

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta
Katedra fyzické geografie a geoekologie

Studijní program: Geografie
Studijní obor: Geografie a kartografie



Klára Eliášová

MAXIMÁLNÍ POLOHY HORNÍ HRANICE LESA V ALPÁCH
A JEJICH VZTAH K TEPLOTNÍM CHARAKTERISTIKÁM

THE HIGHEST ALPINE TREELINE POSITIONS IN THE ALPS
AND THEIR RELATION TO TEMPERATURES

Bakalářská práce

Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Václav Tremel, Ph.D.
Praha 2015

Zadání bakalářské práce

Téma práce: Maximální polohy horní hranice lesa v Alpách a jejich vztah k teplotním charakteristikám

Cíle práce

- 1) *Popsat hlavní charakteristiky a hypotézy vysvětlující vznik horní hranice lesa.*
- 2) *Vytvořit databázi nejvyšších poloh hranice lesa v Alpách (atributy: nadmořská výška polohy horní hranice lesa, druh dřeviny tvořící hranici lesa, zeměpisná šířka a délka lokality) a vypočítat jejich základní teplotní charakteristiky.*
- 3) *Zjistit jaká je variabilita jednotlivých teplotních proměnných.*

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Zájmové území: Alpy

Metody: tvůrčí rešerše, klimatická staniční data za období 1961-1990 získat z KNMI Climate Explorer a z NOAA (chybějící hodnoty dopočítat regresí z CRU TS), nejvyšší polohy hranice lesa v okolí stanic zjistit z Google Earth.

Datum zadání: 1.10. 2014

Jméno studenta: Klára Eliášová

Podpis studenta:.....

Jméno vedoucího práce: Václav Tremel

Podpis vedoucího práce:

Poděkování:

Děkuji svému školiteli Mgr. Václavu Tremlovi, Ph.D za odborné konzultace, cenné rady a především za trpělivé vedení této práce. Dále bych chtěla poděkovat Markétě Hillayové za pomoc při překladu anglického textu.

Prohlášení:

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

V Praze 25. 05. 2015

Podpis:

Poloha horní hranice lesa v Alpách a její vztah k teplotním charakteristikám

Abstrakt

Již mnoho let se vědci po celém světě zabývají přechodem stromových forem dřevin ke keříčkové a travnatobylinné vegetaci na gradientu nadmořské výšky v ekotonu horní hranice lesa (HHL). Hlavní faktor, který z ekofyziologického hlediska určuje vznik HHL, se dnes jeví nedostatečné zabudování asimilátů vzniklých fotosyntézou do buněčných struktur a omezený růst buněk a pletiv díky nízkým teplotám vegetačního období. Důležitou roli v ekotonu HHL hraje i zeměpisná šířka a kontinentalita, s jejíž rostoucí mírou stoupá vegetační stupňovitost a poloha HHL. Podle tvaru přechodové zóny rozlišujeme rozptýlené, ostré a ostrovní horní hranice lesa a hranice lesa s klečovou formou dřevin. Teorie omezení růstu se považuje za nejpravděpodobnější a nejuhrovnější hypotézu a příčinu utváření horní hranice lesa, ve které nízké teploty způsobují její formování. V této práci byly zjištěny vhodné indikátory, spojující polohy horních hranic lesa v regionu Alp. Výsledky byly srovnány se světovými výzkumy.

Klíčová slova: horní hranice lesa, typy hranice lesa, teplotní omezení růstu, Alpy, biogeografie, nedostatečná uhlíková bilance, vegetační stupňovitost

Alpine treelines in the Alps and their relation to temperatures

Abstract

For many years, scientists around the world deal with the transition of tree forms of woody species to heathland and grassland vegetation in altitudinal gradient in treeline ecotone. The main factor that determines the ecophysiological terms of origin of treeline ecotone now seems to be inadequate building of assimilates incurred from photosynthesis to cellular structures and limited growth of cells and tissues due to the low temperatures of the growing period. There is important role of latitude and continentality with its increasing rate vegetation zonation rises. According to the shape of the transition zone we distinguish diffused, sharp and island treeline and mugo pine

treeline. The Growth Limitation hypothesis is considered the most likely and the most trustworthy hypothesis and the cause of formation of treeline in which the low temperature causes its formation. This paper discussed suitable indicators connecting the position of the treeline in the Alps region. The results were compared with global research.

Key words: treeline, types of treeline, the growth limitation hypothesis, the Alps, biogeography, insufficient carbon uptake, vegetation zonation.

Obsah

| | |
|--|-----------|
| Obsah | v |
| Seznam tabulek | vii |
| 1 ÚVOD..... | 1 |
| 2 DEFINICE POJMU HORNÍ HRANICE LESA | 4 |
| 3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ POLOHU HORNÍ HRANICE LESA..... | 6 |
| 3.1 Hypotézy vysvětlující vznik HHL | 9 |
| 3.1.1 Nedostatečná uhlíková bilance | 9 |
| 3.1.2 Hypotéza omezení růstu | 10 |
| 3.1.3 Disturbanční hypotéza | 11 |
| 3.1.4 Stresová Hypotéza..... | 11 |
| 3.1.5 Reprodukční hypotéza..... | 11 |
| 3.2 Klasifikace horní hranice lesa podle tvaru přechodové zóny | 12 |
| 3.3 Přehled teplotních indikátorů polohy horní hranice lesa | 15 |
| 4 ZÁKLADNÍ FYZICKO-GEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA STUDOVANÉHO REGIONU | 18 |
| 4.1 Západní Alpy..... | 19 |
| 4.1.1 Vnější krystalické pásmo | 19 |
| 4.1.2 Vnitřní krystalické pásmo | 19 |
| 4.1.3 Severní vápencové pásmo..... | 19 |
| 4.2 Východní Alpy | 20 |
| 4.1.4 Centrální krystalické jádro..... | 20 |
| 4.1.5 Severní vápencové pásmo..... | 20 |
| 4.1.6 Jižní vápencové pásmo | 20 |
| 4.3 Klima | 21 |
| 4.3 Vodstvo | 21 |
| 4.4 Půdy | 22 |
| 4.5 Vegetace | 22 |
| 5 Metodika | 24 |
| 6 Výsledky..... | 26 |
| 7 DISKUZE | 37 |
| 8 ZÁVĚR | 41 |
| 9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY | 43 |

Seznam obrázků

| | |
|---|----|
| Obrázek 1: Výškové stupně v horách (Prach et al. 2009)..... | 1 |
| Obrázek 2: Globální rozpořování vegetace podle Alexandra von Humboldta. Zeměpisná šířka specifikuje polohu nadmořské výšky horní hranice lesa (Körner 2012). | 2 |
| Obrázek 3: Geografické rozmístění publikovaných výzkumů týkajících se horní hranice lesa, hodnoceno 800 publikovaných výzkumů. (Körner 1999). | 3 |
| Obrázek 4: Schéma vymezení ekotonu horní hranice lesa (Körner, Paulsen 2004). | 5 |
| Obrázek 5: Distribuce hlavních orobiomů a zonobiomů na Zemi (Miehe 2000). | 7 |
| Obrázek 6: a) faktory ovlivňující horní hranici lesa v různých měřítkách (HOLTMEIER 2009); b) faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa (HOLTMEIER 2009). | 9 |
| Obrázek 7: Reakce růstových HHL na klimatické změny od roku 1900 (Harsh a Bader 2011) | 13 |
| Obrázek 8: Pozice Alp v Evropě (www.earth.google.com)..... | 18 |
| Obrázek 9: Nadmořská výška lokalizovaných HHL zájmového území..... | 28 |
| Obrázek 10: Průměrná teplota nejteplejšího měsíce..... | 31 |
| Obrázek 11: Průměrná teplota 3 nejteplejších měsíců..... | 32 |
| Obrázek 12: Průměrná teplota 4 nejteplejších měsíců..... | 33 |
| Obrázek 13: Průměrná teplota 5 nejteplejších měsíců..... | 34 |
| Obrázek 14: Počet dnů s teplotou nad 5°C. | 35 |
| Obrázek 15: Suma teplot nad 5°C. | 36 |

Seznam tabulek

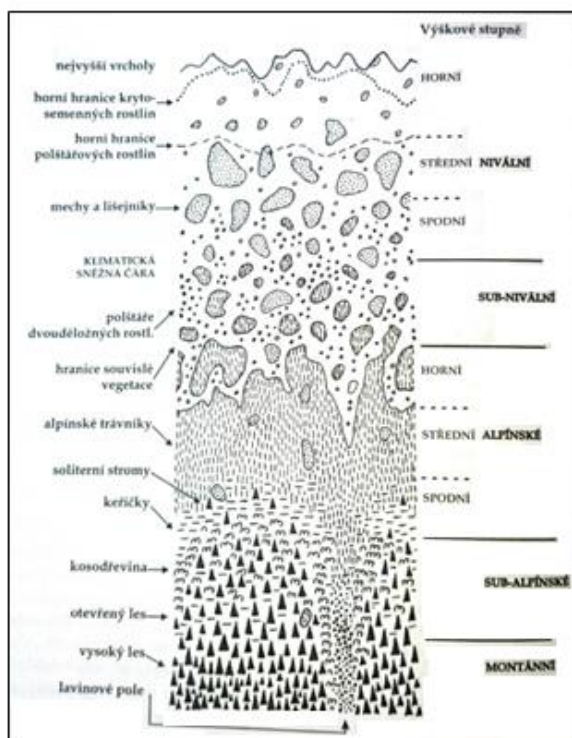
| | |
|---|----|
| Tabulka 1: Minimální výška stromů, jako kritérium pro určování horní hranice lesa (všechny práce citovány v Holtmeier 2009) | 4 |
| Tabulka 2: Maximální pozice HHLv jednotlivých oblastech (identifikované pomocí Google Earth). 25 | |
| Tabulka 3: Hodnoty vertikálních teplotních gradientů [$^{\circ}\text{C}/100\text{m}$], charakterizující určité oblasti Alp (Rolland 2003). | 25 |
| Tabulka 4: Základní statistické charakteristiky vypočtené na základě M1, M3, M4, M5 a DM5. | 26 |
| Tabulka 5: Geografická poloha studovaných lokalit (Chauchard et al. 2009, Motta a Nola 2001, Král 1999, Wallentin et al. 2008, Gehrig-Fasel et al. 2007, Gehrig-Fasel et al. 2008, Rozman et al. 2013). | 29 |
| Tabulka 6: Základní teplotní charakteristiky vztahující se k vegetačnímu období vypočtené na základě 10 vybraných bodů (vlastní výpočty). | 30 |
| Tabulka 7: Teplotní charakteristiky vegetačního období na HHL v Alpách (Kašpar, Tremel 2015) ... | 38 |

1 ÚVOD

Vysokohorské oblasti jsou díky vyvinuté vegetační stupňovitosti řazeny mezi tzv. orobiomy. Nadmořské výšky nad 2 000 m se na povrchu Země rozkládají na necelých 2 % povrchu Země a území nad 3 000 metrovou hranicí se rozkládá pouze na 1,2 % povrchu. Avšak vzhledem k souši pokrývají 6,7 % (Prach et al. 2009).

V horách lze rozdělit několik základních vegetačních stupňů podle stoupající nadmořské výšky: montánní, subalpínský, alpínský, a nivální stupeň (Prach et al. 2009). Prach et al. (2009) dále uvádí, že ve vysokých pohořích jsou zaznamenány velké rozdíly v mikroklimatu. Velmi členitý a často i skalnatý povrch je různě ohříván podle konkrétního slunečního osvitů daného místa. Teplotní a vlhkostní gradienty jsou velmi krátké a strmé. Odlišnými jsou zajisté i vlhkostní poměry jednotlivých částí reliéfu. Na tyto poměry a gradienty navazují rozdílné půdní a živinové poměry. Scherrer a Körner (2010) uvádí, že orobiomy jsou nejvíce heterogenními biomy vůbec v měřítkách decimetrů až stovek metrů.

Obrázek 1: Výškové stupně v horách (Prach et al. 2009).



Horní hranice lesa (HHL) je důležitou charakteristikou vysokohorských oblastí (Körner 2012). Vzestup polohy horní hranice lesa v reakci na nárůst teplot je zaznamenán v mnoha pohořích severní polokoule (Holtmeier 2009).

HHL je komplexním přechodem v horské krajině, oddělující od sebe dva zásadně odlišné typy ekosystémů: stupeň montánní (horský les) a dolní alpínský (bezlesí) v důsledku rostoucí nadmořské výšky a měnícího se klimatu.

Jeden z prvních popisů zabývajících se tímto jevem uveřejnil v roce 1555 Conrad Gessner (Körner 2012). Snažil se popsat polohu horní hranice lesa ve švýcarských Alpách. Poloha horní hranice lesa hrála prominentní roli i v pracích Alexandra von Humboldta, který studoval rozložení vegetace na Zemi a jasně ukázal, že zeměpisná šířka podmiňuje nadmořskou výšku horní hranice lesa (Körner 2012). Autor dále zmiňuje další významné osobnosti Kerner a Naegela. Ti provedli v polovině 19. století experiment v evropských Alpách, odkud pochází celosvětově užívaný název „alpínská hranice lesa“. Jejich experiment spočíval v relokaci několika rostlinných druhů z vyšších nadmořských výšek do nižších a naopak. Pokus pochopitelně neměl úspěšné výsledky, ale vedl k poznatku genetických komponentů rostlin při jejich adaptaci na nepříznivé podmínky (Körner 2012).

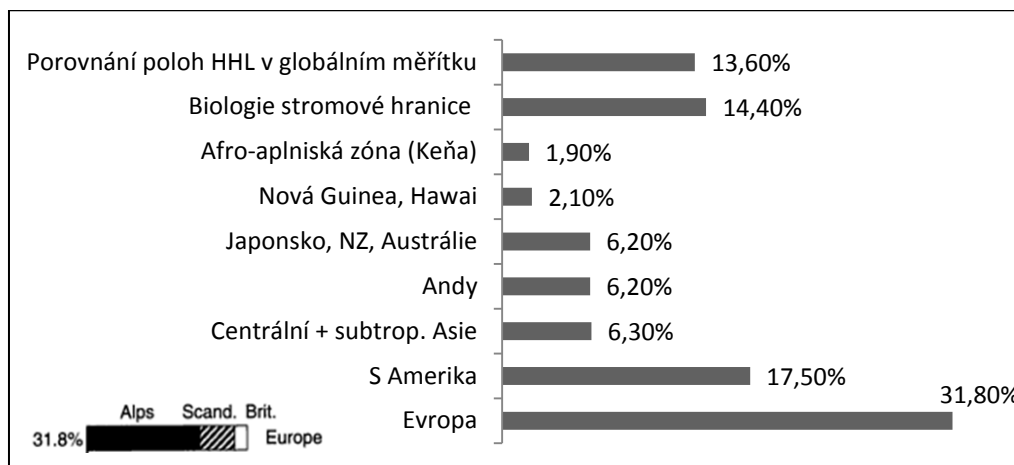
Obrázek 2: Globální rozložení vegetace podle Alexandra von Humboldta. Zeměpisná šířka specifikuje polohu nadmořské výšky horní hranice lesa (Körner 2012).



Během 20. století vědci začali vytvářet nové hypotézy o formování HHL. Zdůrazňovali například vliv teploty, s níž souvisí globální oteplování, které má za následek postup HHL do vyšších nadmořských a zeměpisných šířek (Holtmeier a Broll 2005). Výzkum se již nesoustředil převážně na Alpy, ale rozšířil se do celého světa. Tabulka č. 1 poukazuje na to, že Alpy dodnes zůstávají nejprostudovanější oblastí světa spolu se Severní Amerikou. Nejméně pozornosti bylo věnováno Africkému kontinentu. Ostatních

14,4 % publikovaných prací bylo věnováno biologii stromové hranice a 13,6 % se zaměřuje na porovnání poloh HHL v globálním měřítku, ve snaze najít společné faktory určující její vznik (Körner 1999).

Obrázek 3: Geografické rozmístění publikovaných výzkumů týkajících se horní hranice lesa, hodnoceno 800 publikovaných výzkumů. (Körner 1999).



