom ve dvou letech, konkrétně se jednalo o dendrochronologické roky 2002-2003 a 2006-2007 (viz Obrázek 15).

Absolutní počet indikátorů disturbance vyskytující se v jednom roce dosahoval maximálně v období na začátku 90. let, což je ale výrazně ovlivněno rostoucí hloubkou souboru (viz Obrázek 16). Nejvíce jich bylo zaznamenáno v dendrochronologických letech 1991-1992 (5 indikátorů) a 1990-1991 (4 indikátory). Celkem jich bylo během 54letého období zachyceno 51, což odpovídá průměru lehce přes  $0,94 \text{ rok}^{-1}$ ; během 26 dendrochronologických roků se ovšem nevyskytoval ani jeden. Mnohem důležitější byl ovšem vývoj relativního výskytu zaznamenaných indikátorů ve vztahu k celkové hloubce analyzovaného souboru, protože na základě právě této hodnoty byly následně vymezovány lavinové roky. Hloubka souboru se do 70. let pohybovala na hodnotě 1, ovšem na začátku tohoto desetiletí začala rychle růst a již v dendrochronologickém roce 1975-1976 překročila hodnotu 3. Maxima (tj. 4) dosáhla v roce 1981-1982, přičemž tato hodnota platila (s krátkou pauzou v důsledku mechanického poškození vývrty 1) až do dendrochronologického roku 2001-2002. Poté následuje její pokles způsobený špatnou čitelností okrajových letokruhů obou výsečí, která měla za následek nemožnost vypočtení většiny indikátorů.



Obrázek 16. Počty zaznamenaných indikátorů disturbance a vývoj hloubky souboru

Stanovená hraniční hodnota  $\frac{2}{3}$  bodů.vzorek<sup>-1</sup>, při jejímž překročení byl daný rok považován za lavinový, byla dosažena dohromady ve 14 případech (viz Obrázek 16). Průměr za celé období byl 0,398 bodů.vzorek<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>. Maximum dosáhlo hodnoty 2 body.vzorek<sup>-1</sup> a to v letech 1966-1967 a 1969-1970. V té době byla ovšem hloubka souboru pouze na úrovni 1, což lze považovat za hlavní příčinu této relativně vysoké cifry. Ze 14 vymezených lavinových roků se jich 11 vyskytuje ve skupinkách několika po sobě jdoucích let (letokruhů), konkrétně se jedná o tříletou etapu mezi roky 1990-1992 a dvouletá období 1962-1963, 1967-1968, 1970-1971 a 2006-2007. Zbylé tři roky s předpokládaným vznikem laviny jsou datovány do let 1982, 1988 a 2004.

## 7. Diskuze

Následující diskusní část je v případě metaanalýzy vedena formou zhodnocení celkových vývojových trendů v dendrogeomorfologickém výzkumu rychlých svahových pohybů; u případové studie je pozornost věnována porovnání dendrochronologicky zjištěných lavinových roků s písemnými záznamy v lavinových katastrofách. Jejich prostřednictvím je také validována celková přesnost použité metody.

### 7.1. Diskuze metaanalýzy

Pionýrské práce v oboru dendrochronologického datování sněhových lavin byly prováděny převážně v USA, jmenovitě v Glacier National Park v Montaně (blíže viz STOFFEL, BOLLSCHWEILLER 2008), přičemž na lavinové svahy Severní Ameriky je dodnes soustředěna pozornost značného počtu studií (REARDON ET AL. 2008; BUTLER, SAWYER 2008). Po přelomu tisíciletí ovšem nastává postupný nárůst zájmu i o další světové velehory. V první řadě se jedná o Alpy (CASTELLER ET AL. 2007; CORONA ET AL. 2010); metody dendrochronologie byly ale úspěšně aplikovány i v Pyrenejích (MUNTÁN ET AL. 2009), v oblastech argentinských And (MUNDO ET AL. 2007; CASTELLER ET AL. 2011) a jiných regionech světa s častým výskytem lavin (DECAULNE, SÆMUNDSSON 2008; LAXTON, SMITH 2009; KÖSE ET AL. 2010). Pokud se v tabulce uvedené v přílohách zaměříme na parametry terénní části výzkumu, je dobře patrné, že laviny se jím značně liší od ostatních svahových pohybů. V první řadě zmiňme relativně časté, až téměř pravidelné, využívání značného množství mrtvého dřeva pro datování. To v sobě skrývá podstatná omezení (nutnost určovat stáří podkorního letokruhu pomocí křížového datování, možnost napadení dřevokaznými organismy, ...), ale i jeden velmi dobrý potenciál – v podstatě pouze při studiu lavin je běžné, aby většina vzorků byla odebrána ve formě přírůstkových kotoučů (nebo alespoň výřezů), které při laboratorním vyhodnocování a analyzování poskytují značný „komfort“ a více informací než vývrty. Další aspekt, kterým se datování lavin odlišuje od datování ostatních svahových pohybů, vyplývá ze samotné podstaty lavin – ty totiž vznikají v zimě, tudíž (téměř) vždy v období vegetačního klidu, a proto je dosažení výsledků s požadovanou přesností na rok zcela dostačující. O to větší úsilí bývá ovšem vyvíjeno na odhadnutí a jistou kvantifikaci spouštěcího mechanismu lavin. Takto bylo například zjištěno, že četnost lavin v Glacier National Park je kromě místních meteorologických podmínek ovlivněna i cirkulačními systémy nad Pacifikem (REARDON ET AL. 2008), podobně jako byl potvrzen vliv systému ENSO na laviny v Lago del Desierto (CASTELLER ET AL. 2011) a NAOi v Katalánských Pyrenejích (MUNTÁN ET AL. 2009). Corona et al. (2010) se zase spíše zaměřili na vliv meziročních změn lokálních

meteorologických prvků a dokonce popsali pravděpodobnost vzniku velké laviny pomocí funkce, ve které je jedinou vstupní proměnnou suma sněhových srážek za prosinec a leden. Z druhů dřevin využívaných pro datování lavin je patrné výrazné biogeografické ovlivnění – zatímco na severní polokouli dominují jehličnany, v případě obou studií zaměřených na Patagonii a Ohňovou zemi byly využity listnáče.

