

Využití dendrochronologie při inženýrsko-geologickém průzkumu svahových deformací Mostecké pánve

RNDr. Jan Burda, Ph.D.¹, Mgr. Jan Tumajer^{2,3}

¹Výzkumný ústav pro hnědé uhlí a.s., Most; burda@vuhu.cz

²Katedra Fyzické geografie a Geoekologie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Karlova v Praze

³IFER - Ústav pro výzkum lesních ekosystémů, s.r.o., Čs. armády 655, Jílové u Prahy

Přijato: 5. 4. 2016, recenzováno: 8. a 30. 8. 2016

Abstrakt

Dendrochronologie je jednou z metod absolutního datování, která je založena na hodnocení způsobu reakce dřevin na různé přírodní procesy jako jsou například svahové pohyby, blokovobahenní proudy, laviny, záplavy, eroze nebo sopečné události. Analýza šířek a tvarů letokruhů, stejně jako studium anatomických změn dřeva, umožňují rekonstrukci těchto přírodních procesů včetně jejich dopadu, rozsahu a frekvence. Tento článek prezentuje, jak může být dendrochronologie použita v inženýrsko-geologickém výzkumu a při hodnocení přírodních ohrožení ve specifických podmínkách antropogenního reliéfu Mostecké pánve. Článek rovněž předkládá výsledky výzkumů případových studií zpracovaných na různých lokalitách Mostecké pánve v průběhu posledních dvou desetiletí.

The role of dendrochronology in the engineering-geology research of landslides within the Most basin

Dendrochronology is a method of the absolute dating based on the evaluation of the response of woody plants to different natural processes, e.g., mass movements, debris flows, avalanches, floods, erosion and volcanic events. Tree-ring width analysis as well as quantitative wood anatomy allow reconstruction of the former natural processes, together with their impact, magnitude, severity and frequency. This article describes how dendrochronology can be used in the natural hazard research in specific conditions of anthropogenic relief of the Most basin. Results of case studies performed during the last two decades are presented as well.

Nutzung der Dendrochronologie bei der ingenieur-geologischen Untersuchung von Böschungsverformungen im Moster Becken

Die Dendrochronologie ist eine der absoluten Datierungsmethoden, die auf der Bewertung der Reaktionsweise von Gehölze auf verschiedene natürliche Prozesse, z. B. Böschungsbewegungen, Murgänge, Lawinen, Überflutungen, Erosionen oder vulkanische Erscheinungen, basiert. Analysen der Jahrringbreiten und deren Form, sowie auch das Studium der anatomischen Holzveränderungen, ermöglichen Rekonstruktion dieser natürlichen Prozesse inkl. deren Einwirkung, Umfang und Häufigkeit. Dieser Artikel präsentiert, wie die Dendrochronologie in ingenieur- geologischer Forschung und bei der Bewertung der Bedrohungen durch Naturprozesse unter spezifischen Bedingungen in anthropogener Reliefform des Moster Beckens verwendet werden kann. Der Artikel legt auch Ergebnisse der Forschungen von Fallstudien offen, die auf verschiedenen Lokalitäten des Moster Beckens im Laufe der letzten zwanzig Jahre erarbeitet wurden.

Klíčová slova: dendrochronologie, antropogenní reliéf, svahové pohyby, Mostecká pánev.

Keywords: dendrochronology, anthropogenic relief, mass movements, Most basin.

1 Úvod

Dendrochronologie jako vědní disciplína je v posledních desetiletích dynamicky se rozvíjejícím vědním oborem. Od 90. let minulého století přinesly jednotlivé podobory dendrochronologie řadu zajímavých a významných poznatků. Dendroekologie, dendroklimatologie, dendroarcheologie, dendrohydrologie i dendrogeomorfologie se vyvinuly v samostatné disciplíny, které jsou využívány k exaktnímu datování různých procesů a událostí. V dendrogeomorfologii se jedná např. o sesuvy a blokovobahenní proudy [1,2], skalní řícení [3]; laviny [4]; vulkanické erupce [5 a 6], to vše často v kontextu s klimatickými změnami [7].

Dendrochronologie je metoda rekonstrukce přírodních podmínek v minulosti, založená na analýze letokruhů stromů. Jedná se o datovací metodu, která je široce aplikovatelná (hlavně pro mladší období geologické historie) a umožňuje dosažení velmi přesných výsledků [8]. 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 [8]. Ačkoliv je délka života stromu z pohledu geologického času relativně krátká, je možné dendrochronologické přístupy aplikovat i pro dataci velmi starých událostí, a to využitím starého stavebního dříví a pohřbených zbytků, a jejich křížového datování s již existujícími letokruhovými chronologiemi [9]. To dělá z dendrochronologie vysoce přesnou a široce aplikovatelnou datovací metodu.

Z inženýrsko-geologického pohledu a z pohledu ocenění přírodních hazardů je znalost historických aspektů zkoumaného jevu (např. svahových pohybů) neocenitelná. Základním předpokladem pro využití dendrochronologických metod k jejich dataci je, že energie svahových pohybů způsobuje změnu lokálních ekologických podmínek v zasažené oblasti, na které dřeviny reagují změnou parametrů růstu [10]. Tato zásadní myšlenka vychází z principu „Proces-Událost-Odezva“ [11]. Procesem se v tomto případě rozumí geomorfologický činitel (např. sesuv, zemětřese-

ní, 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 přizpůsobením, 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 jasná příčinná souvislost, je možné využít k rekonstrukci daného geomorfologického procesu. Vegetace tak svým růstem přímo odráží podmínky působící na daném stanovišti, dendrochronologie pak využívá míry ročního přírůstu dřeva a proměn v jeho struktuře k rekonstrukci těchto podmínek. Jednotlivé reakce dřevin jsou tedy dobrým ukazatelem roků s působením geomorfologických činitelů [24].

2 Anatomická stavba a tvorba letokruhu

Dendrochronologie je založena na správném pochopení anatomické stavby letokruhu a jeho sezónní tvorby. Dřevo vzniká sekundárním tloušťnutím rostlinného těla, které je zajištěno činností dělivého pletiva kambia, což je skupina nediferencovaných buněk (tzv. iniciál), které si po celou dobu své existence zachovávají dělivou funkci. Vytváří tak směrem do středu kmene buňky sekundárního dřeva (xylému) a směrem vně buňky sekundárního lýka (floému), tedy rostlinná pletiva s vodivou funkcí [12].

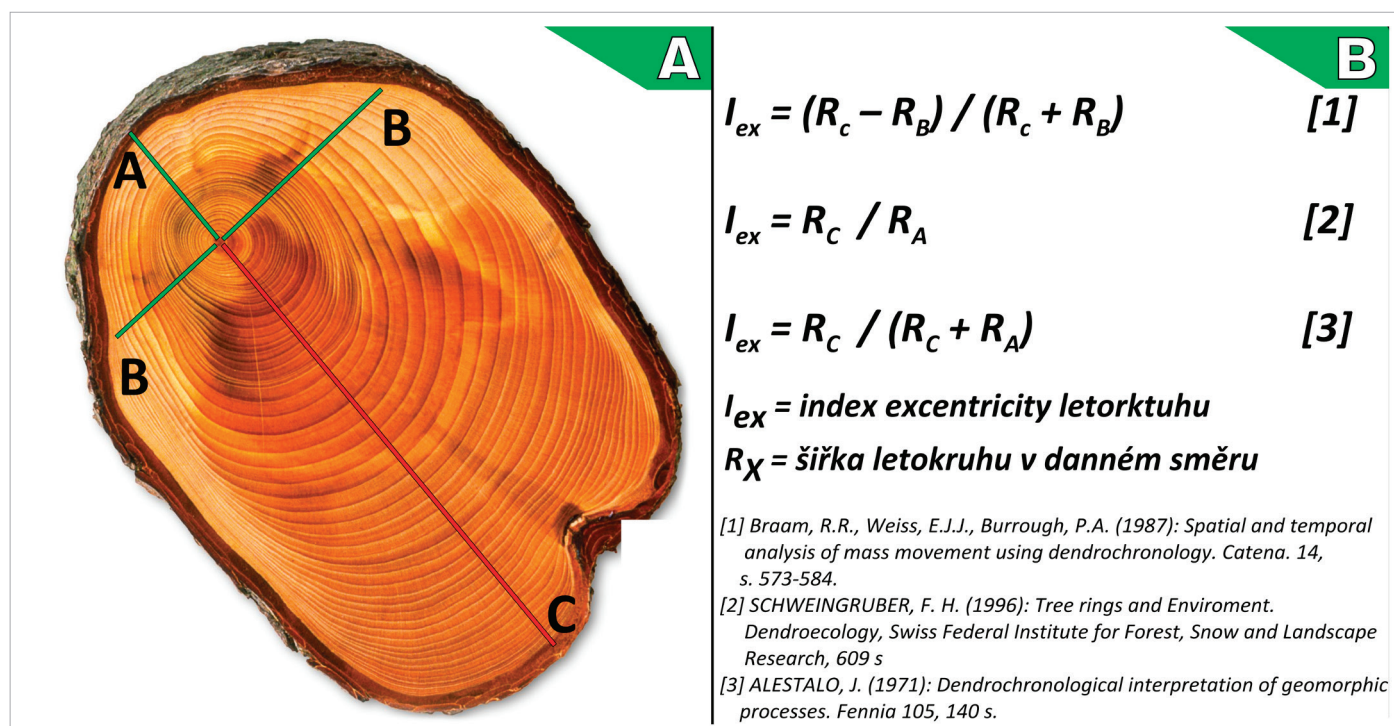
Činnost kambia je omezena pouze na část roku, kdy jsou pro růst příhodné klimatické podmínky. Délka tohoto období se liší místo od místa (v měřítku České republiky hlavně vlivem nadmořské výšky) a rok od roku [13]. Typicky ale v našich podmínkách trvá po dobu 4 měsíců (od května do srpna), s největší aktivitou kambia většinou v červnu. Vzhledem k proměnlivosti počasí probíhá tvorba buněk dřeva na začátku a na konci růstové periody za zcela jiných podmínek, což má za následek změnu jeho makro i mikrostruktury. V jarních měsících vznikají buňky

na příčném průřezu kulatého tvaru s tenkými buněčnými stěnami, které se na transversálním řezu kmenem jeví jako světlé. V průběhu léta zase dochází k tvorbě neisodiametrických buněk se zřetelně ztloustlou buněčnou stěnou; ty zase vytvářejí tmavší vrstvu [14,12]. Toto střídání světlých a tmavých kruhů na příčném průřezu kmenem vytváří charakteristickou strukturu letokruhů. Výše popsané rozdíly mezi jarním a letním dřevem jsou charakteristické pro jehličnany (které jsou nejčastěji využívány pro dendrogeomorfologické účely; [24]), v případě listnáčů je však situace složitější. U tzv. kruhovitě roztroušených jedinců (např. dub, jasan) je jarní a letní dřevo také výrazně odlišné; u zbylých listnáčů s tzv. roztroušenou pórovitostí jsou však rozdíly zcela zanedbatelné.