S nadmořskou výškou a klesající teplotou se stromy přizpůsobují svému prostředí změnou regenerace, růstu a růstových forem a prostorové mozaiky rozmístění stromů (Holtmeier & Broll 2005). Limit růstu stromů je tedy dán teplotami, nicméně teplotní parametry studovaných hranic se značně liší a jsou často získávány z krátkodobých měření daných lokalit (Körner 1999).

Tato bakalářská práce je zaměřena na vytvoření databáze nejvyšších poloh hranice lesa v Alpách a porovnání jejich základních teplotních charakteristik. Jak bylo řečeno, Alpy patří mezi nejvíce prostudované oblasti na světě a je tak k dispozici větší množství prací s publikovanými údaji o teplotách vzduchu či půdy na hranici lesa. Hlavní cíle mé bakalářské práce jsou:

- 1) popsat hlavní charakteristiky a hypotézy, vysvětlující vznik HHL;
- 2) vyhledat nejvyšší polohy hranice lesa v jednotlivých částech Alp s následujícími atributy: nadmořská výška polohy horní hranice lesa, druh dřevin tvořící HHL a zeměpisnou šířku a délku;
- 3) zjistit jaké teplotní proměnné odpovídají nejvyšším polohám hranice lesa v Alpách a jak jsou variabilní.

2 DEFINICE POJMU HORNÍ HRANICE LESA

Pojem horní hranice lesa označuje přechodovou zónu mezi montánním stupněm a sub-alpínským či alpínským stupněm (viz. Obrázek 1) (Prach et al. 2009, s. 97). Horní hranicí lesa se rozumí přechod („ekoton horní hranice lesa“ - *treeline ecotone*) od horního limitu zapojeného lesa do oblasti a výskytem roztroušených zakrslých stromových jedinců (Holtmeier, 2009).

V rámci samotné přechodové zóny můžeme dále definovat další tři linie. Körner a Paulsen (2004) v souvislosti s alpínskou hranicí lesa uvádí tyto pojmy „timberline“, „tree species line“ a „treeline“ (viz. obrázek 3). „Timberline“ tvoří horní limit zapojeného lesa a vyznačuje se dále postupným se snižováním výšky stromů a otevíráním zápoje. Střední linie je zastoupena tzv. „treeline“, která je charakterizována jako linie spojující nejvyšší výběžky lesa v rámci svahů s podobnou orientací a expozicí (Körner 1998). „Tree species line“ tvoří nejvyšší partii, která je tvořena linií nejvyššího výskytu stromových druhů.

Základní definice *strom*, *les*, *horní limit zapojeného lesa* jsou poněkud komplikované pojmy. V literatuře se lze setkat s nespočetným množstvím různých definic těchto pojmů. Např. definici slova „strom“ autoři shodně popisují jako vzpřímený dřevnatý kmen, ale jeho minimální výška se u autorů liší (Richardson, Fieldland 2009). Podle Körnera (2012) je strom definován jako vzpřímená dřevina s dominantním nadzemním kmenem dosahující výšky minimálně 3 m a hraje důležitou roli v definici horní hranice lesa.

Tabulka 1: Minimální výška stromů, jako kritérium pro určování horní hranice lesa (všechny práce citovány v Holtmeier 2009)

Tabulka 1: Minimální výška stromů, jako kritérium pro určování horní hranice lesa (všechny práce citovány v Holtmeier 2009)

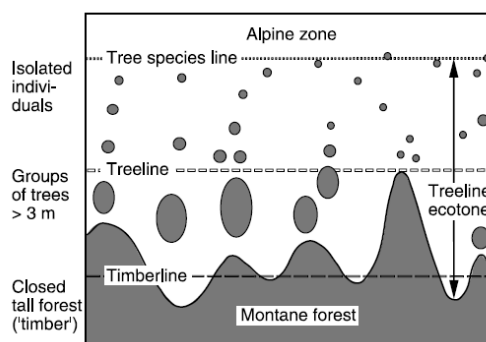
| Autor | Výška stromu (m) |
|--------------------------|------------------|
| Brockmann-Jerosch (1919) | 5 |
| Schöter (1926) | 4-5 |
| Leibundgut (1938) | 5 |
| Vincent (1938) | 8 |
| Rubner (1953) | 6-8 |
| Hermes (1955) | 5 |
| Plesník (1959) | 8 |

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------------|
| Jenik a Lokvenc (1962) | 5 |
| Ellenberg (1963) | 2 |
| Wardle (1964) | 1 |
| Holtmeier (1965) | > průměrná hloubka sněhové pokrývky |
| Hustich (1966) | 5 |
| Müller- Dombois and Ellenberg (1974) | 2 |
| Wardle (1974, 1981) | 2 |
| Bernadski (1976) | 2 |
| Braathe (1977) | 2,5 |
| Kullman (1979) | 2 |
| Little (1979) | 4 |
| Piussi and Schneider (1985) | 2 |
| Timoney et al. (1992) | 3 |
| Hofgaard (1997) | 2 |
| Paulsen et al. (2000) | 3 |

Z tabulky je patrné, že každý autor vymezil různou minimální výšku stromů jako kritérium pro určování horní hranice lesa. Holtmeier (2009) uvádí příklad, kdy v severní Skandinávii je dostatečná výška pro břízu (*Betula tortuosa*) 2,5 m, zatímco pro borovici (*Pinus sylvestris*) je výška 5 m. Autor dále uvádí zkoumanou výšku dřevin v jižní Skandinávii, konkrétně břízu a smrk, dosahující výšky více než 2 metry a borovici, která ve stejné výškové úrovni dosahovala pouze 1 m.

V mírném a subtropickém pásmu je optimální minimální výškou stromu brána hodnota, která dostačuje pro překonání průměrné mocnosti sněhové pokrývky, a to 2 m. Holtmeier (2009) říká, že 2 m vysoký strom, jakéhokoliv druhu, je vystaven drsným klimatickým podmínkám a atmosférické cirkulaci a takto vysoký strom si není schopen vytvořit své vlastní ochranné mikroklima na rozdíl od nižší křovité vegetace.

Obrázek 4: Schéma vymezení ekotonu horní hranice lesa (Körner, Paulsen 2004).



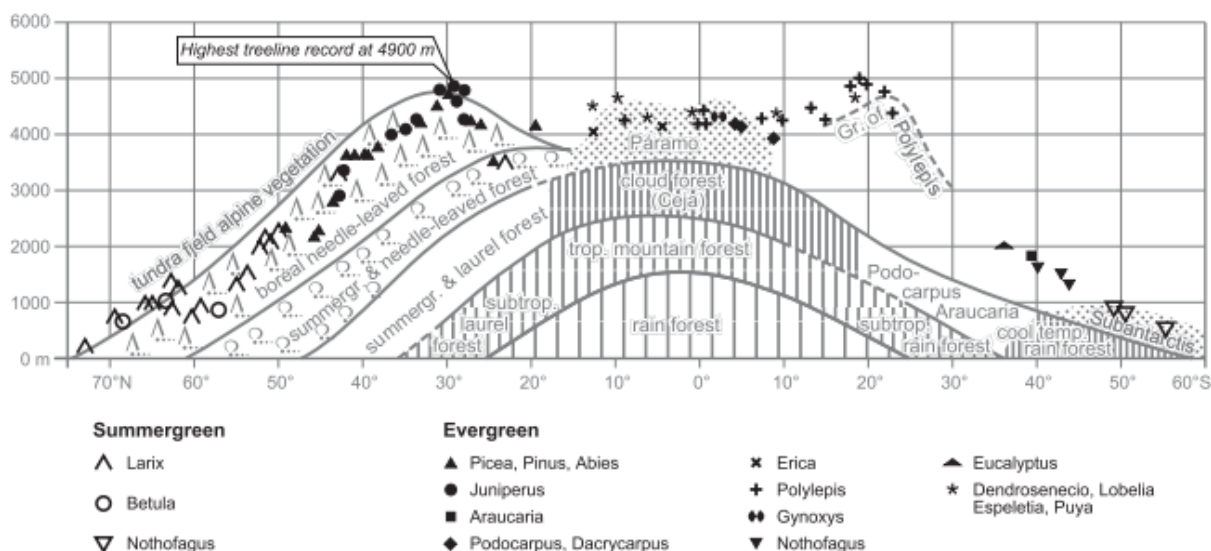
3 FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ POLOHU HORNÍ HRANICE LESA

Holtmeier (2009) zmiňuje existenci HHL v závislosti na teplotním deficitu, který určuje délku vegetační sezóny a závisí na zeměpisné šířce, nadmořské výšce, vertikálním teplotním gradientu, proudění větru, půdní vlhkosti, délce trvání sněhové pokrývky a v neposlední řadě na sezónních teplotních rozdílech.

Nadmořská výška, ve které se nachází HHL kolísá se zeměpisnou šířkou. Elevace HHL v polárních oblastech sahá od hladiny moře po cca 4000m výšky v subtropích či Himaláji (Holtmeier 2009). Zajímavostí je, že HHL dosahuje svého maxima v subtropích a nikoliv v „růstově nejpříznivějších“ humidních rovníkových tropech (viz. obrázek 5). Nagy a Grabher (2009) to vysvětlují častějším výskytem vyšší oblačnosti, resp. vyššími srážkami a následným větším výskytem nízkých teplot při rovníku, čímž zde dochází ke snížení polohy alpské hranice lesa. V Andách v západní Bolívii porosty rodu *Polylepis*, nejčastěji *Polylepis tomentella* dosahují výšek 4800 – 5000 m n. m. Nejvyšší polohy jsou charakteristické pro Tibet (Troll 1973). Důležitou roli v ekotonu HHL hraje i kontinentalita, s jejíž rostoucí mírou stoupá vegetační stupňovitost a poloha HHL (Holtmeier 2003). Např. v západní části Severní Ameriky se HHL ve východní části Kaskádového pohoří nachází ve výšce okolo 2 500 m n. m., kdežto směrem k západu výška dosahuje pouze 2 000 m n. m. (Zeidler a Banaš 2013).

Důsledkem rozdílné míry kontinentality vznikají rozdíly polohy HHL mezi pobřežními a vnitrozemskými pohořími a také mezi okrajovými a vnitřními částmi pohoří, které tvoří tzv. efekt „hmotnatosti pohoří“ (Zhao et al. 2014). Okrajové části horského systému mají charakter oceánského klima s vysokým úhrnem srážek, centrální část se naopak vyznačuje vysokohorskou kontinentalitou projevující se nižšími srážkami, zvýšeným počtem hodin slunečního svitu a vyšší teplotou vzduchu v důsledku nižší expozice vůči frontálnímu počasí.

Obrázek 5: Distribuce hlavních orobiomů a zonobiomů na Zemi (Miehe 2000).



Nad linií horní hranicí zapojeného lesa se nachází nepříznivé pásmo. Zhoršené klimatické podmínky mají za následek deformaci a zakrsnutí stromů nebo jejich špatné vyvinutí (Holtmeier 2009). S nadmořskou výškou a klesající teplotou se stromy přizpůsobují svému prostředí, např. délkou období dormace (schopnost přežití při nepříznivých podmínkách), vegetativním rozmnožováním, menší výškou vzrůstu a tvarem koruny (Körner 1998). Čím je klima extrémnější, tím špičatější jsou koruny jehličnanů (známe i z našich hor). Prach et al. (2009) toto tvrzení vydává za adaptaci k velkému množství sněhu, který po krátkých a směrem dolů skloněných větvích lépe sklouzne dolů. Stejný autor dále uvádí, že v méně příznivých podmínkách je zpomalen růst bočních větví, než růst vrcholu, do něhož je přednostně vkládána energie. Se stoupající nadmořskou výškou také zvyšuje frekvence a síla působení větrů, které ovlivňují výšku a tvar stromu.

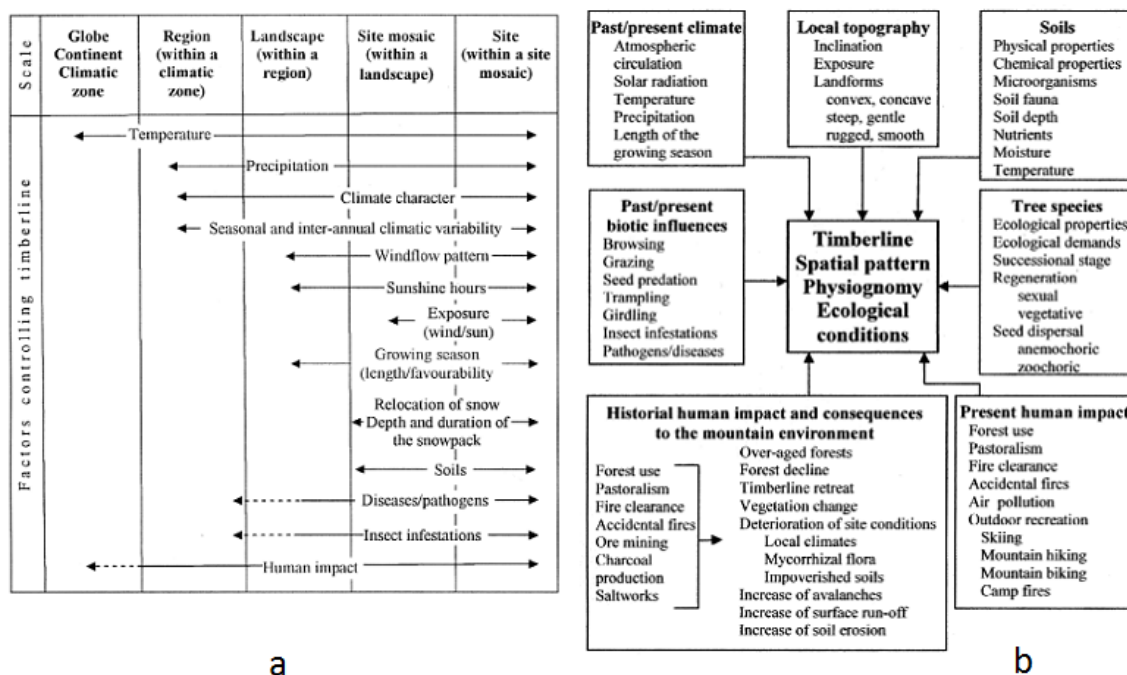
Jelikož poloha HHL je především teplotně limitována (Körner 1999), je možné předpokládat, že vzrůstem či poklesem teplot bude docházet i k příslušné reakci polohy hranice lesa. Gehrig – Fasel et al. (2007) zkoumali změny na HHL na území Švýcarských Alp, kde severní část Alp je charakteristická oceánickým klimatem, centrální je tvořena kontinentálním klimatem a jižní část klimatu se vyznačuje zasahujícím mediteránním typem klimatu. Za sledované období došlo k posunu HHL v průměru o 38m. Autoři připouští, že pohyb horní hranice lesa směrem vzhůru je způsoben klimatickými změnami, ale hlavní důvod změny HHL je způsoben opuštěním pastvin a změnou využívání půdy.

Půdní vlastnosti jsou dalším z významných faktorů, určujících polohu HHL. Svými fyzikálními, chemickými a biologickými vlastnostmi, hloubkou, vlhkostí, teplotou a množstvím živin limituje půda uchycení a růst stromů (Holtmeier 2003). V důsledku chladu v zimě, nízkého PH, častého zamokření a chemického složení je zde rozklad biomasy velmi pomalý. V odumřelé biomase jsou vázány živiny, těch je v této oblasti velký nedostatek (Prach et al. 2009). Nízká půdní teplota zkracuje vegetační období, zabraňuje kořenové respiraci, růstu kořenů a klíčení a růstu semenáčků (Holtmeier 2003). Na horní hranici lesa hraje důležitou roli i ektotrofní mykorrhiza, která napomáhá stromům čerpat špatně dostupné živiny z půdy (Prach et al. 2009).

