

**Univerzita Karlova v Praze**  
**Přírodovědecká fakulta**  
**Katedra fyzické geografie a geoekologie**

Studijní program: Geografie  
Studijní obor: Geografie a kartografie



**Petr Kolařík**

**RECENTNÍ ZMĚNY POLOHY HORNÍ HRANICE LESA V TEMPERÁTNÍ  
A BOREÁLNÍ ČÁSTI SEVERNÍ POLOKOULE**

**RECENT SHIFTS OF ALPINE TREELINE ECOTONE IN TEMPERATE AND  
BOREAL PART OF NORTHERN HEMISPHERE**

Bakalářská práce

Vedoucí závěrečné práce: Mgr. Václav Treml, Ph.D.

Praha, 2015

# Zadání bakalářské práce

Název práce

Recentní změny polohy horní hranice lesa v temperátní a boreální části severní polokoule

Cíle práce

1. Zpracování rešerše na téma „Faktory určující pozici horní hranice lesa na globální a regionální úrovni + faktory ovlivňující postup horní hranice lesa“ a vytvoření regionálního přehledu změn v poloze horní hranice lesa na severní polokouli s výjimkou Evropy
2. Vytvoření databáze vzestupů horní hranice lesa na severní polokouli s následujícími atributy: poloha, druh dřeviny, velikost vzestupu, teplotní trend, metoda výzkumu, trend v land-use
3. Statistické vyhodnocení databáze

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

Metody: rešerše, detekce trendů z klimatických databáze

Postup: 1. zpracování rešerše

2. vytvoření databáze vzestupů horní hranice lesa na severní polokouli
3. pro zájmové lokality zjistit teplotní trendy pro příslušné období z gridových teplotních databází
4. statisticky vyhodnotit a analyzovat databázi za účelem zodpovězení otázky, zda je vzestup řízen spíše teplotně nebo změnou land-use; jaký vliv má metoda výzkumu na získané výsledky?

Datum zadání: 2. 12. 2014

Jméno studenta: Petr Kolařík

Podpis studenta: .....

Jméno vedoucího práce: Václav Tremel

Podpis vedoucího práce: .....

**Prohlášení:**

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

V Praze, 30. 6. 2015

.....  
Petr Kolařík

**Poděkování:**

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Mgr. Václavu Tremlovi, Ph.D. za velkou trpělivost, věnovaný čas, rady a připomínky k práci a za poskytnutá data. Také bych chtěl poděkovat osobám blízkým za morální i materiální podporu během psaní této práce.

**Abstrakt:**

Jedním z často uváděných projevů globálních změn klimatu je postup horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek, zejména v souvislosti se zvyšující se průměrnou teplotou. Problematika dynamiky horní hranice lesa je však složitější. Cílem této práce je popsat faktory, které ovlivňují polohu a pohyb horní hranice lesa a vytvořit přehled dynamiky horní hranice lesa v temperátní a boreální části severní polokoule mimo Evropu. Dále pak vytvořit databázi postupu horní hranice lesa v této oblasti a následně ji analyzovat. Z 20 zkoumaných lokalit byl postup zaznamenán u 65 %, ústup jen u dvou lokalit, nejvyšší hodnoty postupu (až 1,59 m/rok) vykazovala oblast Skalnatých hor v Severní Americe, největší ústup (1,21 m/rok) byl zaznamenán v San Francisco Peaks taktéž v Severní Americe. Statistickou analýzou nebyla zjištěna významná korelace mezi teplotními trendy a postupem hranice lesa. Nejvyšší hodnoty postupu i ústupu horní hranice lesa vykazovaly lokality, kde došlo ke změnám v land use, což naznačuje, že antropogenní činnost je významným faktorem ovlivňujícím dynamiku horní hranice lesa.

**Klíčová slova:**

horní hranice lesa, vzestup, využití krajiny

**Abstract:**

Treeline advance is often cited as one of the effects of the global climate change, especially the rise of mean temperatures. However, treeline dynamics is a complex issue. This thesis aims to describe factors that determine the position and dynamics of the alpine treeline and create an overview of treeline dynamics in the temperate and boreal parts of the Northern Hemisphere outside of Europe. A further goal is to create a database of treeline advance at locations in this region and then analyze this database. Of the 20 studied locations, 65 % showed treeline advance while treeline receded at only two locations. The highest rate of advance was recorded in the Rocky Mountains of North America, up to 1.59 m/yr. The highest rate of recession was recorded in the San Francisco Peaks, also in North America, where a recession of 1.21 m/yr was recorded. A statistical analysis showed no significant correlation between temperature trends and treeline advance. Locations that had undergone a change in land use showed both the highest rate of advance and recession. It appears that anthropogenic activity is an important factor influencing the dynamics of alpine treelines.

**Key words:**

treeline, advance, land use

# Obsah

1 Úvod.....	8
2 Faktory určující pozici a postup horní hranice lesa.....	9
2.1 Definice horní hranice lesa.....	9
2.2 Faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa.....	11
2.3 Faktory ovlivňující postup horní hranice lesa.....	16
3 Regionální přehled změn polohy horní hranice lesa na severní polokouli (mimo Evropu)....	19
3.1 Asie.....	19
3.1.1 Severní Asie.....	19
3.1.2 Střední Asie.....	19
3.1.3 Východní Asie.....	20
3.2 Severní Amerika.....	21
3.2.1 Východní Severní Amerika.....	21
3.2.2 Západní Severní Amerika.....	21
3.2.2.1 Skalnaté hory.....	21
3.2.2.2 Ostatní.....	22
4 Metodika.....	24
4.1 Data.....	24
4.2 Zpracování.....	25
5 Výsledky.....	26
6 Diskuse.....	30
7 Závěr.....	32
8 Seznam použité literatury.....	33

## Seznam obrázků

- Obrázek 1:** Horní hranice lesa v Ohňové zemi (Holtmeier 2009)
- Obrázek 2:** Formy horní hranice lesa (upraveno – Harsch a Bader 2011)
- Obrázek 3:** Vliv místního reliéfu na charakter stanoviště a vegetační kryt (upraveno – Holtmeier 2009)
- Obrázek 4:** Poloha a dynamika horní hranice lesa jako důsledek dřívějšího vývoje a změn prostředí (upraveno podle Holtmeier 2009 – Holtmeier a Broll 2007)
- Obrázek 5:** Graf dynamiky horní hranice lesa na zkoumaných lokalitách

## **Seznam tabulek**

**Tabulka 1:** Faktory podporující postup horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek (upraveno – Holtmeier 2009)

**Tabulka 2:** Databáze vzestupu horní hranice lesa

**Tabulka 3:** Teplotní trendy na zkoumaných lokalitách

# 1 Úvod

Horní hranice lesa je velmi výrazným vegetačním limitem v horských oblastech (obrázek 1) všech kontinentů s výjimkou Antarktidy. Posun horní hranice lesa je jedním z významných témat v rámci širší diskuse ohledně globálních změn klimatu a jejich dopadu na prostředí (Holtmeier 2009), neboť se obecně předpokládá, že s růstem průměrných teplot vzduchu bude docházet k posunu této hranice do vyšších nadmořských výšek (Holtmeier a Broll 2005). Nutno ovšem dodat, že klimatické poměry nejsou zdaleka jedinou proměnnou, která ovlivňuje polohu horní hranice lesa. Na většině míst je tato poloha ovlivněna i jinými faktory (druhové složení, půdy, reliéf, činnost živočichů a člověka aj.) (Holtmeier 2009).

Antropogenní činnost způsobila na rozsáhlých územích pokles horní hranice lesa v řádu až stovek metrů do nižších nadmořských výšek. Případné změny ve využití krajiny (*land use*) tak mohou vést k výrazným změnám v poloze horní hranice lesa (Holtmeier 2009).

Cílem této bakalářské práce je popsat faktory, které mají vliv na polohu horní hranice lesa a její dynamiku, popsat změny v poloze této hranice v temperátní a boreální části severní polokoule mimo Evropu, vytvořit databázi vzestupů horní hranice lesa pro tuto oblast s atributy: poloha, druh dřeviny, velikost vzestupu, teplotní trend, metoda výzkumu, trend v *land use*, tuto databázi pak statisticky vyhodnotit a analyzovat za účelem zodpovězení otázky, zda je vzestup řízen spíše teplotně nebo změnou ve využití krajiny a jaký vliv má metoda výzkumu na získané výsledky.