Základním předpokladem dendrochronologie je výše popsaný mechanismus tvorby dřeva, ale pouze během určité části roku, jenž vede k omezení přesnosti datování geomorfologických procesů pomocí této metody. V případě, že ke geomorfologické disturbanci dojde během vegetačního období, anomálie ve stavbě dřeva se projeví (téměř) okamžitě. Někdy je dokonce možné datovat událost s lepším než ročním rozlišením (např. podle výskytu anatomických anomálií v jarním/letním dřevě). Pokud se však geomorfologická událost vyskytla v době vegetačního klidu, kdy strom neroste, její následky se projevují se zpožděním až v rámci jarního dřeva následujícího letokruhu. Na to je třeba pamatovat při interpretaci výsledků dendrochronologického datování.

3 Principy dendrochronologického datování svahových pohybů

Letokruhovú analýza je základní a zatím nejrozšířenější metoda dendrochronologického datování, která se zaměřuje na hodnocení tvaru a šířky jednotlivých letokruhů [24]. Pro stromy rostoucí na svazích s častým výskytem svahových pohybů jsou typické



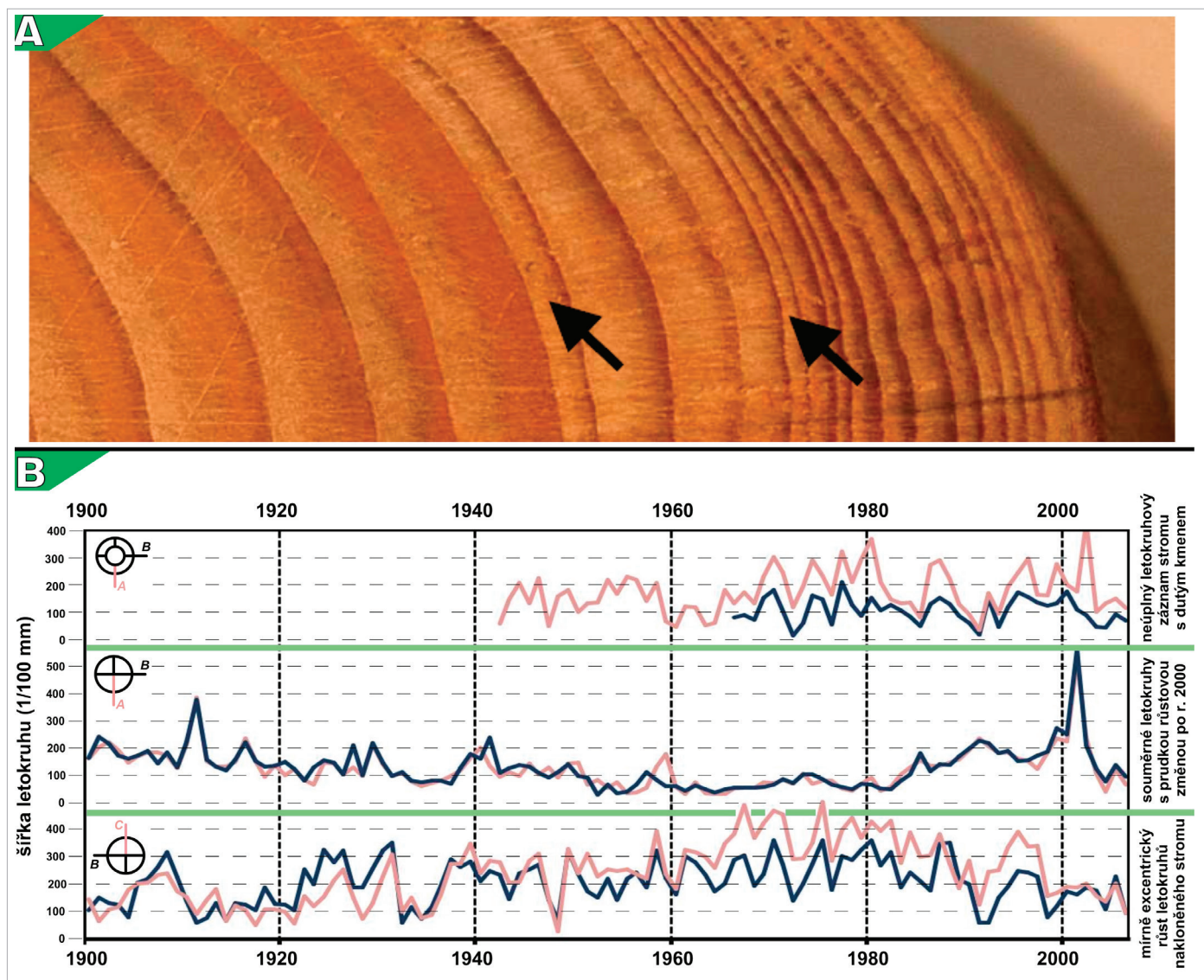
Obr. 1: Změna tvaru kruhových letokruhů na eliptické spojené s tvorbou reakčního dřeva, s naznačením směru odběrů jednotlivých vzorků (A). Základní vztahy pro určení indexu excentricity (B).

excentrické/eliptické letokruhy (obr. 1a), které způsobují makroskopickou deformaci celých kmenů. V oblastech pomalých svahových pohybů typu ploužení jsou typické ohnuté kmeny v části při patě stromu; u rychlých pohybů typu sesouvání je variabilita jejich tvarů vyšší – často u nich dochází k vychýlení z vertikální pozice na různé strany [8]. V případě, že je kmen stromu nakloněn, dochází ke změně anatomické struktury dřeva a vytváří se tahové dřevo (u listnatých stromů) nebo tlakové dřevo (u jehličnatých stromů). Jeho hlavní funkcí je navrácení kmene zpět do vertikální polohy. Hlavní odlišností tohoto tzv. reakčního dřeva je vyšší hustota, což se projevuje tmavším zbarvením, které je zvláště u jehličnanů velmi dobře rozeznatelné [22].

I když deformace kmene může vyvolat i velké množství jiných vlivů, než jsou svahové pohyby, je pro jejich odlišení při dendrochronologické analýze svahových pohybů obvykle postačující základní inženýrsko-geologické zhodnocení lokálních podmínek [23]. Tvar letokruhů může být kvantifikován prostřednictvím výpočtu indexu excentricity (index ukazuje, jak

moc se tvar letokruhu v daném roce blíží kruhu, viz obrázek č. 1b), jinými slovy datováním excentrických letokruhů lze přesně stanovit rok, v jehož průběhu začal strom reagovat na naklonění kmene – svahový pohyb.

Dalším dendrochronologickým parametrem hodnoceným letokruhovou analýzou je míra ročního přírůstu dřeva vyjádřená jako šířka daného letokruhu (obrázek č. 2). Míra tohoto přírůstu může být rovněž ovlivněna vnějšími faktory, což mohou být změny množství dopadajícího světla, mechanické poškození koruny, kmene nebo kořenů, působení větrného proudění, změny teplot a srážek a minerální složení půdy [14]. Tyto faktory pak mohou být přímým důsledkem právě svahových pohybů nebo jiných geomorfologických procesů. V důsledku svahového pohybu mohou být stromy oslabeny tak silně, že umírají. Díky poklesu kompetice se v následujících letech zvyšuje přírůst u přeživších stromů (obrázek č. 2b). U stromů, které událost přežijí, ale jsou velmi výrazně poškozeny (např. ulomená část koruny, přetřhané a vyvrácené kořeny, lokálně poškozené kambium,



Obr. 2: Náhlé poklesy šířek letokruhů – možné důsledky disturbance (A). Rozdílné typy přírůstových křivek, horní obrázek je ze stromu s dutým kmenem, u kterého navíc došlo k odlomení špičky. Prostřední přírůstová křivka je odebrána z neporušeného stromu, u nějž po r. 2000 došlo k prudkému zvýšení růstu. Spodní přírůstová křivka je příkladem mírně excentrického růstu letokruhů po r. 1960, k němuž došlo v důsledku velmi mírného naklání vlivem svahových pohybů (B) (upraveno podle: [14] a [22]).

dochází v dalších letech k drastickému zúžení šířky jejich letokruhů (obrázek č. 2a).