Körner a Paulsen (2004) ve své globální studii zjistili, že průměrná teplota půdy ve vegetačním období je $6,7^{\circ}\text{C} \pm 0,8 \text{ SD}$. Tato teplota byla měřena v 10 cm hluboké půdě v ekotonu HHL, kdy v horstvech mírného pásma byla naměřena vyšší teplota $7 - 8^{\circ}\text{C}$, v oblasti tropů nižší teplota $5 - 6^{\circ}\text{C}$ a v oblasti subarktické a boreální dosahují průměrné teploty $6 - 7^{\circ}\text{C}$. Důvody použití půdní teploty jako klimatického indikátoru, jsou následující:

- 1) je podobná teplotě vzduchu v korunách stromů;
- 2) růst kořenů je velmi citlivý k nízkým teplotám;
- 3) nadzemní metabolismus rostlin je přímo ovlivněn teplotou kořenové zóny;
- 4) teplotní limity fyziologického růstu (rozhodující pod určitým teplotním minimem) jsou stejné jak na buněčné úrovni, tak i ve všech pletivech na stejné úrovni; je jedno, zda se jedná o kořen či nadzemní část stromu.

Obrázek 6: a) faktory ovlivňující horní hranici lesa v různých měřítkách (HOLTMEIER 2009); b) faktory ovlivňující polohu horní hranice lesa (HOLTMEIER 2009).



3.1 Hypotézy vysvětlující vznik HHL

Z hlediska vysvětlení mechanismu působení nízkých teplot a vznik horní hranice lesa se používá několik hypotéz (uhlíkové bilance a omezení růstu a dále hypotézy stresové, disturbanční a reprodukční, Körner 2012), kterými se budu dále zabývat. Níže uvedené hypotézy se nemusí vzájemně vylučovat, ale platí pro různé typy hranice lesa. Závisí na odlišném typu přechodové zóny (přechod rozptýlený, ostrý, ostrovní a klečový, Harsch a Bader 2011).

3.1.1 Nedostatečná uhlíková bilance

Teorie uhlíkové bilance je závislá na fotosyntéze. Rostoucí nadmožská výška a pokles teplot zkracují délku vegetačního období. To má za následek pokles intenzity fotosyntézy a celkového množství fixovaného uhlíku (Richardson a Friedland 2009). Grace et al. (2002) uvádí, že v mírném pásu je optimální teplota pro fotosyntézu okolo 20°C, dále pomalu klesá při 10°C a stále pozitivní uhlíková bilance je zaznamenána i při 5°C. Stromy potřebují velké množství uhlíku pro produkci kořenového systému a dřevnatého

kmenu. Vysoké stromy v těchto podmínkách hůře udržují pozitivní uhlíkovou bilanci a to má za následek jejich postupné nahrazení nízkými stromy a keříčkovitou vegetací při horní hranici lesa (Richardson a Friedland 2009).

Körner a Paulsen (2004) dále poukazují na nedostatky teorie uhlíkové bilance, která zanedbává řadu důležitých faktů:

- 1) dostačující množství vláhy při horní hranici lesa, která tvoří příznivější podmínky pro fotosyntézu ve vyšších nadmořských výškách, oproti nižším polohám;
- 2) ve vegetačním období je celkově vysoká fixace uhlíku, která plně stačí pokrýt respirační ztráty v zimě;
- 3) v tropických zeměpisných šířkách je absence sezonality, což vede k fixaci uhlíku během celého roku a k pozitivní uhlíkové bilanci; přesto jsou zde vyvinuty stromové hranice.

3.1.2 Hypotéza omezení růstu

Tato hypotéza vychází z předpokladu, že nízké teploty způsobují formování horní hranice lesa. V tomto důsledku syntetické procesy zahrnující transport aminokyselin a cukrů do těla rostlin nedostatečně pokrývají jejich potřebu a nároky na stavebního materiálu. Rostlina tedy není schopna tvořit nové stavební struktury. Körner (2007) považuje tuto hypotézu jako nejpravděpodobnější a nejméně pravděpodobnou příčinu utváření horní hranice lesa.

Izoterma nejteplejšího měsíce ve vegetačním období s hodnotou 10° C byla v dřívě považována za mez rozšíření stromových dřevin, která, jak se ukázalo, obecně neplatí (Körner 1998). Hodnota teploty od 5,5°C až po 7,5°C limituje růst stromů na HHL, disponuje globálně nejmenším rozptylem. Postihuje snížení HHL v tropických oblastech, vlivem oblačnosti snižující příjem slunečního záření, i snížení horní hranice lesa ve značných nadmořských výškách vysokých zeměpisných šířek (Körner 1998).

3.1.3 Disturbanční hypotéza

Tato hypotéza popisuje mechanická poškození způsobená několika faktory a to větrem, sněhovými závějemi, abrazí, ledovými krystalky, lavinami, okusem býložravců a houbovými patogeny. Následkem těchto událostí je hlavně ztráta biomasy vedoucí k nedostatečnému růstu dřeviny (Tranquillini 1979).

3.1.4 Stresová Hypotéza

Opakované poškozování mrazem, mrazovým vysoušením a fototoxickým účinkem následujícím po mrazovém vysychání zabraňuje růstu stromů ve vyšších nadmořských výškách (Körner 1998). Částečné mechanické poškození buněčných membrán rostlin a vnitrobuněčné promrzání bývá způsobeno rychlými a hlubokými poklesy teplot pod bod mrazu (Holtmeier 2003). Výsledkem postupné ztráty vody transpirací je mrazové vysychání. Následná ztráta transpirací nemůže být nahrazena kvůli zmrzlé půdě a částečně zmrzlým pletivům (Herrick, Friedland 1991). V důsledku zvětšování teplotních rozdílů, tedy zvýšené insolaci na konci zimy, dochází u rostlin mezi povrchem jehličí a vzduchem k větším ztrátám vody (Plesník 1971). Nebezpečí zapříčiněné mrazovým vysycháním častě postihuje nejčastěji osluněná místa s nízkou sněhovou pokrývkou (Holtmeier 2003) a významné ohrožení představuje především pro juvenilní jedince (Körner 1998).

3.1.5 Reprodukční hypotéza

Na problémy s opylením, rozptylem a klíčením semen a neschopností ujmoutí se semenáčků se zaměřuje reprodukční hypotéza (Körner 1998). Nižší produkce semen a jejich klíčivost je známa u stromů situovaných blízko jejich limitu růstu (Tranquillini 1979 in Tremli 2007). Horní limit produkce životaschopných semen bývá často níže, než je fyziologický limit růstu stromů. Klíčení semen a jejich vývoj a rozptyl je omezený, mikroklimatem a mikroreliefem (Richardson, Friedland 2009). Dále je produkce životaschopných semen závislá na okolní teplotě, a proto je silně citlivá na klimatickém změny. Se stoupající teplotou roste intenzita klíčení (Körner 1999).

Hrubozrnná půda obvykle znemožňuje růst i uchycení stromu, mělká půda má sníženou schopnost vázat na sebe vodu. Vyluhování, vyvolané každoročním táním sněhové pokrývky má za následek dostatečné množství živin v půdách (Holtmeier 2003). S rostoucí nadmořskou výškou je půda minerálně chudší a kyselejší (Plesník 1971).

Podle Holtmeiera (2003) s rostoucí nadmořskou výškou půdní teplota klesá pomaleji než teplota vzduchu. Teplotu půdy ovlivňuje její pórovitost, půdní vlhkost, objemová hmotnost, obsah humusu, výška a trvání sněhové pokrývky a pohyb vody v půdě, druh a struktura krajinného pokryvu, větrné proudění a teplota vzduchu.

Tmavý a suchý humus nacházející se zejména na jihozápadních svazích dosahuje extrémně vysokých teplot, někdy až 80°C. Takto vysoké teploty způsobují negativní ovlivnění uchycování semen, jejich následné klíčení a rozkladu biomasy. Shluky semenáčků a mladých stromků jsou lépe chráněné před klimatickými stresovými faktory. Ale tato výhoda po určité době vyprší (cca 10 let) a dochází k soupeření o vodu, živiny a světlo mezi jednotlivými rostlinami. Nevýhodu ovšem mají i mladé stromky rostoucí pomalu a samostatně. Často se stávají obětí sněhových plísň (Holtmeier 2003).

Teorie omezené reprodukce je tedy uplatňovaná pouze tam, kde je pro HHL charakteristické krátké vegetační období a drsné klimatické podmínky, které ovlivňují přežití a růst semenáčků (Holtmeier 2009).

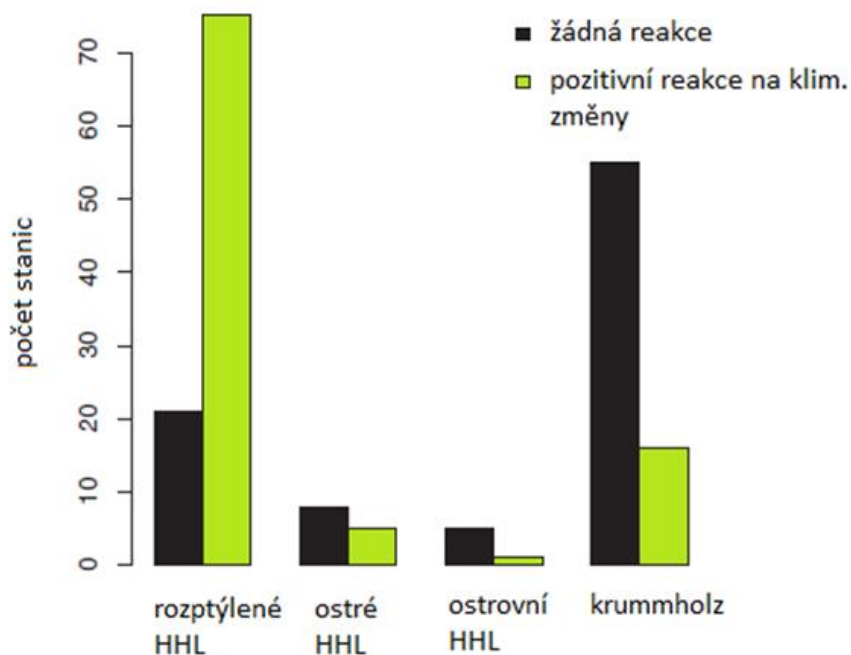
3.2 Klasifikace horní hranice lesa podle tvaru přechodové zóny

HHL se liší svojí šířkou, tak i charakterem přechodové zóny. V horských oblastech se výška HHL obvykle vyskytuje ve vyšších elevacích, avšak šířka ekotonu obvykle nepřesahuje několik desítek-stovek metrů. Naopak je tomu v subarktických oblastech, kde je polární hranice lesa charakterizována šířkou ekotonu v řádu desítek až stovek kilometrů (Holtmeier a Broll 2009).

Prostorová mozaika stromů v ekotonu HHL ovlivňuje dynamiku HHL. (Holtmeier a Broll 2009). Harsch a Bader (2011) uvádí 4 hlavní formy alpské hranice lesa: rozptýlené, ostré, ostrovní, klečové. Z obrázku číslo 7 je zřejmé, že 80 % rozptýlených HHL reaguje svojí expanzí na současné změny klimatu. Pouze 25 % ostrých a ostrovních HHL a HHL tvořené klečí vykazuje změny ve své poloze vůči oteplování klimatu. Rozmanitost

orografických a klimatických podmínek v rámci jednoho pohoří podmiňuje výskyt různých forem alpské hranice lesa i na malém území. Příkladem jsou španělské Pyreneje, kde se na svazích s různou expozicí setkáme s rozptýlenou (vliv nízkých teplot) a ostrou (vlivem větru) HHL (Harsch a Bader 2011).

Obrázek 7: Reakce růstových HHL na klimatické změny od roku 1900 (Harsh a Bader 2011)



Mezi nejrozšířenější a nejvíce prozkoumané formy alpské hranice lesa patří rozptýlené HHL, které jsou charakterizované postupným poklesem výšky stromů. Hustota stromů má klesající tendenci podél hranice ekotonu (Harsh a Bader 2011). Mezi příčiny formování tohoto typu HHL patří zejména nízké teploty vegetačního období. Snižování hustoty porostů je příčinou slabého generativního zmlazování a vysokou úmrtností stromů. Rozptýlené HHL rychle reagují na změny klimatu. Zvyšování teplot vede ke zvýšení přežívání semenáčků a k nárůstu hustoty porostů. Tento typ HHL je charakteristický nízkým výskytem klečových růstových forem a velkým negativním vlivem kompetičních efektů. Například HHL v suchých oblastech je charakterizována velkými vzdálenostmi mezi porosty stromů (např *Pinus hartwegii* na Pico de Orizaba v Mexiku,

nebo *Polylepis tarapacana* na sopce Sajama v Bolívii), které jsou způsobeny kořenovou konkurencí (Harsh a Bader 2011).

Hlavní příčinou ostré hranice lesa jsou disturbance a stresové klimatické události. Ostrá HHL se obvykle vyskytuje níže, než průběh klimatické HHL (Körner a Paulsen 2004). Výška stromů přesahující 3 m, jejich rychlý růst a velké množství životaschopných semen potvrzuje, že tyto HHL nejsou podmíněny faktory limitující růst. Důležitou roli zde hrají zpětnovazební pozitivní efekty (přežívání juvenilních jedinců v poloze za stromovou skupinou) a naopak i kompetiční vztahy. Výskyt permafrostu silně ovlivňuje úmrtnost semenáčků. Nepříznivé podmínky přežití semen pod klimatickou HHL vysvětlují nižší polohy ostré HHL v porovnání s rozptýlenou hranicí. Z druhovém složení zde dominují především stálezelené listnáče (*Eucalyptus pauciflora*, *Betula litwinowii*), které jsou citlivé k mrazům a silně závisí na konkurenčních vztazích (Harsh a Bader 2011).

Ostrovní HHL se vyznačuje přítomností malých ostrůvků vzpřímených stromů či klečových forem, které se nachází nad klimatickou HHL (Harsh a Bader 2011). Tato HHL se tvoří tam, kde topografické podmínky začínají vytvářet příznivé mikroklima pro růst stromů. Negativní faktory jako jsou například laviny a následné přemístování sněhu, či vítr v blízkosti ostrůvku, překáží tvorbě zapojeného lesa. Nejvíce jsou rozšířeny v severní Americe. Forma a velikost ostrovní HHL závisí na úhynu semenáčků a stromů a na topografii. Skupiny ostrůvků, které jsou tvořeny vzpřímenými stromy, mají lepší bioklimatické podmínky. Z druhového složení zde převládají jehličnany, což je pravděpodobně vysvětlováno geografickou polohou tohoto typu HHL, kde většina HHL nacházejících se v Severní Americe, je tvořena jehličnany.

Krummholz, tedy hranice lesa vyznačující se klečovými růstovými formami dřevin, které jsou rozptýlené nebo tvoří souvislé pásmo nad hranicí vzpřímených stromů. Jedná se o typ HHL, který může mít jak rozptýlený, ostrý i ostrovní tvar (Harsch a Bader 2001). Tyto porosty často nedosahují výšky 3 m, někdy ani 2m. Kleč je forma dřeviny snadno se adaptující na drsné klimatické podmínky. Vyskytuje se v pohořích celého světa, především na svazích vystavených větru. Kleč je charakteristická vegetativním rozmnožováním, kdežto vegetativní rozmnožování se prakticky nevyskytuje kvůli nízkému přežívání semen. Působení fyzického poškození stromů (způsobené řadou stresorů, jako je vítr, sníh, mráz a přebytek záření) limituje schopnost růstu. Během letních měsíců dochází k narůstání

stonku jedince, ale nový růst je zcela ztracen během zimního období následky fyzického poškození (Wardle 1968).

Charakteristické je vegetativní rozmnožování. Generativní rozmnožování se téměř nevyskytuje kvůli malému přežívání semen. Harsh a Bader (2011) zmiňují, že u některých klečových hranic se pozoruje zvýšené přežívání semenáčků. To je výsledkem zlepšujících se podmínek v zimě, nicméně podmínky v létě zůstávají stejné, což překáží kleči v přechodu na jiný typ HHL.

3.3 Přehled teplotních indikátorů polohy horní hranice lesa

Mezi hlavní faktory, určující pozici HHL v globálním měřítku, jsou považovány zejména teplotní poměry a teploty půdy. (Körner a Paulsen 2004). Podnebí všeobecně určuje druhové složení, strukturu stromů, množství biomasy a podmínky přežití stromů (Tranquillini 1979).

