PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY KARLOVY

Katedra fyzické geografie a geoekologie

Ověření expozičního efektu na horní hranici lesa v Krkonoších

(Diplomová práce)

Tereza Ponocná

Vedoucí práce: Mgr. Václav Treml, PhD.

PRAHA 2009

Prohlašuji, že jsem zadanou diplomovou práci vypracovala sama, a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje.

Praha 21.8. 2009

.....

Za cenné rady, připomínky, poskytnutou literaturu a trpělivost při vedení mé diplomové práce děkuji Mgr. Václavu Tremlovi, PhD. Dále děkuji Správě Krkonošského národního parku a Karkonoskiego Parku Narodowego za vydání povolení k výzkumné činnosti. Děkuji svým blízkým a Tomášovi.

Abstract

The thesis deals with the influence of thermal conditions on the growth of the trees along the slopes with differing exposure to solar radiation in the alpine treeline ecotone in the Eastern Giant Mountains.

Methodological approach was based on the measuring of the tree top and root zone temperatures, measurement of the dendrometric parameters (tree height, length increment) and radial increment of the Norway spruce (*Picea abies*).

The results show only weak relation between significant temperature characteristics and exposure effect in the alpine treeline ecotone, which correspond to the growth rates of the sampled trees.

Slightly higher temperatures were found on the south-facing slopes during the growing seasons in case of the closed canopy forest. Soil and air temperatures in tree groups were a bit higher on the north-facing slopes.

In closed-canopy forest there was larger radial increment on south-facing slopes of Luční hora, on the slopes of Malý Šišák there were similar growth trend on both slope exposures. In tree groups there were found larger increments on north-facing slope of Luční hora, on the sampled sites of Malý Šišák there were found larger increment on south-facing slope during the 20th century, then in last decade larger increment was recorded on north-facing slope.

Based on standard tree-ring chronologies there was found increase in tree-ring widths during 60s and beginning of 70s of the 20th century. That was consistent with the increase of average temperatures in the corresponding period. In contrast, there were detected the growth depression at the end of 70s and during 80s of the 20th century. The effect of the air pollution is the reason for this decline. Then there were found the period of increased tree growth at all sampled sites. It may be a consequence of increased air temperatures as well as nitrogen input during the 90s of the 20th century.

During the period of obtained temperature data it was found that the larger increment corresponds to the higher temperature on all sampled location in closed-canopy forest as well as in the tree groups.

It can by summarize that the potentially favorable slope aspect is partly reflected in the closed-canopy forest while in the tree groups there were not detected. These results are probably affected by local topography and air flow in the sampled area.

Obsah

1. Úvod 8
2. Teoretické aspekty alpinské hranice lesa 10
2.1 Termín alpinská hranice lesa 10
2.2 Vznik alpinské hranice lesa 11
2.2.1 Faktory ovlivňující vznik alpinské hranice lesa 12
2.3 Teplotní indikátory alpinské hranice lesa 14
2.4 Alpinská hranice lesa a expoziční efekt 15
2.5 Alpinská hranice lesa v Krkonoších 18
3. Fyzickogeografická charakteristika studovaného území 20
3.1 Geologické a geomorfologické poměry 20
3.2 Klimatické poměry 22
3.3 Hydrologické poměry 25
3.4 Půdní poměry 26
3.5 Biogeografické poměry 27
3.6 Antropogenní ovlivnění 30
3.7 Ochrana přírody v Krkonoších 30
3.8 Charakteristika zájmových ploch 31
4. Použité metody 33
4.1 Vzorky 33
4.1.1 Získávání vzorků 33
4.1.2 Vytvoření letokruhových sérií 33
4.1.3. Datování 34
4.1.4 Korekce šířek letokruhů odstraněním věkového trendu 34
4.1.5 Vytvoření stanovištních chronologií 35
4.1.6 Porovnání šířek letokruhů a dendrometrických charakteristik 35
4.2 Teplotní data 36
4.2.1 Teplotní měření 36
4.2.2 Počítané teplotní indikátory 37
4.2.3 Srovnání teplotních ukazatelů s tepelným požitkem stanoviště 37
4.3 Měření výšky sněhové pokrývky 38
4.4. Vztah mezi růstem stromů a teplotami 38
5. Výsledky 39
5.1 Aktuální šířky letokruhů 39
5.2 Korigované šířky letokruhů 40
5.3 Stanovištní chronologie 48
5.4 Dendrometrické znaky smrku ztepilého 50
5.5 Teplotní indikátory 51

5.6 Průměrné měsíční teploty 57
5.7 Vztah potenciálního tepelného požitku a měřených teplot 59
5.8 Odtávání sněhové pokrývky 62
5.9 Vztah mezi růstem stromů a teplotami 64
5.9.1 Aktuální šířky letokruhů 64
5.9.2 Korigované šířky letokruhů 67
6. Diskuze 70
7. Závěr 75
8. Seznam literatury 76

Seznam obrázků uvedených v textu:

Obr. 1: Schéma ekotonu AHL 11
Obr. 2: Geologická mapa východních Krkonoš 21
Obr. 3: Průměrné měsíční teploty Sněžky za období 1961-1990 22
Obr. 4: Roční hodnoty SO2 (µg.m-3), stanice Krkonoše Rýchory 24
Obr. 5: Roční hodnoty NOx (µg.m-3), stanice Krkonoše Rýchory 25
Obr. 6: Roční hodnoty O3 (µg.m-3.h), stanice Krkonoše Rýchory 25
Obr. 7: Půdy východních Krkonoš 27
Obr. 8: Klasifikace biotopů v rámci mapování Natura 2000 ve východních Krkonoších 29
Obr. 9: Zájmové území 31
Obr. 10: Vztah mezi kambiálním stářím a šířkou letokruhů, trend modelován polynomem 2. stupně 35
Obr. 11: Průměrná šířka letokruhů na hranici lesa za posledních 10 let 39
Obr. 12: Průměrná šířka letokruhů stromových skupinek za posledních 10 let 40
Obr. 13: Standardizovaná šířka letokruhů na hranici lesa 42
Obr. 14: Standardizovaná šířka letokruhů stromových skupinek 42
Obr. 15: Srovnání šířky letokruhů na hranici lesa (ahl_s1 x ahl_j1) v 10letých obdobích 44
Obr. 16: Srovnání šířky letokruhů na hranici lesa (ahl_s2 x ahl_j2) v 10letých obdobích 45
Obr. 17: Srovnání šířky letokruhů stromových skupinek (skup_s1 x skup_j1) v 10letých obdobích 46
Obr. 18: Srovnání šířky letokruhů stromových skupinek (skup_s2 x skup_j2) v 10letých obdobích 47
Obr. 19: Stanovištní chronologie na hranici lesa 49
Obr. 20. Stanovištní chronologie stromových skupinek 49
Obr. 21: Srovnání aktuálních délkových přírůstů na hranici lesa 50
Obr. 22: Srovnání aktuálních délkových přírůstů stromových skupinek 50
Obr. 23: Průměrná teplota půdy v období 23.7.-9.10.2005 51
Obr. 24: Průměrné teploty vzduchu a půdy v období 24.7.-9.10.2006 53
Obr. 25: Průměrné teploty vzduchu a půdy v období 16.6.-16.10. 2007 55
Obr. 26: Průměrné teploty vzduchu a půdy v období 4.7.-31.10. 2008 57
Obr. 27: Průměrné měsíční teploty vzduchu během vegetačního období na hranici lesa 58
Obr. 28: Průměrné měsíční teploty půdy (-10 cm) během vegetačního období na hranici lesa 58
Obr. 29: Průměrné měsíční teploty vzduchu stromových skupinek 59
Obr. 30: Průměrné měsíční teploty půdy (-10 cm) stromových skupinek 59
Obr. 31: Potenciální tepelný požitek 60
Obr. 32: Srovnání lokalit dle průměrné hodnoty HLI 60

Obr. 33 : Vztah mezi průměrnou teplotou půdy ve sledovaném období 2007 a HLI 61
Obr. 34: Vztah mezi průměrnou teplotou vzduchu ve sledovaném období 2007 a HLI 61
Obr. 35: Vztah mezi průměrnou teplotou půdy ve sledovaném období 2008 a HLI 62
Obr. 36: Vztah mezi průměrnou teplotou vzduchu ve sledovaném období 2008 a HLI 62
Obr. 37: Vztah mezi průměrnou teplotou půdy a aktuální šířkou letokruhů v roce 2008 65
Obr. 38: Vztah mezi průměrnou teplotou vzduchu a aktuální šířkou letokruhu v roce 2008 .. 65
Obr. 39: Vztah mezi aktuální šířkou letokruhů a průměrnou teplotou půdy v roce 2007 66
Obr. 40: Vztah mezi aktuální šířkou letokruhů a průměrnou teplotou vzduchu v roce 2007 .. 66
Obr. 41: Vztah mezi korigovanou šířkou letokruhu a průměrnou teplotou půdy v roce 2008 67
Obr. 42: Vztah mezi korigovanou šířkou letokruhů a průměrnou teplotou vzduchu v roce 2008 68
Obr. 43: Vztah mezi korigovanou šířkou letokruhu a průměrnou teplotou půdy v roce 2007 68
Obr. 44: Vztah mezi korigovanou šířkou letokruhů a průměrnou teplotou vzduchu v roce 2007 69