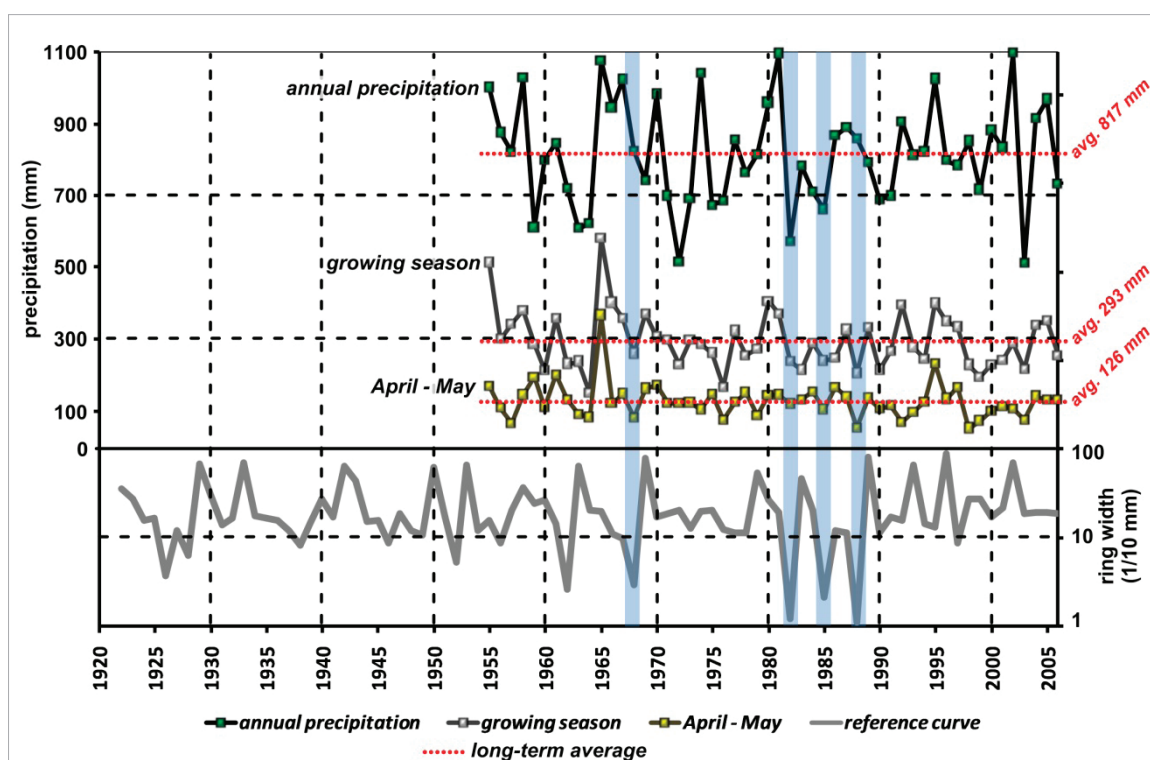
Kromě měření šířek a tvaru letokruhů a identifikace anormálních anatomických struktur je moderním směrem v dendrochronologii i kvantitativní hodnocení anatomické stavby xylému (dřeva). Xylém má 3 hlavní funkce, kterými jsou (i) vertikální vedení vody transpiračním proudem, (ii) vedení vody v horizontálním směru a (iii) mechanická opora. Proto je xylém většiny dřevin složen (v rozdílných zastoupeních u různých druhů) z buněk sklerenchymu (mechanická opora) a parenchymu (horizontální vedení vody). Za nejdůležitější je však z funkčního hlediska možné označit vodivé elementy, tj. cévy a cévice. Cévy se, na rozdíl od cévic, vyskytují pouze u krytosemenných [18]. Vznik a vývoj cév a řízení těchto procesů rostlinnými hormony je detailně popsán např. v publikaci [19].

V případě poškození listnáče při svahovém pohybu dochází k poklesu průměru cév [20], který má u mechanicky poškozených jedinců svoje funkční opodstatnění. Ve větších cévách dochází k efektivnějšímu vedení vody z kořenů do koruny vzhledem k tomu, že tření vodního sloupce o vnitřní povrch stěny je relativně nižší s ohledem na množství proudící vody (se zdvojnásobením poloměru cévy vzroste obvod /tření/ 2x, ale plocha /množství proudící vody/ 4x). S rostoucími plochami cév se ale zvyšuje i riziko přerušení proudu vody v cévě (kavitace,

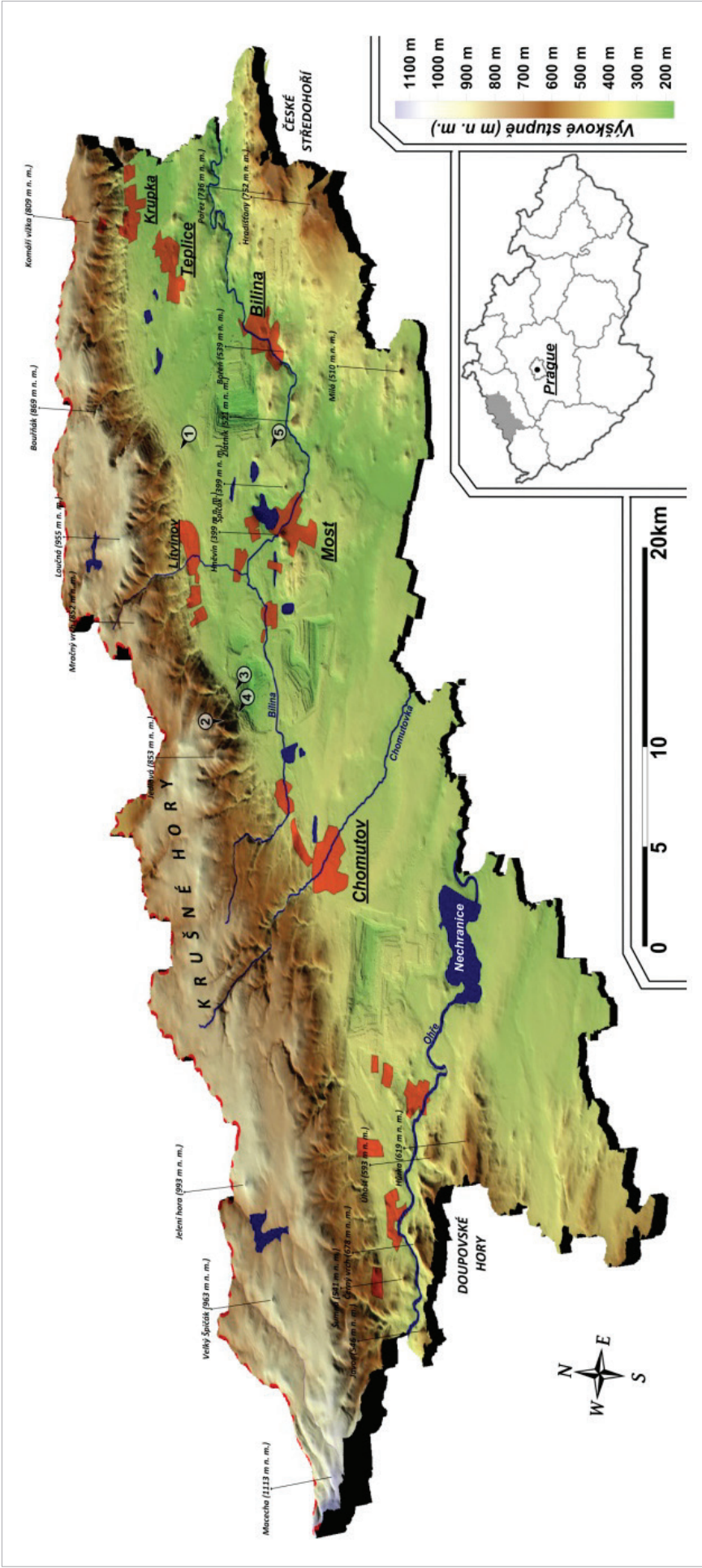
embolie), při kterém hrozí vniknutí vzduchu, obsahujícího např. spory parazitů, dovnitř vodivého elementu. Z tohoto důvodu mají dřeviny přirozenou tendenci v obdobích příznivých pro svůj růst cévy zvětšovat, avšak v momentě mechanického poškození dochází k preferenci menších buněk, které jsou sice méně vodivě efektivní, ale bezpečnější.

3.1 Odběr a zpracování vzorků

Pro každou dendrochronologickou analýzu je vždy třeba ze zkoumaného stromu odebrat jeden až několik vzorků. V závislosti na účelu výzkumu se nejčastěji používá dutý přírůstkový vrták (Presslerův nebozez) různých délek i průměrů, z nějž se jádro (vývrt) odebírá dlouhou tenkou lžící (extraktorem). V některých případech se vzorky získávají smýcením stromu a odříznutím celé výšece, popř. již ze stromů uhynulých, či dokonce jen z pařezů [17]. Přírůstkovým vrtákem se vzorky obvykle odebírají ve výšce cca 130 cm nad zemí, ale samozřejmě lze místo odběru uzpůsobit potřebám výzkumu - lze odvrátat vzorky z kořenů nebo jizev, které mohou být v různých výškách nad zemí. Z kmene stromu se nejčastěji odebírají jeden až čtyři vzorky (dle klíče v obrázek č. 1a) tak, aby bylo možné zhodnotit růstové změny v průřezu celého kmene. Vliv takovýchto odběrů na zdraví stromu bývá minimální. Jelikož je porušena jen malá část kambia, dochází většinou k mírnému zabarvení dřeva



Obr. 3 Porovnání ročních srážek, srážek ve vegetačním období a srážek v období od dubna do května s referenční křivkou sestavou - krušnohorská bučina [15]. Z obrázku je patrná selekce roků (1958, 1982, 1985 a 1988), kdy došlo k výrazným růstovým poklesům, které souvisí s poklesem srážkových úhrnů. Tyto roky bylo nutné následně zohlednit i při hodnocení svahových pohybů na svazích Krušných hor (viz kapitola 3.1), kde byl u zkoumaných stromů brán ohled na fakt, že případné růstové anomálie v těchto letech souvisí s klimatickými vlivy, nikoliv se svahovými pohyby. Annual prec. - roční srážkové úhrny, Growing season - srážky v období kambialní aktivity, April - May - srážky v období měsíců dubna a května, Ring width - šíře letokruhu v daném roce, Long-term average - dlouhodobý srážkový průměr v daném období, Reference curve - referenční křivka (převzato: [16]).