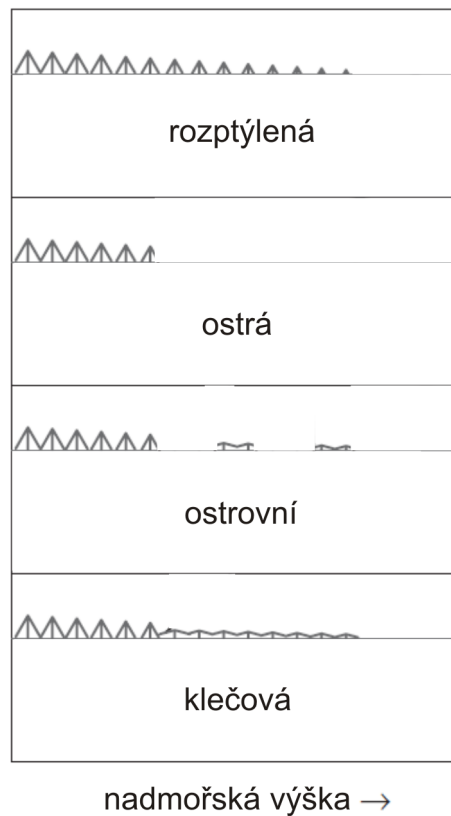
**Obrázek 1:** Horní hranice lesa v Ohnňové zemi (Holtmeier 2009)

## 2 Faktory určující pozici a postup horní hranice lesa

### 2.1 Definice horní hranice lesa

Hranice lesa je vymezena poměrně prudkým poklesem výšky stromů a velikosti zápoje (Harsch a Bader 2011). Většina autorů tak jako jeden z faktorů pro vymezení hranice lesa uvádí minimální výšku stromů či zápoj lesa. Minimální výška pro to, aby byl jedinec považován za strom, se většinou pohybuje v rozmezí 2 až 8 m, minimální velikost zápoje obvykle od 30 % až 40 % (Holtmeier 2009). Někteří autoři dokonce definují rozdílnou minimální výšku pro různé druhy. Aas a Farlund (1996) například pro břízu pýřitou (*Betula pubescens*) definují minimální výšku 2,5 m, pro borovici lesní (*Pinus sylvestris*) však 5 m. Holtmeier (1974) ale nepovažuje absolutní minimální výšku za dostatečně vypovídající, jedinci by podle něj měli být považováni za strom, když překročí průměrnou výšku sněhové pokrývky v dané lokalitě. Tato definice ovšem není aplikovatelná pro tropické oblasti (Holtmeier 2009).

Holtmeier a Broll (2005) definují horní hranici lesa jako ekoton (přechodnou zónu), který je v horní části vymezen hranicí výskytu stromových druhů, tj. nejvyšší nadmořskou výškou, kde se vyskytují stromové druhy bez ohledu na výšku a deformace jedinců, v dolní části pak hranicí zapojeného lesa se stromy vyššími než 3 m. Tato přechodná zóna může být různě široká a vykazovat různé vlastnosti. Harsch a Bader (2011) rozlišují 4 formy horní hranice lesa: rozptýlenou, ostrou, ostrovní a klečovou (obrázek 2).



**Obrázek 2:** *Formy horní hranice lesa (upraveno – Harsch a Bader 2011)*

Pro rozptýlenou hranici je typické postupné snižování výšky i hustoty stromů. Na ostré hranici dochází k prudkému přechodu od zapojeného lesa vyššího než 3 m do nízké alpské vegetace. Nad touto hranicí se mohou ojediněle vyskytovat solitérní stromy. Pro ostrovní hranici jsou charakteristické ostrůvky či pásy stromů (případně kleče) nad hranicí zapojeného lesa se stromy vyššími než 3 m. Klečová hranice se vyznačuje zakrslými či deformovanými stromy, které navazují na vzpřímený zapojený les. Pokud tyto zakrslé (deformované) stromy tvoří nad hranicí zapojeného lesa, jedná se o hranici ostrovní (viz výše) (Harsch a Bader 2011).

## 2.2 Faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa

Z globálního pohledu je nárůst teplotního deficitu s rostoucí nadmořskou výškou považován za hlavní faktor ovlivňující fyziologické procesy stromů na horní hranici lesa. To lze ilustrovat na klesající nadmořské výšce polohy horní hranice lesa v poledníkovém směru od subtropických oblastí k pólům (s výjimkou aridních a semiaridních oblastí) (Holtmeier a Broll 2007).

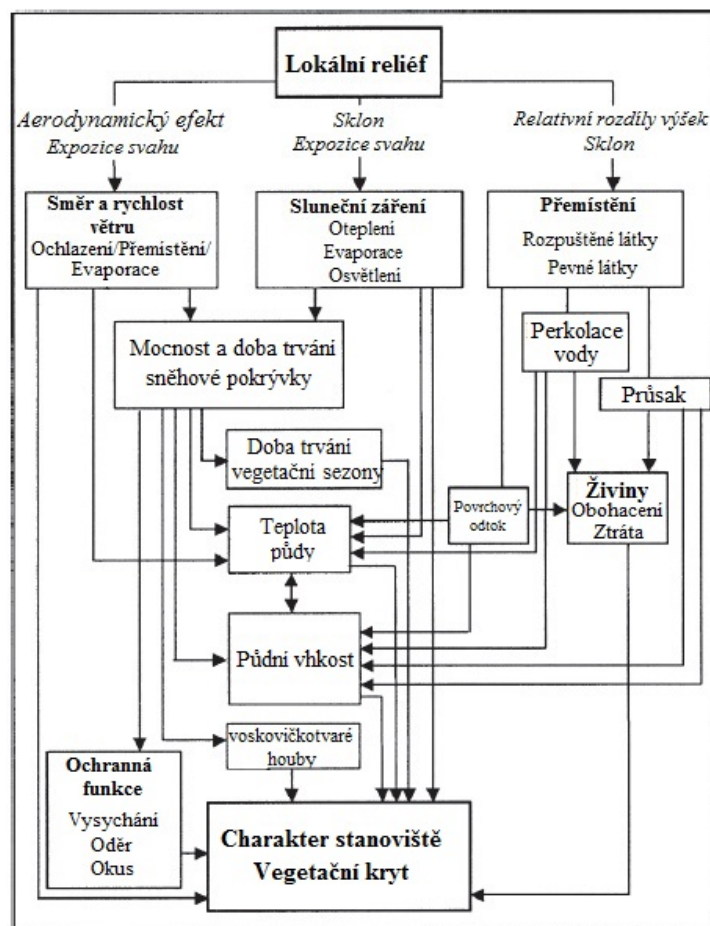
Vysvětlení polohy horní hranice lesa teplotou vzduchu je přinejmenším problematické. Mnozí autoři se dříve přikláněli k vymezení průměrnou teplotou nejteplejšího měsíce, kdy měla poloha horní hranice lesa odpovídat přibližně průměrné teplotě 10 °C, což však platí jen pro některé temperátní oblasti (Koerner 1998). Více odpovídající se zdá být počet dní s minimální teplotou alespoň 5 °C či průměrná teplota tří (příp. čtyř) nejteplejších měsíců. I zde se však autoři rozcházejí natolik, že není možné jednoduše definovat teplotu, která by globálně určovala polohu horní hranice lesa (Holtmeier 2009).

Důležitým faktorem ovlivňujícím polohu horní hranice lesa je půdní teplota. Na rozdíl od teploty vzduchu je pro zkoumání tohoto faktoru k dispozici poměrně málo dat (Holtmeier 2009). Teprve v nedávné době došlo k rozsáhlejšímu výzkumu na několika desítkách lokalit, jehož cílem bylo dokázat hypotézu, že pozice horní hranice lesa je určena nízkou půdní teplotou. Zjištěna byla korelace polohy horní hranice lesa s průměrnou půdní teplotou  $6,7\text{ °C} \pm 0,8\text{ °C}$  v hloubce 10 cm během vegetačního období (Koerner a Paulsen 2004). Hoch a Koerner (2003) pak uvádějí  $6,1\text{ °C} \pm 0,7\text{ °C}$ . Půdní teplota je ovlivněna mnoha faktory, např. zrnitostí půdy, její pórovitostí, objemovou hustotou, obsahem humusu, půdní vlhkostí, tepelnou vodivostí, vegetační kryt, expozice vůči radiaci i atmosferickému proudění, pohyb půdních vod, sněhová pokrývka aj. Obecně platí, že průměrná půdní teplota klesá se zvyšující se nadmořskou výškou. Tento pokles je však menší než u teploty vzduchu. Průměrná půdní teplota však prudce klesá s rostoucí hloubkou, v 10 cm je již obvykle nižší než teplota vzduchu (Holtmeier 2009). Půdní teplota je také obecně nižší pod zapojeným lesem než pod nízkou alpínskou vegetací (Koerner 2012).