Seznam tabulek uvedených v textu:

Tab. 1: Vybrané klimatické charakteristiky (průměrné hodnoty) 23
Tab. 2: Vybrané charakteristiky studovaných ploch 32
Tab. 3: Teplotní měření na Luční hoře a Zadní Planině 37
Tab. 4: Teplotní měření vzduchu a půdy na Malém Šišáku 37
Tab. 5: Sledovaná časová období, u kterých byly k dispozici data ze všech stanovišť 37
Tab. 6: Dendrometrické znaky smrku ztepilého 50
Tab. 7: Vybrané ukazatele teploty půdy (-10 cm) za období 23.7.-9.10.2005 51
Tab. 8: Vybrané ukazatele teploty půdy (-10 cm) za období 24.7.-9.10.2006 52
Tab. 9: Vybrané ukazatele teploty vzduchu v období 24.7.-9.10.2006 52
Tab. 10: Vybrané ukazatele teploty půdy (-10 cm) v období 16.6.-16.10. 2007, v závorce uvedené hodnoty pro vegetační období 54
Tab. 11: Vybrané ukazatele teploty vzduchu v období 16.6.-16.10. 2007, v závorce uvedené hodnoty pro vegetační období 54
Tab. 12: Vybrané ukazatele teploty půdy (-10 cm) v období 4.7.-31.10. 2008, v závorce uvedené hodnoty pro vegetační období 56
Tab. 13: Vybrané ukazatele teploty vzduchu v období 4.7.-31.10. 2008, v závorce uvedené hodnoty pro vegetační období 57
Tab. 14: Průměrná, min. a max. výška sněhové pokrývky (cm), pokryvnost (%) 63
8.4. a 18.4.2009 63
Tab. 15: Průměrná, min. a max. výška sněhové pokrývky (cm), pokryvnost (%) 63
30.4., 1.5. 2009 63
Tab. 16: Průměrná, min. a max. výška sněhové pokrývky (cm), pokryvnost (%) 64
13.5., 15.5. 2009 64

1. Úvod

Alpinská hranice lesa (AHL) je pravděpodobně nejznámější a nejvíce studovanou vegetační linií ve vysokohorských oblastech světa (Körner, 2003). Fenomén alpinské hranice je způsoben postupným ústupem stromové vegetace s rostoucí nadmořskou výškou (Körner, 2003). Tento ústup je podmíněn nedostatkem tepla během vegetačního období (Holtmeier, 2009).

Za předpokladu, že růst stromů a jejich reprodukce v ekotonu AHL je teplotně limitovaným fenoménem, jedná se o citlivý bioindikátor změny klimatu (Holtmeier, 2009, Kullman & Öberg, 2009, Walther et al., 2005). Holtmeier (2009) uvádí, že teoretický vzrůst teploty o 6°C by zvýšil polohu hranice lesa o 1200 m. Vzestup AHL do vyšších nadmořských výšek by způsobil fragmentaci alpinského bezlesí, nejvíce ohroženy by byly malé izolované plochy. Fragmentace či úplný zánik stanovišť by zvýšil riziko vyhynutí některých alpinských druhů a následně by poklesla biodiverzita (Holtmeier, 2009). Kromě změny polohy se projevují i změny ve struktuře vegetace. Dochází ke zvýšenému tempu růstu stromů, ke změně růstových forem, zvyšuje se hustota populací dřevin budujících hranice lesa na stanovištích (Walther et al., 2005).

Pozice alpinské hranice lesa, závislá na teplotní bilanci během vegetačního období, se v horském reliéfu liší v závislosti na různých geomorfologických podmínkách, zejména orientaci svahů a jejich sklonu (Wieser & Tausz, 2007). Ačkoliv lze předpokládat vyšší pozici hranice lesa na jižně orientovaných svazích vzhledem k předpokládaným vyšším teplotám a kratšímu trvání sněhové pokrývky v porovnání se svahy se severní expozicí, nebyl tento předpoklad potvrzen (Švýcarské Alpy, Paulsen & Körner, 2001). Na základě teplotních měření na opačně orientovaných svazích s různě zapojenými stromovými porosty se jednoznačná výhodnost jižní expozice neprokázala (Treml & Banaš, 2008, Körner & Paulsen, 2004). Teplotní údaje jsou spíše než expozičním efektem ovlivněny místními specifickými faktory – mikrotopografií, mocností humusové vrstvy, větrným prouděním a hustotou zápoje (Körner & Paulsen, 2004, Treml & Banaš, 2008, Wieser, 2007).

V ekotonu alpinské hranice lesa se teplotní údaje v závislosti na orientaci svahu vůči slunečnímu záření pravděpodobně významně neliší v oblasti souvisle zapojeného lesa, a to díky vlivu souvislého zápoje, který kořenovou zónu zastiňuje a brání tak zahřívání povrchu (Wieser, 2007, Treml & Banaš, 2008). Zároveň mikroklima vzrostných vrcholů je spíše svázáno s volnou atmosférou než s přízemní prohřátou vrstvou vzduchu (Körner & Paulsen, 2001). Expoziční efekt se tak pravděpodobně uplatňuje v případě semenáčků, zákrsků a

v oblasti bezlesí, kde dochází k výraznému prohřívání půdy a aktivní vrstvy vzduchu na expozičně příznivém svahu (Wieser, 2007).

Cílem této práce bylo ověřit výhodnost jižní expozice svahu vůči severní expozici ve vztahu k růstovým charakteristikám stromů na různých stanovištích v různých částech ekotonu alpinské hranice lesa. Dílčími cíli zejména bylo:

- Zjistit, jak se liší teplotní poměry vzduchu a půdy na opačně orientovaných svazích v ekotonu alpinské hranice lesa;
- Porovnat růst stromů z hlediska tloušťkového přírůstu a růstu větví na těchto svazích;
- Srovnat jednotlivé stanovištní chronologie;
- Zjistit rozdíl růstu stromů mezi souvisle zapojeným lesem a stromovými skupinkami;
- Srovnat, zda růst stromů koresponduje se zjištěnými teplotními poměry.

2. Teoretické aspekty alpinské hranice lesa

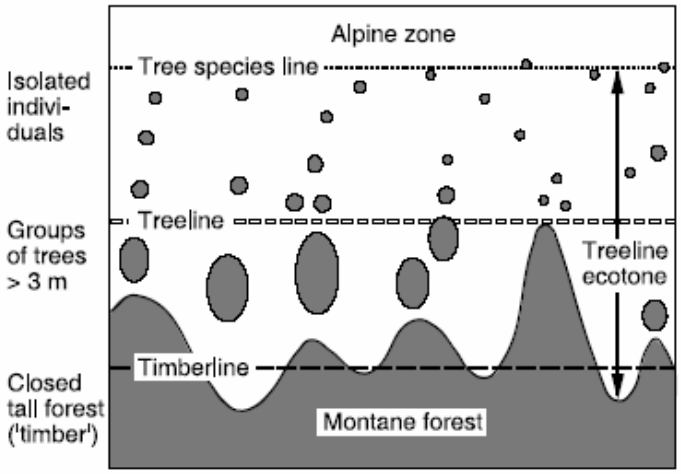
2.1 Termín alpinská hranice lesa

Alpinská hranice lesa je často chápána jako ekoton mezi subalpinským a alpinským stupněm (Hiller & Müterthies, 2005). Körner (1998) se termínu „subalpinský“ vyhýbá a alpinskou hranici lesa chápe jako přechodnou zónu – ekoklinu – mezi horní hranicí uzavřeného horského lesa a horní linií výskytu stromových druhů. Konvenčně je však horní hranice lesa vymezována jako linie (Körner, 2003). Vymezením pojmu se zabývalo mnoho autorů, kteří se shodují v kriteriích vymezení, nikoliv však v parametrech. Dle Plesníka (1971) je základní vlastností lesa jeho výška, zápoj a plocha. Autor uvádí pro oblast Malé Fatry les při zápoji 0,5 m s minimální výškou stromu 8 m a plochou 10 arů. Jeník & Lokvenc (1962) definují les jako porost o minimální výšce 5 m, s minimálním zápojem 0,5 m a minimální plochou 1 ar. Körner (2003) definuje strom jako vzpřímenou dřevinu s jediným nadzemním kmenem, který dosahuje výšky minimálně 3 m.

K definování hranice nebo linie lesa se používá následujících termínů: Timberline je termínem používaným pro horní linii souvisle zapojeného lesa (často je však těžko definovatelná, zápoj lesa většinou nekončí náhle, ale většinou dochází k poklesu výšky stromů a ke zmenšování zápoje) (Körner, 2003). Heikkinen et al. (1995) a Holtmeier (2009) termínem timberline označují přechodnou zónu mezi lesem a bezlesím. Alpine Tree line (také alpine forest line) zaujímá střední pozici a spojuje výběžky lesa a ostrůvky stromů uvnitř daného svahu nebo série svahů stejné expozice (Körner, 2003). Tuhkanen (1993) používá termín treeline v obecném smyslu jako ekoton mezi lesem a bezlesím, Jobbágy & Jackson (2000) používají termín forest line pro horní limit zapojeného lesa. Tree species line (outpost treeline) je horní linií výskytu stromových druhů, jde o nejzazší místo výskytu jedinců v takzvané „kampfzone“ (pás boje – pás sahající od hranice zapojeného lesa k stromovým zákrskům) (Körner, 2003).