Obr. 4 Prostor Mostecké pánve s vyznačením ploch, v nichž byl prováděn dendrochronologický výzkum zmíněný v tomto článku; 1 – Salesiova výšina, 2 – Kateřinohorská klenba, 3 – dejekční kužel Šramnického potoka, 4 – říční pod Janským vrchem, 5 – Černý vrch.

Tab. 1: Přehled hodnocených dendrochronologických výzkumů realizovaných v prostoru Mostecké pánve.

Publikace	Lokalita	Zkoumaný proces	Počet stromů	Metoda	Počet vzorků	Druh	Rozsah souboru	Nejstarší záznam
Vilímek et al., 2002 [19]	Salesiova výšina	soliflukce	6	letokruhová analýza	12	dub	1839 - 1997	1832
Burda, 2011 [14]	Kateřinohorská klenba	ploužení zvětralinového pláště	50	letokruhová analýza	108	buk lesní	1900 - 2006	1793
Tumajer, Burda, 2013 [24]	dejekční kužel Šramnického potoka	sesouvání	24	anatomie	67	bříza bělokorá	2009-2011	zima 2010/11
Tumajer et al., 2015 [29]	Janský vrch	skalní odvalová říční	15	anatomie	52	bříza bělokorá	2001 - 2013	zima 2010/11

a pouze lokálnímu přerušení transpiračního toku.

Odebrané vzorky je vhodné následně vlepít do připravené dřevěné laboratorní lišty a zbrousit tak, aby letokruhová kresba byla lépe čitelná. Takto připravené vzorky lze následně analyzovat s využitím mikroskopu a přesné měřicí aparatury TimeTable, která umožňuje měření šířek letokruhů s přesností na μm .

Pokud je cílem dendrogeomorfologické analýzy i hodnocení anomálií v anatomické stavbě dřeva, případně měření velikosti jednotlivých buněk, je většinou nutné připravit trvalé mikroskopické preparáty [18]. Při tom je nutné z vodou nasyceného vzorku dřeva uříznout (nejčastěji pomocí mikrotomu) tenký plátek (20–25 μm), který je následně možné pozorovat v procházejícím světle mikroskopu. Pro zvýšení optického kontrastu mezi buněčnými stěnami a lumeny (vnitřky buněk) se vzorek barví směsí barviv Safranin a Astra modř, která dodává vzorku modro-červené zbarvení. Ačkoliv existují i jiné barvicí roztoky a jejich směsi, kombinace dvou výše uvedených barviv vede ke kontrastnímu zbarvení různých typů buněk a buněčných stěn, které je výhodné při následném mikroskopickém pozorování a analýze obrazu. V případě, že se vzorek v dalším kroku odvodní (pomocí proplachování etanolem s postupně se zvyšující koncentrací), je ho následně možné trvale zafixovat mezi podložní a krycí sklo. Takto připravený vzorek se následně nasnímá digitálním fotoaparátem připojeným k mikroskopu a dále se obraz analyzuje pomocí specializovaných programů.

3.2 Referenční křivka

Každé datování konkrétních geomorfologických procesů je třeba konfrontovat s referenční křivkou. Kromě stromů ovlivněných sledovaným jevem (např. sesuvem), je třeba vybrat i neovlivněné stromy pro sestavení referenční křivky. Meziroční kolísání šířek letokruhů, které z referenční růstové křivky získáme, reflektuje klimatické výkyvy, nikoliv lokální vlivy, různých geomorfologických činitelů. Správné sestavení dostatečně robustní referenční chronologie je tedy nezbytné pro odfiltrování růstových anomálií způsobených čistě klimatickými vlivy (obrázek č. 3) a pro následnou korektní interpretaci růstových anomálií spojených s působením jiných procesů (např. sesuvů, řícení).

Aby byla referenční křivka pro danou lokalitu reprezentativní a aby byly odfiltrovány šumy způsobené jinými než geomorfologickými vlivy, dodržujeme následující podmínky pro zařazení stromu do referenční skupiny:

- 1) vybíráme stromy rostoucí v okolí zkoumaného stanoviště,
- 2) u zkoumaného jedince nepozorujeme růstové disturbance,
- 3) vybíráme stromy nejstarší, nejlépe úrovňové.

Obecně tedy volíme stromy, jejichž růst je ovlivňován čistě klimatickými vlivy a u nichž se neprojevují vlivy biotických, ani geomorfologických faktorů.

4 Příklady případových studií z Mostecké pánve

De facto prvním aplikovaným využitím dendrochronologie byl pionýrský výzkum prováděný na okraji Mostecké pánve poblíž města Osek (obrázek č. 4) v rámci inženýrsko-geologického průzkumu Salesiovy výšiny [21]. Vzhledem k tomu, že bylo zkoumáno pouze šest stromů (dub), je třeba tento dendrochronologický výzkum považovat čistě za doplňkovou metodu

probíhajícího inženýrsko-geologického průzkumu, jejímž cílem bylo ověřit existenci případných recentních svahových pohybů v prostoru Salesiovy výšiny ovlivněných hlubinnou těžbou.

Výsledky opírající se o letokruhovou analýzu, zpracované pro období 1839–1997, neprokázaly žádné růstové anomálie, které by byly důsledkem recentních rychlých svahových pohybů. Rovněž nebyl prokázán vliv těžby na stabilitu oblasti.

4.1 Ploužení sutí na svazích Krušných hor

Příkladem využití dendrochronologie při průzkumu plošně rozsáhlých území může být studie zaměřená na dynamiku svahových pohybů na JZ svazích Kateřinohorské klenby [16]. Ačkoliv byl výzkum realizován z větší části mimo prostor pánve, uvádíme jej, neboť jeho cílem bylo mimo jiné ověřit případný vliv povrchové těžby v Mostecké pánvi na ploužení zvětřalinového pláště krušnohorských svahů. Na základě terénního mapování a GIS analýzy byla vytipována nejkritičtější charakteristická místa, kde proběhly odběry vzorků ze vrostlých stromů (buk lesní). Cílem letokruhové analýzy bylo doplnit výsledky mapování a analýzy existujících dat o údaje o historickém vývoji zkoumaných svahových pohybů.

4.1.1 Výsledky studie

Ve sledované lokalitě a jejím bezprostředním okolí bylo odebráno celkem 108 vzorků (vývrtů) z 50 stromů. 35 stromů bylo vybráno k vlastní analýze svahových pohybů a zbylých 15 stromů k sestavení referenční křivky. Pro podchycení nejstarších událostí byly vybrány stromy nejmohutnější, tedy pravděpodobně nejstarší. Ve zvoleném území se jednalo výhradně o buk lesní (*Fagus sylvatica*). Pro odběr vzorků byl použit Presslerův nebozez délky 700 mm. Z každého stromu byly odebrány dva až tři vzorky (podle schématu v obr. 1a). Podmínkou pro zařazení stromu do výzkumu bylo:

- 1) růstové anomálie jsou prokazatelně způsobeny zkoumaným jevem (v tomto případě svahovým pohybem),
- 2) na daném stanovišti jde o strom pokud možno nejstarší (eliminuje se tak šum způsobený kompeticí).

Vzorky byly podrobeny letokruhové analýze; byla hodnocena excentricita letokruhů a náhlé změny růstu mezi jednotlivými letokruhy (viz obrázek č. 2b). Rozbor zjištěných růstových anomálií byl již detailně popsán [15 a 16].

V období let 1900–2006 byl vznik excentrických letokruhů prokázán u většiny zkoumaných stromů, prokazatelný byl zejména mezi roky 1903, 1904, 1906, 1909 až 1911, 1914, 1923, 1927 a 1928. Dále je zřejmý nárůst hodnot po roce 1955, který vyvrcholil v letech 1957 až 1964, 1967 až 1969, 1972 až 1974, 1981, 1985, 1992 a od r. 2004 do konce roku 2006. Naopak roky 1901, 1915, 1925, 1936, 1937 a 1942 jsou roky, které vykazují minimální produkci excentrických letokruhů. Největší růstové anomálie byly zjištěny mezi lety 1959 až 1961 a mezi lety 1972 až 1974. V těchto letech byl u vzorků RB (viz obrázek č. 1a) prokázán rovněž pokles růstu - zúžení letokruhů.

Pro vytvoření časového a prostorového modelu pro hodnocení dynamiky svahových pohybů byl stanoven podíl excentrických letokruhů v určitém období: 1900–1919, 1920–1939, 1940–1959, 1960–1979, 1980–2006. Tento přístup vycházel z předpokladu, že