Faktorem, který ovlivňuje polohu horní hranice lesa, je i půda samotná. Přestože nelze vymežit určitý půdní typ, který by byl pro ekoton horní hranice lesa typický, existují

společné znaky, které půdy v tomto ekotonu obvykle vykazují. Pověšinou se jedná o půdy mělké s velkou skeletovitostí a vysokým obsahem humusu (Holtmeier 2009).

Vliv tvaru georeliéfu (obrázek 3) je patrný zejména v lokálním měřítku (Holtmeier a Broll 2005). Vystavení slunečnímu záření a účinkům větru je důležitým faktorem určujícím polohu horní hranice lesa i její druhové složení. Účinky slunečního záření rostou s nadmořskou výškou z důvodu koncentrace vodních par do nižších vrstev atmosféry. Rychlost větru obecně také roste se zvyšující se nadmořskou výškou. Rozdílné podmínky mezi slunečnou a stinnou i návětrnou a závětrnou stranou svahu jsou tak ve vyšších nadmořských výškách ještě umocněny. Horní hranice lesa se na slunných svazích (na severní polokouli tedy převážně jižních) nachází obvykle ve vyšší nadmořské výšce než na svazích stinných, např. v Alpách je tento rozdíl okolo 100 m. Slunné svahy se kromě vyššího příjmu tepelné energie vyznačují také tím, že jsou sušší, což může vést k rozdílnému druhovému složení ekotonu horní hranice lesa než na svazích stinných. Vystavení převládajícímu směru atmosferického proudění může kromě přímého vlivu na fyziologii a mechanická poškození stromů způsobovat i přemístování sněhu výrazně tak měnit podmínky stanoviště. Kvůli povrchovému odtoku a rozdílnému vsaku jsou nejvyšší části konvexních tvarů reliéfu sušší než přiléhající reliéf. Tvary reliéfu rovněž mohou mít vliv na antropogenní zásahy, které se na ne snadno dostupných lokalitách vyskytují zřídka (Holtmeier 2009).



**Obrázek 3:** Vliv místního reliéfu na charakter stanoviště a vegetační kryt (upraveno – Holtmeier 2009)

Nadmořská výška polohy horní hranice lesa většinou roste se zvyšující se kontinentalitou. Např. v západní části Kaskádového pohoří se horní hranice lesa vyskytuje v nadmořských výškách do 1800 m n. m., východněji ve Skalnatých horách ve stejné zeměpisné šířce pak okolo 3000 m n. m. V plošně rozsáhlých pohořích se horní hranice lesa nachází v jejich vnitřních částech obvykle ve vyšší nadmořské výšce než v okrajových částech. Ve vnitřních částech je vlivem transformace slunečního záření na dlouhovlnnou energii na povrchu teplota vyšší než v otevřené atmosféře (Holtmeier 2009).

Poškození mrazem může mít vliv na polohu horní hranice lesa. V oblastech se sezónním klimatem však k takovému poškození nedochází v nejméně chladnější části roku (Koerner 1998). Při výzkumu v Alpách nebyla zjištěna korelace mezi absolutními minimy ročních teplot a polohou horní hranice lesa (Brockmann-Jerosch 1919 v Koerner 1998). Dle Larchera (1985) poškození mrazem výrazně neovlivňuje samotné přežití stromů na

horní hranici lesa v temperátních oblastech, drobná poškození však mohou ovlivňovat jejich růst. Ani v netemperátních oblastech nemá poškození mrazem rozhodující vliv na samotnou polohu horní hranice lesa (Koerner 1998).

Zimní vysychání je někdy uváděno jako jeden z hlavních faktorů určujících polohu horní hranice lesa (Koerner 1998). Jehlice a větve mohou být poškozeny postupným nedostatkem vody, která nemůže proudit z důvodu zmrzlé půdy či kořenů (Larcher 1985). Zimním vysycháním jsou obvykle zasaženy mladé stromy (Holtmeier 2009). Skutečnost, že se jedná o proces, ke kterému dochází jen v určitém ročním období, znamená, že jím nelze vysvětlit polohu horní hranice lesa v globálním měřítku (Koerner 1998).

Disturbance mohou způsobovat ztrátu pletiva, které již nestihá být regenerováno. Jedná se o mechanická poškození vlivem větru, sněhu, ledu, činnosti živočichů aj., v některých oblastech také požárů. Disturbance však nejsou obvykle považovány za činitele, který by globálně určoval polohu horní hranice lesa (Koerner 1998).

Antropogenní činností je ovlivněna poloha horní hranice lesa již téměř globálně (Holtmeier 2000). Na řadě míst vedla ke snížení nadmořské výšky horní hranice lesa, obvykle o 150–300 m v porovnání s maximální postglaciální nadmořskou výškou klimatické hranice lesa. Velmi častým antropogenním vlivem je pastva hospodářských zvířat, která mnohde probíhá už tisíce let. Dalšími vlivy jsou např. těžba či v posledních desetiletích masová turistika (Holtmeier 2009).

Uchycení semenáčků je nutným předpokladem pro růst stromů na horní hranici lesa. I přes snižující se reprodukční schopnost stromů s rostoucí nadmořskou výškou je v oblasti horní hranice lesa semen schopných uchycení relativně dostatek (Sveinbjornsson et al. 1996). Semenáčky se velmi často nacházejí nad touto hranicí (Daly a Shankman 1985), nejsou však schopny přechodu do fáze stromu (viz Úvod). Důvodem mohou být jiné podmínky panující při zemi a důležitou roli může hrát kompetice jiných rostlinných druhů (Koerner 1998).

Přestože schopnost fotosyntézy při nízkých teplotách klesá, stromy na horní hranici lesa obecně netrpí nedostatečným příjmem uhlíku, který by znemožňoval růst (Koerner 1998). Výzkumy naznačují, že ztráty uhlíku v chladném období jsou nahrazeny v řádu dnů až týdnů v období teplot příznivějších pro fotosyntézu (Holtmeier 2009).

Druhové složení stromů na horní hranici lesa je dáno klimatem a vývojem rostlin v dané oblasti. Zvláště pokud se na horní hranici vyskytuje více druhů, mohou jejich rozdílné ekologické vlastnosti a nároky (např. světlomilnost, klimaxové či pionýrské druhy, eolické či živočišné šíření semen aj.) hrát významnou roli ve vývoji stanovišť i co se týče struktury, fyziognomie a klimaticky podmíněné dynamiky horní hranice lesa (Holtmeier 2009). Kompetičně silné druhy jako např. smrk Engelmannův (*Picea engelmannii*) či smrk ztepilý (*Picea abies*) často tvoří stanoviště s vysokým stupněm zápoje a ostrou hranicí. Kompetičně slabší druhy jako modřín (*Larix*) či mnohé druhy borovic (*Pinus*) tvoří obvykle hranici rozptýlenou (Armand 1992).

## 2.3 Faktory ovlivňující postup horní hranice lesa

Poloha horní hranice lesa v prostoru a čase odráží dřívější i současně probíhající změny způsobené mnoha faktory (např. makroklima, mikroklima, půdní vlastnosti, sukcese, kompetice, činnost zvířat, vlastnosti druhu tvořícího horní hranici lesa aj.), které spolu vzájemně interreagují (obrázek 4). Reliéf je nejkonstantnějším činitelem a determinuje mnohé faktory (distribuce stromů, půdní teplota, půdní vlhkost) pod vlivem změn klimatu (Holtmeier a Broll 2005).

Reakce horní hranice lesa na klimatické změny je pozorována v globálním pohledu. V tomto globálním trendu jsou však regionální a lokální variace i variace v čase, liší se tak jeho rozsah, intenzita a mechanismus změn. Je proto složité dojít k obecným závěrům. Existují ale některé společné aspekty (tabulka 1) (Holtmeier 2009).