Holtmeier (2009) rozlišuje 4 různé typy AHL v závislosti na šířce ekotonu: 1. ostrý přechod mezi lesem a alpinskou vegetací, 2. hranici lesa s přechodovou zónou (ekoton), 3. hranici lesa přecházející v „krummholz formy“ (zákrsky, klečový vzrůst dřevin), 4. postupný přechod ze souvisle zapojeného lesa přes porosty dřevin klečového vzrůstu k alpinské vegetaci.

Obr. 1: Schéma ekotonu AHL,
Zdroj: Körner, Paulsen (2004)



Mnoho autorů používá termín horní hranice lesa (např. Plesník, 1971, Holtmeier, 2009), jiní používají termín alpinská hranice lesa (Jeník & Lokvenc, 1962, Heikkinen et al., 1995, Körner 1998, 2003). V souladu s tradicí předchozích prací zabývajících se Krkonošemi (Jeník & Lokvenc, 1962, Treml, 2007, Janda, 2008, Jungrová, 2008) v práci používám termín alpinská hranice lesa.

2.2 Vznik alpinské hranice lesa

Pozice alpinské hranice lesa může být vnímána jako výsledek vztahů mezi biotickými a abiotickými faktory, v rámci kterých se s rostoucí nadmořskou výškou stává klima pro růst stromů stále méně výhodné a omezuje tak jejich růst (Jobbágy & Jackson, 2000).

Körner (1998, 2003) rozlišuje pět, částečně provázaných, skupin mechanismů, které se podílí na přechodu ze souvisle zapojeného lesa do alpinské zóny: 1. Hypotéza stresu: opakované poškození mrazem a mrazové vysychání, 2. Hypotéza disturbancí: mechanické poškození větrem, ledem, sněhem a lavinami, poškození herbivory či houbovými patogeny, 3. Hypotéza reprodukce: snížená schopnost produkce pylu, dozrávání a klíčení semen a etablování semenáčků ve vyšších nadmořských výškách, 4. Hypotéza záporné uhlíkové bilance: není zachována rovnováha mezi příjmem a výdejem uhlíku, 5. Hypotéza růstového limitu: nedostatečný přísun cukrů a aminokyselin požadovaných pro růst a obnovu pletiv.

Stres, způsobený mrazovým vysycháním (Tranquillini, 1979), ztrácí na důležitosti mimo temperátní oblasti. Hypotéza uhlíkové bilance taktéž není rozhodující pro růst stromů, protože neexistuje žádný důkaz o tom, že by docházelo ke zvýšeným respiračním ztrátám, množství asimilátů vytvořených fotosyntézou je dostatečné (Hoch et al., 2002). Jako nejpravděpodobnější teorii vzniku fenoménu alpinské hranice lesa uvádí Körner (2007) zastavení růstu stromů (nedostatečné zabudování asimilátů do pletiv) v důsledku nízkých teplot, t.j. jinými slovy hypotézu růstového limitu.

Sveinbjörnsson (2000) uvádí jako hlavní příčinu vzniku alpinské hranice lesa klimatické podmínky a další nepřímo působící faktory jako je kompetice stromů s keřovou vegetací a travními společenstvy, požáry, vlivy sněhu a lavin, poškození biotickými faktory. Jako významný determinant AHL považuje nedostatek živin. Mezi hlavní živiny limitující růst zahrnuje dusík a cukry. Dostupnost živin, zejména dusíku, je omezena nízkými teplotami půdy, které omezují míru mineralizace a fixaci dusíku.

Struktura a poloha AHL je dle Holtmeiera (2009) výsledkem složitého působení mnoha faktorů. Mezi nejvýznamnější faktory zahrnuje vlivy klimatu v minulosti i současnosti, disturbance způsobené ohněm, biotickými faktory (hmyzí škůdci) a lidskou činností, historií růstu stromů na stanovišti a jeho ekologickými podmínkami.

2.2.1 Faktory ovlivňující vznik alpinské hranice lesa

AHL je primárně ovlivněna klimatem, místně však mohou mít velký vliv i ostatní faktory: topografie, edafické a biotické podmínky, katastrofické události, lidská činnost.

Mikrotopografie ovlivňuje mikroklimatické podmínky stejně jako rozšíření rostlinných druhů a půd**.** Má vliv na výšku sněhové pokrývky, ovlivňuje její trvání a tání, kterým je dále ovlivněna teplota a vlhkost půdy (Hiller & Müterthies, 2005).

Edafické charakteristiky také ovlivňují pozici horní hranice lesa. Plesník (1971) uvádí, že půdy v alpinské oblasti jsou obecně mělké, hrubozrnné, s nízkou schopností jímat vodu a s nedostatkem živin. Stromy se špatně etablují na srázných nebo skalnatých svazích, na kamenných mořích a sutích, kde se nevytváří půdní substrát (Heikkinen et al., 1995).

Rychlost větru je v oblasti hranice lesa obecně vyšší než v níže položených oblastech. Jeho rychlost a směr je však ovlivněn topografií. Stromy vystavené vysokým rychlostem vzdušného proudění jsou náchylné k abrazi krystalů sněhu a ledu, k vykořenění nebo zlomení. (Heikkinen et al., 1995). Vlivem silného větru během vegetačního období může dojít ke ztrátě jehlic, což snižuje množství fotosynteticky aktivních pletiv (Holtmeier, 2009). Vítr hraje významnou roli v tvarování korun stromů. Stromy se větru přizpůsobují vlajkovou podobou na závětrné straně nebo deformací do klečových forem (Sveinbjörnsson, 2000). Vzdušné proudění ovlivňuje i stanovištní podmínky – teplotu půdy a vzduchu, půdní vlhkost, výšku a trvání sněhové pokrývky (Isard,1986).

Sněhová pokrývka je determinována mikrotopografií, rostlinným krytem, směrem a rychlostí větru. K akumulaci sněhu dochází na severní polokouli zejména na severních a závětrných svazích, v konkávních tvarech reliéfu (Holtmeier, 2009, Jeník, 1961), kde se

sníh může udržet i v ekotonu hranice lesa až do časných letních dní. Tání sněhu závisí na orientaci svahů vůči slunečnímu záření, na jižních svazích by tedy mělo dojít k odtání sněhu dříve než na svazích severních. Holtmeier (2009) uvádí, že například jižní svahy Karakoramu, vystavené vysoké radiaci, mají vrcholy bez sněhu již během ledna, zatímco ve stejné nadmořské výšce na severním svahu se sníh udržuje až do května. Tání však může být podmíněno i vlivem vzdušného prodění, které může způsobit rychlejší odtání na severních, návětrných svazích (Holtmeier, 2009). Sněhová pokrývka působí v ekotonu AHL jak pozitivně, tak negativně. Působí jako ochrana před mrazem (ochrana semenáčků díky dostatečné výšce sněhu), mrazovým vysycháním, abrazí ledových krystalků, okusem a zvyšuje půdní vlhkost (Körner, 2003). Na druhou stranu však zkracuje vegetační období, zpožďuje zvyšování půdních teplot, čímž zpožďuje klíčivost, růst a příjem živin (Holtmeier, 2009). Dále způsobuje mechanické poškození stromů lámáním, plazivým sněhem a vznikem lavin (Körner, 2003).

Tranquillini (1979) udává jako klíčový faktor determinující ekoton AHL **zimní vysychání**. Během zimy mají dřeviny vytvořenou vysokou mrazovou odolnost, která zpravidla přetrvává až do dubna (Tranquillini, 1979). V tomto období je tudíž poškození mrazem minimální. K poškození mrazem dochází v mírných šířkách až v závěru zimy, kdy na dřeviny působí teplotní zvraty. V tomto období dochází k poškození jehličí a větví (obroušená kutikula) ztrátou vody, která není díky zmrzlé půdě a stonkům nahrazena, a dřeviny usychají (Tranquillini, 1979). V tropických oblastech horní hranice lesa se mrazové poškození může teoreticky vyskytovat během jasných nocí kdykoliv během roku, ale je velmi nepravděpodobné, že by zde hrálo rozhodující roli (Körner, 2003).

Kompetice je další faktor ovlivňující pozici hranice lesa. Např. smrk ztepilý kompetuje v pásu boje v některých oblastech s borovicí klečí (Walter et al., 2005). Ta sice chrání semenáčky smrku před okusem býložravců, na druhou stranu však stromům konkuruje z hlediska světelných podmínek (zastínění semenáčků) a získávání živin (Dullinger, 2005).

Biologičtí činitelé, jako jsou rostlinné choroby a hmyzí škůdci, jsou dalšími stresory, které přispívají ke snížení hranice lesa (Tuhkanen, 1993), zvláště pokud je vitalita jedinců negativně ovlivněna například emisemi (Heikkinen et al., 1995).