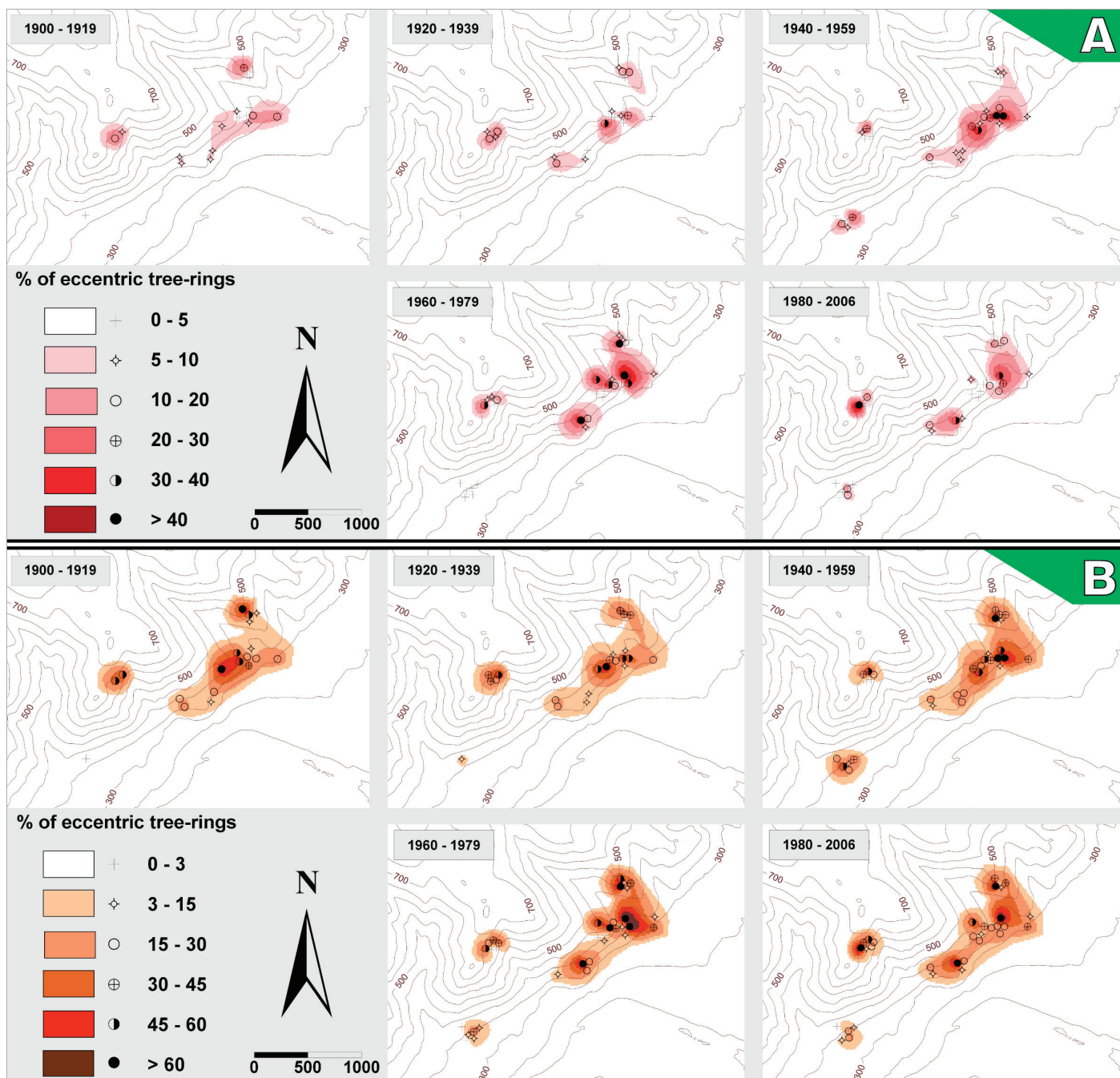
větší podíl excentrických letokruhů indikuje akceleraci sledovaných v pozorovaném období.

Touto metodou se podařilo věrohodně zrekonstruovat dynamiku svahových pohybů – ploužení zvětralínového pláště - na svazích Krušných hor v období 1900-2006. Pohyby se projevují v celém zájmovém prostoru, největší dynamika pohybů byla prokázána v údolí Šramnického potoka, a to v 50. letech 20. století (obrázek č. 5).

Primární příčinou akcelerace pohybů vázaných na údolí Šramnického potoka (obrázek č. 5) je vznik hluboce založené svahové deformace, která vznikla poddolováním území během

hlu-binné těžby ve 40. a 50. letech minulého století [25]. Naopak dopad povrchové těžby lomu ČSA na akceleraci creepových pohybů nebyl prokázán, zkoumané pohyby zde byly zdokumentovány od r. 1900. Vzhledem k tomu, že je ploužení sutí na takto strmých svazích přirozeným jevem, není to zjištění překvapující. K akceleraci pohybů docházelo epizodicky v důsledku zvodnění kvartérních sedimentů [15].

Případová studie dokládá, jakým způsobem lze dendrochronologii využít při datování pomalých a dlouhodobých svahových pohybů typu ploužení.



Obr. 5 Aktivita svahových pohybů (ploužení) vyjádřená podílem excentrických letokruhů v určitém období: 1900-1919, 1920-1939, 1940-1959, 1960-1979, 1980-2006. Silně excentrické letokruhy s hodnotou indexu $I_{EX} > 0,5$ (A) a letokruhy středně excentrické s hodnotou indexu $I_{EX} > 0,31$ (B), (převzato [16]).

4.2 Sesuv sedimentárních zemin na okraji Mostecké pánve (dejekční kužel Šramnického potoka)

Možnost využití náletových dřevin pro datování rychlých hluboce založených sesuvů je nastíněna v práci [26]. V této práci byl aplikován obrácený postup datování. Účelem práce tedy nebylo zjistit, kdy k sesuvu došlo, ale zjistit jakým způsobem bříza bělokorá reagovala na sesuv zemin z ledna r. 2011 [27]. Dále zdali je možné tento druh, který byl doposud v dendrochronologii využíván jen zcela okrajově, v budoucnu použít pro datování událostí, které jsou vázány na opuštěné lomové a výsypkové lokality, kde právě břízy vytvářejí rozsáhlé monokultury.

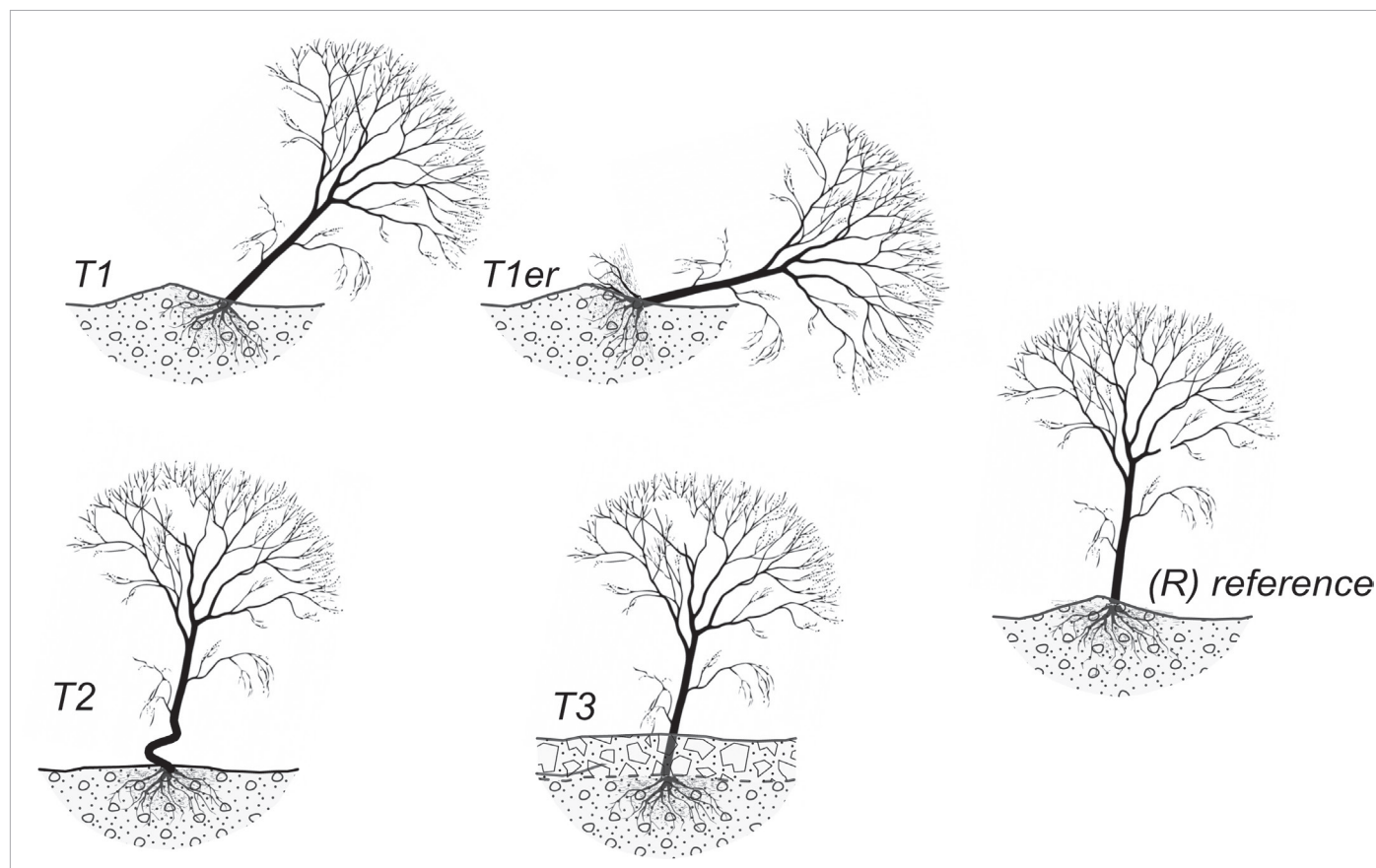
Na rozdíl od jiných studií, které se zabývaly vztahem struktury cév a exogenních vlivů [24,28,29 a 30] a které se nejvíce zaměřovaly na změny ploch cév na příčném průřezu, byla v tomto případě mnohem větší pozornost věnována tvarovým charakteristikám lumenů cév (tj. hlavně délce a šířce buněk a jejich vzájemnému vztahu). V tomto případě byla délka lumenů cévy (LL) chápána jako nejdelší možná spojnice dvou hranic lumenů a šířka lumenů cévy (LW) jako nejdelší možná kolmice k délce, která celá leží uvnitř lumenů (obrázek č. 7b).