Průměrné roční teploty na HHL napříč všemi klimatickými zónami vypovídají podobné hodnoty (5,5 – 7,5 °C), (Körner 1998), podmínkou pro existenci stromových forem dřevin je průběh vegetační sezóny, kdy je nutné souvislé období trvající minimálně 94 dní s průměrnými denními teplotami vyššími než 0,9 °C (Körner 2012). Rossi et al.(2006) ve své studii uvádí, že pro růst dřevin je důležitá perioda vegetačního období v rozmezí 90 – 137 dní, při které je průměrná denní teplota 5,6 – 8,5 °C. Průměrná teplota kmene je 7,2 – 9°C.

Díky výzkumu teplot měřených za celé vegetační období Körnerem (1999) se došlo k závěru, že minimální teplota potřebná pro zhotovování funkčních pletiv a dělení buněk kolísá v rozmezí od 3°C – 10°C a je přibližně stejná v různých zeměpisných šířkách.

Průměrná denní teplota půdy, měřená v hloubce 10 cm v maximálních polohách HHL během vegetační sezóny se rovná 5,4°C – 7,8°C (Körner, Paulsen 2004). Tato průměrná teplota je dostatečná pro růst stromů, avšak růst kořenů a s tím i spojené absorpční schopnosti kořenů jsou značně omezené při teplotě nižší než 6 °C (Alvarez-Uria, Körner 2007). Ovšem problémem je snaha porovnávání půdní teploty různých oblastí, protože teplota půdy je závislá na velkém množství faktorů: vlhkost, textura, tepelná

vodivost, typ vegetačního pokryvu (Holtmeier 2009). Při této hraniční teplotě dochází rovněž k omezení fotosyntézy, která probíhá pouze s 60-70% intenzitou (Körner 2012). Dá se říci, že výše zmíněné hodnoty teplot jsou prahovými hodnotami fyziologického omezení stromů.

Zeidler a Banaš (2013) ve své práci uvádí, že v oblasti Alp na každých 100 výškových metrů dochází ke zkrácení vegetační periody o 6–7 dní. Pro vytváření biomasy potřebuje většina dřevin průměrnou teplotu překračující 5°C (Körner 2012), což je určující pro dlouhodobé přežívání dřevin a tím též hranici lesa. Této hodnoty je dosaženo ve Švýcarských Alpách po dobu 85–120 dní ve výšce 2000 m a 195–210 dní ve výšce 1000 m (Zeidler a Banaš 2013). Zkrácení vegetační sezóny pod hranici tří měsíců neumožňuje dřevinám vybudovat dostatečné vrstvy krycích pletiv asimilačních orgánů a znemožňuje za takových podmínek jejich dlouhodobou existenci (Rossi et al. 2006). Délka vegetačního období pravděpodobně nehraje zcela významnou roli na určení HHL, protože se značně liší v různých zeměpisných šířkách (od tří měsíců v subarktické oblasti po celý rok v tropickém pásu (Körner, Paulsen 2004).

Teplotní poměry mají i velký vliv na vitalitu stromů a jsou přímo spojeny s jejich mortalitou (Tranquillini 1979). Tento autor dále uvádí na příkladu smrku, že letní teploty přesahující 46 °C a zimní teploty nižší než -36°C mohou zapříčinit úplné uhynutí jedince v důsledku přehřátí, respektive umrznutí. Výskyt nízkých teplot v průběhu zimy patrně nezpůsobuje mortalitu stromů na HHL (Kullman, Öberg 2009), nicméně promrznutí půdy v mnoha případech vede k mrazovému vysychání či ke ztrátě jehlic, a v konečné fázi i k odumření jedince (Han et al. 2012)

Pomocí teplotních faktorů je obtížné vysvětlit polohu lesních ostrůvků lokalizovaných ve vyšších elevacích, než se nachází samotná HHL. Jejich výskyt je ve všech pohořích světa i při teplotě vegetačního období 2,5 - 5°C. (Körner 1999). Ostrůvky jsou reliktem příznivějších klimatických podmínek a díky svému vnitřnímu mikroklimatu mohou ustát extrémní podmínky a odolávat negativním klimatickým změnám (Körner 1999). Druhá teorie je, že skupiny stromových plošek představují zbytek lesních porostů, které byly dříve odstraněny antropogenní činností (Körner 1999).

Výzkum teplotních poměrů na HHL nám dovoluje najít vhodné teplotní indikátory pro určení minimálních teplot podmiňujících přechod lesních porostů k bezlesí. V literatuře jsou uvedeny následující teplotní indikátory určující polohy HHL: minimální

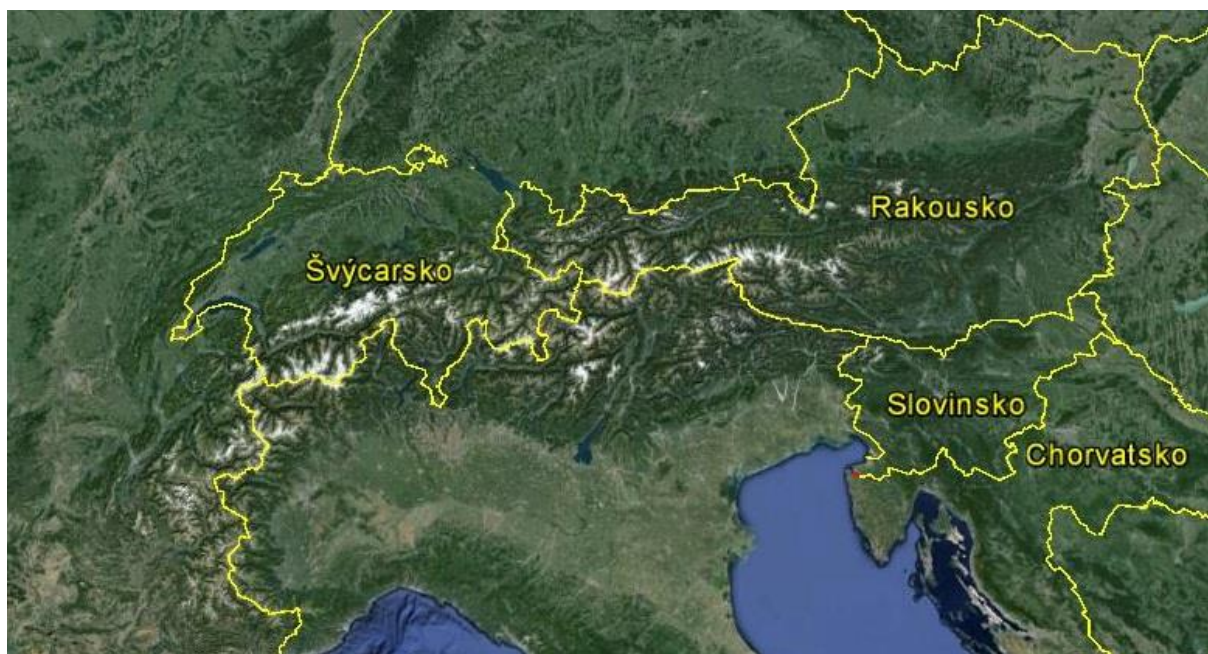
průměrná denní teplota vegetačního období (Körner a Paulsen 2004), průměrná teplota čtyř nejteplejších měsíců (Wardl 1998), průměrná teplota měsíců, jejichž průměrná teplota převyšuje 5°C (Körner 1998), průměrná teplota období s teplotami vzduchu vyššími než 0°C (Körner a Paulsen 2004), suma denních teplot vyšších než 5°C (Holtmeier 2003), suma teplot na 0°C (Kašpar, Tremli 2015), průměrná teplota nejteplejšího měsíce (Gehrig-Fasel et al. 2008), počet dní s teplotou vyšší než 5 °C (Ellenberg 1963 in Gehrig-Fasel et al. 2008), počet dnů s teplotou nad 0,9°C bez sněhové pokrývky (Kašpar, Tremli 2015).

4 ZÁKLADNÍ FYZICKO-GEOGRAFICKÁ CHARAKTERISTIKA STUDOVANÉHO REGIONU

Alpy můžeme označit jako nejmohutnější horský systém Evropy, táhnoucí se v oblouku od Vídeňské a Panonské pánve k Janovskému zálivu přes území sedmi států- Francie, Německo, Švýcarsko, Lichtenštejnsko, Rakousko, Itálie a Slovinsko. Zaujímají rozlohu 180 000 km² (Král 1999).

Alpy vznikly vrásněním zejména v mezozoiku v období spodní křídy během alpské orogeneze. Pliocenní denudace a sedimentace byla zakončena za přelomu třetihor a čtvrtohor rozsáhlou zdvihovou fází, která vyzvedla mnohá, již zcela zarovnaná pohoří a dala jim dnešní podobu (Votýpka, 1994). Velehory mají složitou příkrovovou stavbu a byly vyvrásněny ze dna geosynklinály Tethys. Jde o pásemné pohoří. Centrální, nejvyšší část oblouku velehor tvoří krystalické horniny, severní část je tvořena pásem vápencových pohoří, na jihu je toto pásmo tvořeno vápenci a je neúplné (Votýpka, 1994).

Obrázek 8: Pozice Alp v Evropě (www.earth.google.com).



4.1 Západní Alpy

Západní Alpy se dají charakterizovat jako užší a sevřenější a mají vyšší absolutní výšky asymetrické geologické stavby. Dělí se na dvě základní pásma vápencové a krystalické. Podle charakteru příkrovů se krystalické pásmo dělí na vnější a vnitřní (Votýpka, 1994).

4.1.1 Vnější krystalické pásmo

Metamorfovanými horninami jako jsou ortoruly či břidlice jsou základní stavební horninou tvořící vnitřní krystalické pásmo. Od mořského pobřeží jsou vyzdviženy jako Ligurské Alpy s maximální výškou kolem 2 655 m. Dále navazují Alpy Kottické a Grajské, jejichž výška přesahuje 4 000 m a dají se zde lokalizovat první ledovce. Celé pásmo vrcholí Penninskými Alpami, na švýcarské straně známé jako Walliské Alpy, které jsou nejmohutnějším celkem tohoto pásma s nejvyšším štítem Monte Rosa (4 634 m n. m) (Votýpka, 1994).

4.1.2 Vnitřní krystalické pásmo

Vnější krystalické pásmo probíhá paralelně s vnitřním krystalickým jádrem. Je tvořené převážně starými variskými orogény, na něž byly nasunuty helvétské příkrovy. Od Ligurského moře se zvedá dlouhý hřbet Přímořských Alp. Na ně navazují Alpy Dauphinské, které jsou již značně vysoké a zaledněné. Nalezneme zde i nejvyšší alpský masiv Mont Blanc, s variským jádrem. Bernské Alpy se vyznačující se vysokou průměrnou nadmořskou výškou, jsou z velké části zaledněny a nachází se zde největší alpský ledovec Aletsch Gletscher (Votýpka, 1994).

4.1.3 Severní vápencové pásmo

Pásmo vzniklo převážně z helvétských a austrijských příkrovů a bylo vytvořené především v juře a křídě. Nejčastěji jsou zde nalezeny vápence a slínovce. Tento celek je poměrně nízký, tvoří rozsáhlé pásmo alpského předhůří. Nalezneme zde i tělesa

vulkanického původu, například Dauphinéské a Savojské Alpy. Ve švýcarské části se rozkládá mezihorská osamocená deprese zvaná Mittelland, v níž leží největší švýcarská jezera ledovcového původu: Ženevské, Neuchatelské a Bodamské (Votýpka, 1994).

4.2 Východní Alpy

Východní Alpy jsou podstatně nižší, ale širší a méně kompaktní než Alpy Západní. Díky podélným údolím jsou značně symetrické. Vymezuje se zde severní a jižní vápencové pásmo a centrální krystalinické pásmo (Votýpka, 1994).

4.1.4 Centrální krystalické jádro

Tato oblast je tvořena rulami, svory a žulami, místy lze najít i jiné krystalinické břidlice. Nalezneme zde známé Vysoké Taury, Ötztalské, Stubajrské, Zillertalské, nebo Kitzbühlské Alpy. Ve Vysokých Taurách se nachází nejvyšší štít Rakouska Gross Glockner (3798 m n.m.) (Votýpka, 1994).

4.1.5 Severní vápencové pásmo

Pásmo navazuje na Západní Alpy a tvoří řadu předhorských hřebenů, jež jsou na Z poměrně vysoké, ovšem směrem na východ a sever se snižují. Od centrálních Alp je dělí povodí Illu, Innu a Emže a Mury. Řadí se sem například Alpy Lechthalské, Severotyrolské, či Salcburské a jsou tvořeny převážně vápenci a slíny spodní jury a křidy (Votýpka, 1994).

4.1.6 Jižní vápencové pásmo

Je tvořeno zejména vápenci a dolomity, ovšem nalezneme se zde i mnoho tektonických zlomů, podél kterých docházelo k výstupu eruptivních hornin. Mezi nejvýznamnější orografické jednotky patří Ortlerské, Benátské, Karnské a Julské Alpy (Votýpka, 1994).

4.3 Klima

Pohoří Alp táhnoucí se jako souvislý pás po jižní části kontinentu je výrazným klimatickým předělem Evropy. Brání totiž pronikání chladného severního vzduchu k jihu a naopak. To způsobuje, že jižní svahy jsou obecně teplejší, s časným příchodem jara a delším teplejším podzimem (Votýpka, 1994). Klima Alp je různorodé, tvoří podnebné rozhraní mezi vlivy oceánickými a kontinentálními a zároveň i mezi boreálními a středomořskými (Král, 1999). Dále je omezeno mnoha faktory: nadmořskou výškou, expozicí svahů a hranicí sněžné čáry, která se nachází na severních svazích v elevaci 2500 m, v sušších a teplejších jižních Alpách ve výškách 3000 až 3500 m.

Sněžná čára odděluje území věčného sněhu, ledovců a mrazového zvětrávání. Firnoviště, sníh a ledovce jsou při svém tání hlavními zdrojnicemi vody mnoha alpských řek (Votýpka, 1994).

Značnou roli hraje i expozice svahů. Ta určuje srážkovou bilanci území. Nejvlhčí jsou okrajová pásma, střední oblasti zejména doliny jsou sušší. Východní závětrná část Alp má mnohem méně srážek než západní (Votýpka, 1994). Důležitá je i role úhlu dopadu paprsků na zemský povrch. Král (1999) uvádí, že jižní svahy dostávají 8 – 10 více tepla než svahy severní, např. v průsmyku Bernina (2323 m) na území Švýcarska byl pozorován rozdíl o celých 54°C mezi zastíněným svahem na povrch půdy.

V silně členitém reliéfu Alp jsou veliké rozdíly v regionálním rozdělení srážek. Na mezihorské kotliny srážkovém stínu připadá roční úhrn srážek pouze v rozmezí 500 – 700 mm. Ve Východních Alpách jsou srážky velmi bohaté, k nejdeštivějším místům patří Karnské a Julské Alpy (2500 – 3000 mm). Směrem na západ, ale také do nitra pohoří srážek ubývá. Na návětrných svazích Západních Alp srážky dosahují rozmezí 3000 – 3500 mm (Král 1999).

4.3 Vodstvo

Alpami neprochází pouze již zmíněný klimatický předěl, pohoří vytváří i hlavní evropské rozvodí, jež dělí řeky do úmoří Středozevního a Severního moře. Pramení zde významné řeky, jako je Pád, Rýn, Dunaj či Rhône. Nejvyšší průtokové maximum těchto řek je na jaře, způsobené táním sněhové pokrývky a v létě, kdy čerpají vodu z tajících ledovců.

Řeky mají vysoký energetický potenciál, avšak spád je značně nevyrovnaný s častým výskytem peřejí a vodopádů (Votýpka, 1994). Je zde četný výskyt jezer ledovcového původu jakožto pozůstatek glaciálů. Nejčastější jsou údolní jezera hrazená ústupovými morény. Největšími jezery jsou Ženevské, Bodamské, Neuchâtelské a Lago Maggiore (Votýpka, 1994).

4.4 Půdy

V Alpském podhůří jsou typické pravé luvisoly, hojně se zde vyskytují i nasycené kambisoly a místy i gleje a histosoly. V krystalických pásmech centrálních Alp se vyskytují na kyselých substrátech litosoly a rankery. Na nižších svazích, kde se udává mocnější půdní kryt, jsou pravé podzoly nebo nenasyčené kambisoly. Ve vápencových oblastech Alp, zejména v jižních vápencových Alpách v Itálii a v Severních vápencových Alpách v Rakousku, Švýcarsku a Německu, jsou rozšířeny především rendziny, jež ve vyšších elevacích přecházejí v litosoly.