V porovnání s jinými svahovými pohyby je dendrochronologie jenom zřídka využívána k datování skalního říčení. Ačkoliv Stoffel, Bollschweiler (2008) zmiňují několik starších studií zaměřených na širší charakteristiky tohoto typu svahového procesu, první výzkumy zaměřené na analýzu časoprostorového rozsahu jsou velmi mladého data. Ty jsou navíc zatím téměř výhradně záležitostí evropských velehor (na prvním místě Alp a Pyrenejí). Za zmínku rozhodně stojí výzkum na svahu Täschgufer, který svým časovým rozsahem pokryl rekordní období let 1600-2002, během kterých vymezil charakteristické výkyvy ve frekvenci výskytu skalního říčení (STOFFEL ET AL. 2005b). Podobně i ostatní studie se spíše než na vymezení přesného roku vzniku skalního říčení zaměřují na změny ve frekvenci jeho výskytu během určitého časového období a mezi jednotlivými částmi postihovaného území (SCHNEUWLY, STOFFEL 2008; MOYA ET AL. 2010). Opačným trendem je zase snaha o zachycení sezóny vzniku říčení, se kterou se například setkáme v práci Moya et al. (2010). Dominantním způsobem odběru vzorků je použití Presslerova nebozezu, protože to je s ohledem na častý ochranný charakter lesů na zkoumaných svazích poměrně šetrná metoda. Pokud tento fakt dáme do souvislosti s tím, že nejčastěji bývají jako ukazatel skalního říčení využívány jizvy, pro jejichž správné vyhodnocení je nutné odebrat větší počet vývrtů, je pochopitelné, že jsou výzkumy tohoto typu svahových pohybů obvykle charakteristické nadprůměrným množstvím odebraného materiálu.

Na rozdíl od skalního říčení má dendrochronologický výzkum bahnotoků a jiných typů tekoucích svahových pohybů dlouhou historii. Po pionýrských studiích v oblastech Kalifornie se v 90. letech minulého století staly hlavní zájmovou oblastí Dolomity (blíže viz STOFFEL, BOLLSCHWEILER 2008), v současné době ovšem probíhá největší procento výzkumů v Alpách, konkrétně nejčastěji jsou průzkumu podrobovány různé oblasti švýcarského kantonu Valais (STOFFEL ET AL. 2005a; BOLLSCHWEILER ET AL. 2007; SORG ET AL. 2010; ARBELLAY ET AL. 2010; BOLLSCHWEILER, STOFFEL 2007, 2010). Jedná se o oblast s velmi častým výskytem mur, která je intenzivně studována hlavně vědci z Dendrogeomorfologické laboratoře při Univerzitě v Bernu, což je z hlediska množství publikovaných odborných článků jedno z nejpřednějších evropských i světových pracovišť. Výzkumy zaměřené na tento typ svahových procesů, ovšem staršího data, můžeme zaznamenat ale také z jiných partií

světa, například z italské části Alp (SANTILLI, PELFINI 2002) nebo dokonce z Japonska (YOSHIDA ET AL. 1997). Naopak poměrně novým trendem je datování murám podobných „debris-floods“ (MAYER ET AL. 2010; BOLLSCHWEILER ET AL. 2011). Téměř charakteristickým rysem území postihovaných bahnotoky je, že všechny minulé eventy neprobíhaly v jednom stejném „kanále“, ale že takovýchto „kanálů“ existuje víc a to, kterými z nich se bude vzniklá mura šířit, závisí kromě její velikosti i na celé řadě faktorů daných samotným charakterem těchto potenciálních trajektorií. To představuje pro dendrochronologický výzkum velkou výzvu, takže kromě prostého určení roků, ve kterých blokovobahenní a jiné proudy vznikaly, se většina studií snaží i o prostorové vymezení jednotlivých událostí a zachycení jeho změn. Tyto změny mohou být velmi zajímavé a často velice podstatné pro plánování ochrany – například Bollschweiler et al. (2007) zjistili, že proudové svahové procesy postihovaly před rokem 1935 spíše západní polovinu údolí Bruchji (Švýcarsko), ačkoliv v současnosti je jejich aktivita výrazně omezena na východní část. Dalším častým cílem některých studií je vyhodnocení spouštěcích faktorů. Jako ten nejdůležitější se jeví výrazně nadprůměrné denní srážky, neméně podstatný je ale i vliv času uběhnuvšího od předchozího eventu, který ovlivňuje kolik materiálu je k dispozici pro přesun po svahu (SANTILLI, PELFINI 2002). Zajímavé závěry poskytuje dendrochronologie i z pohledu otázky změny frekvence výskytu tekoucích svahových pohybů v souvislosti s globálními změnami klimatu (BOLLSCHWEILER, STOFFEL 2010). Ze všech v metaanalýze zahrnutých odborných článků si bližší pozornost rozhodně zaslouží výzkum mur v oblasti Ritigrabenu ve Švýcarsku (STOFFEL ET AL. 2005a), který na základě rekordního množství více než 1200 analyzovaných stromů (2450 vývrtů) umožnil datování 53 eventů během posledních 400 let, čímž velmi přispěl k doplnění a rozšíření informací o tekoucích pohybech známých z písemných záznamů.

Využitím dřeva při studiu sesuvů se zabývali již Shroder (1978) v USA a Braam et al. (1987) ve Francii, v prvním případě se ovšem jednalo o pohyby spíše pomalého charakteru a ve druhém o článek spadající do kategorie základního výzkumu spíše než mezi případové studie. Jádrový region současného výzkumu představují horské oblasti Itálie (FANTUCCI, SORRISO-VALVO 1999; STEFANINI 2004; GUIDA ET AL. 2008) a do jisté míry stále Severní Amerika (CARRARA, O'NEILL 2003; WIECZOREK ET AL. 2006), s jejich dendrochronologickými studii se ovšem na rozdíl od ostatních svahových pohybů můžeme setkat i ve velmi nízko položených oblastech (VAN DEN EECKHAUT ET AL. 2010). Pokud se zaměříme na vyhodnocované indikátory disturbance, je zřejmé, že některé z nich (např. jizvy) je možné využívat jenom velmi zřídka, což je pravděpodobně důsledkem charakteru pohybu hmot po svahu. Jako klíčové můžeme naopak označit excentricitu a jako obvykle prudké

růstové změny, velmi užitečným postupem může také být prosté studium anomálií v celkovém habitu stromů a tvaru jejich kmenů (VAN DEN EECKHAUT ET AL. 2010). Na rozdíl od všech ostatních typů svahových pohybů převládají v případě sesuvů mezi analyzovanými druhy listnáče. Vysvětlení se nabízí například v tom, že dendrochronologické rekonstrukce sesuvů se na rozdíl od jiných typů svahových pohybů provádějí i v oblastech s relativně nižší energií reliéfu, kde bývají převládajícím porostem právě listnáče. Kromě snahy o prostorové analýzy aktivity různých částí sesuvných oblastí v jednotlivých letech (STEFANINI 2004; VAN DEN EECKHAUT ET AL. 2010) je častou výzkumnou otázkou také problematika spouštěcího vlivu. Zdá se například, že v seismicky relativně aktivní Itálii kromě tradičně vyhodnocovaného faktoru srážek souvisí do určité míry výskyt sesuvů i s výskytem zemětřesení (FANTUCCI, SORRISO-VALVO 1999; STEFANINI 2004), podobně jako byla tato závislost prokázána i v Montaně (USA). Tam bylo navíc zjištěno, že na reaktivaci činnosti sesuvu stačí zemětřesení o hodnotě intenzity III Mercalliho modifikované stupnice (CARRARA, O'NEILL 2003).