Katastrofické události, mezi které patří lesní požáry, laviny, mury a vulkanické erupce také mohou ovlivnit hranici lesa, ta ale může být schopna se po odeznění těchto událostí vrátit zpět (Tuhkanen, 1993). Mury a laviny rozrušují svými mechanickými účinky lesní porosty v ekotonu hranice lesa i pod ním a také ovlivňují edafické a klimatické poměry (Plesník, 1971).

Již několik tisíciletí jsou patrné **antropogenní vlivy** (Burga, 1988)**.** Horní hranici lesa snižuje pravidelná seč a pastva, odlesňování (dřevo na otop, dřevěné uhlí, stavební účely, prostor pro pastviny). Během posledních desetiletí se výrazně projevuje chemické znečištění ovzduší, půdy a vody (Heikkinen et al., 1995).

2.3 Teplotní indikátory alpinské hranice lesa

Klíčovým, obecně platným, faktorem zapříčiňujícím vznik hranice lesa jsou teplotní podmínky (Körner, 2003). Ty jsou proto dlouhodobě používány jako indikátory polohy hranice lesa.

Během 19. a na počátku 20. století byl vznik alpinské hranice lesa opětovně uváděn ve spojení s průměrnou teplotou vzduchu nejteplejšího měsíce 10ºC (Brockmann-Jerosch, 1919 cit. in Körner, 2003). Tato charakteristika však není globálně platná: platí jen pro část Alp a Rocky Mountains, a selhává v ostatních horských regionech – v tropických oblastech nebo na ostrovech bývají hodnoty nižší (6ºC), v kontinentálních a severních oblastech naopak vyšší (11ºC) (Körner, 2007).

V současnosti se nejlepším teplotním indikátorem AHL zdá být průměrná teplota vzduchu během vegetačního období kolísající mezi 5,5º a 7,5ºC (Körner, 2003, Körner & Paulsen, 2004, Gehrig-Fasel et al., 2008). Körner (1998, 2003) uvádí, že tyto hodnoty jsou téměř nezávislé na délce vegetačního období, které se pohybuje v závislosti na zeměpisné šířce mezi 2,5 a 12 měsíci.

Holtmeier (2009) jako další vhodný indikátor navrhuje průměr teplot 3 nebo 4 nejteplejších měsíců. Jobbágy & Jackson (2000) pro vysvětlení AHL používají průměrnou roční teplotu vzduchu (průměrná teplota 12 měsíců) a sezónní teplotní amplitudu vzduchu (rozdíl mezi průměrnou hodnotou nejteplejšího a nejchladnějšího měsíce).

Körner & Paulsen (2004) navrhují jako další významný indikátor AHL teplotní sumy: počet dní s minimální teplotou 0°C nebo 5°C. Gehrig-Fasel et al. (2008) hodnotí tyto indikátory jako méně ideální z důvodu závislosti aktuálních teplot na délce vegetačního období. Dle Körnera & Paulsena (2004) existuje korelace mezi sumou teplot >0°C a pozicí AHL v případě použití tohoto indikátoru v rámci jednoho geografického regionu (např. Alpy), v rámci celosvětového srovnání nebyl mezi tímto ukazatelem a AHL nalezen žádný vztah. Podle Holtmeiera (2009) je vhodnějším indikátorem suma teplot s minimem 5°C, Körner & Paulsen (2004) však zjistili velký rozdíl mezi získanými hodnotami v rámci jednoho geografického regionu (např. Mexiko). Janda (2006) hodnotí průměrnou teplotu měsíců

s teplotním průměrem nad 5°C jako nejvhodnější teplotní veličinu ve spojení s klimatickou alpinskou hranicí lesa.

Körner & Paulsen (2004) uvádějí, že růst stromů je omezen nejen teplotou vzduchu, ale i teplotou půdy (měřena 10 cm pod povrchem). Vycházejí z předpokladu, že k tvorbě pletiv dochází i v kořenové zóně. Na základě jejich měření vykonávaného v mnoha světových pohořích vyplývá, že průměrné teploty půdy během vegetačního období vykazují nejmenší rozdíly, a kolísají mezi 6,4° a 7,8°C. Předkládají tedy jako nejvhodnější indikátor AHL sezónní teplotní průměr půdy kolísající kolem 6,7°C±0,8 SD. Tento předpoklad potvrzuje i Körner (2007).

2.4 Alpinská hranice lesa a expoziční efekt

Expozice reliéfu vůči vzdušnému proudění a slunečnímu záření je důležitým faktorem ovlivňující výškovou polohu AHL. Ovlivňuje teplotní podmínky, vlhkost (srážky, délka trvání sněhové pokrývky a její mocnost, přemisťování sněhu, evaporaci, atd.) a následné rozložení vegetace (Wieser, 2007). Sluneční záření (jehož zásadní složkou je přímé záření) je hnací silou pro fotosyntézu, a ovlivňuje vodní bilanci vegetace (Pierce et al., 2005).

Intenzita slunečního záření exponenciálně roste s nadmořskou výškou v důsledku vyšší koncentrace aerosolů v dolní části troposféry. V důsledku toho se s rostoucí nadmořskou výškou zvyšuje rozdíl mezi polohou AHL na osluněném a zastíněném svahu (Holtmeier, 2009). Stejný autor uvádí, že rozdíl v poloze AHL na osluněném a zastíněném svahu se pohybuje v Alpách kolem 100 m, v Norsku až 150 m. Uvádí dále, že největších rozdílů je dosaženo v subtropických pohořích. V humidních tropech se expoziční efekt vůbec neuplatňuje (Paulsen & Körner, 2001). Dle Körnera (2003) se expoziční efekt stává mimořádně důležitý zejména v obdobích s minimální oblačností.

Pro odhad dopadajícího slunečního záření je v mnoha studiích používána svažitost a orientace svahu. Dle Pierce et al. (2005) však tyto faktory mají omezenou schopnost zachytit plný rozsah topografické variability daného území. Uvádí, že rozdíl příjmu slunečního záření mezi dvěma svahy se stejným sklonem a orientací vzniká na základě existence topografických rozdílů. Podle těchto autorů se množství dopadající radiace mění v čase. Uvádí, že východní svahy mají vyšší radiační zátěž v ranních hodinách a sníženou v pozdních odpoledních hodinách. K ročním změnám dopadajícího slunečního záření dochází v souladu s měnícím se úhlem sklonu dopadajícího záření.

Isard (1986) uvádí, že bezlesé svahy východní a jižní orientace v Coloradu v USA, mají o 14 a 18 % vyšší radiaci než svahy se severní expozicí. Rozdíl mezi slunečním zářením dopadajícím na západně orientované svahy v porovnání s jižně orientovanými je zanedbatelný.

McCune & Keon (2002) předpokládají, že zatímco dopad potenciálního přímého záření je v ose sever–jih symetrický, rozložení teplot takto symetrické není. Uvádí, že svah, na který dopadá odpolední sluneční záření, má vyšší maximální teploty než ekvivalentní svah, který je ozářen v ranních hodinách. Dle zmíněných autorů jsou na severní polokouli nejteplejší jihozápadní svahy, zatímco nejnižších hodnot teplot je dosaženo na svazích severovýchodních. Na jižní polokouli jsou pak nejteplejší svahy SZ, zatímco jihovýchodní svahy jsou chladnější.

V některých vysokohorských pohořích jsou vlivy expozice částečně překryty jinými faktory. Rozdíly mohou být způsobeny návětrností svahu, půdní vlhkostí, živinami (J svahy mohou být ochuzené v důsledku vhodnějších podmínek pro hospodářské využívání) nebo rozdílným hospodářským využíváním (Paulsen & Körner, 2001).

Například Körner (2003) uvádí, že expoziční efekt může být eliminován denním chodem oblačnosti. Uvádí, že severně orientované svahy mohou být mírně teplejší než jižně orientované svahy díky tomu, že rána a dopoledne jsou v horském prostředí jasná (větší množství radiace), zatímco v odpoledních hodinách se zvětšuje oblačnost.

McCutchan & Fox (1986) se zabývali vlivem nadmořské výšky a orientace svahu na rychlost a směr větru, teplotní poměry a vlhkost v oblasti San Antonio Mountain v USA. Předpokládali, že různá orientace způsobuje rozdílné zahřívání a ochlazování horských svahů díky dopadajícímu slunečnímu záření. Na základě svého výzkumu došli k závěru, že teplota v okolí izolovaných horských vrcholů je bez výjimky ovlivněna nadmořskou výškou. Orientace svahu významně ovlivňuje teplotu během července a srpna, během září a října je vliv expozice potlačen z důvodu výskytu silného větru.

Výše zmíněné práce vznikly z teplotních měření na nezastíněných stanovištích. Příjem radiace a následně i teplotní údaje se však mezi lokalitami se zápojem a v oblasti bezlesí liší. Množství dopadajícího slunečního záření je v oblasti pod stromovým zápojem nižší (Porté et al., 2004).