4.5 Vegetace

V regionu Alp jsou veliké rozdíly v rostlinném krytu v závislosti na nadmořské výšce, expozici, příkrostiti svahů či na poloze na okraji nebo v nitru celé horské soustavy (Votýpka, 1994). Obecně zde platí pravidlo, že se vzrůstající nadmořskou výškou se zkracuje vegetační období (průměrně o 12 dní na 100 m výšky, Král, 1999). Podle Krále (1999) v okolí Innsbrucku v nadmořské výšce 1000 m vegetační období trvá 8 měsíců, ve výšce 1500 m 6 měsíců a na hranici sněžné čáry při výšce 2700 – 2800 m pouze 4 – 6 týdnů.

Lesní stupeň (motánní) je plošně nejvíce zastoupený, zároveň i značně diferencovaný, jenž zasahuje po horní hranici lesa. HHL leží ve francouzských pohořích Provence v nadmořské výšce 1900 – 2000 m, v severní části rakouských Alp 1500 – 1700 m n. m. a ve vnitřních horských pásmech, např. v Dolomitech, Penninských Alpách a ve Vysokých Taurách vystupuje do výšky 2200 – 2300 m, místy i elevace nad 2500 m (Král, 1999).

V Kottických Alpách v Itálii je horní hranice lesa tvořená borovicí limbou (*Pinus cembra*) a modřínem opadavým (*Larix decidua*). HHL se nachází ve výšce 2350 – 2650 m a patří mezi nejvýše položené v Alpách. (Motta a Nola 2001). V oblasti povodí řeky Val Masino, která se nachází v italských Centrálních Alpách se HHL nachází ve výšce 1950 m a je tvořena borovicí lesní (*Pinus sylvestris*), smrkem ztepilým (*Picea abies*), borovicí kleč (*Pinus mugo*) a modřínem opadavým (*Larix decidua*), (Diaz-Varela et al. 2010). HHL v regionu Valle d'Aosta v západních Italských Alpách je tvořena modřínem opadavým (*Larix decidua*) a v menší míře i borovicí limbou (*Pinus cembra*). Nachází se ve výšce 2500 m (Leonelli et al. 2011).

HHL v lokalitách Grächen a Ginals, nacházejících se v Centrálních Švýcarských Alpách, se nachází ve výšce v rozmezí 2100 až 2580 m a je složena z borovice limby (*Pinus cembra*) a modřínu opadavého (*Larix decidua*), (Vittoz et al. 2008). Gehrig-Fasel et al. (2007) prováděli výzkum HHL ve Švýcarských Alpách. V severní části švýcarských Alp je hranice tvořena smrkem ztepilým (*Picea abies*) a v jižní části společně s modřínem opadavým (*Larix decidua*) a borovicí limbou (*Pinus cembra*).

V rakouských Centrálních Alpách, konkrétně v údolí Ötztal je HHL tvořená smrkem ztepilým (*Picea abies*) a modřínem opadavým (*Larix decidua*) a nachází ve výšce okolo 1900 m (Wallentin et al. 2008).

5 Metodika

Praktická část je zaměřená na výpočet určitých teplotních charakteristik, které se vztahují k vegetačnímu období a jejich aplikování na základní hypotézy o formování horní hranice lesa. Záměrem bylo pro vybrané lokality dohledat teplotní údaje za období 1961 - 2000 a spočítat následující charakteristiky: průměrnou teplotu nejteplejšího měsíce M1 (Gehrig-Fasel et al. 2008), průměrnou teplotu čtyř nejteplejších měsíců M4 (Wardl 1998), počet dnů s teplotou nad 5°C DM5 (Holtmeier 2003), sumu teplot nad 5°C (Ellenberg 1963 in Gehrig-Fasel et al. 2008) a průměrnou teplotu tří (M3) a pěti (M5) nejteplejších měsíců.

Z webových serverů KNMI Climate Explorer a NOAA's National Centers for Environmental Information byly dohledány klimatické stanice, nacházející se na našem zájmovém území a následně byly získány potřebná data (průměrné měsíční teploty pro jednotlivé lokality za období 1961 - 2000). Hlavním kritériem byla jejich nadmořská výška vyšší než 800 m. Seznam stanic, jejich zeměpisné souřadnice, nadmořská výška a druh dřevin tvořící HHL je zobrazen v tabulce 5. Některé stanice neposkytovaly kompletní datovou řadu, proto bylo nutné chybějící data dopočítat pomocí regrese, při které byla použita i databáze CRU TS3.22 Mean Temperature (www.climexp.knmi.nl). Tato databáze se skládá z pravidelného gridu měsíčních průměrných teplot pro periodu 1901 – 2013 s rozlišením v 0,5°.

Pomocí Google Earth byly identifikovány maximální pozice stromových skupin odpovídající horní hranici lesa v okolí jednotlivých lokalit. Pro každou lokalitu byly dohledány elevace 3 nejvýše položených HHL a následně byl vypočítán jejich průměr (viz tabulka 2).

Dalším krokem byl přepočítání měsíčních teplot vztahovaných k nadmořské výšce jednotlivých lokalit, na výškovou úroveň HHL, s použitím vzorce:

$$t_M + (h_L - h_{HHL}) * g_R / 100 = T_L$$

t_M značí teplotu vztahující se k jednotlivým stanicím, h_L značí nadmořskou výšku stanice a h_{HHL} značí nadmořskou výšku zjištěné HHL. Pro výpočet byly použity vertikální teplotní gradienty g_R uvedené v tabulce 3.

Na základě určených dat byly spočítány základní teplotní charakteristiky: průměrná teplota nejteplejšího měsíce (M1), průměrná teplota tří (M3), čtyř (M4) a pěti (M5) nejteplejších měsíců, počet dní s teplotou nad 5°C (DM5) a sumu teplot nad 5°C (SM5) (viz tabulka 6). Protože jsem pracovala s měsíčními průměry, musely být získány denní data pro proměnné DM5 a SM5 pomocí interpolace měsíčních průměrů. Ty byly přiřazeny 15. dni v měsíci a následně interpolovány.

Tabulka 2: Maximální pozice HHLv jednotlivých oblastech (identifikované pomocí Google Earth).

| | Oblast | Maximální pozice HHL (v m n. m.) | | | Průměrná nadm. výška HHL |
|----|-------------|----------------------------------|------|------|--------------------------|
| | | 1. | 2. | 3. | |
| 1 | ST BERNARD | 2238 | 2226 | 2232 | 2232,0 |
| 2 | SANTIS | 1837 | 1869 | 1839 | 1848,3 |
| 3 | JUNGRAUJOCH | 2306 | 2285 | 2304 | 2298,3 |
| 4 | SONNBLICK | 2100 | 2128 | 2123 | 2117,0 |
| 5 | OBERSTDORF | 1916 | 1925 | 1921 | 1920,7 |
| 6 | WENDELSTEIN | 1939 | 1933 | 1940 | 1937,3 |
| 7 | KREDARICA | 2158 | 2152 | 2138 | 2149,3 |
| 8 | PAGANELLA | 2240 | 2238 | 2250 | 2242,7 |
| 9 | ZUGSPITZE | 2044 | 2062 | 2041 | 2049,0 |
| 10 | ST GOTTHARD | 2089 | 2084 | 2101 | 2091,3 |

Tabulka 3: Hodnoty vertikálních teplotních gradientů [°C/100m], charakterizující určité oblasti Alp (Rolland 2003).

| °C/100m | S Itálie | Adige | J Fr. Alpy | Tyrolsko |
|----------|----------|-------|------------|----------|
| Leden | 0,46 | 0,5 | 0,63 | 0,41 |
| Únor | 0,49 | 0,53 | 0,63 | 0,47 |
| Březen | 0,58 | 0,585 | 0,65 | 0,56 |
| Duben | 0,62 | 0,62 | 0,64 | 0,62 |
| Květen | 0,63 | 0,63 | 0,57 | 0,63 |
| Červen | 0,635 | 0,64 | 0,58 | 0,64 |
| Červenec | 0,63 | 0,635 | 0,63 | 0,635 |
| Srpen | 0,625 | 0,63 | 0,6 | 0,63 |
| Září | 0,61 | 0,61 | 0,57 | 0,58 |
| Říjen | 0,57 | 0,57 | 0,58 | 0,53 |
| Listopad | 0,52 | 0,53 | 0,59 | 0,47 |
| Prosinec | 0,49 | 0,5 | 0,63 | 0,41 |

6 Výsledky

Analýza pro aritmetický průměr ukazuje, že největší hodnoty jsou pozorovány pro indikátor M1. Hodnot M3, M4 a M5 jsou nižší (viz tabulka 4) se souvislostí zvětšování rozsahu teplot a zapojením nižších průměrných teplot v květnu a září v porovnání s červencem, kdy jsou zaznamenány nejvyšší hodnoty teplot. Hodnoty vypočítané pro medián mají stejnou tendenci změny.

Hodnota variačního koeficientu (0,09) byla zjištěna pro ukazatele M1, M3 a M4. Největší hodnotu (0,10) vykazuje ukazatel M4 (viz tabulka 4). Toto se dá vysvětlit tím, že červnové, červencové, srpnové a zářijové teploty jsou rozloženy více méně rovnoměrně, oproti teplotám v květnu. Celkově průměrné teploty jsou málo variabilní. Oproti tomu suma teplot nad 5°C vykazuje rozkolísanost.

Tabulka 4: Základní statistické charakteristiky vypočtené na základě M1, M3, M4, M5 a DM5.

| Statistická charakteristika | Průměrná teplota nejteplejšího měsíce na HHL (°C) | Průměrná teplota 3 nejteplejších měsíců (°C) | Průměrná teplota 4 nejteplejších měsíců (°C) | Průměrná teplota 5 nejteplejších měsíců (°C) | Počet dní s teplotou nad 5°C (DM5) | Suma teplot nad 5°C |
|-----------------------------|---|--|--|--|------------------------------------|---------------------|
| Průměr (°C) | 8,50 | 7,64 | 7,17 | 6,26 | 109,6 | 263,36 |
| Variační koeficient | 0,09 | 0,09 | 0,09 | 0,10 | 0,9 | 0,26 |
| Medián (°C) | 8,48 | 7,74 | 7,31 | 6,44 | 113,50 | 273,92 |

Průměrná délka vegetačního období (průměrný počet dnů s teplotou nad 5°C) se rovná 109,6 dnům (viz tabulka 3). Minimum se rovná 83 dnům a maximum 118 dnům (bod 1 a 2 viz obrázek 14). Variační koeficient se rovná hodnotě 0,09, což je srovnatelná hodnota s průměrnými teplotami M1, M3 a M4. Průměrná hodnota sumy denních teplot vzduchu nad 5 °C ve vegetačním období je 263,36 °C, která je rozdílná od mediánu 273,92. Minimální suma teplot nad 5°C se rovná 135,73 °C a maximální 395,2 °C (bod 2 a 1, viz obrázek 15).

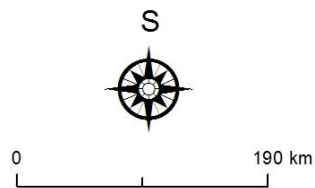
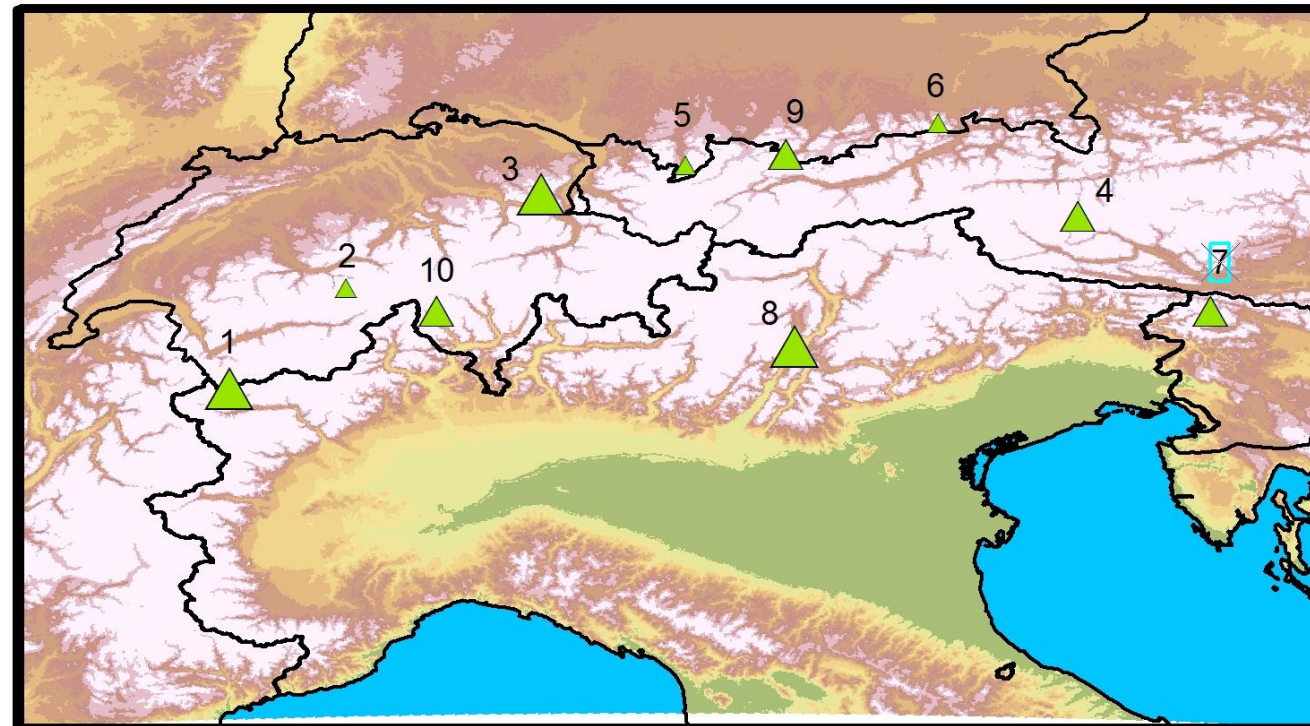
Na obrázcích 10, 11, 12, 13, 14 a 15 je představeno rozložení jednotlivých teplotních indikátorů studovaného území Alp. Na základě níže prezentovaných map lze obecně říci, že nejvyšší průměrné hodnoty teplot se konkrétně v oblasti Julských a

Peninských a v Dolomitech, kde jsou teploty nejvýrazněji ovlivněny vzduchovými vrstvami od Středozemního moře. Další oblast s výskytem vysoké průměrné hodnoty naměřených teplot se nachází v oblasti Centrálních Alp.

Počet dnů s teplotami nad 5°C je rozložen více méně nerovnoměrně (viz obrázek 13). Obecně největší počet dnů s danými teplotami je charakteristický pro oblast Centrálních a Italských Alp. To koreluje s rozložením sumy teplot nad 5°C, určující průběh vegetačního období.

Obrázek 9: Nadmořská výška lokalizovaných HHL zájmového území.



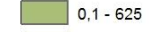
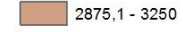

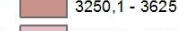

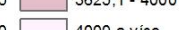


Poloha HHL v jednotlivých lokalitách



Nadmořská výška HHL
(v m n. m.)

-  2000 a méně
-  2001 - 2200
-  2201 a více

Nadmořská výška (m n. m.)

- | | |
|---|---|
|  0 a méně |  2500,1 - 2875 |
|  0,1 - 625 |  2875,1 - 3250 |
|  625,1 - 1250 |  3250,1 - 3625 |
|  1250,1 - 1875 |  3625,1 - 4000 |
|  1875,1 - 2500 |  4000 a více |

Tabulka 5: Geografická poloha studovaných lokalit (Chauchard et al. 2009, Motta a Nola 2001, Král 1999, Wallentin et al. 2008, Gehrig-Fasel et al. 2007, Gehrig-Fasel et al. 2008, Rozman et al. 2013).