Poměrně novým trendem v případových studiích je zaměření některých z nich na oblasti současného výskytu více než jednoho typu svahového pohybu. Může se jednat například o rozlišení lavin a mur na několika svazích ve Švýcarsku (STOFFEL ET AL. 2006; SZYMCZAK ET AL. 2010). Jejich odlišení v anatomických strukturách dřeva je prováděno na základě rozdílů v obdobích výskytu, z čehož vyplývá, že klíčovými indikátory disturbance jsou v těchto typech analýz traumatické pryskyřičné kanálky a jizvy. Na jejich základě je možné rozlišit i laviny a skalní řícení, v rámci metaanalýzy ovšem nebyl zjištěn ani jeden článek, který by tohoto jejich potenciálu využíval.

Ačkoliv je používání metod dendrogeomorfologie v České republice na vzestupu, objektivně srovnávat počet a rozsah výzkumů prováděných u nás a v jiných evropských zemích (jmenovitě např. ve Švýcarsku) je v podstatě nemožné (ŠILHÁN 2010b), a proto byla v rámci metaanalýzy pozornost zcela výjimečně věnována i odborným článkům zaměřeným na pomalé svahové pohyby. Dendrochronologickým pracovištěm v České republice s nejdelší tradicí je asi Dendrochronologická laboratoř při Ústavu nauky o dřevě Mendelovy univerzity v Brně, jejímž hlavním zaměřením je ovšem výzkum v oboru dendroarcheologie. Dendroekologické studie jsou naopak prováděny spíše odborníky z jiných pracovišť – jmenovitě Přírodovědecké fakulty Univerzity Karlovy v Praze (z nich se na svahové pohyby zaměřují DAÑHELKA 2001; VILÍMEK ET AL. 2002; BURDA 2010; ŽÍŽALA ET AL. 2010) nebo Přírodovědecké fakulty Ostravské univerzity (ŠILHÁN, PÁNEK 2008; ŠILHÁN 2010a, 2010b); na ostatních a zahraničních ústavech probíhají dendrogeomorfologické výzkumy v rámci



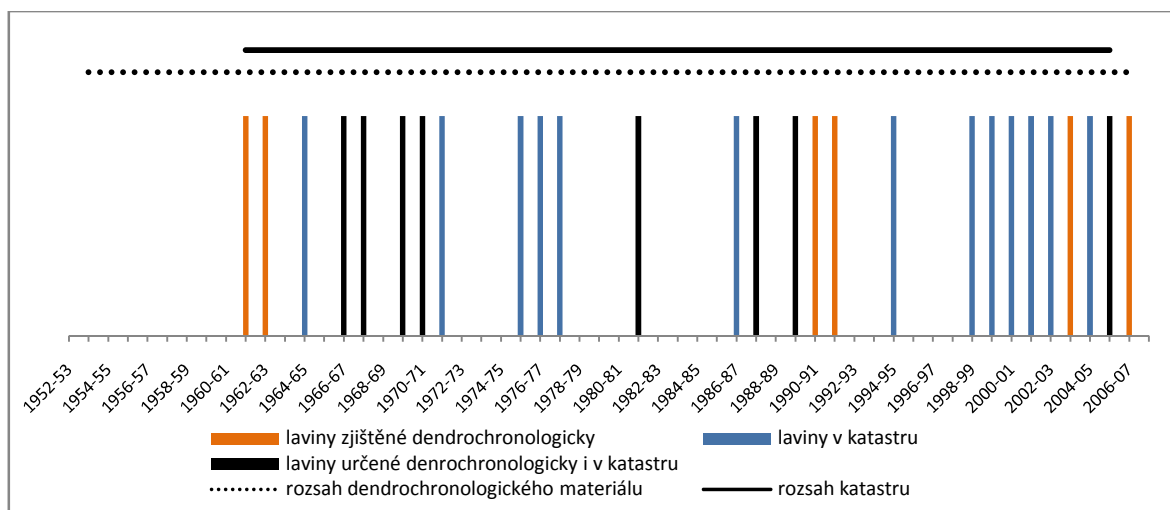
České republiky spíše zřídka (RAŠKA 2007; MALIK, OWCZAREK 2009). Velký podíl výzkumných aktivit dendrogeomorfologů z PřF Ostravské univerzity se zaměřuje na problematiku blokovobahenních proudů v Moravskoslezských Beskydech, které ačkoliv mají morfometrické parametry podporující jejich vznik, nikdy nebyly podrobeny důkladnému výzkumu historických mur (ŠILHÁN, PÁNEK 2008). Naopak studie „pod hlavičkou“ PřF Univerzity Karlovy v Praze se zabývají spíše pomalými svahovými pohyby plouživého charakteru, často v rozdílných částech Krušných hor. Burda (2010) analyzoval růstové anomálie v oblasti zámku Jezeří, což je lokalita potenciálně ohrožená poklesem stability svahů v důsledku intenzivní těžby (nedaleký lom Československé armády) vedoucí k pomalému sjíždění zvětralin. Podobný výzkum v oblasti Salesiovy výšiny výskyt starých svahových procesů neprokázal (VILÍMEK ET AL. 2002), určitou nejistotu v tomto konkrétním případě ovšem představuje velmi malý počet odebraných vzorků (v tomto ohledu ostatně vykazuje deficit naprostá většina českých výzkumů oproti výzkumům prováděným např. v Alpách). Další ze studií se zase zaměřila na zodpovězení otázky, zda mohly být pomalé svahové pohyby v lokalitě Běleč příčinou poškození vodovodního řadu na Brněnsku (ŽÍŽALA ET AL. 2010). Při použití dendrochronologických metod se dospělo k závěru, že takovýto přímý vliv neexistuje.