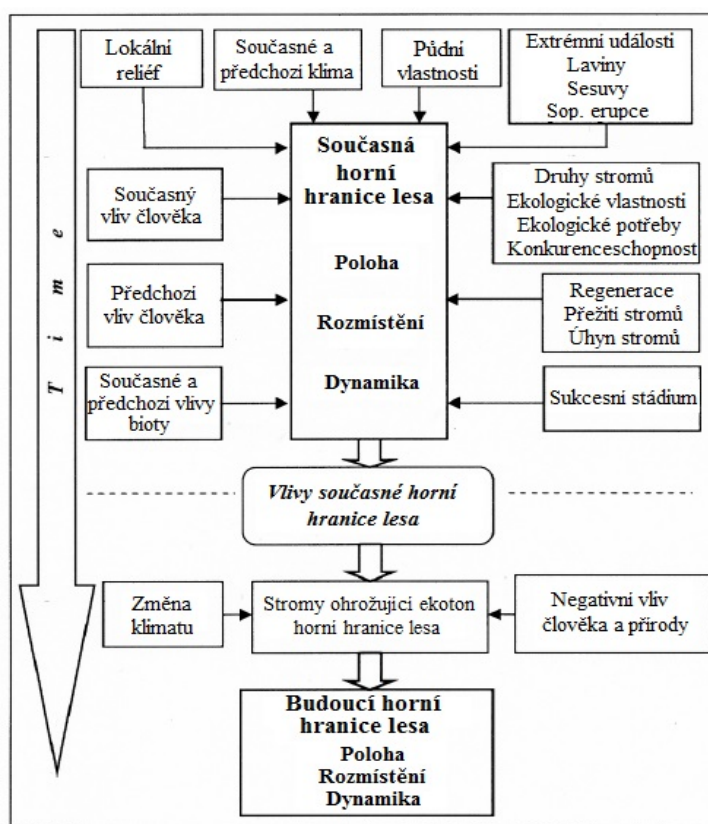
V současné době pozorovaný postup horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek je v mnohých případech návrat do poloh zalesněných ještě v posledním tisíciletí. Historický vývoj stanovišť má dlouhotrvající následky a je jedním z hlavních faktorů ovlivňujících současnou polohu horní hranice lesa (obrázek 4). Extrémní či katastrofické události (mrazy během vegetační doby, požáry, sopečné erupce, šíření nemocí aj.) mohou způsobit ústup a změnit dynamiku horní hranice lesa v budoucnu. Takovéto události je však velmi složité (či přímo nemožné) předpovídat (Holtmeier 2009).

Relativně stálé tvary reliéfu a mikroreliéfu způsobují, že horní hranice lesa nepostupuje rovnoměrně, ale stromy se uchytí nejdříve na příznivějších stanovištích a jiná místa ve stejné nadmořské výšce mohou zůstat dlouhodobě nezalesněná (Holtmeier 1989). Vliv mikroreliéfu na příjem slunečního záření a větrné podmínky je zásadní pro přežití mladých jedinců. Stanoviště jsou navíc ovlivněna přítomností stromů samotných (Daly 1984). S uchycením většího množství stromů dochází ke snížení vlivu větru na jedince a k větší depozici sněhu. Ten pak může chránit uchycující se semenáčky (Germino et al. 2002). Déle trvající sněhová pokrývka však může vést k napadení houbami, zkrácení vegetačního období a nižším půdním teplotám v letním období (Holtmeier 2009). Při posunu horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek může dojít k vystavení silnému větru, vliv tvaru reliéfu tak zejména pro semenáčky a mladé jedince může ještě vzrůst (Resler 2006). Ke změně orograficky podmíněné polohy horní hranice lesa dojde zřídka, a to

i v dlouhodobém horizontu (Holtmeier a Broll 2005).

Na změnu teplotních poměrů může hranice lesa reagovat se zpožděním v řádu až desítek či stovek let (Davis 1986). Klimatické změny navíc nepůsobí stejně na různé druhy stromů (Holtmeier 2009).

Pastva, okus a sešlap způsobený divokými býložravci má negativní vliv na postup horní hranice lesa (Holtmeier 2009). Antropogenně ovlivněné hranice lesa mnohde souvisí s pastvou hospodářských zvířat, ale i jinými aktivitami. Po změně využití krajiny obvykle následuje velmi rychlá změna v poloze horní hranice lesa (Holtmeier a Broll 2005).



**Obrázek 4:** Poloha a dynamika horní hranice lesa jako důsledek dřívějšího vývoje a změn prostředí (upraveno podle Holtmeier 2009 – Holtmeier a Broll 2007)

<b>Klimatické faktory</b>	<b>Ostatní faktory</b>
Teplá vegetační sezona bez výskytu mrazů	Dostatečná zásoba semen
Žádné extrémní klimatické události, které by znemožňovaly uchycení semenáčků a růst stromů (např. extrémní sucho, vysoká sněhová pokrývka)	Efektivní rozptyl semen
Zimní sněhová pokrývka (v mimotropických oblastech) poskytující ochranu semenáčkům	Vhodné podmínky pro uchycení
Nízké rychlosti větru	Žádná nebo malá kompetice nestromových druhů rostlin
	Míra přežití semenáčků > jejich úmrtnost
	Neomezená zásoba živin
	Vyrovnané hodnoty půdní vlhkosti
	Umožnění uchycení semenáčků např. ochranou vzrostlých stromů
	Zotavení doposud potlačovaných jedinců
	Žádné dlouhotrvající disturbance způsobené patogeny, nemocemi a hmyzem
	Absence požárů (vč. antropogenně založených)
	Absence destruktivních pohybů sněhu
	Stabilní substráty
	Adaptace stromového druhu na nové podmínky stanoviště

**Tabulka 1:** Faktory podporující postup horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek (upraveno – Holtmeier 2009)

### **3 Regionální přehled změn polohy horní hranice lesa na severní polokouli (mimo Evropu)**

Vzhledem k tomu, že se tato práce zabývá změnami polohy horní hranice lesa v temperátní a boreální části severní polokoule mimo Evropu, týká se tato kapitola pouze těchto oblastí.

#### **3.1 Asie**

Přestože Asie zaujímá v temperátní a boreální části severní polokoule velkou plochu a nachází se v ní velké množství pohoří s velmi rozmanitými přírodními podmínkami, problematice horní hranice lesa se v této oblasti věnuje jen velmi omezené množství výzkumů, většina výzkumné činnosti je soustředěna do Evropy a Severní Ameriky (Holtmeier 2009). Výzkum Harsch et al. (2009) naznačuje, že na většině lokalit dochází k posunu horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek, ovšem vzhledem k velmi malému množství dat je složité určit obecný trend pro celou oblast.

##### **3.1.1 Severní Asie**

V této oblasti se zabýval problematikou změn v poloze horní hranice lesa např. Moiseev (2002), konkrétně v pohoří Kuzněcký Alatau v jižní části Sibiře. Horní hranici lesa zde tvoří modřín sibiřský (*Larix sibirica*) a k roku 1997 se nacházela v nadmořské výšce přibližně 1600 m n. m. Dendrochronologickou metodou byl zjištěn postup hranice lesa do vyšších nadmořských výšek. U tohoto postupu byla zjištěna korelace s obdobími zvýšených letních teplot.

##### **3.1.2 Střední Asie**

Zde prováděli výzkum např. Wang et al. (2006), a to ve Východním Ťan-Šanu. Na horní hranici lesa tu roste smrk Schrenkův (*Picea schrenkiana*) a hranice se nachází přibližně ve 2800 m n. m. Dendrochronologickým výzkumem nebyla za několik desetiletí v této lokalitě zjištěna změna v poloze horní hranice lesa. Byla zde však zjištěna korelace mezi průměrnou minimální teplotou v únoru a srpnu a šířkou letokruhu odpovídajícího roku.

### 3.1.3 Východní Asie

Mezi práce zabývající se změnou polohy horní hranice lesa ve Východní Asii patří např. výzkumy Bakera a Moseleyho (2007) a Sakia a Masuzawy (2012).

Baker a Moseley (2007) se zabývali lokalitou na východním okraji Himálaje. Porovnáním fotografií stejného místa z let 1923 a 2003 byl zjištěn posun horní hranice lesa o 45 m vzhůru do nadmořské výšky přibližně 4300 m n. m. Přestože klimatická data z let 1955 až 1995 ukazují pozitivní teplotní trend (v zimním i letním období) a negativní trend ročního srážkového úhrnu, je souvislost posunu se změnami klimatických podmínek nejasná, i v této nadmořské výšce se jedná o oblast, která byla ještě relativně nedávno využívána k pastvě hospodářských zvířat. Navíc byla v období 1923 až 2003 zasažena nejméně dvěma požáry. Na horní hranici lesa se zde nalézají modřín Potaninův (*Larix potaninii*).

Sakio a Masuzawa (2012) zkoumali dynamiku horní hranice lesa na jihovýchodním svahu hory Fudži. Jedná se o oblast, která byla výrazně ovlivněna sopečnou erupcí roku 1707. Dendrochronologickým výzkumem mezi lety 1978 a 1999 byl zjištěn posun horní hranice lesa o 21 výškových metrů. Jedná se nejspíše o proces rekolonizace dřívějších stanovišť, která byla opuštěna z důvodu vulkanické disturbance. Není však vyloučeno, že klimatické změny tento proces urychlují. Dominantním druhem je zde modřín japonský (*Larix kaempferi*) a hranice lesa se nachází v nadmořské výšce přibližně 2400 m n. m.