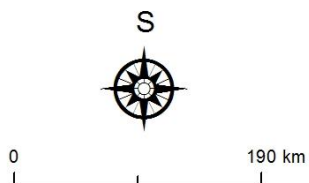
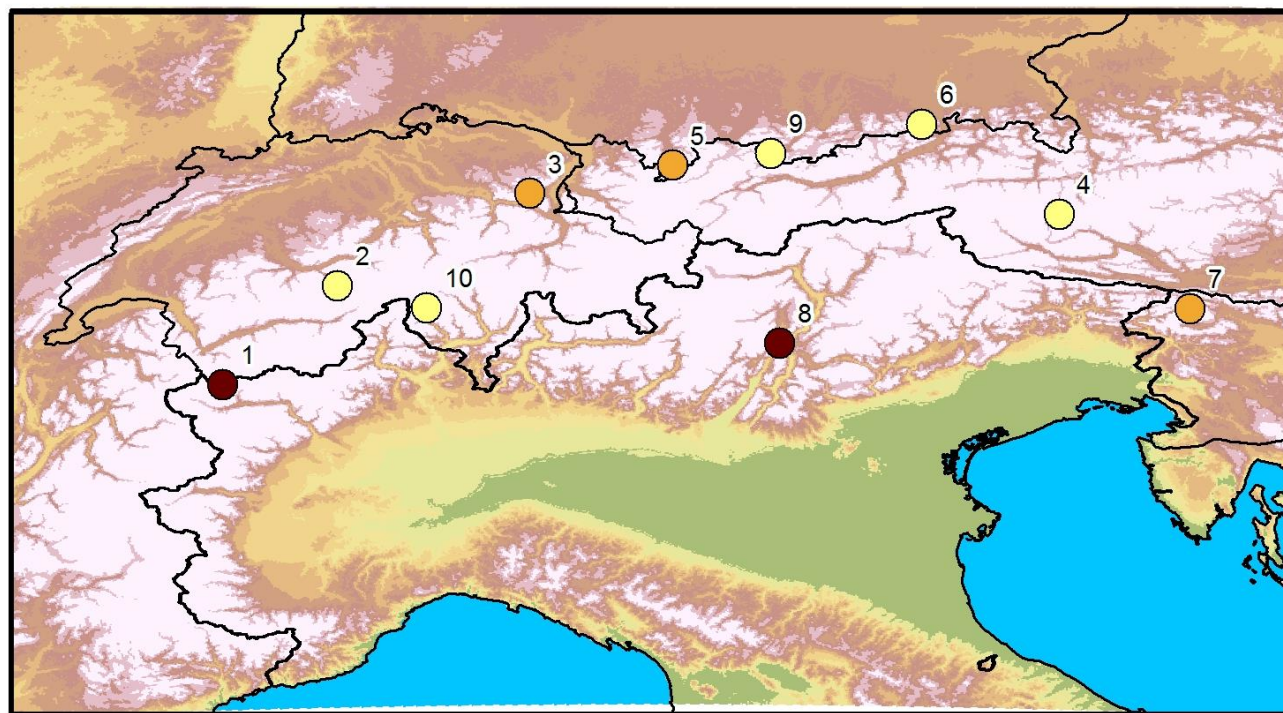
| | Oblast | Nadm. výška (v m n. m.) | Zem. šířka | Zem. délka | Zdroj dat | Druhy dřevin tvořících HHL |
|----|-------------|-------------------------|------------|------------|---------------------|--|
| 1 | ST BERNARD | 2472 | 45,7° | 6,9° | www.climexp.knmi.nl | <i>Pinus cembra, Pinus abies, Latrix decidua</i> |
| 2 | JUNGRAUJOCH | 3576 | 46,55° | 7,98° | www.climexp.knmi.nl | <i>Picea abies</i> |
| 3 | SANTIS | 2500 | 47,2° | 9,3° | www.ncdc.noaa.gov | <i>Latrix decidua, Picea abies</i> |
| 4 | SONNBLICK | 3109 | 47,05° | 12,95° | www.climexp.knmi.nl | <i>Picea excelsa</i> |
| 5 | OBERSTDORF | 806 | 47,39 ° | 10,27° | www.ncdc.noaa.gov | <i>Picea excelsa, Latrix decidua</i> |
| 6 | WENDELSTEIN | 1832 | 47,7° | 12,01° | www.ncdc.noaa.gov | <i>Picea excelsa</i> |
| 7 | KREDARICA | 2514 | 46,38° | 13,85° | www.ncdc.noaa.gov | <i>Pinus mugo, Latrix decidua</i> |
| 8 | PAGANELLA | 2125 | 46,15° | 11,03° | www.ncdc.noaa.gov | <i>Fagus silvatica, Pinus cembra, Latrix decidua</i> |
| 9 | ZUGSPITZE | 2538 | 47,41° | 10,98° | www.ncdc.noaa.gov | <i>Picea abies, Latrix decidua</i> |
| 10 | ST GOTTHARD | 2095 | 46,40° | 8,60° | www.climexp.knmi.nl | <i>Picea excelsa, Latrix decidua, Pinus cembra</i> |

Tabulka 6: Základní teplotní charakteristiky vztahující se k vegetačnímu období vypočtené na základě 10 vybraných bodů (vlastní výpočty).

| | Oblast | Průměrná teplota nejteplejšího měsíce na HHL (°C) | Průměrná teplota 3 nejteplejších měsíců (°C) | Průměrná teplota 4 nejteplejších měsíců (°C) | Průměrná teplota 5 nejteplejších měsíců (°C) | Počet dní s teplotou nad 5°C (DM5) | Suma teplot nad nad 5°C |
|----|-------------|--|--|---|---|--|----------------------------|
| 1 | ST BERNARD | 9,70 | 8,54 | 8,13 | 7,00 | 118 | 352,90 |
| 2 | JUNGRAUJOCH | 7,17 | 6,37 | 5,98 | 5,03 | 83 | 135,73 |
| 3 | SANTIS | 8,68 | 7,80 | 7,38 | 6,52 | 115 | 281,76 |
| 4 | SONNBLICK | 8,05 | 7,36 | 6,81 | 5,95 | 104 | 228,57 |
| 5 | OBERSTDORF | 8,68 | 7,86 | 7,43 | 6,62 | 118 | 292,26 |
| 6 | WENDELSTEIN | 8,05 | 7,36 | 6,81 | 5,95 | 104 | 228,57 |
| 7 | KREDARICA | 8,52 | 7,71 | 7,32 | 6,37 | 112 | 267,47 |
| 8 | PAGANELLA | 9,73 | 8,78 | 8,13 | 7,14 | 117 | 373,85 |
| 9 | ZUGSPITZE | 8,45 | 7,77 | 7,30 | 6,51 | 116 | 280,38 |
| 10 | ST GOTTHARD | 8,02 | 6,85 | 6,42 | 5,46 | 109 | 192,14 |

Obrázek 10: Průměrná teplota nejteplejšího měsíce.

PRŮMĚRNÁ TEPLOTA NEJTEPLEJŠÍHO MĚSÍCE



Průměrná teplota (°C)

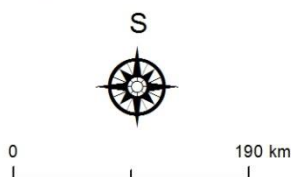
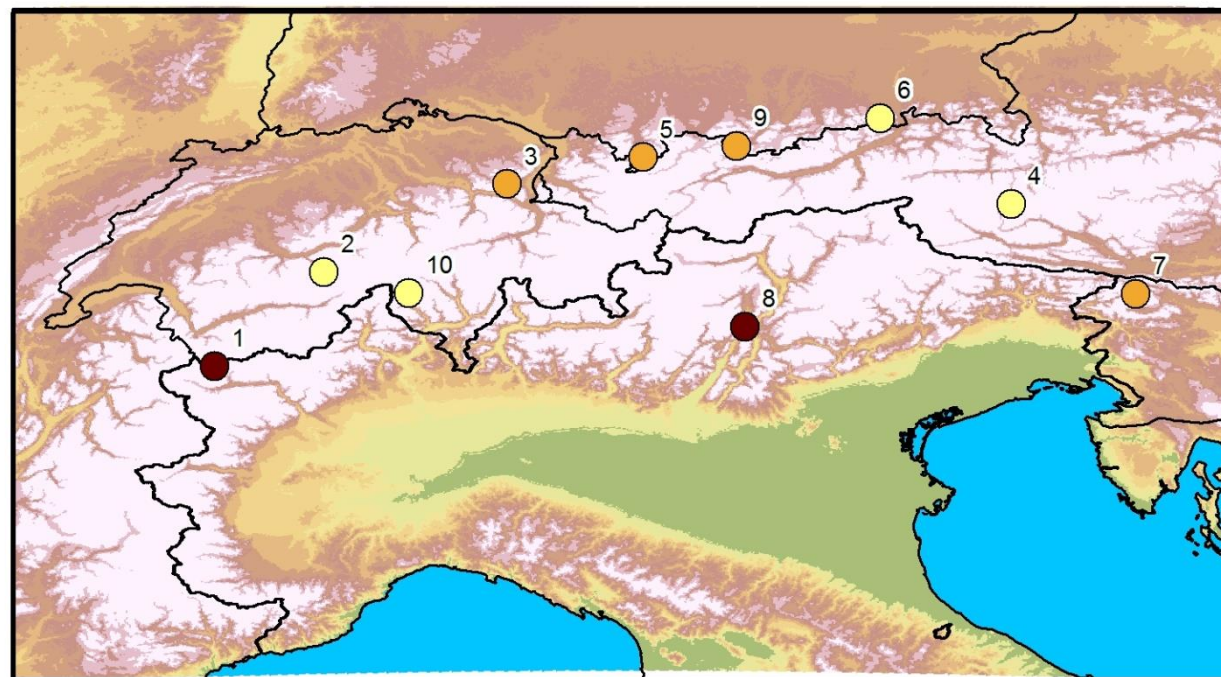
- 8,5 a méně
- 8,51-9
- 9,1 a více

Nadmořská výška (m n. m.)

- | | |
|---------------|---------------|
| 0 a méně | 2500,1 - 2875 |
| 0,1 - 625 | 2875,1 - 3250 |
| 625,1 - 1250 | 3250,1 - 3625 |
| 1250,1 - 1875 | 3625,1 - 4000 |
| 1875,1 - 2500 | 4000 a více |

Obrázek 11: Průměrná teplota 3 nejteplejších měsíců.

PRŮMĚRNÁ TEPLOTA 3 NEJTEPLEJŠÍCH MĚSÍCŮ



Průměrná teplota (°C)

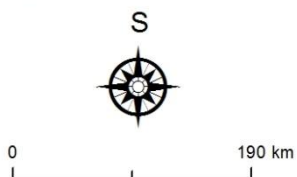
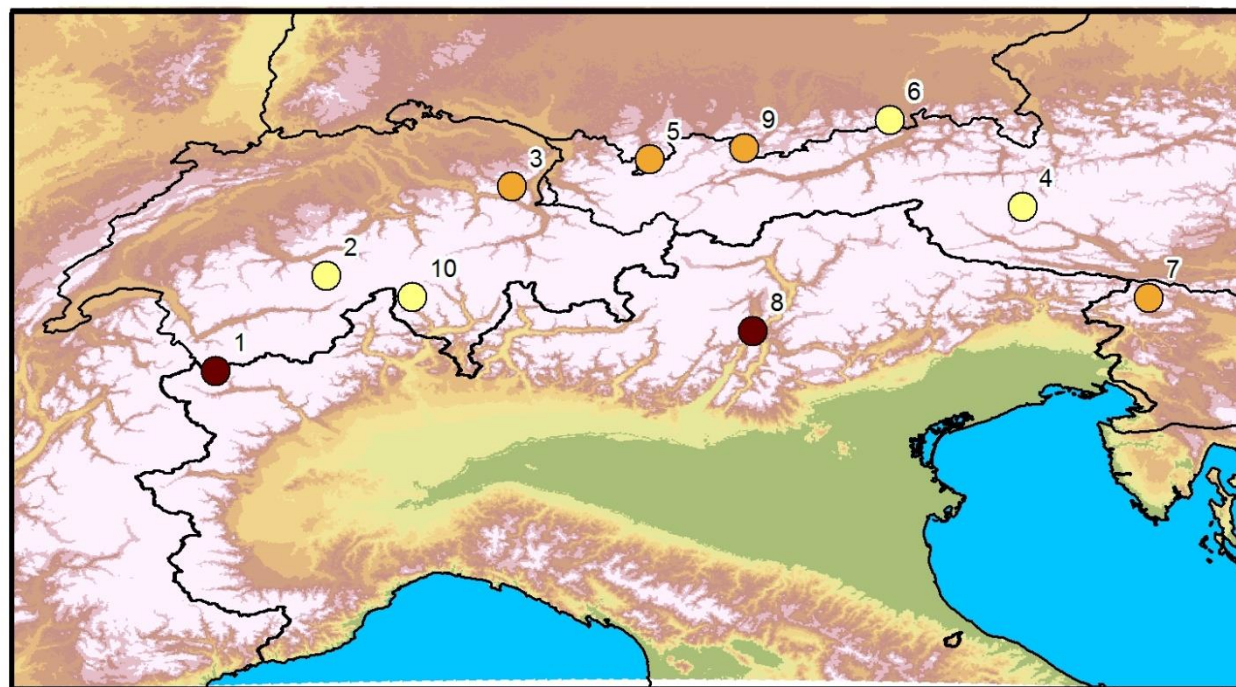
- 7,5 a méně
- 7,51 - 8
- 8 a více

Nadmořská výška (m n. m.)

- | | |
|---|---|
| 0 a méně | 2500,1 - 2875 |
| 0,1 - 625 | 2875,1 - 3250 |
| 625,1 - 1250 | 3250,1 - 3625 |
| 1250,1 - 1875 | 3625,1 - 4000 |
| 1875,1 - 2500 | 4000 a více |

Obrázek 12: Průměrná teplota 4 nejteplejších měsíců.

PRŮMĚRNÁ TEPLOTA 4 NEJTEPLEJŠÍCH MĚSÍCŮ



Průměrná teplota (°C)

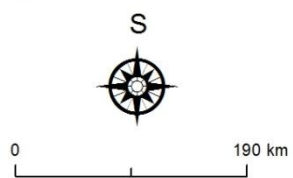
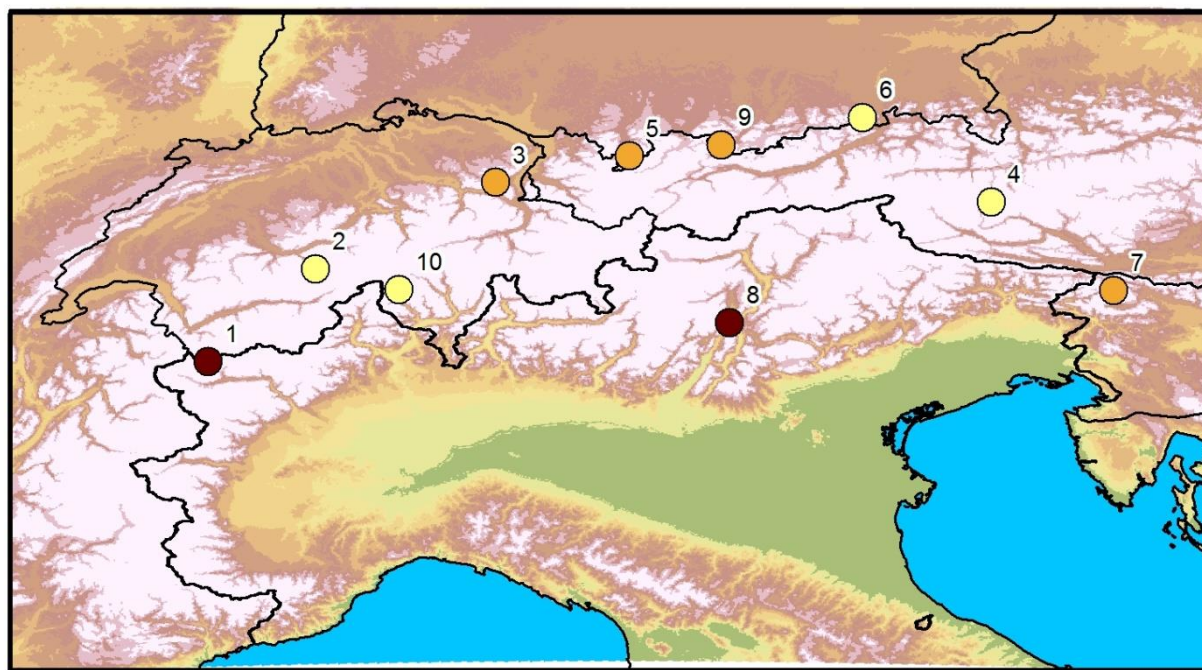
- 7 a méně
- 7,1 - 7,5
- 7,51 a více

Nadmořská výška (m n. m.)