## **7.2. Diskuze případové studie**

Využitím metod dendrochronologie bylo v oblasti Schustlerova žlabu v Krkonoších datováno dohromady 14 lavinových roků v období mezi lety 1953-2007. Studium jejich historie ovšem není v Krkonoších odkázáno pouze na aplikaci rozličných rekonstrukčních metod, ale může využít i celou řadu různě kvalitních písemných záznamů. Za hlavní zdroj věrohodných informací o časoprostorovém rozsahu recentních lavinových událostí lze považovat krkonošské lavinové katastry (SPUSTA, KOCIÁNOVÁ 1998; SPUSTA ET AL. 2003, 2006), které pro jednotlivé lavinové dráhy napříč celou českou částí Krkonoš shrnují informace o obdobích jejich výskytu a nejdůležitějších parametrech. Nedostatečný, převážně co se týče množství analyzovaného materiálu, rozsah dendrochronologického výzkumu provedeného v této bakalářské práci naproti tomu fakticky znemožňuje, aby byly jím zjištěné závěry interpretovány tak, jak tomu bývá v odborných článcích zaměřených na studium lavin (REARDON ET AL. 2008; MUNTÁN ET AL. 2009; KÖSE ET AL. 2010) – tzn. jako doplnění a zpřesnění již existujících písemných záznamů. Ty jsou totiž v daných oblastech neúplné a často tendenční v tom smyslu, že zdůrazňují pouze ty lavin, které vedly k lidským obětem nebo materiálním škodám. V tomto případě je ovšem vhodnější předpokládat úplnost

lavinových katastrů a následně je použit jako norma pro evaluaci přesnosti výsledků dosažených pomocí dendrochronologických metod.

Do současné doby publikované a dostupné publikace lavinových katastrů pokrývají svým rozsahem období mezi dendrochronologickými roky 1961-1962 až 2005-2006, během kterých zaznamenávají v Schustlerově žlabu 24 různě velkých lavin (viz Obrázek 17). Obvykle se za zimní sezónu uvolňovala pouze maximálně jedna, během zim 1986-1987, 1999-2000 a 2001-2002 však vyjely laviny dvě. Při srovnání dat zjištěných dendrochronologicky s daty z katastrů dojdeme k závěru, že ze 14 dendrochronologicky vymezených let je 8 zaznamenáno i v písemných záznamech, 5 není, a poslední dendrochronologický rok s vypočteným výskytem laviny (2006-2007) leží mimo rozsah dnes běžně dostupných krkonošských lavinových katastrů. Celkový podíl lavinových let vyhodnocených „správně“ je tedy přibližně 57 % a na „špatně“ určené připadá 36 % (viz Tabulka 2). To jsou hodnoty zhruba srovnatelné s výsledky dosaženými Reardonem et al. (2008) v USA, stejně jako Muntánem et al. (2009) v Pyrenejích. V těchto případech ovšem, jak již bylo výše naznačeno, nebyly díky obsáhlejšímu rozsahu dendrochronologického výzkumu roky s nově zjištěným výskytem lavin obvykle považovány za chyby. Naopak sloužily jako podklad pro revizi „nedokonalých“ písemných záznamů.



**Obrázek 17. Dendrochronologicky vymezené laviny a chronologie písemných záznamů**  
 Zdroje dat o lavinovém katastru: Spusta, Kociánová 1998; Spusta et al. 2003, 2006

Z celkového počtu 21 lavinových roků popsanych v katastru bylo tedy dendrochronologicky potvrzeno pouze 8, což odpovídá jenom 38 %. Ačkoliv se tato hodnota může zdát velmi nízká, její význam je poměrně zanedbatelný, protože ukazuje na celkovou validitu obdržených výsledků jenom velmi vzdáleně a nepřímou. Některé lavinové události,

zvláště ty, při kterých se transportuje menší množství sněhové hmoty na kratší vzdálenost, totiž vůbec nemusí ovlivnit dřeviny v zóně nánosu, protože do ní prostě nedorazí. Právě Schustlerův žlab je charakteristickým příkladem lavinové dráhy, kde se často menší a střední laviny zastavují v polovině svahu (SPUSTA, KOCIÁNOVÁ 1998). Pokud jsou pozorovány, objeví se o nich záznam v lavinovém katastru, zatímco záznam v letokruhových křivkách a anatomické struktury dřeva rostoucího v akumulární zóně se zcela logicky objevit nemůže. Další aspekt, který je nutné při interpretaci výsledku zohlednit, je možná prostorová variabilita jednotlivých větších lavin. Tato problematika nebyla v průběhu zpracování praktické části bakalářské práce diskutována a zohledněna, je ovšem evidentní, že může nastat situace, kdy větší lavina do zóny nánosu sice dorazí, ovšem do její jiné části, než ze které pocházejí analyzované vzorky.

Použitý indikátor/metoda							
Počet vymezených let		Excentricita	Prudké růstové změny	Podíly indexů	TRD	b.vzorek <sup>-1</sup>	
		Celkem	12	17	16	2	14
		zároveň v katastru	6 (50 %)	8 (47 %)	8 (50 %)	1 (50 %)	8 (57 %)
		není v katastru	6 (50 %)	8 (47 %)	8 (50 %)	0	5 (36 %)
		mimo rozsah katastru	0	1 (6 %)	0	1 (50 %)	1 (7 %)

**Tabulka 2. Míra shody mezi lavinovými roky určenými pomocí použitých indikátorů a písemnými záznamy**

Pomocí lavinových katastrů je možné i ohodnotit přesnost jednotlivých dílčích indikátorů disturbance. Ta dosahovala ve všech případech velmi podobné hodnoty pohybující se okolo 50 % (viz Tabulka 2). Srovnáme-li to s 57 %, což je úspěšnost finálního výsledku, je dobře patrné, že aplikace lehce modifikovaného postupu navrženého Castellerem et al. (2011) vedla k zvýšení celkové přesnosti. Jeho prostřednictvím byla totiž odfiltrována celá řada dendrochronologických roků, které vykazovaly překročení kritické hodnoty pouze jednoho konkrétního indikátoru (šum), a tím pádem byly zohledněny pouze roky, kde byly projevy disturbance patrné na větším podílu vzorků. Podobně také tato metoda kompenzovala nedostatky spojené s použitím pointer years namísto event years.

Pokud bychom stejným způsobem chtěli zhodnotit i přesnost nově navrženého vzorce pro určení excentricity výsečí, došli bychom k výrazně negativním číslům. Pouze jediný touto metodou vymezený dendrochronologický rok (1977-1978) byl zároveň zachycen v písemných záznamech, zatímco u zbylých třech tomu tak nebylo. Zajímavostí ovšem je, že všechny čtyři roky následovaly těsně po roce, ve kterém katastr zachycoval výskyt laviny. Aplikace vzorce č. 8 v případové studii tedy nebyla pro výsledné závěry přínosem, ale příčinu toho není nutné

hledat v jeho principu, který stále považuji za správný a vidím v něm dobrý potenciál. Pro dosažení odpovídajících výsledků je ovšem nutné jej důkladně pochopit a definovat přesné způsoby jeho správné interpretace. Pokud bychom připustili možnost, že podle tohoto vzorce vypočtené hodnoty excentricity reagují na disturbance s jednoročním zpožděním (a pochopitelně také popsali příčinu tohoto zpoždění), byl by potom právě tento indikátor nejpřesnějším ze všech zde použitých.