Boltstad et al. (1998) srovnávali teploty v Coweeta Basin v Apalačském pohoří v USA, v zapojeném lese. Průměrné maximální teploty, měřené ve stejné nadmořské výšce a v podobném typu reliéfu, vykazují na jižním svahu až o 1,4ºC vyšší hodnoty než na severozápadním svahu. Tento expozičně ovlivněný vzrůst teplot je shodný během celého

roku. Ve stejných místech byl naopak pozorován jen malý vliv expozice u průměrných denních a průměrných minimálních teplot. Na základě teplotních hodnot a zeměpisné šířky odvodili, že vzrůst průměrných minimálních teplot o 0,5ºC souvisí s posunem 10º k jižní expozici. Uvádějí, že tento posun by měl být shodný ve všech východoamerických a evropských oblastech.

Vztahem mezi minimálními a maximálními hodnotami teploty vzduchu a expozičním efektem se zabývali také Lookingbill & Urban (2002). Tito autoři shodně s tvrzením Boltstada et al. (1998) zjistili, že denní maximální teploty jsou významně ovlivněny topografickou expozicí, zatímco denní minimální teploty ovlivňuje spíše poloha na svahu.

Rossi et al. (2007) studovali alpinskou hranici lesa v oblasti Cinquae Torri ve východních italských Alpách. Srovnávali růst stromů na jižním a severním svahu pomocí údajů teplot půdy (v 15 cm hloubce), vzduchu a teploty kmene. Během sledovaného období 2002-2004 byly průměrné denní teploty vzduchu velmi podobné na S i J svahu, s rozdíly do 0,2ºC. Hlavní rozdíly mezi opačně orientovanými svahy zaznamenali v ročním a sezónním (duben – září) průměru u teplot půdy (rozdíl až 2ºC). Pozorovali, že během května dochází k tání sněhu a ohřívání půdy nejdříve na jižních svazích, zatímco severní svahy mají 10-15 denní zpoždění.

Dle Paulsena & Körnera (2001), dosahuje AHL ve Švýcarských Alpách stejné maximální výšky ve všech orientacích svahu. Jižní a západní svahy jsou sice více zalesněny než severní a východní, kde je les více fragmentován lavinovými drahami a dlouhotrvající sněhovou pokrývkou. Nevýhoda „chladných“ svahů může být také důsledkem pomalejší sukcese, která zvyšuje pravděpodobnost, že les je na severních svazích klasifikován jako kleč. Paulsen & Körner (2001) uvádějí, že expoziční efekt je zanedbatelný v případě, že les je už na daném svahu etablován. Expozice hraje silnou roli při přežívání semenáčků, a v počátečním stádiu růstu stromů, ale postupně, se vzrůstající velikostí stromů, mizí. Z tohoto důvodu se na jižních svazích vyskytuje ve vyšších polohách větší počet semenáčků, které zdánlivě neovlivňují pozici AHL (Paulsen & Körner, 2001).

Körner & Paulsen (2004) při výzkumu závislosti půdních teplot na orientaci svahu vůči slunečnímu záření zjistili, že v jimi sledovaných oblastech (V a Z Alpy, Mexiko) je rozdíl mezi naměřenými teplotami půdy způsoben zejména stanovištními specifikami, jako jsou mikrotopografie, mocnost humusové vrstvy, zápoj stromového patra a větrné poměry. Udávají celkovou variabilitu mezi sledovanými stanovišti <0,5K. Stejně tak ani měřené teploty vzduchu nevykazují žádnou závislost na orientaci svahu. Předpokládají, že závislost svahů na radiaci je omezena pouze na otevřené lokality nebo na místa s nízkou vegetací.

Ashcroft et al. (2008) uvádí, že v oblasti Woronora Plateau, jižně od Sydney v Austrálii, v oblasti deštného a eukalyptového lesa a v bažinatém území, je prostorová distribuce teplot, která dále vysvětluje distribuci vegetace, nejvíce determinována nadmořskou výškou a převládajícím vzdušným prouděním. Orientace svahu a radiace má pro rozložení vegetace menší, ale také významný, vliv. Expozice zde hraje největší roli během období výskytu extrémních teplotních hodnot, tj. během letních maxim a zimních minim. Stejně jako Paulsen & Körner (2001) uvádí, že expozice více ovlivňuje teploty půdy než teploty vzduchu.

2.5 Alpinská hranice lesa v Krkonoších

Krkonoše představují v rámci hercynské střední Evropy pohoří s nejrozsáhlejším alpínským bezlesím (Treml, 2004). Plocha alpínského bezlesí se rozkládá na ploše 5465 ha (Treml & Banaš, 2000), z čehož 3178 ha je ve východních Krkonoších, a 2286 ha se nachází v západních Krkonoších (Treml & Banaš, 2000).

Alpinské bezlesí je v Krkonoších z větší části přirozeného původu, Jeník (1961), Jeník & Lokvenc (1962) přisuzují velký význam na jeho formování působení anemo-orografických systémů, Treml & Banaš (2000) považují za rozhodující důkazy přirozenosti tohoto bezlesí výskyt zachovalých periglaciálních mikrotvarů a specifická, na bezlesí vázaná, rostlinná společenstva.

Průměrná výška AHL je 1229 m, maximální výška je dosažena ve východních Krkonoších na JZ svahu Sněžky (1367 m n.m.), v západních Krkonoších na JZ svahu Dívčích Kamenů (1360 m n.m.) (Treml, 2004). Své minimální výšky dosahuje AHL v Labském dole – 960 m n.m. (Treml & Banaš, 2000).

Z celkové délky 124 km, je 74 km ve východních Krkonoších a 50 km v západních Krkonoších, 92,5 km délky alpinské hranice lesa se vyskytuje v české části pohoří (Treml & Banaš, 2000).

Pro srovnání, Jeník & Lokvenc (1962) udávají průměrnou výšku hranice lesa v Krkonoších 1220 m, s výškovým maximem 1350 m na Růžové hoře a výškovým minimem 895 m v Labském dole. Celkovou délku uvádí 112,5 km.

Podle druhu budujících dřevin a struktury vegetace lze rozeznat v Krkonoších tyto čtyři hlavní synmorfologické typy hranice lesa (dle Jeníka, 1961): (1) Parkovitá hranice lesa se smrkem. Jedná se o velmi pozvolný rozpad zapojeného lesa, který je vytvořen ve východní části A-O systémů i na všech izolovaných vrcholových hřebenech přesahujících výšku cca

1250 m. Jednotlivé smrky velmi často vstupují do bylinných společenstev. (2) Parkovitá vegetace se smrkem a kosodřevinou. Jde o charakteristický typ hranice lesa v Krkonoších, a také o pravý „alpský“ typ hranice lesa, zastoupený v nejširším rozsahu v evropských velehorách. Do uvolněného zápoje konkurenčně oslabeného smrku proniká kosodřevina (*Pinus mugo*). Mozaika smrkových skupin a porostů kosodřeviny („pásmo boje“) je roztažena často do širšího pruhu. Příkladem této hranice je J a JV svah Sněžky, dále Modrý důl, svah Studniční a Luční hory, V svah Stříbrné bystřiny, a vyšší vrchol slezského hřebene (Violík, Vysoké Kolo, M. Šišák). (3) Sevřená hranice lesa se smrkem. V závětrných turbulentních prostorech lze často pozorovat náhlé ohraničení smrkového porostu, vyvolané především periodickými zásahy sněhových lavin a plazivého sněhu. Někdy je přechod k alpinským fytocenózám zprostředkován ještě křovitými listnatými dřevinami – břízou pýřitou a bělokorou (*Betula pendula a B.pubescens*), bukem lesním (*Fagus sylvatica*), javorem klenem (*Acer pseudoplatanus*), vrbami. Častěji je však hranice zcela ostrá a připomíná téměř okraj umělých enkláv ve smrkových porostech. Tento typ hranice lesa se vyskytuje na dně Labské a Úpské jámy. (4) Sevřená hranice lesa s bukem. Tento typ hranice lesa se zachoval v některých krkonošských jámách (Kotelní jámy). Vlivem mimořádného poklesu hranice lesa, způsobeným lavinami, a současně příznivým působením klimatu závětrného turbulentního prostoru, se buk udržuje pomístně až na pomezí alpinské oblasti. Je pravděpodobné, že před zásahem člověka byl tento typ hranice v krkonošských jámách rozšířenější.

Pro rekonstrukci pozice AHL v Krkonoších v průběhu holocénu má zásadní význam pylový záznam z Labského dolu (990 m n.m.) (Treml et al., 2008). Z tohoto záznamu vyplývá, že hranice lesa postupně stoupala z přibližně 500-600 m n.m. na konci Mladšího Dryasu až na výšku přibližně 1000 m n.m., kde je doložena mezi 9200 a 8800 BP. Po 7400 BP dosáhla AHL svého maxima, nacházela se minimálně v oblasti Pančavského rašeliniště (1320 m n.m.). Maximální poloha hranice lesa v dalším období byla pravděpodobně níže než 1450 m n.m. V období 4000-800 BP byla hranice lesa situována pravděpodobně pod úrovní Úpského rašeliniště (1420 m n.m.) (Treml et al., 2008).