## **3.2 Severní Amerika**

V Severní Americe je výzkum koncentrován do její západní části, nejvíce pak do oblasti Skalnatých hor. Většina z několika desítek lokalit zkoumaných v práci Harsch et al. (2009) vykazovala postup horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek, jen u dvou byl pozorován ústup.

### **3.2.1 Východní Severní Amerika**

Ve východní části Severní Ameriky byly změny v poloze horní hranice lesa zkoumány např. na Presidential Range v severní části Appalačského pohoří. Bond (2010) uvádí, že zde v období 1986 až 2004 došlo k posunu horní hranice lesa o 11 m do nadmořské výšky 1615 m n. m. Výsledku bylo dosaženo porovnáním satelitních snímků. Horní hranici lesa zde tvoří jedle balzámová (*Abies balsamea*).

### **3.2.2 Západní Severní Amerika**

V západní části Severní Ameriky je většina výzkumů týkajících se horní hranice lesa prováděna ve Skalnatých horách.

#### **3.2.2.1 Skalnaté hory**

Z důvodu velké rozlohy a rozdílných přírodních podmínek (i antropogenních vlivů) jsou v poloze a druhovém složení horní hranice lesa v rámci Skalnatých hor značné rozdíly (Holtmeier 2009).

Butler a DeChano (2001) a Klasner a Fagre (2002) prováděli výzkumy na rozdílných lokalitách v národním parku Glacier v Montaně nedaleko kanadských hranic. Zatímco Butler a DeChano (2001) použili metodu porovnání terestrických fotografií z let 1935 a 1998, Klasner a Fagre (2002) analyzovali letecké snímky z let 1945 a 1991. V obou lokalitách se na horní hranici lesa nachází jedle plstnatoplodá (*Abies lasiocarpa*). Klasner a Fagre (2002) ve studovaném období nezjistili změnu v poloze horní hranice lesa, která se nachází v nadmořské výšce 2160 m n. m. Butler a DeChano (2001) zaznamenali vzestup o 100 metrů do nadmořské výšky 2050 m n. m. Hlavním důvodem je podle autorů aktivní boj proti šíření požárů, které se v oblasti dříve pravidelně vyskytovaly. V jiné části národního parku Glacier (Lee Ridge) Bekker (2005) při dendrochronologickém výzkumu

zaznamenal v období 1920 až 2000 vzestup horní hranice lesa o 22 m do nadmořské výšky přibližně 2300 m n. m. V této lokalitě se vyskytuje borovice pokroucená (*Pinus contorta*).

Ve Front Range ve státě Colorado pozorovali Daly a Shankman (1985) při dendrochronologickém výzkumu vzestup horní hranice lesa v letech 1960 až 1984 do nadmořské výšky 3540 m. V jejich zájmovém území je dominantním druhem borovice ohebná (*Pinus flexilis*). V témže pohoří probíhal také dendrochronologický výzkum Ivese a Hansen-Bristow (1983). Ti v období 1945 až 1980 zaznamenali rychlý ústup horní hranice lesa o 40 m do nadmořské výšky přibližně 3530 m n. m. Důvodem je s největší pravděpodobností rozmach turistiky ve zkoumané lokalitě. Zde se na horní hranici lesa nalézají smrk Engelmannův (*Picea engelmannii*).

Jižněji, v San Juan Mountains, rovněž ve státě Colorado, proběhly dva výzkumy porovnávající historické a současné fotografie. Lokality těchto výzkumů leží velmi blízko sebe. Zier a Baker (2006) při porovnání fotografií z let 1913 a 2004 nezaznamenali pohyb horní hranice lesa, která se nachází přibližně v 3500 m n. m. a je tvořena smrskem Engelmannovým (*Picea engelmannii*). Elliott a Baker (2004) na nedaleké lokalitě porovnáním snímků z let 1909 a 2002 zjistili vzestup horní hranice lesa do nadmořské výšky 3547 m n. m., kde je navíc pozorována invaze *Populus tremuloides* jedlí plstnatoplodou (*Abies lasiocarpa*).

Na jižním okraji Skalnatých hor v Novém Mexiku leží dle Coopa a Givnishe (2007) horní hranice lesa v nadmořské výšce přibližně 3200 m n. m. Analýzou leteckých snímků z let 1935 a 1996 zjistili v tomto období vzestup horní hranice lesa, který byl pravděpodobně způsoben antropogenním potlačováním výskytu požárů. Na horní hranici lesa se v této oblasti nalézají smrk Engelmannův (*Picea engelmannii*).

### **3.2.2.2 Ostatní**

V oblasti pohoří sv. Eliáše v kanadském teritoriu Yukon nedaleko hranic Aljašky prováděli své výzkumy např. Danby a Hik (2007a, 2007b). Zkoumány byly dvě různé lokality v tomto pohoří. Danby a Hik (2007a) porovnáním leteckých snímků z let 1947 a 1989 zjistili, že došlo k posunu horní hranice lesa o 10 výškových metrů vzhůru do nadmořské výšky 1406 m n. m. Vzhledem k tomu, že se jedná o oblast kde za zkoumané období nebyly pozorovány výrazné disturbance či změny využití krajiny, přisuzují autoři

tento posun klimatickým změnám. Na jiné lokalitě v tomto pohoří Danby a Hik (2007b) v období 1992 až 2002 dendrochronologickou metodou nezjistili změnu v poloze horní hranice lesa, která se nachází ve výšce 1336 m n. m. V obou lokalitách je dominantním druhem smrk sivý (*Picea glauca*) (Danby a Hik 2007a, 2007b).

Dendrochronologický výzkum Laroque et al. (2000) probíhal na ostrově Vancouver. Bylo zjištěno, že za téměř 100 let zde došlo k mírnému postupu horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek (1300 m n. m.), který je pravděpodobně řízen klimaticky. Dominuje zde jedle plstnatoplodá (*Abies lasiocarpa*).

V pohoří Sierra Nevada Vale (1987) metodou porovnání snímků lokality v národním parku Yosemite z let 1903 a 1984 nezjistil změnu v poloze horní hranice lesa, která je zde tvořena borovicí pokroucenou (*Pinus contorta*) a leží v nadmořské výšce přibližně 3500 m n. m. Millar et al. (2006) však v jiné lokalitě v Sierra Nevadě zjistili dendrochronologickou metodou posun hranice o 75 m výše v období 1945 až 2006. Hranice v této lokalitě leží ve 3475 m n. m., tvořena je borovicí ohebnou (*Pinus flexilis*).

Weisberg et al. (2007) zkoumali dynamiku horní hranice lesa ve Velké pánvi ve státě Nevada. Porovnáním panchromatických leteckých snímků z let 1966 až 1995 byl zjištěn posun horní hranice lesa do vyšších poloh. Ve zkoumané oblasti dominuje borovice jednolistá (*Pinus monophylla*).

V oblasti vulkanického pohoří San Francisco Peaks ve státě Arizona prováděli dendrochronologický výzkum Cocke et al. (2005). Za období 124 let (1876 až 2000) zde horní hranice lesa klesla o 150 m na úroveň 3506 m n. m. Tento velmi výrazný ústup je přisuzován lidské činnosti, zejména pak pastvě dobytka a těžbě dřeva. Dominantním druhem ve zkoumané lokalitě je borovice osinatá (*Pinus aristata*).

## 4 Metodika

### 4.1 Data

Data o změnách v poloze horní hranice lesa byla získána rešerší odborných článků, které se touto problematikou, případně jí podobnou, v oblasti temperátní a boreální části severní polokoule (mimo Evropu) zabývají. Bylo identifikováno celkem 20 lokalit. Kromě samotné vertikální změny polohy horní hranice lesa v jednotlivých lokalitách vyjádřené v metrech byla z těchto článků zjištěna její poloha (v metrech nad mořem) ke konci studovaného období, délka zkoumaného období, zeměpisná šířka a délka zkoumané lokality, metoda výzkumu (dendrochronologická nebo dálkový průzkum – tj. srovnáním leteckých, satelitních snímků či fotografií), druh (popřípadě druhy) dřeviny, který se na horní hranici lesa nachází, a také zda (ano či ne) byla lokalita ovlivněna změnami ve využití krajiny (*land use*). Články byly vyhledány pomocí specializovaných vyhledávacích služeb (ScienceDirect, Google Scholar) nebo v seznamech literatury citované v jiných odborných člancích.