Ačkoliv nebyl v této práci důsledně dodržen tradiční význam termínu prudká růstová změna, z Tabulky 2 je dobře patrné, že při analýze vývrtů a výsečí s relativně krátkým časovým rozsahem je ztotožnění prudkých růstových změn s pointer years dostačující. Podíl lavinových roků určených pomocí tohoto indikátoru a zároveň podle katastru je srovnatelný s jinými indikátory; navíc bylo v tomto případě možné definovat hraniční hodnotu pro zrychlení přírůstu poměrně vysokou (pro zpomalení analogicky nízkou). V případě, že bychom trvali na tradičním pojetí, které definuje prudkou růstovou změnu jako tři po sobě jdoucí roky s danou odchylkou (SCHWEINGRUBER 1996), byl by pomocí tohoto indikátoru při daných hraničních mírách vymezen jediný lavinový rok u jediného vzorku (1989-1990, 5A). Pokud bychom zároveň chtěli přibližně zachovat množství vymezených lavinových roků, museli bychom pozměnit použité hraniční hodnoty, což by ve svém důsledku mohlo vést ke vzrůstu podílu nesprávně vymezených roků.

Určitou nejistotu při interpretaci dosažených výsledků také představuje otázka, jak vyhodnotit situaci, kdy po sobě následuje několik let s dendrochronologicky vymezeným výskytem laviny. Nabízí se totiž v podstatě dvě krajní možnosti – v každém z po sobě jdoucích roků skutečně disturbance opakovaně vznikla a ovlivnila růst dřeviny, anebo k ní došlo pouze v roce prvním, ale její následky přetrvávaly déle. Zásadní kritérium pro výběr jedné z těchto možností interpretace by mělo asi být založeno na frekvenci výskytu eventů svahových pochodů v dané oblasti. Například Schustlerův žlab je třetí nejaktivnější lavinová dráha Labského dolu (SPUSTA, KOCIÁNOVÁ 1998) s průměrným počtem v katastroch zaznamenaných lavin  $0,54 \text{ rok}^{-1}$ . Vzhledem k tomu byl považován každý rok s překročenou hodnotou  $\frac{3}{4}$  bodu.vzorek<sup>-1</sup> za lavinový; ve chvíli, kdy by byl výskyt gravitačního pohybu v zájmové lokalitě prokazatelně „řidší“, bylo by pravděpodobně vhodnější volit druhý přístup. Z obrázku 17 je patrné, že v případě dvou po sobě následujících dendrochronologicky vymezených lavinových roků byly většinou oba potvrzeny i katastry. Jediná situace, kdy by bylo vhodnější uvažovat pouze první rok s překročenou kritickou hodnotou, bylo již výše několikrát zmiňované období mezi roky 1990-1992, kdy písemné záznamy skutečně potvrzují výskyt laviny jenom v prvním roce. Specifikou tohoto případu bylo, že vypočtené indikátory

prudkých růstových změn a podílů letokruhových indexů v prvních dvou letech shodně naznačují pokles přírůstu a v roce třetím naopak jeho dramatické zrychlení, pravděpodobně po aklimatizaci na nově vzniklé podmínky. Nabízí se tak otázka pro případný další výzkum, zda by mohla být taková změna v charakteru přírůstových anomálií využita pro rozlišení případů, kdy došlo k několika disturbancím v letech po sobě a kdy se jedná o následek jedné větší laviny.

## 8. Závěr

Svahové pohyby bezpochyby patří mezi přírodní ohrožení, jejichž riziko nelze podceňovat. Dendrochronologie může využít celé řady růstových reakcí a anatomických změn dřevin postižených lavinami, tekoucími svahovými pohyby, sesuvy i skalním řícením k rekonstrukci těchto procesů a tak poskytnout cenné informace nejenom pro orgány územního plánování. Použitelnost jednotlivých indikátorů disturbance se značně liší v závislosti na charakteru studovaného svahového pohybu (za určitých okolností dokonce umožňuje jejich rozlišení). Rozdíly ale nemusí být jenom v aplikovatelnosti různých indikátorů, jednotlivé gravitační pochody se od sebe mohou lišit také převažujícím způsobem odběru vzorků, jejich obvyklým množstvím, používanými statistickými veličinami či obecnými zákonitostmi interpretace dosažených výsledků.

I přes nastíněnou širokou aplikovatelnost dendrogeomorfologických metod pro určování stáří svahových pohybů, jsou odborné studie jich využívající poměrně nerovnoměrně geograficky rozmístěny. „Masově“ dochází k jejich používání v podstatě pouze ve Švýcarsku (či v širším regionu Alp), tradiční oblastí stále zůstává Montana (USA), naopak nově se pozornost zaměřuje i na pohoří Pyreneje a argentinské Andy. V dalších částech světa je dendrochronologický výzkum prováděn spíše sporadicky, což platí i o České republice, kde je největší zájem věnován murám Moravskoslezských Beskyd a sesuvům v Krušných horách, případně i Českému středohoří.

Pomocí aplikace rozličných dendrochronologických metod bylo možné provést datování výskytu 14 lavinových roků v Schustlerově žlabu v Krkonoších. Podíl lavin vymezených dendrochronologicky, pro které zároveň existuje písemný doklad, je srovnatelný s moderními odbornými studiemi, což dokládá, že použité indikátory umožňují dosáhnout relativně kvalitních výsledků i v případě, že množství analyzovaných vzorků je malé. Některé z použitých indikátorů potřebují pro dosažení dostatečně validních výsledků vyjasnit některé okolnosti interpretace výsledných hodnot (např. určení excentricity u výsečí nebo problematika několika po sobě jdoucích roků s přírůstovou anomálií). Jako velmi výhodné se naopak jeví využití přístupu použitého i ve studii zaměřené na výskyt lavin v Argentině (CASTELLER ET AL. 2011), který se ukázal jako dobrý nástroj k odfiltrování celé řady roků, u kterých například pouze jeden indikátor disturbance poukazoval na činnost laviny. Celkově tak byl doložen dobrý potenciál pro datování stáří vzniku lavin v českých pohořích, kde, i přes nezanedbatelnou míru rizika i přírodovědné hodnoty tohoto procesu, použití dendrochronologických metod stále téměř zcela zůstává „terrou incognitou“.