Současná pozice AHL se nachází ve výšce 1350-1390 m n.m., maximální rozdíl její současné a historické pozice je tudíž menší než 100 m, průměrné polohy byly překročeny o méně než 150 m. Tento rozdíl koresponduje s teplotními rekonstrukcemi, které během holocénu předpokládají maximální zvýšení teplot o 1° - 2°C (Treml et al., 2008).

3. Fyzickogeografická charakteristika studovaného území

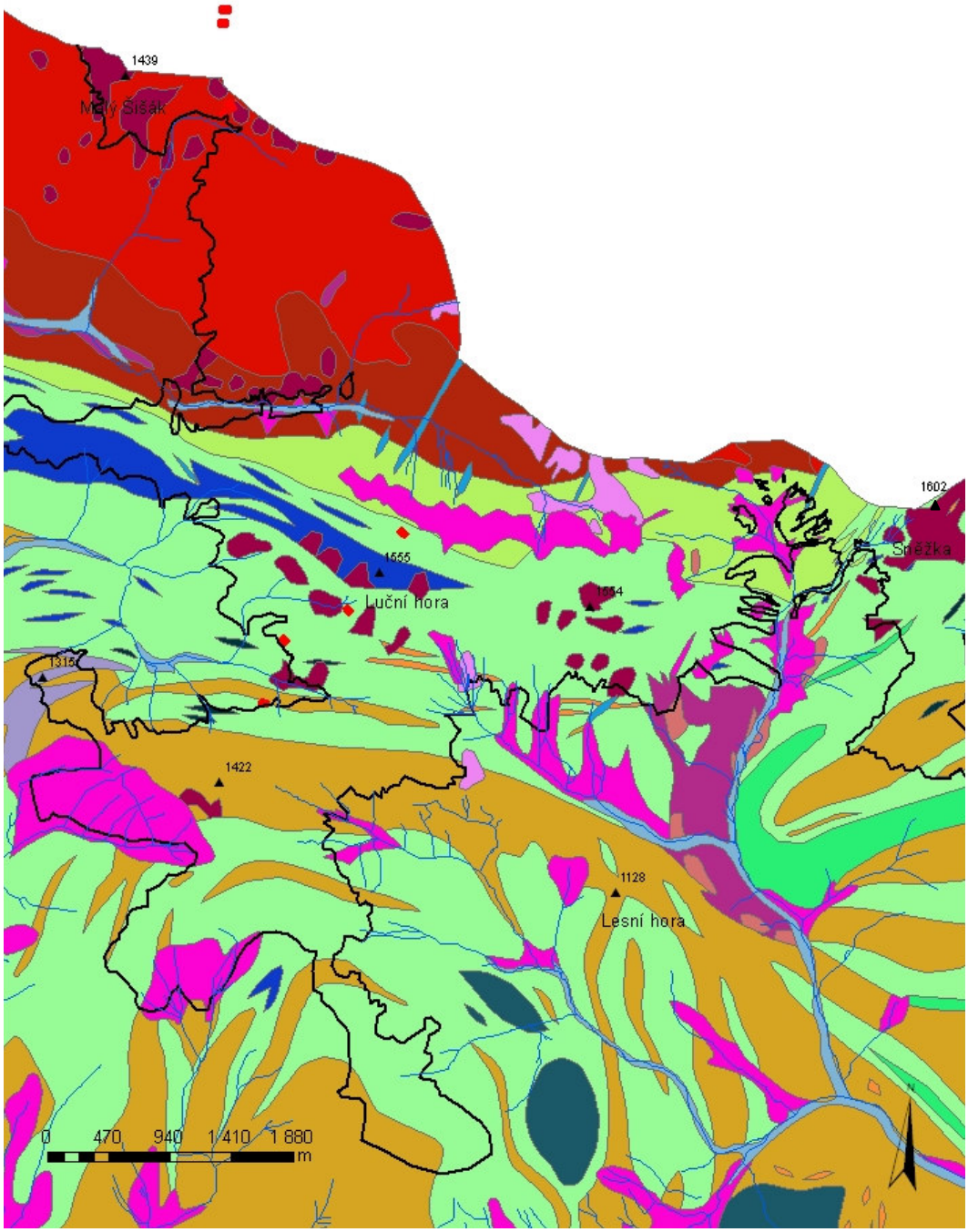
3.1 Geologické a geomorfologické poměry

Krkonoše náleží do geologické jednotky krkonošsko-jizerského krystalinika. Krystalické břidlice jsou nejstaršími horninami Krkonoš, jsou proterozoického a paleozoického stáří. Uprostřed krystalických břidlic se rozkládá žulový masiv – krkonošsko-jizerský pluton tvořící hlavně vrcholové části Krkonoš (Chaloupský, 1983). Nejrozšířenějšími krystalickými břidlicemi jsou svory s vložkami křemence (kvarcitu). Časté jsou ortoruly. Mezi nejrozšířenější paleozoické horniny patří grafitické, chloriticko-sericitické fylity a kvarcity (Chaloupský, 1983).

Dle regionálně-geomorfologického členění (Balatka & Kalvoda, 2006) náleží Krkonoše v rámci Evropy do Hercynského systému, České vysočiny, Krkonošsko-jesenické subprovincie a Krkonošské oblasti. Dále do celku Krkonoše, do podcelku Krkonošské hřbety a Krkonošské rozsochy (Balatka & Kalvoda, 2006). Česká část Krkonoš je z orograficko-morfometrického hlediska členitou hornatinou o střední výšce 901 m a středním sklonem 13º 23' (Pilous, 2007).

V paleozoiku vyvrásněný masiv podléhal během mezozoika a na počátku terciéru procesům denudace, v terciéru a i během kvartéru pak docházelo v důsledku alpinského vrásnění k výzdvihu podél zlomových systémů, a to zejména v období saxonské tektoniky (Migoň, Pilous, 2007). Díky výzdvihu se pak vytvořila dnešní údolní síť (Král et al., 1983). Na modelaci reliéfu Krkonoš se konečně výrazně projevil kvartér. Během tohoto období byl dotvořen dnešní reliéf (Král et al., 1983). Na přeměnách reliéfu se významně podílely zejména fluviální, svahové, glaciální a periglaciální procesy (Král et al., 1983). Pohoří bylo několikrát zaledněno, morfologicky nejvýraznější glaciální akumulační tvary pocházejí z poslední fáze zalednění (Engel, 2007). Nejvyšší části pohoří byly modelovány periglaciálními procesy. V Krkonoších se ve vyšších polohách nachází strukturní půdy, soliflukční tvary, putující bloky, nivační deprese a valy, kamenná moře, kryoplanační terasy, mrazové srázy a sruby (Křížek et al., 2007).

Obr. 2: Geologická mapa východních Krkonoš, Zdroj dat: ČGS



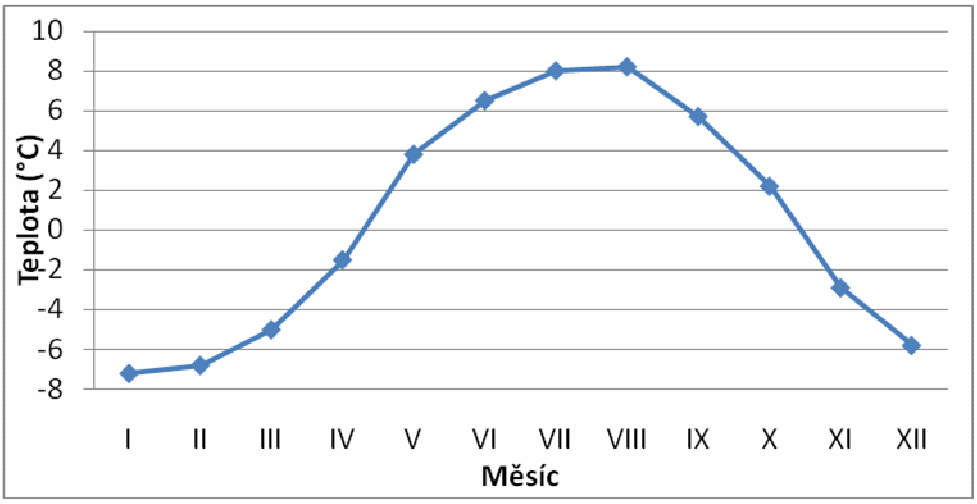
# kóty	kvarcit
vodní toky	rašeliny
ahl	fluviální sedimenty inundačních území (silty, písky, štěrky)
zájmové plochy	fluviální štěrky a písky (terasy spodní úrovně)
šedé muskovitické albitické svory až fylity	erlany
drobnozrná biotitická žula až aplitická žula	glacigenní sedimenty, relikty morén
deluviální balvanité a blokové sedimenty, kongelifrakční kamenitá až bloková e	glacigenní až nivační sedimenty, morfologicky výrazné morény
střední zrnitá biotitická žula	grafit-sericitické fylity
výrazní porfýrická, střední zrnitá žula až granitoid	metalydity
deluviální až fluviodeluviální sedimenty polygenetického charakteru (písčité h	amfibolity
zelenošedé chlorit-muskovitické albitické svory až fylity	deluviofluviální sedimenty výplavových kuželů (písčité štěrky)
migmatitické ruly (laminovaná okatá rula)	žulový porfýr
(biotit)-muskovitické ruly	krystalické vápence až dolomity
andezitoidy (melafýry)	šedé, zelenošedé prachovce, jílovce, pískovce, vrstvy bitumenních pelit
sericitický kvarcit	

3.2 Klimatické poměry

Dle Quitta (1971) náleží nejvyšší partie do nejchladnější klimatické oblasti CH4. Pro ni je typické velmi krátké, chladné a vlhké léto, přechodná období velmi dlouhá a chladná, zima velmi dlouhá, velmi chladná, vlhká, s velmi dlouhým trváním sněhové pokrývky.