Z takto získaných dat byla v programu Microsoft Excel vytvořena databáze. Vertikální změna polohy horní hranice lesa a její poloha ke konci studovaného období jsou vyjádřeny číselně v metrech, respektive v metrech nad mořem. Délka zkoumaného období je vyjádřena rovněž číselně v letech. Číselně ve stupních jsou vyjádřeny zeměpisná šířka a délka. Metoda výzkumu nabývá právě jednu z hodnot dendrochronologická, DPZ. Změny ve využití krajiny pak právě jednu z hodnot ano, ne. Druh dřeviny je uveden latinským druhovým jménem. Jednotlivé lokality byly navíc označeny číselně (1–20) podle zeměpisné délky v západovýchodním směru (nejnižší hodnota odpovídá nejzápadnější lokalitě). Pro každou lokalitu byla podílem vertikální změny polohy a délky zkoumaného období vypočtena průměrná roční změna polohy horní hranice lesa. Ta je udána v metrech za rok.

Pro jednotlivé lokality byla zjištěna průměrná měsíční teplota za každý měsíc v období 1901–2013. Tato teplotní data byla získána z časových sérií gridové databáze CRU TS3.22 prostřednictvím internetové služby Climate Explorer, kterou provozuje Královský nizozemský meteorologický institut (*KNMI – Koninklijk Nederlands Meteorologisch*

*Institut*). Data v rozlišení  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  byla získána pro lokality na základě známé zeměpisné šířky a délky. Z teplotních dat byla v každé lokalitě pro každý rok zjištěna průměrná roční teplota vzduchu, která byla vypočítána v programu Microsoft Excel jako průměr průměrných měsíčních teplot v daném roce. Obdobným způsobem byla v každém roce zjištěna průměrná letní a zimní teplota. Vzhledem k tomu, že tato práce se zabývá temperátní a boreální částí severní polokoule, byla k výpočtu průměrných letních teplot použita data za měsíce červen až srpen, pro výpočet průměrných zimních teplot pak prosinec až únor. Veškerá teplotní data byla získána ve stupních Celsia.

## 4.2 Zpracování

Výše uvedená data byla použita k výpočtu meziročních teplotních trendů pro jednotlivé lokality. K tomu byla využita regresní analýza metodou nejmenších čtverců vyjadřující vztah mezi průměrnou roční teplotou a rokem. Tato analýza byla provedena v programu Microsoft Excel. Jako meziroční teplotní trend byla definována směrnice takto získané regresní přímky. Teplotní data v jednotlivých lokalitách byla použita za roky odpovídající období výzkumu a 10 rokům, které tomuto období předcházely. Důvodem je skutečnost, že ke změnám v horní hranici lesa může dojít se zpožděním v porovnání se změnou teplotních poměrů (Harsch et al. 2009). Stejnou analýzou byly získány meziroční letní a zimní teplotní trendy. Místo průměrné roční teploty však byla využita průměrná letní (resp. zimní) teplota v odpovídajícím roce.

V programu R pak po provedení Shapiro-Wilkova testu normality byly vypočteny hodnoty Pearsonova korelačního koeficientu na 5% hladině významnosti za účelem zjištění korelace mezi teplotními trendy a postupem horní hranice lesa.

## 5 Výsledky

Z 20 zkoumaných lokalit byl vzestup horní hranice lesa pozorován na 13 (65 %), na 5 lokalitách (25 %) nebyla pozorována změna a sestup byl pozorován jen na dvou lokalitách (obrázek 5), u obou těchto lokalit navíc byla zaznamenána výrazná změna ve využití krajiny. V průměru byl pozorován vzestup 0,27 m/rok. Celkový teplotní trend je pozitivní, jen tři lokality vykazovaly pokles ročních teplot. V případě letního teplotního trendu byly však zjištěny záporné hodnoty u celé poloviny lokalit. Záporný zimní teplotní trend byl pozorován jen na čtyřech lokalitách (20 %). Největší postup horní hranice lesa, 1,59 m/rok, byl pozorován v lokalitě č. 8, která se nachází ve Skalnatých horách v Severní Americe. Nejvýraznější sestup (o 1,21 m /rok) byl zjištěn u lokality č. 10, ležící v San Francisco Peaks v Severní Americe (tabulka 2, tabulka 3).

U asijských lokalit (č. 17 až 20) nebyla změna v poloze horní hranice lesa pozorována v jednom případě (lokalita č. 17), u 75 % lokalit došlo k postupu do vyšších nadmořských výšek v rozmezí 0,30 m/rok až 1,00 m/rok, v průměru o 0,62 m/rok. Roční, letní i zimní trendy byly v této oblasti v průměru pozitivní. V Severní Americe (lokality č. 1 až 16) byl zaznamenán sestup u dvou lokalit (č. 10 a 14), 4 lokality (č. 2, 4, 9 a 13) nevykazovaly posun horní hranice lesa. Postup byl pozorován na zbývajících 10 lokalitách (62,5 %), v rozmezí 0,16 m/rok až 1,59 m/rok, průměrně 0,59 m/rok. Průměrný posun horní hranice lesa v severoamerických lokalitách je 0,22 m/rok, průměrné roční, letní a zimní teplotní trendy jsou pozitivní (tabulka 2, tabulka 3).

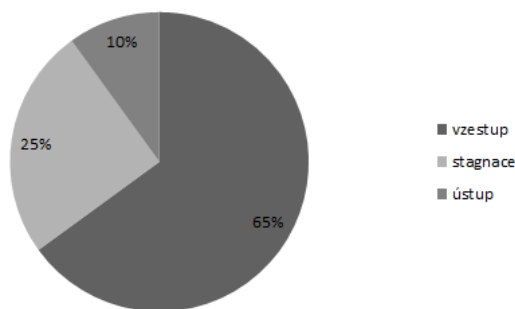
V 10 lokalitách, kde byl výzkum prováděn dendrochronologickou metodou, byl pozorován roční vzestup horní hranice lesa od -1,21 m do 1,23 m. Na dvou lokalitách (č. 10 a 14) byl zaznamenán ústup, v obou případech o více než 1 m/rok. Na dvou jiných lokalitách (č. 2 a 17) pak nebyla zaznamenána změna v poloze horní hranice lesa. Na zbylých 6 (60 %) byl pozorován vzestup, v průměru o 0,63 m/rok (tabulka 2, tabulka 3).

V 10 lokalitách, kde průzkum probíhal metodou dálkového průzkumu (DPZ), nebyl ústup horní hranice lesa pozorován nikde. Na třech lokalitách (č. 4, 9, 13) je poloha horní hranice lesa stabilní, na 7 (70 %) byl pozorován vzestup o 0,18 m/rok až 1,59 m/rok, v průměru o 0,58 m/rok (tabulka 2, tabulka 3).

Na 9 lokalitách, kde byla zaznamenána změna ve využití krajiny, byly pozorovány roční změny v poloze horní hranice o  $-1,21$  m/rok do  $1,59$  m/rok, tato kategorie tedy zahrnuje jak lokalitu s nejvyšším zaznamenaným ročním vzestupem, tak i sestupem. Na 2 lokalitách (č. 10 a 14) byl pozorován sestup horní hranice lesa, na jiných dvou (č. 9 a 13) pak nebyl zaznamenán pohyb. Vzestup byl zjištěn u 5 lokalit (56 %), v průměru o  $0,74$  m/rok (tabulka 2, tabulka 3).

Na lokalitách, kde nebyla zjištěna změna ve využití krajiny, kterých je 11, nebyl ústup horní hranice lesa pozorován. Na třech místech (č. 2, 17 a 4) byla její poloha stálá, na 8 (73 %) byl zjištěn postup o  $0,16$  m/rok až  $1,23$  m/rok, v průměru o  $0,51$  m/rok (tabulka 2, tabulka 3).

Výpočtem korelačních koeficientů nebyla zjištěna statisticky významná korelace mezi změnou polohy horní hranice lesa a ročním, letním ani zimním teplotním trendem. Statisticky významná korelace nebyla pozorována ani při omezení výběru dat na lokality, kde nebyly zaznamenány změny ve využití krajiny, jehož účelem bylo pokud možno eliminovat vliv významného antropogenního ovlivnění na výsledky.