- | | |
|---|---|
| ■ 0 a méně | ■ 2500,1 - 2875 |
| ■ 0,1 - 625 | ■ 2875,1 - 3250 |
| ■ 625,1 - 1250 | ■ 3250,1 - 3625 |
| ■ 1250,1 - 1875 | ■ 3625,1 - 4000 |
| ■ 1875,1 - 2500 | ■ 4000 a více |

Obrázek 13: Průměrná teplota 5 nejteplejších měsíců.

PRŮMĚRNÁ TEPLOTA 5 NEJTEPLEJŠÍCH MĚSÍCŮ



Průměrná teplota (°C)

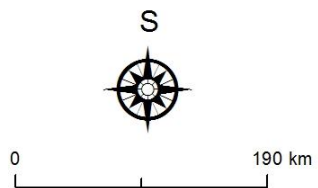
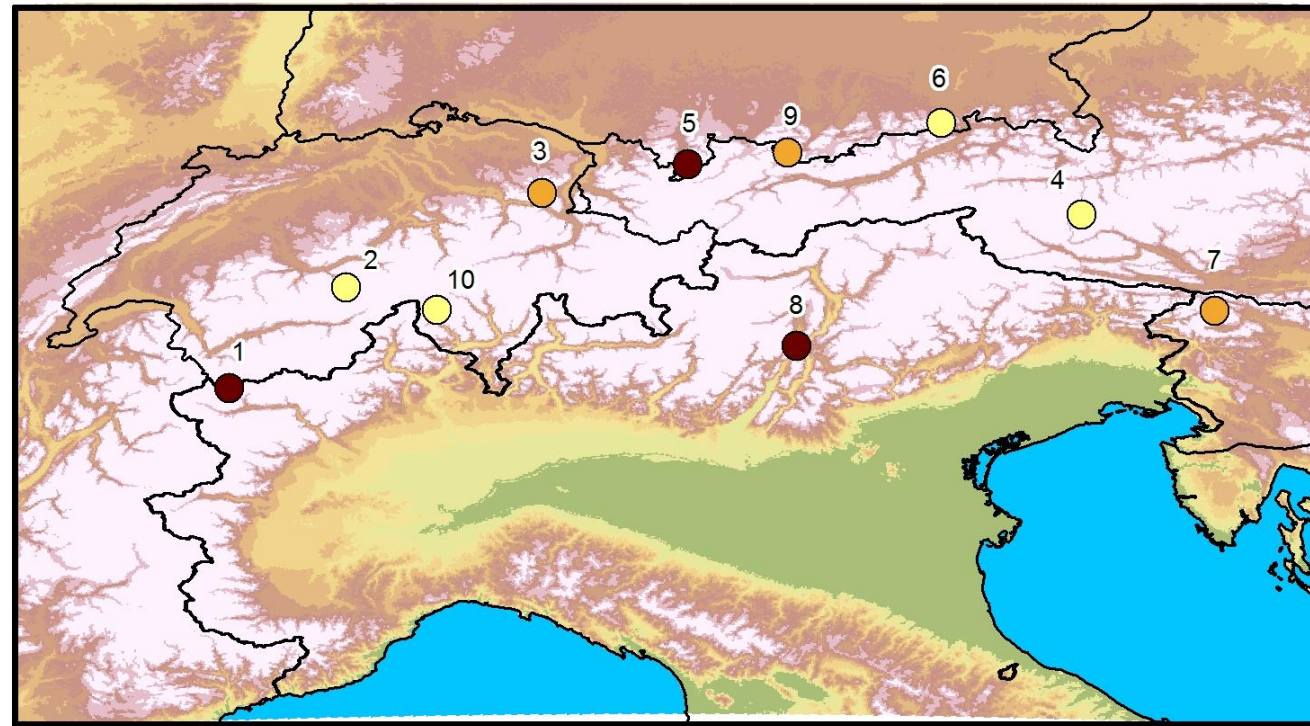
- 6 a méně
- 6,1 - 7
- 7,1 a více

Nadmořská výška (m n. m.)

- | | |
|---------------|---------------|
| 0 a méně | 2500,1 - 2875 |
| 0,1 - 625 | 2875,1 - 3250 |
| 625,1 - 1250 | 3250,1 - 3625 |
| 1250,1 - 1875 | 3625,1 - 4000 |
| 1875,1 - 2500 | 4000 a více |

Obrázek 14: Počet dnů s teplotou nad 5°C.

POČET DNŮ S TEPLOTOU NAD 5°C



Počet dnů s teplotou nad 5°C

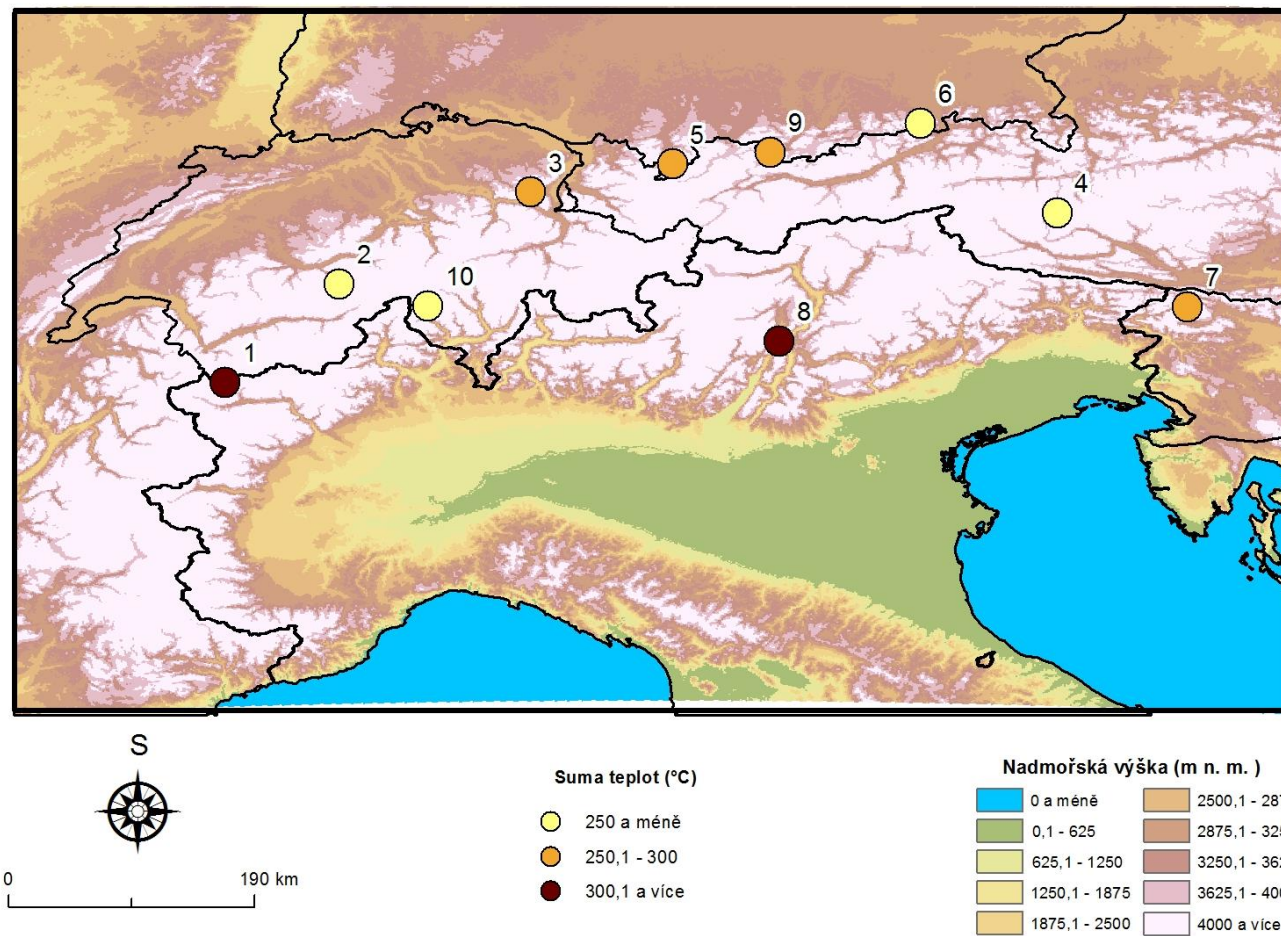
- 110 a méně
- 110,1 - 116
- 116,1 a více

Nadmořská výška (m n. m.)

- | | |
|---|--|
| ■ 0 a méně | ■ 2500,1 - 2875 |
| ■ 0,1 - 625 | ■ 2875,1 - 3250 |
| ■ 625,1 - 1250 | ■ 3250,1 - 3625 |
| ■ 1250,1 - 1875 | ■ 3625,1 - 4000 |
| ■ 1875,1 - 2500 | ■ 4000 a více |

Obrázek 15: Suma teplot nad 5°C.

SUMA TEPLŮT NAD 5°C



7 DISKUZE

Snahou celé práce bylo vytvořit databázi teplotních indikátorů vztahujících se identifikovaným polohám hranice lesa v Alpách a porovnání jejich základních teplotních charakteristik. V této části práce se pokusím o srovnání mých výsledků s výsledky jiných studií z různých horstev. Nejdříve se zaměřím na analýzu dat představených v praktické části a její interpretaci.

Jak bylo již dříve zmíněno, mezi hlavní faktory určující pozici horní hranice lesa v globálním měřítku, jsou považovány teplotní poměry (Körner et Paulsen 2004). Průměrné teploty vegetačního období měřené na horních hranicích lesa napříč všemi klimatickými pásy vykazují hodnoty $5^{\circ}\text{C} - 7,5^{\circ}\text{C}$ (Körner 1998), což v mém zájmovém regionu koresponduje zejména s hodnotami indikátoru M5 (průměr má hodnotu 6,33 a medián se rovná $6,44^{\circ}\text{C}$). Spočítané hodnoty indikátorů M1, M3 a M4 většinou nespádají do Körner – Paulsenova rozmezí se souvislostí zapojením vyšších průměrných teplot v červnu, červenci, srpnu a září v porovnání s květnem, kdy jsou zaznamenány nejnižší hodnoty teplot.

Rozmezí teplot $6^{\circ} - 7^{\circ}\text{C}$, které je stanovené Schickoffem (2005) jako průměrná teplota vegetačního období na HHL, se opět nejlépe přibližuje hodnotám indikátoru M5. Ovšem některé lokality nezapadají do Schickoffova rozmezí. Zde je nutné poznamenat, že Schickoff (2005) teplotní hranici stanovil na základě studia Hindúkuše, Karakorámu a Himalájí.

Obecně se dá říct, že indikátor M1 je často užívanou teplotní charakteristikou, ovšem v této práci není zcela přínosným ukazatelem pro určování HHL, jelikož je vztažený k menšímu počtu dnů s nejvyššími teplotami oproti celému vegetačnímu období, které zahrnuje větší počet dní a rozsah teplot. Užití indikátoru M3, M4 či M5 se jeví jako více vypovídající charakteristikami o průběhu vegetačního období.

V průběhu vegetační sezóny je nutné souvislé období trvající minimálně 94 dní s průměrnými denními teplotami vyššími než $0,9^{\circ}\text{C}$ (Körner 2012). V této práci byl použit při výpočtu vegetačního období indikátor počet dnů s teplotou nad 5°C (DM5, viz obrázek 14). Bylo zjištěno, že průměrná délka vegetačního období ve studované oblasti se rovná 109,6 dnům, medián se rovná 113,5 dnům. Celkově variabilita indikátoru DM5 byla nízká.

Zeidler a Banaš (2013) uvádí, že v oblasti Alp na každých 100 výškových metrů dochází ke zkrácení vegetační periody o 6–7 dní. Pro vytváření biomasy potřebuje většina dřevin průměrnou teplotu překračující 5°C (Körner 2012), což je určující pro dlouhodobé přežívání dřevin a tím též hranici lesa. Této hodnoty je dosaženo ve Švýcarských Alpách po dobu 85–120 dní ve výšce 2000 m (Zeidler a Banaš 2013), což se dá aplikovat i na mé studované oblasti, které se nacházejí v podobné elevaci od nejnižších 1848 m n. m. (Säntis) po nejhvýše položené 2298 m n. m.

Při srovnání mých vypočítaných průměrných hodnot indikátorů M1 a M4 s hodnotami uvedenými v práci Kašpar, Tremel (2015) uvedené v tabulce 7, dospívám k závěru, že se zde nacházejí podobné hodnoty teplotních charakteristik, a to jak pro indikátor M1, tak i M4. Konkrétně pro stanici Säntis mé zjištěné hodnoty jsou pro M1 8,68°C a pro M4 7,38 °C. Příčiny nepatrných rozdílných hodnot mohou mít několik primárních zdrojů. Příčiny těchto rozdílů mohou být užitím odlišné metodiky, například uplatnění různých teplotních gradientů při přepočtu měsíčních teplot vztažených k nadmořské výšce jednotlivých lokalit, na výškovou úroveň HHL, dále odlišné určení nadmořské výšky hranice HHL, či použití odlišné periody měsíčních dat. V práci Kašpara a Tremela (2015) byla užitá perioda let 1961 – 1990, v této práci bylo počítáno období 1961 – 2000, což může vést k rozdílnosti teplotních indikátorů.

Tabulka 7: Teplotní charakteristiky vegetačního období na HHL v Alpách (Kašpar, Tremel 2015)

| Region | Period | Average Jun-Sep temperature (°C) | Sum of temperatures above 0 °C [D.D.] ±SD | Mean temperature of warmest month (°C) | Reference |
|--------------------------|------------|---|---|--|----------------------------|
| Alps – several locations | 2004-2005 | 8.0 ±0.6 (Mid-May to mid-November) | - | - | Gehrig-Fasel et al. (2008) |
| Dolomites 46N,12E | 2002-2004 | 9.8 - 10.0 | - | - | Rossi et al. (2007) |
| Mt. C 47N,11E | 2000 | 8.2 treeline (end of May – 1th October) | - | - | Körner and Paulsen (2004) |
| | 2006, 2007 | 8.8 timberline | - | - | Gruber et al. (2008) |

| | | | | | |
|--|-----------|----------|-----------|---------|-----------------|
| Mt. Patscherkofel 47N,11E Treeline 2070 m | 1961-1990 | 7.7 | 1115 | 9.0 | Climate station |
| Villacher Alps 47N,13E Treeline 2050 m | 1961-1990 | 8.1 | 1193 | 9.3 | Climate station |
| Andermatt/G ütsch Treeline 2200 m | 1961-1990 | 6.8 | 934 | 8.2 | Climate station |
| Säntis 47N,9E Treeline 1900 m | 1961-1990 | 7.3 | 1146 | 8.4 | Climate station |
| CENA | 1961-1990 | 8.4 ±0.5 | 1272± 112 | 9.5±0.6 | This study |

Výše uvedené teplotní indikátory představují globální faktory, které mají významný vliv na polohu HHL. Je třeba zmínit, že výzkum byl do určité míry omezen nízkým počtem příslušných klimatických stanic spadajících do studované oblasti. Všechny zjištěné teplotní charakteristiky jsou přepočítány z elevací, obvykle položených mnohem více, než samotná HHL. Z toho mohou plynout určité odchylky již na prvním stupni získávání dat.

Jak je ukázáno na mapách 9, 10, 11, 12, největší průměrné teploty jsou charakteristické pro oblast Dolomitů. Významným faktorem ovlivňující teploty jsou proudící vzduchové vrstvy od Středozevního moře (Král, 1999). Další oblast s největšími průměrnými teplotami je v oblasti Centrálních a Peninských Alp. Určitý vliv na vysoké teploty vegetačního období má i efekt hmotnosti pohoří.