## Seznam použité literatury a zdrojů

- ARBELLAY, E., STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M. (2010): Dendrogeomorphic reconstruction of past debris-flow activity using injured broad-leaved trees. *Earth Surface Processes and Landforms*. 35, s. 399-406.
- BODOQUE, J. M., DÍEZ-HERRERO, A., MARTÍN-DUQUE, J. F., RUBIALES, J. M., GODFREY, A., PEDRAZA, J., CARRASCO, R. M., SANZ, M. A. (2005): Sheet erosion rates determined by using dendrogeomorphological analysis of exposed tree roots: Two examples from Central Spain. *Catena*. 64, s. 81-102.
- BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M. (2007): Debris flows on forested cones – reconstruction and comparison of frequencies in two catchments in Val Ferret, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 7, s. 207-218.
- BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M. (2010): Variations in debris-flow occurrence in an Alpine catchment – A reconstruction based on tree rings. *Global and Planetary Change*. 73, s. 186-192.
- BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M., EHMISCH, M., MONBARON, M. (2007): Reconstructing spatio-temporal patterns of debris-flow activity using dendrogeomorphological methods. *Geomorphology*. 87, s. 337-351.
- BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M., SCHNEUWLY, D. M. (2008): Dynamics in debris-flow activity on a forested cone – A case study using different dendroecological approaches. *Catena*. 72, s. 67-78.
- BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M., VÁZQUEZ-SELEM, L., PALACIOS, D. (2010): Tree-ring reconstruction of past lahar activity at Popocatepetl volcano, México. *The Holocene*. 20/2, s. 265-274.
- BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M., SCHLÄPPY, R. (2011): Debris-flood reconstruction in a pre-alpine catchment in Switzerland based on tree-ring records of coniferous and broadleaved trees. *Geografiska Annaler Series*. 93, s. 1-15.
- BRAAM, R. R., WEISS, E. J. J., BURROUGH, P. A. (1987): Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena*. 14, s. 573-584.
- BURDA, J. (2010): Dendrogeomorfologická analýza dynamiky svahových pohybů v lokalitě Jezeří. *Geografie*. 115/4, s. 440-460.
- BUTLER, D. R., SAWYER, C. F. (2008): Dendrogeomorphology and high-magnitude snow avalanches: a review and case study. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 8, s. 303-309.
- CARRARA, P. E., O'NEILL, J. M. (2003): Tree-ring dated landslide movements and their relationship to seismic events in southwestern Montana, USA. *Quaternary Research*. 59, s. 25-35.
- CASTELLER, A., STÖCKLI, V., VILLALBA, R., MAYER, A. C. (2007): An Evaluation of Dendroecological Indicators of Snow Avalanches in the Swiss Alps. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*. 39(2), s. 218-228.
- CASTELLER, A., VILLALBA, R., ARANEO, D., STÖCKLI, V. (2011): Reconstructing temporal patterns of snow avalanches at Lago del Desierto, southern Patagonian Andes. *Cold Regions Science and Technology*. 67, s. 68-78.
- COROMINAS, J., MOYA, J. (1999): Reconstructing recent landslide activity in relation to rainfall in Llobregat river basin, Eastern Pyrenees, Spain. *Geomorphology*. 30, s. 79-93.
- CORONA, CH., ROVÉRA, G., JÉRÔME, L. S., STOFFEL, M., PARFETTINI, P. (2010): Spatio-temporal reconstruction of snow avalanche activity using tree rings: Pierres Jean Jeanne avalanche talus, Massif de l'Oisans, France. *Catena*. 83, s. 107-118.
- DAŇHELKA, J. (2001): Dendrogeomorfologický výzkum sesuvné lokality u Čeřeniště. *Geografie*. 106/3, s. 166-177.
- DECAULNE, A., SÆMUNDSSON, Þ. (2008): Dendrogeomorphology as a tool to unravel snow-avalanche activity: Preliminary results from the Fnjóskadalur test site, Northern Iceland. *Norwegian Journal of Geography*. 62, s. 55-65.
- DORREN, L. K. A., BERGER, F. (2005): Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. *Tree physiology*. 26, s. 63-71.
- DRÁPELA, K., ZACH, J. (2000): Dendrometrie (Dendrochronologie). Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně. Brno. 152 s.
- DUNCKER, P., SPIECKER, H. (2008): Cross-sectional compression wood distribution and its relation to eccentric radial growth in *Picea abies* [L.] Karst. *Dendrochronologia*. 26, s. 195-202.
- FANTUCCI, R., SORRISO-VALVO, M. (1999): Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago, Calabria (Italy). *Geomorphology*. 30, s. 165-174.
- FRIEDMAN, J., M., VINCENT, K., R., SHAFROTH, P., B. (2005): Dating floodplain sediments using tree-ring response to burial. *Earth Surface Processes and Landforms*. 30, s. 1077-1091.
- GÄRTNER, H. (2007a): Glacial landforms, tree rings – Dendrogeomorphology. In: Elias, S., A.: *Encyclopedia of Quaternary Science*. University of London. s. 979-988.
- GÄRTNER, H. (2007b): Tree roots – Methodological review and new development in dating and quantifying erosive processes. *Geomorphology*. 86, s. 243-251.
- GÄRTNER, H., HEINRICH, I. (2009): The Formation of Traumatic Rows of Resin Ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* (Pinaceae) as a Result of Wounding Experiments in the Dormant Season. *IAWA Journal*. 30(2), s. 199-215.
- GUIDA, D., PELFINI, M., SANTILLI, M. (2008): Geomorphological and dendrochronological analyses of a complex landslide in the southern Apennines. *Geografiska Annaler*. 90A(3), s. 211-226.
- HEINRICH, I., GÄRTNER, H. (2008): Variations in tension wood of two broad-leaved tree species in response to different mechanical treatments: implications for dendrochronology and mass movement studies. *International Journal of Plant Sciences*. 169(7), s. 928-936.