**Obrázek 5:** Graf dynamiky horní hranice lesa na zkoumaných lokalitách

lokality č.	zeměpisná šířka (ve °)	zeměpisná délka (ve °)	poloha HHL (m n. m.)	sledované období	vzestup HHL (m)	vzestup HHL/rok (m)	změna v <i>land use</i>	metoda	druh	zdroj
1	61,00	-138,00	1406	1947–1989	10	0,24	ne	DPZ	<i>Picea glauca</i>	Danby a Hik 2007a
2	60,45	-137,30	1336	1992–2002	0	0,00	ne	dendrochronologická	<i>Picea glauca</i>	Danby a Hik 2007b
3	49,02	-124,19	1300	1900–1996	15	0,16	ne	dendrochronologická	<i>Abies lasiocarpa</i>	Laroque et al. 2000
4	37,45	-119,35	3500	1903–1984	0	0,00	ne	DPZ	<i>Pinus contorta</i>	Vale 1987
5	36,50	-118,16	3475	1945–2006	75	1,23	ne	dendrochronologická	<i>Pinus flexilis</i>	Millar et al. 2006
6	39,38	-116,48	2490	1966–1995	14	0,48	ne	DPZ	<i>Pinus monophylla</i>	Weisberg et al. 2007
8	48,00	-114,35	2050	1935–1998	100	1,59	ano	DPZ	<i>Abies lasiocarpa</i>	Butler a DeChano 2001
7	48,90	-113,75	2300	1920–2000	22	0,28	ne	dendrochronologická	<i>Pinus contorta</i>	Bekker 2005
9	48,43	-113,65	2160	1945–1991	0	0,00	ano	DPZ	<i>Abies lasiocarpa</i>	Klasner a Fagre 2002
10	35,19	-111,36	3506	1876–2000	-150	-1,21	ano	dendrochronologická	<i>Pinus aristata</i>	Cocke et al. 2005
11	35,43	-106,31	3200	1935–1996	22	0,36	ano	DPZ	<i>Picea engelmannii</i>	Coop a Givnish 2007
13	37,13	-106,30	3500	1913–2004	0	0,00	ano	DPZ	<i>Picea engelmannii</i>	Zier a Baker 2006
12	37,13	-106,30	3547	1909–2002	17	0,18	ano	DPZ	<i>Abies lasiocarpa</i> , <i>Populus tremuloides</i>	Elliot a Baker 2004
14	39,63	-105,81	3530	1945–1980	-40	-1,14	ano	dendrochronologická	<i>Picea engelmannii</i>	Ives a Hansen-Bristow 1983
15	40,04	-105,35	3540	1960–1984	19	0,79	ne	dendrochronologická	<i>Pinus flexilis</i>	Daly a Shankman 1985
16	44,27	-71,30	1615	1986–2004	11	0,61	ne	DPZ	<i>Abies balsamea</i>	Bond 2010
17	43,80	88,10	2800	1959–2000	0	0,00	ne	dendrochronologická	<i>Picea schrenkiana</i>	Wang et al. 2006
18	53,50	89,01	1600	1937–1997	18	0,30	ne	dendrochronologická	<i>Larix sibirica</i>	Moiseev 2002
19	28,15	98,46	4300	1923–2003	45	0,56	ano	DPZ	<i>Larix potaninii</i>	Baker a Moseley 2007
20	35,35	138,75	2400	1978–1999	21	1,00	ano	dendrochronologická	<i>Larix kaempferi</i>	Sakio a Masuzawa 2012

Tabulka 2: Databáze vzestupu horní hranice lesa

lokality č.	teplotní trend rok	teplotní trend léto	teplotní trend zima
1	-0,008	-0,003	-0,005
2	0,048	0,044	0,039
3	0,006	0,002	0,010
4	0,007	0,003	0,015
5	0,020	0,017	0,025
6	0,003	-0,005	-0,004
8	-0,002	-0,006	0,003
7	0,007	0,000	0,017
9	0,002	-0,003	0,013
10	0,006	0,005	0,011
11	0,006	0,000	0,013
13	0,003	-0,001	0,003
12	0,001	-0,002	0,000
14	0,001	-0,011	0,010
15	0,001	0,015	-0,030
16	0,049	0,037	0,096
17	0,047	0,006	0,106
18	0,029	-0,002	0,075
19	-0,001	-0,001	-0,002
20	0,037	0,027	0,037

*Tabulka 3: Teplotní trendy na zkoumaných lokalitách*

## 6 Diskuse

Přestože z 20 zkoumaných lokalit byl ústup horní hranice lesa pozorován jen u dvou, posun hranice do vyšších nadmořských výšek byl pozorován u 13 lokalit (tj. 65 %). Z těchto výsledků lze usuzovat, že postup horní hranice lesa není jev, který by se vyskytoval ve všech oblastech severní polokoule. K podobnému závěru v globálním měřítku dospěli i Harsch et al. (2009), kteří nepotvrdili často předpokládanou celosvětovou reakci ekotonu na globální zvyšování průměrných teplot a v rozsáhlém výzkumu zjistili postup hranice lesa jen na 52 % zkoumaných lokalit.

V této práci se nepodařilo zjistit statisticky významnou korelaci mezi změnami polohy horní hranice lesa a teplotními trendy, ať už ročními, letními nebo zimními, přestože k výpočtu těchto trendů byly použity obdobné metody jako při výzkumu Harsch et al. (2009), kteří uvádějí, že největší pravděpodobnost postupu horní hranice lesa do vyšších nadmořských výšek je u lokalit, které vykazují pozitivní zimní teplotní trend. Tento rozpor může být způsoben omezeným počtem zkoumaných lokalit v této bakalářské práci. Významná korelace mezi postupem horní hranice lesa a teplotními trendy se neprojevila ani při vyloučení lokalit, kde byly zaznamenány výrazné změny ve využití krajiny. Výsledky však mohly být ovlivněny použitím teplotních dat z gridové databáze s rozlišením  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ , které nemusí odpovídat skutečným podmínkám na horní hranici lesa v dané oblasti. Tento problém by nebyl eliminován ani použitím konkrétních staničních dat (Tranquillini 1979).

Lokalita s nejvyšším zjištěným postupem i ústupem horní hranice lesa byly zasaženy změnami ve využití krajiny. Tato skutečnost by mohla naznačovat, že antropogenní činnost je velmi významným faktorem ovlivňujícím dynamiku horní hranice lesa, což by bylo konzistentní se závěry, ke kterým došli Holtmeier a Broll (2005). Holtmeier a Broll (2007) pak tvrdí, že činnost člověka může eliminovat vliv měnících se klimatických podmínek. V lokalitách, kde došlo ke změnám ve využití krajiny, a které vykazují postup hranice lesa, je průměrná hodnota tohoto postupu vysoká, 0,74 m/rok. Mezi antropogenní faktory, které byly u zkoumaných lokalit zjištěny, patří pastva dobytka, těžební činnost, zabraňování šíření požárů i rozmach masové turistiky, což je faktor, který se začal objevovat převážně až ve 2. polovině 20. století (Ives a Hansen-Bristow 1983).

Zatímco v lokalitách zkoumaných dendrochronologicky byl u 40 % případů sledován ústup či stagnace horní hranice lesa, lokality zkoumané porovnáním snímků ústup nevykazují vůbec a v 70 % případů u nich je pozorován postup hranice lesa do vyšších nadmořských výšek. Podle Harsch et al. 2009 má dendrochronologická metoda vyšší rozlišovací schopnost, což však může mít za následek, že jsou při výzkumu touto metodou zohledněny i změny, které se v dlouhodobém horizontu nemusejí promítnout.

U 75 % asijských lokalit byl zjištěn postup horní hranice lesa, zatímco celkově byl postup sledován jen u 65 % lokalit a v Severní Americe jen u 62,5 %. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben nerovnoměrným rozložením lokalit, které je způsobeno skutečností, že většina výzkumů problematiky horní hranice lesa je v rámci zájmové oblasti této práce soustředěna do Severní Ameriky, nejčastěji pak do pohoří v její západní části (Miehe a Miehe 2000).

Z výsledků této práce lze usoudit, že není možné jednoznačně určit konkrétní faktor, kterým by byla řízena dynamika horní hranice lesa v temperátní a boreální části severní polokoule. Podle Koerner (2012) není toto zjištění v kontextu studií zabývajících se problematikou horní hranice lesa neobvyklé, interpretace takových výsledků je však podle něj problematická.

## 7 Závěr

Rešeršní literatury zabývající se problematikou horní hranice lesa a její dynamiky bylo zjištěno, že se jedná o problematiku komplexní (např. Holtmeier 2009). Přestože obecně lze říci, že poloha horní hranice lesa je dána teplotním deficitem, nelze jednoznačně stanovit teplotu vzduchu, kterou by byla globálně určena poloha horní hranice lesa, tato poloha je totiž ovlivněna mnoha jinými faktory, které se mohou na různých lokalitách lišit. Například antropogenní činnost vedla na rozsáhlých územích ke snížení polohy horní hranice lesa. Často se předpokládá, že v souvislosti se změnami klimatu dojde k celosvětovému postupu horní hranice lesa do vyšších poloh (Harsch et al. 2009), tento trend však není univerzální. Zejména změny ve využití krajiny mohou vést k rychlým změnám polohy horní hranice lesa, které nesouvisí se změnou klimatických podmínek.