Tento jev (Mountain mass elevation effect) je odražen i na charakteru vegetace v jednotlivých částech pohoří. Zvyšující se teploty mají za následek prodlužování růstové periody rostlin. Transformace vzduchových mas ve směru do nitra horských systémů způsobují, že s rostoucí kontinentalitou směrem k centrální části pohoří jsou spíše oceánické dřeviny vystřídány typickými kontinentálními dřevinami (Zeidler a Banaš 2013). Ve studované lokalitě Piz da Staz (2847 m) v centrálních Alpách ve Švýcarsku (Hiller et al. 2002), jsou druhy *Pinus cembra*, *Larix decidua* základním druhem dřevin tvořících HHL v této oblasti. *Loiseleuria procumbens* a druhy rodu *Lichen* jsou typickými zástupci návětrných míst této lokality. *Pinus cembra*, *Larix decidua* a *Picea abies* jsou typické dřeviny tvořící ekoton HHL Alp (Nagy a Grabher 2009).

Další významné faktory, které ovlivňují polohu horní hranice lesa, jsou místní edafické poměry. Průměrná denní teplota půdy, měřená v hloubce 10 cm v maximálních polohách HHL během vegetační sezóny se rovná 5,4°C – 7,8°C (Körner, Paulsen 2004). Ve švýcarských Alpách byl proveden výzkum, při kterém byla zjištěna průměrná teplota půdy v hloubce 10 cm při HHL 7,0±0,4 °C (Gehrig-Fasel et al. 2008). Ve studované lokalitě Piz da Staz (2847 m) v centrálních Alpách ve Švýcarsku (Hiller et al. 2002) jsou identifikovány následující referenční třídy: podzosoly, kambisoly a leptosoly (Hiller et al. 2002).

Klimatickým faktorem ovlivňujícím polohu horní hranice lesa patří působení větru. Se stoupající nadmořskou výškou se zvyšuje jeho síla a frekvence výskytu. Průměrná maximální roční rychlost větru ve stanici Mt. Washington v New Hampshire při HHL je asi 20 m/s, v extrémních případech může dosahovat i hodnoty 70m/s (Holtmeier 2009). Pro porovnání průměrná rychlost na stanicích Säntis (Švýcarsko) a Sonnblick (Rakousko) nepřesáhne hodnotu 7,7 a 7,5 m/s , ve stanici Muottas Muragl ve Švýcarsku je průměrná rychlost 4 m/s (Braun-Blanquet, 1964). Je nutné podotknout, že tyto stanice leží v blízké nadmořské výšce vrcholů hor. Vítr celkově zvyšuje evapotranspiraci a pravděpodobnost mrazového vysychání a relokaci sněhu. To se často projevuje viditelným rozdílem elevace HHL na návětrných a závětrných sklonech.

Tato práce nebyla zaměřena na výzkum vlivu činnosti člověka na polohu HHL. Avšak v této oblasti se jedná o významný faktor. Oblast Alp je z dlouhodobého hlediska vystavena antropogennímu vlivu a je jím silně pozměněna. HHL je v mnoha místech snižovaná, oproti tomu v mnoha místech vykazuje i vzrůstající tendenci. Leonelli et al. (2011) zkoumali změnu elevace HHL v regionu Valle d'Aosta na západu Italských Alp. U horní hranice lesa v nadmořské 2500 m byl zjištěn postup o celých 125 m mezi roky 1901–2008. Poloha HHL byla ovlivňována dopadem člověka a geomorfologickými faktory. Avšak nedávné posuny a zrychlení kolonizace stromů v alpínském stupni je připisována hlavně dramatickému zvýšení teploty (Leonelli et al. 2011).

8 ZÁVĚR

V řadě horských oblastí celého světa se vlivem specifických podmínek vytváří ekoton horní hranice lesa, významný biogeografický předěl v horského reliéfu způsobený poklesem teploty vzduchu a půdy s rostoucí nadmořskou výškou.

Podle příčin formování horní hranice lesa (HHL) se rozlišují následující tvary: ostrá, ostrovní, rozptýlená hranice a hranice tvořená klečí. Každý tvar má svojí charakteristiku a různě reaguje na změny klimatu. To dává možnost stanovení různých hypotéz o jejich formování. Například rozptýlená HHL je globálně nejrozšířenějším typem a rychle reaguje na globální změny teploty (viz obrázek 7). Ostrá HHL naopak odráží spíše lokální podmínky podněcující její vznik. Körner (1998) popisuje 5 různých hypotéz, které vysvětlují vznik horní hranice lesa na základě mnoha faktorů. Jedná se o stresovou, disturbanční, reprodukční hypotézu, hypotézu růstového omezení a hypotézu omezených zdrojů.

Jak bylo již dříve zmíněno, vychází z myšlenky, že horní hranice lesa v globálním měřítku je jevem klimatickým, to znamená, že je především určována teplotními charakteristikami. Nicméně, HHL je ve stejné míře i jevem biologickým, což znamená, že růst stromů ve svých maximálních elevacích je omezen možností rozmnožování a dostupností živin (tyto parametry jsou také ovlivněny teplotními charakteristikami). V této práci byl proveden pouze obecný přehled těchto hypotéz bez záměru na teoretické výpočty.

Teorie omezení růstu se podle Körnera (2007) považuje za nejpravděpodobnější a nejvěrohodnější hypotézu a příčinu utváření horní hranice lesa, ve které nízké teploty způsobují formování horní hranice lesa. Syntetické procesy zahrnující transport aminokyselin a cukrů do těla rostlin nedostatečně pokrývají jejich potřebu na tvorbu nové stavební struktury (Körner 2007). Teorie nedostatečné uhlíkové bilance byla zamítnuta většinou vědců. Na HHL bylo prokázáno dostatečné množství uhlíku a nestrukturálních sacharidů pro fotosyntézu. Problémem spíše zůstává neschopnost stromových jedinců za nízkých teplot zabudovat tyto látky do svých pletiv.

V bakalářské práci jsem pro horní hranice lesa získávala následující teplotní údaje: teplotu nejteplejšího měsíce, teplotu třech, čtyř a pěti nejteplejších měsíců, počet dnů s teplotou nad 5°C a sumu teplot vyšších než 5°C. Hlavním výsledkem, kterého jsem dosáhla v této práci, je zjištění, že HHL je ovlivněna celou řadou na sobě závislých faktorů. Hlavním

a mnou zkoumaným je indikátor teplot. Zjištěné průměrné měsíční hodnoty jednotlivých stanic (viz tabulka 7) korespondují s Körnerovou průměrnou hodnotou vegetačního období 5 - 7,5°C. Počet dnů s teplotou nad 5°C a suma teplot vyšších než 5°C korelují s průměrnými teplotami. Cílem této práce nebyl výzkum vlivu činnosti člověka na polohu HHL. Avšak v této oblasti se jedná o další faktor, který určuje elevaci HHL.

9 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

AESCHIMANN, D., K. LAUBER, D. M. MOSER & J.-P. THEURILLAT (2004). Flora alpina. Haupt, Belin & Zanichelli.

ALVAREZ-URIA, P., KÖRNER, C. (2007): Low temperature limits of root growth in deciduous and evergreen temperate tree species. *Functional ecology*, 21, s. 211 – 218.

BRAUN-BLANQUET, J. (1964): Pflanzensoziologie (3rd edition). Wien/New York.

CHAUCHARD, S., BEILHE, F., DENIS, N., CARCAILLER, CH. (2009): An increase in the upper tree-limit of silver fir (*Abies alba* Mill.) in the Alps since the mid-20th century: A land-use change phenomenon, *Forest Ecology and Management*, S. 1406 – 1415.

DÍAZ-VARELA, R. A., COLOMBO, R., MERONI, M., CALVO-IGLESIAS, M.S., BUFFONI, A., TAGLIAFERRI, A. (2010): Spatio-temporal analysis of alpine ecotones: A spatial explicit model targeting altitudinal vegetation shifts. *Ecological Modelling* 221, s. 621-633.

ELLENBERG, H. (1963). Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in kausaler, dynamischer und historischer Sicht. Ulmer, Stuttgart.

GEHRIG-FASEL, J., GUISAN, A., ZIMMERMANN, N.E. (2007): Tree line shifts in the Swiss Alps: Climate change or land abandonment? *Journal of Vegetation Science* 18, s. 571-582.

GEHRIG-FASEL, J., GUISAN, A., ZIMMERMANN, N.E. (2008): Evaluating thermal treeline indicators based on air and soil temperature using an air-to-soil temperature transfer model, *Ecological modelling* 213, s.345–355.

HARSH, M., BADER, M. (2011): Treeline form – a potential key to understanding treeline dynamics. *Global ecology and biogeography*, s. 1 – 15.

HERRICK, G. T., FRIEDLAND, A. J. (1991): Winter desiccation and injury of subalpine red spruce. *Tree Physiology* 8, s. 23-36

HOCH, G. & KÖRNER, CH. (2005) Growth, demography and carbon relations of *Polylepis* trees at the world's highest treeline. *Functional Ecology* 19: 941-951.

HOLTMEIER, F. K. (2003): Mountain timberlines, Ecology, patchiness and dynamics. Dordrecht. Kulwer academic publishers. 367 s. ISBN 1-4020-1356-6.

HOLTMEIER, F. K. (2009): Mountain timberlines. Ecology, patchiness and dynamics. Advances in global change research. Research 36. 1-4. Springer Science & Business Media B. V. 438 s. ISBN 904-81-8189-5.

GRACE, J., BERNINGER, F. & NAGY, L. (2002): Impacts of climate change on the tree line. Annals of Botany, 90, s. 537 – 544.

HAN, A. R., LEE, S. K., SUH, G. U., PARK, Y., PARK, P. S. (2012): Wind and topography influence the Crown growth of *Picea jezoensis* in a subalpine forest on Mt. Deogyu, Korea. Agricultural and Forrest Meteorology 166-167, s. 207-214.

HERRICK, G. T., FRIEDLAND, A. J. (1991): Winter desiccation and injury of subalpine red spruce. Tree Physiology 8,s. 23-36.

HILLER, B., MÜTERTHIES, A., HOLTMEIER F, K., BROLL, K ,G., VECHTA: Investigations on Spatial Heterogeneity of Humus Forms and Natural Regen eration of Larch (*Larix decidua* Mill.) and Swiss Stone Pine (*Pinus cembra* L.) in an Alpine Timberline Ecotone (Upper Engadine, Central Alps, Switzerland), Geographica Helvetica, s. 81 – 90.

HOLTMEIER, FK, BROLL, G. (2005): Sensitivity and response of northern hemisphere altitudinal and polar treelines to environmental change at landscape at landscape and local scales. Clobal ekology and biogeography, 14, s. 395 – 410

HOLTMEIER, FK, BROLL, G. (2009): Altitudinal and polar treelines in the Northern hemisphere – causes and response to climate change. Polarforschung, 79, č. 3, s. 139 – 153.

KAŠPAR, J., TREML, V. (2015): Thermal characteristics of alpine treelines in Central Europe north of the Alps. Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography.

KÖRNER, CH. (1998) A re-assessment of high elevation treeline positions and their explanation. Oecologia 115: 445-459.

KÖRNER, CH. (1999): Alpine plant life: functional plant ecology of high mountainecosystems. Springer, Berlin, 338 s. ISBN: 3-540-65054-7.

KÖRNER, CH. (2003) Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems, Berlin: Springer–Verlag, s. 343

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

KRÁL, V (1999): Fyzická geografie Evropy. 1. vydání. Praha: Academia ,. ISBN 80-200-06842.

KULLMAN, L., ÖBERG, L. (2009): Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspective. *Journal of Ecology* 97, s. 415-429.

LEONELLI, G., PELFINI, M., MORRA DI CELLA, U., GARAVAGLIA, V. (2011): Climate warming and the recent treeline shift in the European Alps: the role of geomorphological factors in high-altitude sites. *Ambio*, 40, s. 264 – 273.

NAGY, L., GRABHERR, G. (2009): The biology of alpine habitats. Oxford University press, 376 s. ISBN 978-0-19-856703-5.

NETOPIL, R., BIČÍK, I., BRINKE, J. (1989): Geografie Evropy. SPN, Praha, 323 s.

MOTTA, R., NOLA, P. (2001): Growth trends and dynamics in sup-alpine forest stands in the Varaita Valley (Piedmont, Italy) and their relationships with human activities and global change. *Journal of Vegetation Science* 12, s. 219- 230.

PLESNÍK, P. (1971): Horná hranica lesa: Vo Vysokých a v Belanských Tatrách. Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava 1971, 240 s.

PRACH, K., ŠTECH, M., ŘÍHA, P. (2009): Ekologie a rozšíření biomů na Zemi. Scientia, Praha, 152 s. ISBN 978-80-86960-46-3.

ROLLAND, CH. (2003): Spatial and Seasonal Variations of Air Temperature Lapse Rates in Alpine Regions. *Journal of Climate*, 1032-1046.

ROSSI, S., DESLAURIERS, S., ANFODILLO, T., CARRARO, V. (2006) Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes *Oecologia*, 1 – 12.

ROZMAN, A., DIACI, J., BATIČ, F. (2013): Functional analysis of vegetation on alpine treeline ecotone in the Julian and Kamnik-Savinja Alps in Slovenia, *Folia biologica et geologica*, s. 5-23.

RICHARDSON, A., FRIEDLAND, A. (2009): A review of the theories to explain arctic and alpine treelines around the world. *Journal of sustainable forestry*, 28, s. 218 – 242. ISSN: 1054-9811.

TRANQUILLINI, W. (1979): *Physiological ecology of the alpine timberline. Tree existence at high altitudes with special references to the European Alps.* Springer-Verlag, Berlin-New York, 110s.

TREML, V. (2007): *Dynamika alpské hranice lesa ve Vysokých Sudetech.* 198 s., disertační práce na Přírodovědecké fakultě Univerzity Karlovy v Praze na Katedře fyzické geografie a geoekologie, vedoucí disertační práce Doc. RNDr. Zdeněk Lipský, Csc.

VITTOZ, P., RULENCE, B., FRELÉCHOUX, F. (2008): Effects of climate and land-use change on the establishment and growth of cembra pine (*Pinus Cembra* L.) over the altitudinal treeline ecotone in the Central Swiss Alps. *Arctic Antarctic Alpine Research*, 40, s. 225 – 232.

VOTÝPKA, J. (1994): *Fyzická geografie Evropy.* 1.vydání. Praha: Karolinum. ISBN 382-130-94.

WALLENTIN, G., TAPPEINER, U., STROBL, J., TASSER, E. (2008): Understanding alpine tree line dynamics: An individual-based model. *Ecological Modelling*, 218, s. 235 – 246.

WARDLE, P. (1968) Engelmann spruce (*Picea engelmannii* Engel.) at its upper limits on the Front Range, Colorado. *Ecology*, 49, 483–495.

WIESER, G., TAUSZ, M. (2007): *Trees at their upper limit.* Dordrecht. Springer. 233 s. ISBN 978-1402050732.

ZEIDLER, M., BANAŠ, M. (2013): Vybrané kapitoly z ekologie horských ekosystémů. Univerzita Palackého v Olomouci. Olomouc. 88 s.

ZHAO, F., ZHANG, B.P., PANG, Y., YAO, Y. (2014): A study of the contribution of mass elevation effect to the altitudinal distribution of timberline in the Northern Hemisphere. *Journal of Geographical Sciences*, 24, 226-236. doi: 10.1007/s11442-014-1084-4.

WIESER, G., TAUSZ, M. (2007). *Trees at their upper limit*. Springer Netherlands.

GOOGLE EARTH. DigitalGlobe 2012 (V 6.2.2.6613) [online, cit. 21.05.2015] Dostupný z WWW: <http://www.earth.google.com>

KNMI CLIMATE EXPLORER. The Global Historical Climatology Network-Monthly (GHCN-M) temperature dataset [online, cit. 09.05.2015] Dostupný z WWW: <http://climexp.knmi.nl//getstations.cgi>.

NOAA: NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. Data Tools: Find a Station [online, cit. 09. 05. 2015] Dostupný z WWW: <http://www.ncdc.noaa.gov/cdo-web/datatools/findstation>