Průměrná roční teplota vzduchu oblasti se pohybuje v rozmezí 0,5° - 5°C, průměrná sezónní teplota vzduchu kolísá v zimě mezi -5 a -3°C, v létě se pohybuje kolem 10°C (Tolasz et al., 2007). Nejchladnějším měsícem je leden s průměrnými měsíčními teplotami mezi -6° až -4°C, nejteplejším měsícem je červenec s 12°C (Tolasz et al., 2007).

Obr. 3: Průměrné měsíční teploty Sněžky za období 1961-1990; Zdroj dat: Głowicki, 1997



Roční rozložení srážek má typický horský průběh s nejvyššími úhrny v prosinci, minimální množství srážek se vyskytuje v dubnu (Tolasz et al., 2007). Průměrný roční úhrn srážek se dle Tolasze et al. (2007) pohybuje kolem 1200 mm. Hunčarová & Parzóch (2007) a Hladný & Sýkora (1983) uvádějí průměrný roční úhrn srážek spadlých v nejvyšších oblastech kolem 1500 – 1600 mm. Průměrný roční počet srážkových dní s úhrnem větším než 5 mm je 70 (Tolasz et al., 2007). Další vybrané klimatické charakteristiky a jejich průměrné hodnoty jsou uvedeny v Tab. 1.

Tab. 1: Vybrané klimatické charakteristiky (průměrné hodnoty); Zdroj: Tolasz et al., 2007, Metelka et al., 2007

roční pokrytí oblohy oblačností	65–70 %.
počet jasných dní	50–55
počet zatažených dní	160
roční úhrn globálního záření	3500 -3600 MJ.m^2
celkový počet hodin slunečního svitu	1400-1500 hodin/rok
délka slunečního svitu v zimních měsících	40–45 hodin/měsíc
délka slunečního svitu v letních měsících	160–190 hodin/měsíc

Délka období se sněhovou pokrývkou je rozdílná v závislosti na lokálních podmínkách, v průměru se pohybuje kolem 160-180 dnů. Maximální výška sněhové pokrývky je na hřebenech dosažena počátkem jara, v březnu, kdy dosahuje 160–180 cm (Metelka et al., 2007).

Krkonoše jsou jedinou oblastí ČR s rozsáhlou lavinovou aktivitou. V české části Krkonoš se nachází 37 lavinově aktivních svahů, které se koncentrují do vrcholové části pohoří (Spusta et al., 2006).

Mezi nejvýznamnější mezo a mikroklimatologické podmínky patří orientace svahů vůči převládajícímu větrnému proudění a oslunění. Expozice svahů hraje významnou roli zejména v letní polovině roku, kdy mohou na jižních svazích vznikat velmi dobré podmínky pro tvorbu uspořádaných konvekčních pohybů. Za těchto podmínek a při situacích s nižší vertikální stabilitou vzduchu vznikají často teplotně podmíněné přeháňky nebo bouřky (Metelka et al., 2007).

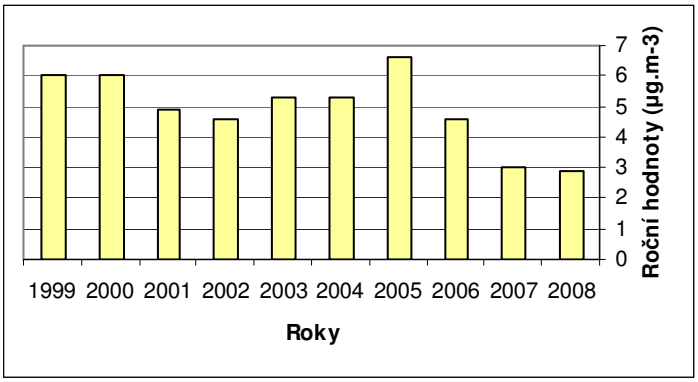
Území výrazně ovlivňuje převládající západní proudění, které v závislosti na tvaru reliéfu (údolí západo-východního směru), tvoří lokální proudění, tzv. anemo-orografický systém (Jeník, 1961). V krkonošské oblasti se jedná o údolí Mumlavy, Bílého Labe a Úpy. Tato údolí jsou označována jako vodící návětrná údolí, která působí na převládající západní proudění jako sběrná koryta a vedou je ve směru své podélné osy k hřebenovým částem a náhorním plošinám. Zde se nachází zrychlující vrcholová část A-O systému s trvalým a usměrněným větrem značné rychlosti. Přes vrcholovou část hřebenů a náhorních plošin směřují mimořádně rychlé lokální vzdušné proudy k hornímu okraji jam a kotlin, kde dávají vznik složitým závětrným turbulentním jevům. Vzniká zde poslední část A-O systému, tzv. turbulentní závětrný prostor (Jeník, 1961).

Důsledkem mechanické turbulence nad závětrnými svahy v krkonošských jamách je zvýšené ukládání eolických sedimentů. V létě se zde usazuje minerální prach a organický detritus, v zimě se hromadí v mohutných závějích sníh. Takto nahromaděný sníh způsobuje

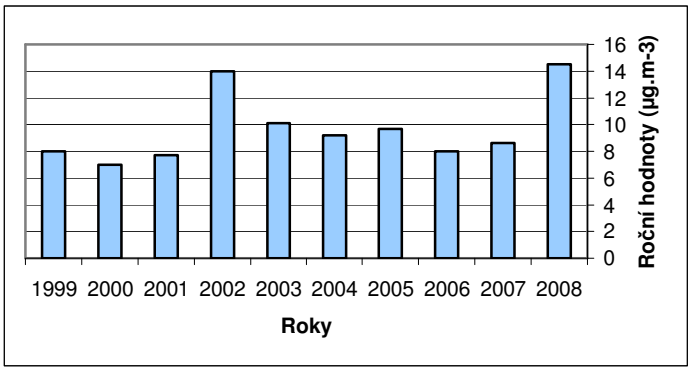
v zimě častou tvorbu sněhových lavin, v létě zde zůstávají vytrvalé sněhové pole. A-O systémy tedy na závětrné straně způsobují hluboký pokles hranice lesa (Jeník, 1961).

Oblast Krkonoš náleží do tzv. Černého trojúhelníka, tedy oblasti, kde během 70. a 80. let 20. století docházelo k poškození a odumírání rozsáhlých lesních ploch ve střední Evropě. Toto poškození a odumírání souvisí s kyselou atmosférickou depozicí a je výsledkem okyselení půd a přímého působení vysokých koncentrací polutantů v ovzduší (Hruška et al., 2005). Nejvýznamnějšími látkami podílejícími se na kyselé depozici je kyselina sírová a dusičná, které vznikají chemickými a fotochemickými reakcemi v atmosféře z oxidu siřičitého a oxidů dusíku. Obr. 4 a Obr. 5 znázorňuje během posledních 10 let roční hodnoty koncentrace SO_2 a NO_x v Krkonoších (stanice Rýchory, roční aritmetický průměr). Během posledních 10 let nebyla ani v jednom roce překročena imisní limitní hodnota pro ochranu ekosystémů (pro SO_2 20 $\mu g.m^{-3}$, pro NO_x 30 $\mu g.m^{-3}$). Koncentrace SO_2 ve sledovaném období postupně klesá. U koncentrací oxidů dusíku dochází k mírnému nárůstu, což pravděpodobně souvisí se stále narůstající automobilovou dopravou. Fotochemickým rozkladem NO_x a uhlovodíků vzniká troposférický ozon. Ozon se v podobě suché depozice také podílí na poškozování lesních porostů. Během minulých 9 let nedošlo jen ve 2 letech (2008, 2001) k překročení imisní limitní hodnoty (18000 $\mu g.m^{-3}.h$).

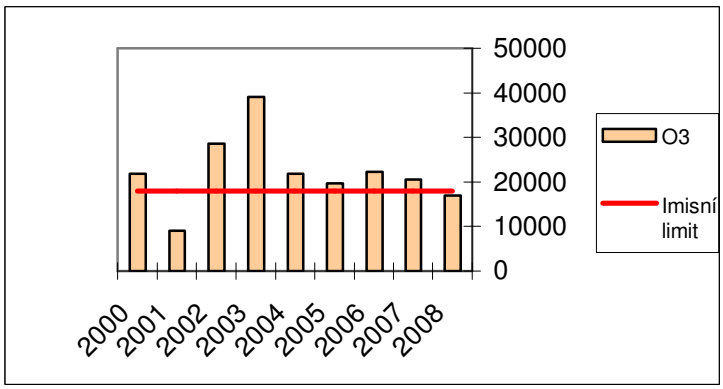
Obr. 4: Roční hodnoty SO2 (µg.m-3), stanice Krkonoše Rýchory, Zdroj dat: ČHMÚ



Obr. 5: Roční hodnoty NOx (µg.m-3), stanice Krkonoše Rýchory, Zdroj dat: ČHMÚ



Obr. 6: Roční hodnoty O3 (µg.m-3.h), stanice Krkonoše Rýchory, Zdroj dat: ČHMÚ



3.3 Hydrologické poměry

Říční síť se vyvinula během třetihor a čtvrtohor. Na české straně Krkonoš je vytvořena mřížkovitá říční síť – údolí toků jsou uspořádána kolmo na sebe v závislosti na geologickém podkladu. Převládá severojižní směr hlavních toků, do kterých se v pravém úhlu vlévají kratší přítoky. Toky mají charakter bystřin s velkým spádem a rozkolísaným vodním stavem (Hunčarová & Parzóch, 2007).