V prostoru svahu, který byl v r. 2011 postižen sesuvem, bylo vytypováno celkem 24 stromů, jenž byly dále rozděleny do pěti skupin podle míry makroskopického poškození (viz obrázek č. 6). Cílem studie byla rovněž snaha určit, zdali je možné na základě anatomických změn buněk letokruhu stanovit nejen období vzniku dané události, ale rovněž její intenzitu. Za tímto

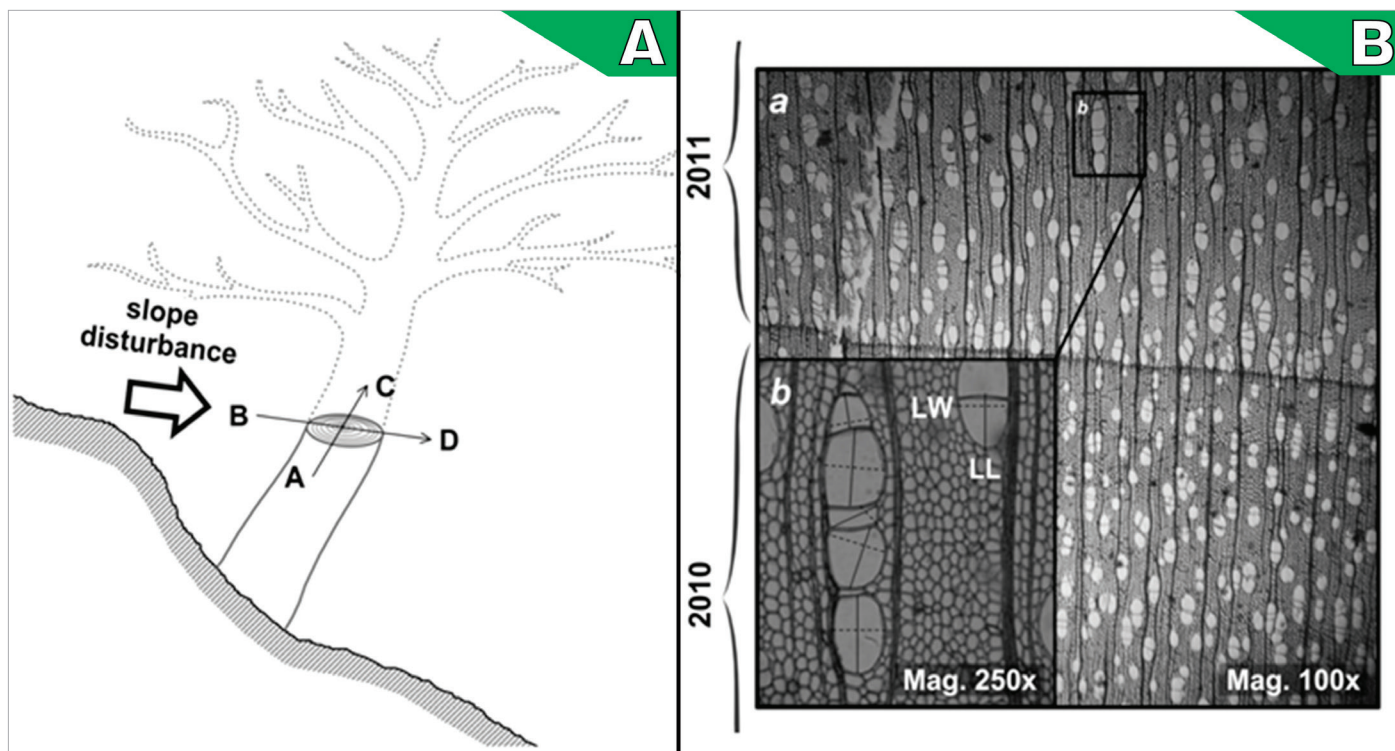
účelem bylo připraveno 67 trvalých preparátů z vytypovaných stromů [18]. Přibližně 20 μm tenké řezy byly pořízeny na mikrotomu GSL 1 a následně obarveny Safraninem a Astra modří, aby došlo ke zvýšení kontrastu mezi lumeny a buněčnými stěnami cév (obrázek č. 7b). Celkově byly na zkoumaných preparátech naměřeny tvarové parametry 8 236 cév, což v průměru odpovídá přibližně 340 cévám/strom a 123 cévám/vzorek. Odezva anatomické stavby dřeva na naklonění byla hodnocena ze 4 různých směrů po obvodu kmene (obrázek č. 7a).

4.2.1 Výsledky studie

Závislost mezi LW a LL byla popsána pro každý rok a každý vzorek zvlášť pomocí rovnice regresní přímky vytvořené na základě všech cév, které byly v daném letokruhu naměřeny. Vypočtené hodnoty meziroční procentuální změny směrnice dosahovaly v případě disturbovaných stromů hodnot od méně než 1 % až po 85,3 %, u referenčních jedinců bylo potom rozpětí od 1 % až po 70,3 %. Rozložení hodnot je pro směry A, C a D velmi podobné – největší počet vzorků zaznamenal procentuální změnu směrnice mezi šířkou a délkou cévy nižší než 20 %. Průměry pro směry A, C a D za všechna pozorování jsou 21,1 %, 21,7 % a 26,2 %. Relativně podobná rozložení, ovšem s rovnoměrnější distribucí, mají i referenční dřeviny. Zcela jinak ovšem vypadá distribuce míry změn tvarových parametrů cév ve směru B, tedy ve směru působení disturbance. Nejvíce pozorování se nachází přibližně v rozmezí 30 a 50 % (průměr 43,7 %).



Obr. 6: Makroskopické poškození kmene stromu podle jednotlivých skupin. T1 – naklonění kmene z vertikálního růstu; T1er – naklonění kmene z vertikálního růstu při současném obnažení kořenového systému; T2 – výrazné zprohýbání kmene stromu; T3 – pohřbení/zasypání kmene stromu; R – referenční stromy bez vnějšího poškození (převzato: [26]).



Obr. 7: Metodika odběru vzorků z kmene stromu z jednotlivých směrů; slope disturbance - směr působení svahového pohybu (A). Mikroskopické foto anatomické struktury buněk xylému břízy bělokoré (nahore - zvětšeno 100x). Ve výřezu jsou vyznačeny směry měření ve směru LL (plná čára) a ve směru LW (čárkovaná čára) v ploše lumenu cévy (B) - upraveno podle: [26].

Zhruba dvakrát častěji byla dokumentována změna k větší izodiametrii příčného průřezu cévou než změna k větší nepravidelnosti. Nejčastěji docházelo v roce po svahovém procesu k poklesu obou charakteristik tvarových parametrů cév, přičemž v průměru mírně rychleji dochází k poklesu LL oproti LW. Vzhledem k tomu, že $LL \geq LW$, vede takováto změna právě ke zmiňovanému nárůstu izodiametričnosti. Stejný charakter a trendy změn byly dokumentovány i na řádově menším vzorku bříz zjizvených suťovým proudem [28] – zatímco zjištěný pokles LL činil v průměru 26 %, hodnota u LW byla 22 %. Tyto závěry tedy nasvědčují, že delší průměr cévy u břízy bělokoré (který má nejčastěji přibližně radiální orientaci [28]) je více náchylný ke změnám v důsledku disturbance než průměr tangenciální. Stejný vztah mezi exogenní disturbance indukovanou změnou LL a LW byl zjištěn i u jiných listnatých druhů – např. olše lepkavé, jasanu úzkolistého a dubu pyrenejského [29].

Rovněž se podařilo prokázat, že u stromů ovlivněných pohybem nejsilněji (T1er), je největší rozptyl a rovněž nejvyšší hodnoty meziroční procentuální změny směrnice popisující tvar cév. To dokládá základní předpoklad, že čím intenzivnější je růstová disturbance, tím výraznější je růstová reakce [26].

Studie prokázala, že lze spolehlivě datovat svahové pohyby typu sesouvání s využitím náletových dřevin, a že na základě charakteru růstových anomálií lze rovněž rekonstruovat charakter a intenzitu sesuvu, či jeho dílčích částí.

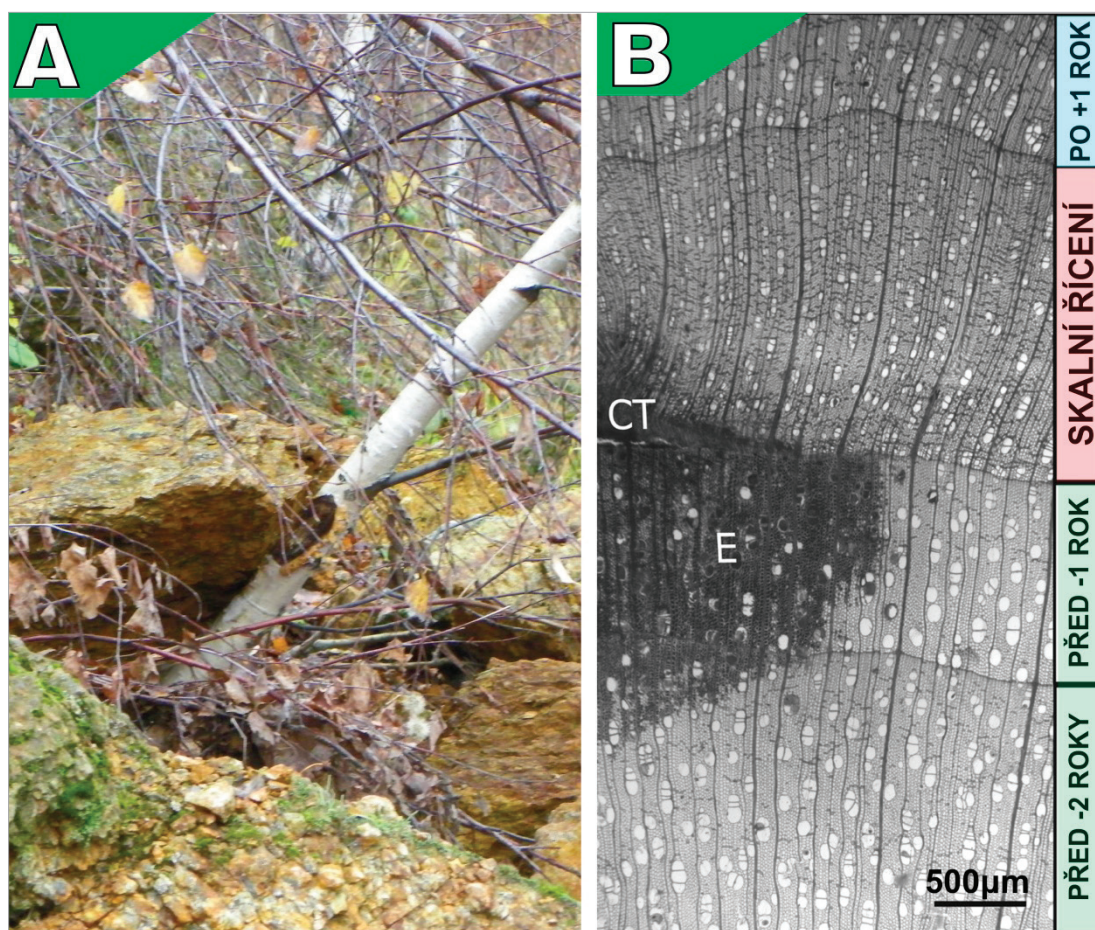
4.3 Skalní řícení pod Jánským vrchem

Dalším příkladem svahových pohybů, který je často dendrochronologickými metodami datován [24], jsou různá skalní řícení, odvalová řícení, popř. suťové proudy. Jde o geomorfologické