- HITZ, O. M., GÄRTNER, H., HEINRICH, I., MONBARON, M. (2008): Wood anatomical changes in roots of European ash (*Fraxinus excelsior* L.) after exposure. *Dendrochronologia*. 25(3), s. 145-152.
- KENT, M., OWEN, N. W., DALE, P., NEWNHAM, R. M., GILES, T. M. (2001): Studies of vegetation burial: a focus for biogeography and biogeomorphology?. *Progress in Physical Geography*. 25(4), s. 455-482.
- KÖSE, N., AYDIN, A., AKKEMIK, Ü., YURTSEVEN, H., GÜNER, T. (2010): Using tree-ring signals and numerical model to identify the snow avalanche tracks in Kastamonu, Turkey. *Natural Hazards*. 54(2), s. 435-449.
- KUKAL, Z., POŠMOURNÝ, K. (2005): Přírodní katastrofy a rizika. Ministerstvo životního prostředí České republiky. Praha. 51 s.
- LANG, A., MOYA, J., COROMINAS, J., SCHROTT, L., DIKAU, R. (1999): Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology*. 30, s. 33-52.
- LAXTON, S. C., SMITH, D. J. (2009): Dendrochronological reconstruction of snow avalanche activity in the Lahul Himalaya, Northern India. *Natural Hazards*. 49, s. 459-467.
- MALIK, I. (2006): Gully erosion dating by means of anatomical changes in exposed roots (Proboszczowicka plateau, southern Poland). *Geochronometria*. 25, s. 57-66.
- MALIK, I., MATYJA, M. (2008): Bank erosion history of a mountain stream determined by means of anatomical changes in exposed tree roots over last 100 years (Bílá Opava River – Czech republic). *Geomorphology*. 98, s. 126-142.
- MALIK, I., OWCZAREK, P. (2009): Dendrochronological records of debris flow and avalanche activity in a mid-mountain forest zone (Eastern Sudetes – Central Europe). *Geochronometria*. 34, s. 57-66.
- MAYER, B., STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M., HÜBL, J., RUDOLF-MIKLAU, F. (2010): Frequency and spread of debris floods on fans: A dendrogeomorphic case study from a dolomite catchment in the Austrian Alps. *Geomorphology*. 118, s. 199-206.
- MIGON, P., PÁNEK, T., MALIK, I., HRÁDECKÝ, J., OWCZAREK, P., ŠILHÁN, K. (2010): Complex landslide terrain in the Kamienne Mountains, Middle Sudetes, SW Poland. *Geomorphology*. 124, s. 200-214.
- MOYA, J., COROMINAS, J., PÉREZ ARCAS, J., BAEZA C. (2010): Tree-ring based assessment of rockfall frequency on talus slopes at Solà d'Andorra, Eastern Pyrenees. *Geomorphology*. 118, s. 393-408.
- MUNDO, I. A., BARRERA, M., D., ROIG, F., A. (2007): Testing the utility of *Nothofagus pumilio* for dating a snow avalanche in Tierra del Fuego, Argentina. *Dendrochronologia*. 25, s.19-28.
- MUNTÁN, E., GARCÍA, C., OLLER, P., MARTÍ, G., GARCÍA, A., GUTIÉRREZ, E.(2009): Reconstructing snow avalanches in the Southeastern Pyrennes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 9, s. 1599-1612.
- NEUWIRTH, B., ESPER, J., SCHWEINGRUBER, F. H., WINIGER, M. (2004): Site ecological differences to the climatic forcing of spruce pointer years from the Löttschental, Switzerland. *Dendrochronologia*. 21/2, s. 69-78.
- PAOLINI, L., VILLALBA, R., RICARDO GRAU, H. (2005): Precipitation variability and landslide occurrence in a subtropical ecosystem of NW Argentina. *Dendrochronologia*. 22, s. 175-180.
- PERRET, S., STOFFEL, M., KIENHOLZ, H. (2006): Spatial and temporal rockfall activity in a forest stand in the Swiss Prealps – A dendrogeomorphological case study. *Geomorphology*. 74, s. 219-231.
- RAŠKA, P. (2007): Comments on the recent dynamics of scree slopes in the Czech Middle Mountains. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*. 7(1), s. 43-49.
- REARDON, B. A., PEDERSON, G. T., CARUSO, C. J., FAGRE, D. B.(2008): Spatial Reconstructions and Comparisons of Historic Snow Avalanche Frequency and Extent Using Tree Rings in Glacier National Park, Montana, U.S.A. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*. 40(1), s. 148-160.
- SANTILLI, M., PELFINI, M. (2002): Dendrogeomorphology and dating of debris flows in the Valle del Gallo, Central Alps, Italy. *Dendrochronologia*. 20/3, s. 269-284.
- SHRODER, J. F.(1978): Dendrogeomorphological Analysis of Mass Movement on Table Cliffs Plateau, Utah. *Quaternary research*.9, s. 168-185.
- SCHNEUWLY, D., M., STOFFEL, M. (2008): Spatial analysis of rockfall activity, bounce heights and geomorphic changes over the last 50 years – A case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*. 102, s. 522-531.
- SCHNEUWLY, D., M., STOFFEL, M., BOLLSCHWEILLER, M. (2009): Formation and spread of calus tissue and tangential rows of resin ducts in *Larix decidua* and *Picea abies* following rockfall impacts. *Tree Physiology*. 29, s. 281-289.
- SCHWEINGRUBER, F. H. (1996): Tree rings and Enviroment. *Dendroecology*. Biermersdorf, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research. Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt, 609 s.
- SPUSTA, V., KOČIÁNOVÁ, M. (1998): Lavinový katastr české části Krkonoš v období 1961/62-1997/98. *Opera Corcontica*. 35, s. 3-205.
- SPUSTA, V., SPUSTA, V. jun., KOČIÁNOVÁ, M. (2003): Lavinový katastr a zimní situace na hřebenu české části Krkonoš v období 1998/1999-2002/2003. *Opera Corcontica*. 40, s. 5-86.
- SPUSTA, V., SPUSTA, V. jun., KOČIÁNOVÁ, M. (2006): Lavinový katastr české části Krkonoš v zimním období 2003/04 až 2005/06. *Opera Corcontica*. 43, s. 81-93.
- SORG, A., BUGMANN, H., BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M.(2010): Debris-flow activity along a torrent in the Swiss Alps: Minimum frequency of events and implications for forest dynamics. *Dendrochronologia*. 28, s. 215-223.