V této práci nebyla zjištěna korelace mezi postupem horní hranice lesa a teplotními trendy. Lokality, kde došlo ke změnám ve využití krajiny, vykazují rychlý postup i ústup horní hranice lesa, zdá se tedy, že dynamika hranice lesa by mohla být tímto faktorem výrazně ovlivněna. Z výsledků práce není možné jednoznačně určit faktor, který by měl univerzální vliv na postup horní hranice lesa. Přestože výsledky výzkumů prováděných různými metodami vykazují určité rozdíly, při omezeném množství dat je nelze považovat za významné.

## 8 Seznam použité literatury

AAS, B., FARLUND, T. (1996): The present and the Holocene birch belt in Norway. *Paläoklimaforschung*, 20, s. 18–24

ARMAND, A. D. (1992): Sharp and gradual mountain timberlines as a result of species interaction. *Ecology Studies*, 92, s. 360–378

BAKER, B. B., MOSELEY, R. K. (2007): Advancing treeline and retreating glaciers: implications for conservation in Yunnan, P.R. China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 39, s. 200–209

BROCKMANN-JEROSCH, H. (1919): Baumgrenze und Klimacharakter. *Beiträge zur geobotanischen Landesaufnahme*, 6, s. 1–255

BEKKER, M. F. (2005): Positive feedback between tree establishment and patterns of subalpine forest advancement. Glacier National Park, Montana, USA. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 37, s. 97–107

BOND, K. (2010): Tracking Advance of the Tree Line on the New Hampshire Presidential Ridge. Poster. Tufts University, Medford, Massachusetts

BUTLER, D. R., DECHANO, L. M. (2001): Environmental change in Glacier National Park, Montana: an assessment through repeat photography from fire lookouts. *Physical Geography*, 22, s. 1–14

COCKE, A. E., FULE, P. Z., CROUSE, J. E. (2005): Forest change on a steep mountain gradient after extended fire exclusion: San Francisco Peaks, Arizona, USA. *Journal of Applied Ecology*, 42, s. 814–823

COOP, J. D., GIVNISH, T. J. (2007): Spatial and temporal patterns of recent forest encroachment in montane grasslands of the Valles Caldera, New Mexico, USA. *Journal of Biogeography*, 34, s. 914–927

CRU TS 3.22 [cit. 20.6.2015]. Dostupné z: <http://climexp.knmi.nl/start.cgi?id=someone@somewhere>

- DALY, C. (1984): Snow distribution patterns in the alpine krummholzzone. *Progress in Physical Geography*, 8, s. 157–175
- DALY, C., SHANKMAN, D. (1985): Seedling establishment by conifers above tree limit on Niwot Ridge, Front Range, Colorado, USA. *Arctic and Alpine Research*, 17, s. 389–400
- DANBY, R. K., HIK, D. S. (2007a): Evidence of recent treeline dynamics in southwest Yukon from aerial photographs. *Arctic*, 60, s. 411–420
- DANBY, R. K., HIK, D. S. (2007b): Variability, contingency and rapid change in recent subarctic tree line dynamics. *Journal of Ecology*, 95, s. 352–363
- DAVIS, M. B. (1986): Climate instability, time lags, and community disequilibrium. *Community ecology*. Harper & Row, New York. s. 269–284
- ELLIOT, E. T., BAKER, W. L. (2004): Quaking aspen (*Populus tremuloides* Michx.) at treeline: a century of change in the San Juan Mountains, Colorado, USA. *Journal of Biogeography*, 31, s. 733–745
- GERMINO, M. J., SMITH, W. K., RESOR, A. C. (2002): Conifer seedling distribution and survival in an alpine tree ecotone. *Plant Ecology*, 162, s. 157–168
- HARSCH, M. A. et al. (2009): Are treelines advancing? A global meta-analysis of treeline response to climate warming. *Ecology Letters*, 12, s. 1040–1049
- HARSCH, M. A., BADER, M. Y. (2011): Treeline form – a potential key to understanding treeline dynamics. *Global Ecology and Biogeography*, 20, s. 582–586
- HOCH, G., KOERNER, C. (2003): The carbon charging of pines at the climatic treeline: A global comparison. *Oecologia*, 135, s. 10–21
- HOLTMEIER, F.-K. (1974): Geoökologische Beobachtungen und Studien an der subarktischen und alpinen Waldgrenze in vergleichender Sicht (nördliches Fennoskandien/Zentralalpen). *Erdwissenschaftliche Forschung*, 8
- HOLTMEIER, F.-K. (2000): Die Höhengrenze der Gebirgswälder. Institut für Landschaftsökologie der Westfälische Wilhelms-Universität, 337 s.

HOLTMEIER F.-K. (2009) Mountain timberlines. Ecology, patchiness and dynamics. Springer, New York. 448 s.

HOLTMEIER, F.-K., BROLL, G. (2005): Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental changes at landscape and local scales. *Global Ecology and Biogeography*, 14, s. 395–410

HOLTMEIER, F.-K., BROLL, G. (2007): Treeline advance driving processes and adverse factors. *Landscape Online*, 1, s. 1–33

IVES, J. D., HANSEN-BRISTOW, K. J. (1983): Stability and instability of natural and modified upper timberline landscapes in the Colorado Rocky Mountains, USA. *Mountain Research and Development*, 3, 149–155

KLASNER, F. L., FAGRE, D. B. (2002): A half century of change in alpine treeline patterns at Glacier National Park, Montana, USA. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 34. s. 49–56

KOERNER, C. (1998a): A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. *Oecologia*, 115. s. 445–459

KOERNER, C., PAULSEN, J. (2004): A world-wide study of high altitude treeline temperatures. *Journal of Biogeography*, 31. s. 713–732

KOERNER, C. (2012): Alpine treelines: Functional ecology of the global high elevation tree limits. Springer, Basel, 220 s.

LARCHER, W. (1985): Winter stress in high mountains. Eidgenoessische Anstalt fuer das forstliche Versuchswesen, 270, s. 11-19

LAROQUE, C. P., LEWIS, D. H., SMITH, D. J. (2000): Treeline dynamics on southern Vancouver Island, British Columbia. *Western Geography*, 10, s. 43–63

MIEHE, G., MIEHE, S. (2000): Comparative high mountain research on the treeline ecotone under human impact. *Erdkunde*, 54, s. 34-50

- MILLAR, C. I., WESTFALL, B., DELANY, D. (2006): Limber pine recruitment and demography at upper treeline, lower treeline, and middle elevation in the White Mountains. Sierra Nevada Research Center. USFS. 5 s.
- MOISEEV, P. A. (2002): Effect of climatic changes on radial increment and age structure formation in high-mountain larch forests of the Kuznetsk Ala Tau. *Russian Journal of Ecology*, 33, s. 7–13
- RESLER, L. M. (2006): Geomorphic controls of spatial pattern and process at alpine treeline. *Professional Geographer*, 58, s. 124–138
- SAKIO, H., MASUZAWA, T. (2012): The advancing timberline on Mt. Fuji: natural recovery or climate change? *Journal of Plant Research*, 125, s. 539–546
- SVEINBJOERNSSON, B., KAUKANEN, H., NORDELL, O. (1996): Treeline ecology of mountain birch in the Tornetraesk area. *Ecological Bulletins*, 45, s. 65–70
- TRANQUILLINI, W. (1979a): Physiological ecology of the alpine timberline. *Ecological Studies*, 31, 140 s.
- VALE, T. R. (1987): Vegetation change and park purposes in the high elevations of Yosemite National Park, California. *Annals of the Association of American Geographers*, 77, s. 1–18
- WANG, T., ZHANG, Q., MA, K. (2006): Treeline dynamics in relation to climatic variability in the central Tianshan Mountains, northwestern China. *Global Ecology & Biogeography*, 15, s. 406–415
- WEISBERG, P. J., LINGUA, E., PILLAI, R. B. (2007): Spatial patterns of pinyon-juniper woodland expansion in central Nevada. *Rangeland Ecology and Management*, 60, s. 115–124
- ZIER, J. L., BAKER, W., L. (2006): A century of vegetation change in the San Juan Mountains, Colorado: An analysis using repeat photography. *Forest Ecology and Management*, 228, s. 251–262