procesy, které mimo jiné způsobují mechanické poškození kmene – zjizvení kmene. V rámci Mostecké pánve byl tento jev sledován v antropogenních terasách pod Jánským vrchem, kde byla v minulosti obnažena tektonická brekie krušnohorského zlomu. Lokálně zde proto dochází k malým odvalovým řícením (o kubatuře m^3 až prvních desítek m^3). Vliv tohoto procesu na místní vegetaci monokultury břízy bělokoré byl hodnocen v rámci samostatné studie [31].

Z jedenácti stromů poškozených skalním řícením v zimě 2011/2012 byly odebrány kmenové výseče pro zhodnocení anomálií v anatomické stavbě dřeva. Dále byly vzorky odebrány i ze 4 nepoškozených (referenčních) stromů. Výseč byla brána vždy v místě jizvy (obrázek č. 8a), přibližně v její polovině. V laboratorii byly připraveny tenké mikroskopické řezy pro kvantitativní analýzu stavby dřeva z různých částí obvodu kmene (místo těsně přiléhající k jizvě, v pravém úhlu a na opačné straně kmene). Následně byly preparáty nasnímány pod mikroskopem a na každém z nich byla změřena průměrná plocha cév v každém letokruhu.

V důsledku mechanického poškození kmene se v těsné blízkosti jizvy tvoří cévy s menším průměrem [20]. Velikost cév je však ovlivňována i přirozeně – s rostoucím věkem stromu (a jeho mohutností) narůstá i průměrná velikost cév (hovoříme o tzv. věkovém trendu). Pokud chceme objektivně hodnotit a srovnávat intenzitu odezvy různých stromů různého stáří a z různých částí po obvodu kmene, je nutné tento efekt odfiltrout. Za tímto účelem byla u každého stromu a vzorku pomocí lineární regrese popsána závislost plochy cév na kalendářním roce v období před rokem 2011 (tj. před ovlivněním růstu skalním řícením, viz obrázek č. 8b). Tento trend byl následně extrapolován do současnosti a intenzita zmenšení cév byla



Obr. 9: Zjizvení a naklonění kmene stromu v důsledku prudkého impaktu solitérního balvanu v průběhu skalního říčení (A). Anatomická stavba dřeva v okolí jizvy (kalusu), CT – kalus, E – embolizovaná oblast s přítomností sekundárních metabolitů uvnitř cév (B) (upraveno podle: [31]).

hodnocena jako procentuální odchylka průměrné plochy cév naměřené ze vzorků od hodnoty očekávané na základě regrese. Stejným způsobem byly vyhodnoceny i referenční stromy.

4.3.1 Výsledky studie

V rámci letokruhu vytvořeného rok po poškození stromů skalním říčením byly cévy v oblasti přiléhající k jizvě v průměru o 66 % užší, než by se dalo očekávat na základě regresního modelu (obrázek č. 9). Tato odchylka se během třech následujících let snižovala, ještě v roce 2013 byla její hodnota 33 %, což značí, že dřevo mladé břízy svojí anatomickou strukturu vrací do normálu relativně pomalu. Snižování plochy vodivých elementů cév bylo rok po distorbanci patrné i ve vzdálenějších částech obvodu kmene. Průměrná intenzita dosahovala rok po skalním říčení 32 % a během následujících dvou let se naměřené hodnoty statisticky vyrovnaly modelovaným (tj. následky poškození byly vykompenzovány). Naopak žádné náhlé synchronní poklesy v plochách cév nebyly pozorovány u nepoškozených referenčních stromů.

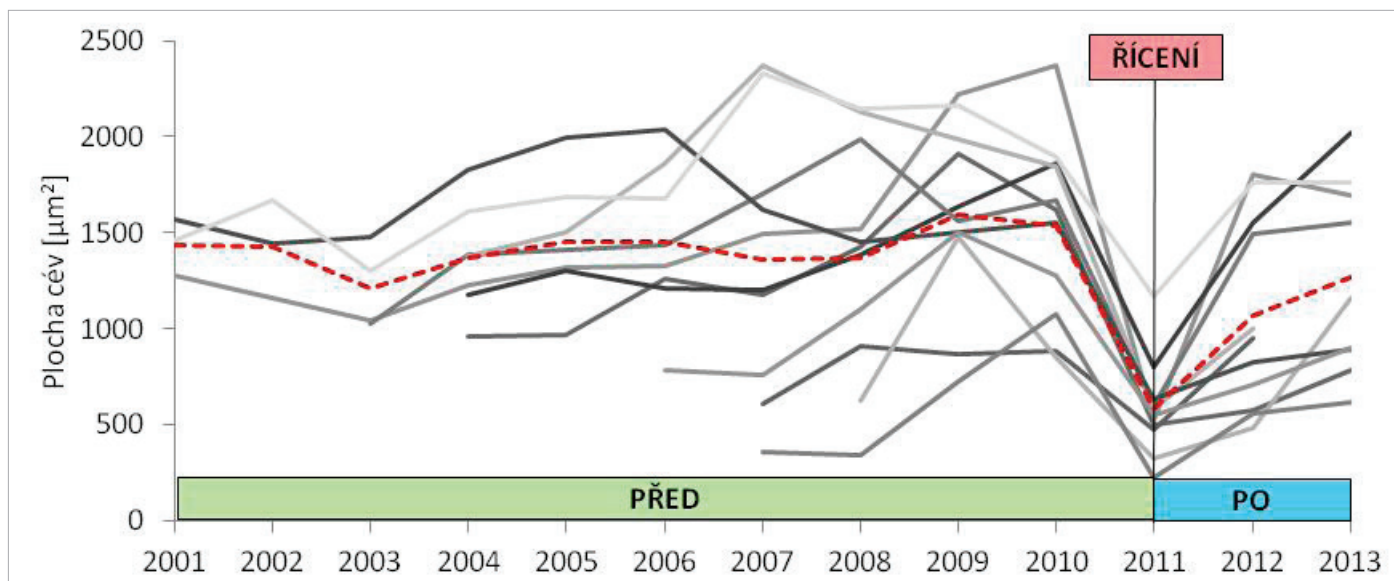
V případě studií popsáných v kapitolách 4.2 a 4.3 nebylo primárním cílem datovat stáří svahové disturbance (protože její datace byla známá z jiných zdrojů), ale zhodnotit odezvu anatomické stavby dřeva na daný proces. Ačkoliv se na první pohled může zdát, že takový postup nemá žádné přínosy pro popsání vývoje zájmového území v minulosti, opak je pravdou.

Dendrogeomorfologické postupy a metody je totiž vhodné verifikovat (ověřit správnost) před jejich „masivním“ nasazením v datovacích dendrogeomorfologických výzkumech. A právě analýza odezvy na poškození známých parametrů je pro tyto účely ideální. Celkově studie prokázala, že lze efektivně využít náletovou dřevinu k datování skalních říčení.

5 Perspektivy dendrochronologie v rámci inženýrsko-geologického výzkumu Mostecké pánve

Vyjma studií, které byly stručně prezentovány výše, probíhá v současné době výzkum v lokalitě Černý vrch, kde jsou experimentálně simulovány různé přírodní vlivy a je monitorována růstová reakce břízy na tyto vlivy. Dendrochronologická analýza stromů (do výzkumu byly zahrnuty převážně staré místní duby, ale rovněž liliovník tulipánokvětý nebo staré lípy) reliktu zámekového Arboreta Jezeří byla zaměřena spíše na hodnocení ročních přírůstků ve vztahu k chodu klimatu. Výsledky potvrdily, že růst stromů byl ovlivňován výhradně klimatickými vlivy, rozsáhlé antropogenní zásahy spojené s těžbou uhlí se výraznými růstovými disturbancemi neprojevovaly [32].