- STEFANINI, M., C. (2004): Spatio-temporal analysis of a complex landslide in the Northern Apennines (Italy) by means of dendrochronology. *Geomorphology*. 63, s. 191-202.
- STOFFEL, M. (2008): Dating past geomorphic processes with tangential rows of traumatic resin ducts. *Dendrochronologia*. 26, s. 53-60.
- STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M. (2008): Tree-ring analysis in natural hazards research – an overview. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. 8, s. 187-202.
- STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M. (2009): What Tree Rings Can Tell About Earth-Surface Processes: Teaching the Principles of Dendrogeomorphology. *Geography Compass*. 3/3, s. 1013-1037.
- STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M., HASLER, G. (2006): Differentiating past events on a cone influenced by debris-flow and snow avalanche activity – a dendrogeomorphological approach. *Earth Surface Processes and Landforms*. 31, s. 1424-1437.
- STOFFEL, M., HITZ, O., M. (2008): Rockfall and snow impacts leave different anatomical signatures in tree rings of juvenile *Larix decidua*. *Tree Physiology*. 28, s. 1713-1720.
- STOFFEL, M., PERRET, S. (2006): Reconstructing past rockfall activity with tree rings: Some methodological considerations. *Dendrochronologia*. 24, s. 1-15.
- STOFFEL, M., LIÈVRE, I., CONUS, D., GRICHTING, M., A., RAETZO, H., GÄRTNER, H., W., MONBARON, M. (2005a): 400 Years of Debris-Flow Activity and Triggering Weather Conditions: Ritigraben, Valais, Switzerland. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 37(3), s. 387-395.
- STOFFEL, M., SCHNEUWLY, D., BOLLSCHWEILER, M., LIÈVRE, I., DELALOYE, R., MYINT, M., MONBARON, M. (2005b): Analyzing rockfall activity (1600-2002) in a protection forest – a case study using dendrogeomorphology. *Geomorphology*. 68, s. 224-241.
- STRUNK, H. (1997): Dating of geomorphological processes using dendrogeomorphological methods. *Catena*. 31, s. 137-151.
- SZYMCZAK, S., BOLLSCHWEILER, M., STOFFEL, M., DIKAU, R. (2010): Debris-flow activity and snow avalanches in a steep watershed of the Valais Alps (Switzerland): Dendrogeomorphic event reconstruction and identification of triggers. *Geomorphology*. 116, s. 107-114.
- ŠILHÁN, K. (2010a): Dendrogeomorphology of spatio-temporal activity of rockfall in the flysch Carpathians: a case study on the western slope of Mt. Smrk, Moravskoslezské Beskydy Mts. (Czech republic). *Moravian Geographical Reports*. 18, s. 33-42.
- ŠILHÁN, K. (2010b): Dendrochronologické datování blokovobahenních proudů (příkladová studie Slavíč; Moravskoslezské Beskydy). In: *Geologické výzkumy na Moravě a ve Slezsku v roce 2010*. Brno. s. 92-95.
- ŠILHÁN, K., PÁNEK, T. (2008): Historická chronologie blokovobahenních proudů v Moravskoslezských Beskydech. *Geomorphologia Slovaca et Bohemica*. 8(1), s. 82-94.
- VAN DEN EECKHAUT, M., MUYS, B., VAN LOY, K., BEECKMAN, H. (2009): Evidence for repeated re-activation of old landslide under forest. *Earth surface processes and landforms*. 34, s. 352-365.
- VAVRČÍK, H. (2002): Anatomická stavba dřeva. Multimediální výukový materiál - verze 1.04a. Ústav nauky o dřevě, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně.  
dostupné z [http://wood.mendelu.cz/nod/e107\\_cz/nod\\_plugins/projects/stavba\\_dreva/index.htm](http://wood.mendelu.cz/nod/e107_cz/nod_plugins/projects/stavba_dreva/index.htm) (4.11.2010)
- VILÍMEK, V., FANTUCCI, R., STEMBERK, J. (2002): Dendrogeomorphological investigations of slope deformation on Salesius Hill in Krušné Hory Mts. In: *Rybář, J., Stemberk, J., Wagner, P.: Landslides*. A.A.Balkema Publishers. Lise, Abingdon, Exton(pa), London. s. 321-326.
- VOTRUBOVÁ, O. (2001): Anatomie rostlin. Učební texty Univerzity Karlovy v Praze. Karolinum. Praha. 89 s.
- WIECZOREK, G. F., SCOTT EATON, L., YANOSKY, T. M., TURNER, E. J. (2006): Hurricane-induced landslide activity on an alluvial fan along Meadow Run, Shenandoah Valley, Virginia (eastern USA). *Landslides*. 3, s. 95-106.
- WILES, G. C., CALKIN, P. E., JACOBY, G. C. (1996): Tree-ring analysis and Quaternary geology: Principles and recent applications. *Geomorphology*. 16, s. 259-272.
- YOSHIDA, K., KIKUCHI, S., NAKAMURA, F., NODA, M. (1997): Dendrochronological analysis of debris flow disturbance on Rishiri Island. *Geomorphology*. 20, s. 135-145.
- ZÁRUBA, Q., MENCL, V. (1987): *Sesuvy a zabezpečování svahů*. 2. vydání. Academia. Praha. 340 s.
- ŽÍŽALA, D., ZVELEBIL, J., VILÍMEK, V. (2010): Using dendrogeomorphology in research on a slope deformation in Běleč, Czech-Moravian Highland (Czech republic). *Acta Universitatis Carolinae-Geographica*. 2, s. 73-88.

## Seznamy obrázků, tabulek a příloh

### Seznam obrázků

Obrázek 1. Schéma vzniku buněčné stěny při periklinálním (nahore) a antiklinálním dělení kambia .	11
Obrázek 2. Anatomická stavba dřeva jehličnanu (vlevo) a roztroušeně pórovitého listnáče, <i>Picea abies</i> a <i>Tilia platyphyllos</i> (přibližné zvětšení 50x) .....	12
Obrázek 3. Dřevo s vylišenou jádrovou a bělovou částí, <i>Robinia pseudoacacia</i> .....	13
Obrázek 4. Změna tvaru letokruhů z kruhových na eliptické .....	16
Obrázek 5. Dva náhlé poklesy šířek letokruhů – možné důsledky disturbance, <i>Picea abies</i> .....	17
Obrázek 6. Srovnání detailní anatomické struktury kompresního dřeva (vlevo) a „normálního“ dřeva, <i>Picea abies</i> (přibližné zvětšení 200x) .....	21
Obrázek 7. Typická anatomická stavba dřeva kořenů (vlevo) a nadzemních částí, <i>Picea abies</i> (přibližné zvětšení 50x).....	23
Obrázek 8. Výrazně vyvinuté řady traumatických pryskyřičných kanálků, <i>Picea abies</i> (přibližné zvětšení 50x) .....	27
Obrázek 9. Tvar letokruhů v místě jizvy (vlevo) a chaoticky uspořádané buňky hojivého pletiva v okolí rány, <i>Picea abies</i> (přibližné zvětšení mikrosnímku 50x).....	30
Obrázek 10. Rozmístění jizev po kmeni u skalního řícení (a) a možné trajektorie padajících klastů v zalesněném území (b).....	37
Obrázek 11. Rozmístění jizev po kmeni u bahnotoku (a) a plošný rozsah zasaženého území (b).....	40
Obrázek 12. Ortosnímek Schustlerova žlabu a jeho poloha v rámci NP Krkonoše .....	43
Obrázek 13. Analyzované vývrty (odshora) 1, 2, 5B a 5A (fotografovány v nestejných měřítcích) ....	44
Obrázek 14. Analyzované výseče č. 3 (vlevo) a č. 4 s vyznačenými směry jednotlivých měření .....	45
Obrázek 15. Časový rozsah vzorků a zaznamenané indikátory disturbance.....	50
Obrázek 16. Počty zaznamenaných indikátorů disturbance a vývoj hloubky souboru .....	51
Obrázek 17. Dendrochronologicky vymezené laviny a chronologie písemných záznamů .....	58

### Seznam tabulek

Tabulka 1. Analyzovaný materiál a parametry jednotlivých indikátorů.....	48
Tabulka 2. Míra shody mezi lavinovými roky určenými pomocí použitých indikátorů a písemnými záznamy.....	59

### Seznam příloh

Příloha I - Metaanalýza dendrogeomorfologické literatury