Všechny tyto regionálně zaměřené případové studie naznačují možnost uplatnění dendrochronologie a její potenciál v budoucím inženýrsko-geologickém přístupu. Studium přírodních ohrožení a rizik je v současné době jedním z nosných témat na poli nejen inženýrsko-geologického, ale celého environmentálního



Obr. 10: Velikost cév v letokruzích v bezprostředním okolí jizvy způsobené skálním řícením; plné šedé křivky – jednotlivé stromy, čárkovaná červená křivka – průměr všech stromů (převzato z: [31]).

výzkumu. Frekvence přírodních katastrof v kontextu klimatických změn je dnes již předmětem veřejné diskuze. V odborné literatuře je přírodní ohrožení (hazard) chápáno jako soubor maximálních dopadů pohromy (přírodního jevu), které se na daném místě vyskytnou za určený časový interval s pravděpodobností rovnou stanovené hodnotě [33]. K objektivnímu posouzení hazardu je nutné znát zranitelnost daného místa a také frekvenci výskytu sledovaného jevu. V takovém pojetí se tedy dendrochronologie profiluje jako vhodný vědní obor, jehož potenciál je v tomto směru veliký. Dendrochronologie umožňuje exaktně datovat jednotlivé přírodní procesy, a to zpětně i na několik set let [např. 3,5,7]. Při posuzování přírodních ohrožení se používají statistiky sledující daný jev právě v časovém intervalu stovek let, výjimečně tisíců let [33]. To společně s faktem, že stromy jsou přítomny téměř všude a zároveň obsahují informaci o svém vývoji řadu let nazpět, dělá z letokruhů časově i prostorově rozsáhlý zdroj informací o minulém vývoji (nejenom) antropogenní krajiny, ale umožňuje časově i prostorově rozsáhlý monitoring svahových procesů.

Samotná Mostecká pánev představuje rozsáhlé území se značným podílem antropogenních ploch – různě starých výsypů (rekultivovaných i s přirozenou sukcesí), dále opuštěných lomových lokalit a lomových stěn. Na řadě těchto ploch se v budoucnu počítá s jejich dalším využitím, ať už pro rekreační, sportovní, zemědělské či jiné účely. Vzhledem k tomu, že se jedná o plošně rozsáhlé oblasti (v rádech desítek km²), které jsou často stranou pozornosti po desítky let, nelze se zde opřít o běžné metody dlouhodobého monitoringu, které jsou zde prakticky i stěží aplikovatelné. Tento článek stručně nastíní možnosti využití dendrochronologie jako metody pro inženýrsko-geologické hodnocení geomorfologických procesů, které v těchto lokalitách v posledních několika desetiletích působily. Právě zmiňovaný princip, že každý strom ve svém růstu reflektuje podmínky, které na daném stanovišti panovaly v minulosti, nám umožňuje nejen hodnotit frekvenci přírodních procesů, ale i jejich intenzitu a případnou korelaci s klimatickými faktory. Ve výsledku tak dendrochronologie představuje rychlou, operativní a finančně

nenáročnou retrospektivní metodu hodnocení prostorových a časových aspektů jednotlivých geomorfologických procesů, jejichž znalost je základním předpokladem pro hodnocení přírodních ohrožení a tedy i pro účelnější využívání těchto lokalit.

Literatura

- [1] ŠILHÁN, K., STOFFEL, M.: Impacts of age-dependent tree sensitivity and dating approaches on dendrogeomorphic time series of landslides. *Geomorphology*, 236, 34-43, 2015.
- [2] ŠILHÁN, K.: Chronology of processes in high-gradient channels of medium-high mountains and their influence on alluvial fans properties. *Geomorphology*, 206, 288-298, 2014.
- [3] STOFFEL, M., PERRET, S.: Reconstructing past rock-fall activity with tree rings: some methodological considerations. *Dendrochronologia*, 24, s. 1-15, 2006.
- [4] LAXTON, S.C., SMITH, D.J.: Dendrochronological reconstruction of snow avalanche activity in the lahul Himalaya, Northern India. *Natural hazards*, 49, s. 459-467, 2009.
- [5] SALZER, M. W., HUGHES, M. K.: Bristlecone pine tree rings and volcanic eruptions over the last 5 000 yr. *quaternary research*, 67, s. 57-68, 2007.
- [6] SOLOMINA, O., PAVLOVA, I., CURTIS, A., JACOBY, G., PONOMAREVA, V., PEVZNER, M.: Constraining recent shiveluch volcano eruptions (kamchatka, russia) by means of dendrochronology. *Nat. hazards earth syst. sci.*, 8, s. 1083-1097, 2008.
- [7] BACHRACH, T., JAKOBSEN, K., KINNEY, J., NISHIMURA, P., REYES, A., LAROQUE, C. P., SMITH, D. J.: Dendrogeomorphological assessment of movement at hilda rock glacier, banff national park, canadian rocky mountains. *Geografiska annaler*, 86a, s. 1-9,

- 2004.
- [8] LANG, A., MOYA, J., COROMINAS, J., SCHROTT, L., DIKAU, R.: Classic and new dating methods for assessing the temporal occurrence of mass movements. *Geomorphology*, 30, s. 33-52, 1999.
- [9] 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, 1996.
- [10] GÄRTNER, H.: Glacial landforms, tree rings – dendro-geomorphology. in: elias, s., a.: *Encyclopedia of quaternary science*. University of London, s. 979-988, 2007.
- [11] SHRODER, J. F.: Dendrogeomorphological analysis of mass movement on table cliffs plateau, Utah. *Quaternary research*, 9, s. 168-185, 1978.
- [12] PALLARDY, S.G., KOZLOWSKI, T.T.: *Physiology of woody plants*. Academic press-elsevier, Oxford, 454 s., 2008.
- [13] SASS-KLAASSEN, U., SABAJO, C.R., DEN OUDEN, J.: Vessel formation in relation to leaf phenology in pedunculate oak and european ash. *Dendrochronologia*, 29, no. 3, s. 171-175, 2011.
- [14] SCHWEINGRUBER, F. H.: *Tree rings and environment. dendroecology*. Biermersdorf, Swiss Federal Institute for forest, snow and landscape research. Berne, Stuttgart, Vienna, Haupt, 609 s., 1996
- [15] BURDA, J.: Dendrogeomorfologická analýza dynamiky svahových pohybů v lokalitě Jezeří. *Geografie*, 115, no. 4, s. 440–460, 2010.
- [16] BURDA, J.: Spatio-temporal activity of mass movements in the Krušné hory mountains (Czech republic): Dendrogeomorphological case study. *Auc Geographica*, 46, no. 2, s. 15–30, 2011.
- [17] KLIMEŠ, J., BAROŇ, I., PÁNEK, T., KOSAČÍK, T., BURDA, J., KRESTA, F., AND HRADECKÝ, J.: Investigation of recent catastrophic landslides in the flysch belt of outer western carpathians (Czech republic): Progress towards better hazard assessment. *Natural hazards and earth system science*, 9, s. 119-128, 2009.
- [18] SCHWEINGUBER, F. H., BÖRNER, A., SCHULZE, E.-D.: *Atlas of woody plant stems*. Springer. Verlag, Berlin, Heidelberg, 229 s., 2008.
- [19] ALONI, R.: Phytohormonal mechanisms that control wood quality formation. in: Entwistle K., Harris P. & Walker J. (eds.): *The compromised wood workshop 2007: 1–22*. The wood technology research centre, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2007.
- [20] ARBELLAY, E., STOFFEL, M. & DECAULNE, A.: Dating of snow avalanches by means of woundinduced vessel anomalies. *Sub-arctic Betula pubescens*, *Boreas*, 42, s. 568–574, 2013.
- [21] VÍMLÍEK, V., FANTUCCI, R., STEMBERK, J.: Dendrogeomorphological investigations of slope deformation on Salesius Hill in the Krušné hory mts. in: Rybář, J. (eds.): *Landslides. Proceedings of the 1st Europe Conference on landslides*, Prague, s. 321-326, 2002.
- [22] HEINRICH, I., GÄRTNER, H.: 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, no. 7, s. 928-936, 2008.
- [23] BRAAM, R.R., WEISS, E.J.J., BURROUGH, P.A.: Spatial and temporal analysis of mass movement using dendrochronology. *Catena*, 14, s. 573-584, 1987.
- [24] TUMAJER, J., TREML, V.: Meta-analysis of dendrochronological dating of mass movements. *Geochronometria*, 40, no. 1, s. 59-76, 2013.
- [25] ŠPŮREK, M.: Sesuvné jevy u dřinova na Mostecku. *Věst. ustř. úst. geol.*, 49, s. 231–234, 1974.
- [26] TUMAJER, J., BURDA, J.: Exploitation of betula pendula in mass movement studies; a preliminary study. *auc Geographica*, 47, no. 2, s. 25-30, 2013.
- [27] BURDA, J., HARTVICH, F., VALENTA, J., SMÍTKA, V. and RYBÁŘ, J.: Climate-induced landslide reactivation at the edge of the most basin (Czech republic) – progress towards better landslide prediction. *Natural hazards and earth system science*, 13, s. 361-374, 2013.
- [28] ARBELLAY, E., STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M.: Dendrogeomorphic reconstruction of past debrisflow activity using injured broad-leaved trees. *Earth surface processes and landforms*, 35, s. 399-406, 2010.
- [29] BALLESTEROS, J.A., STOFFEL, M., BOLLSCHWEILER, M., BODOQUE, J.M., DÍEZ-HERRERO, A.: Flash-flood impacts cause changes in wood anatomy of *Alnus glutinosa*, *Fraxinus angustifolia* and *Quercus pyrenaica*. *Tree physiol.*, 30, s. 773–781, 2010.
- [30] KAMES, S., TARDIF, J.C., BERGERON, Y.: Anomalous earlywood vessel lumen area in black ash (*Fraxinus nigra* marsh.) tree rings as a potential indicator of forest fires. *Dendrochronologia*, 29, s. 109–114, 2011.
- [31] TUMAJER, J., BURDA, J., TREML, V.: Dating of rockfall events using vessel lumen area in *Betula pendula*. *Iawa journal*, 36, no. 3, s. 286-299, 2015.
- [32] BURDA, J.: *Dynamika a rozšíření recentních svahových pohybů na úpatí Krušných hor. regionální studie: Jezeří*, PřF UK, Praha, 173 s., 2012.
- [33] KUKAL, Z., POUŠMOURNY, K.: Přírodní katastrofy a rizika. Příspěvek geologie k ochraně lidí a krajiny před přírodními katastrofami, *Edice Planeta*, XII, no. 3, Praha, 52 s., 2005.