Nejvýznamnější tok Labe pramení na Labské louce ve výšce 1384 m n.m. a bezprostředně odvodňuje třetinu české části pohoří. Přímo v Krkonoších přijímá své větší přítoky: Bílé Labe a Dolský (Svatopetrský) potok (Hunčarová & Parzóch, 2007). Východní třetinu pohoří odvodňuje Úpa pramenící 1,5 km severně od Studniční hory ve výšce 1432 m v Úpském rašeliništi. Mezi její nejvýznačnější přítoky patří Modrý potok, Malá Úpa a Lysečinský potok. Vody ze západní třetiny pohoří tečou do Jizery, která na území Krkonoš vstupuje v 680 m n.m. u Kořenova. Z jejich přítoků je v Krkonoších nejvýznamnější Mumlava, Rokytnický a Vejpálický potok (Hunčarová & Parzóch, 2007).

Reliéf Krkonoš je vhodný pro rozvoj rašelinišť, která jsou charakteristická výskytem organogenních jezer (Pošta, 2005). Stáří krkonošských rašelinišť se odhaduje na 5-8 tis.let a vzhledem ke svým odlišnostem se dělí na dvě skupiny: rašeliniště horská (na mělkých svahových prohlubních) a subalpinská (na plošinách krkonošských hřebenů) (Potocka, 2006).

3.4 Půdní poměry

V Krkonoších je vyvinuta výrazná výšková půdní stupňovitost od podhorských až k vysokohorským půdám (Tomášek & Zuska, 1983). Díky převládajícímu podloží se zde vyskytují půdy kyselé, minerálně chudé, vlhkostně relativně příznivé (Vacek et al., 2006).

Na území Krkonoš se setkáváme s následujícími typy půd (klasifikace dle Němečka a kol., 2001). Kambizemě jsou zonální půdy, typické pro lesní ekosystémy středních a nižších poloh, na stanovištích s neutrálními a kyselými horninami s dostatečným zásobením půdy vodou (Vacek et al, 2006). Půdotvorným substrátem jsou obvykle zvětraliny ortorul, svorů a zejména fylitů. Původními porosty v této oblasti Krkonoš byly na příkřejších svazích květnaté bučiny, na mírnějších svazích pak bučiny bikové. Jedná se o půdy písčitohlinité až hlinitopísčité, s kyselou půdní reakcí a obvykle nepříznivými sorpčními vlastnostmi (Tomášek & Zuska, 1983).

Kryptopodzoly jsou půdy kypré, nejčastěji hlinitopísčité, středně hluboké až hluboké, skeletovité, silně kyselé velmi nepříznivými sorpčními vlastnostmi (Podrázský et al., 2007). Půdotvornými substráty jsou zvětraliny žul, ortorul, svorů a fylitů. Původní vegetaci tvořily acidofilní horské bučiny (Tomášek & Zuska, 1983).

Podzoly jsou souvisle rozšířeny zejména v pásmu nad 1000 m n. m. Zaujímají celou severní část Krkonošského národního parku, kde se jako půdotvorné substráty uplatňují hlavně zvětraliny žul, ortorul a svorů (Tomášek & Zuska, 1983). Původní vegetaci tvořily horské smrčiny a klečové porosty. Humusovou formou je převážně nadložní surový humus z nesnadno rozložitelného opadu vegetace. Jedná se o půdy hlinitopísčité, silně kyselé, s velmi nepříznivými sorpčními vlastnostmi.

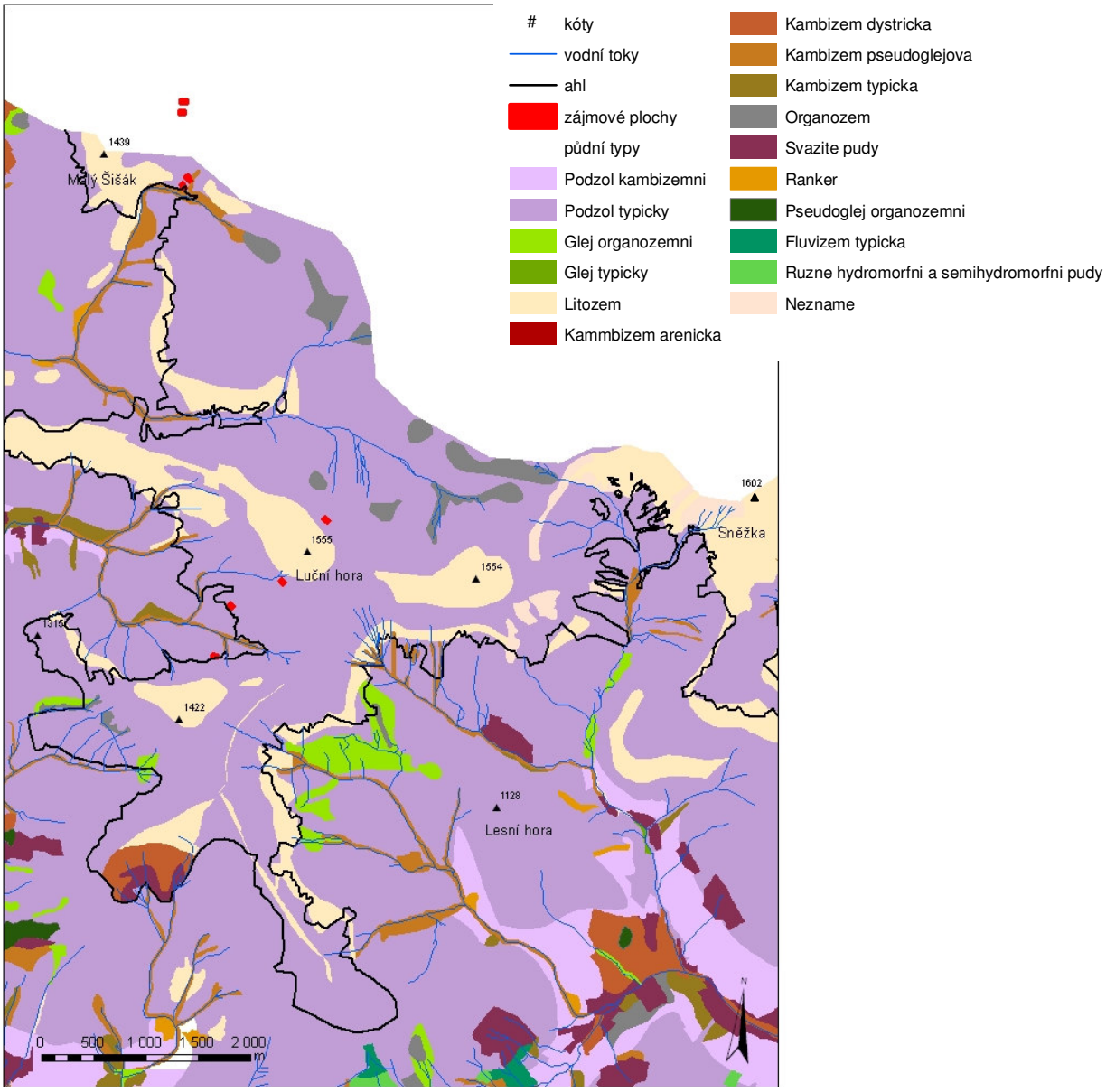
Gleje se nacházejí na menších lokalitách po celém sledovaném území s výjimkou nejvyšších poloh. Jejich vznik je podmíněn vysoko dosahující hladinou spodní vody v důsledku vysokých srážek a konfigurace terénu (Vacek et al., 2006). Jde o půdy silně kyselé s velmi nepříznivými sorpčními vlastnostmi.

Rankery se vyskytují na zejména na suťových lokalitách vyšších poloh, přičemž jejich výskyt je spíše ostrůvkovitý. Vyskytují se zejména na křemencích. Rankery jsou silně

ohroženy erozí, proto obvykle postrádají souvislý vegetační pokryv. Jedná se o půdy skeletovité, se slabě až silně kyselou půdní reakcí, s nepříznivými sorpčními vlastnostmi.

Poměrně hojně jsou ve vyšších zarovnaných polohách Krkonoš zastoupeny organozemě vázané na rašeliniště (Tomášek & Zuska, 1983).

Obr. 7: Půdy východních Krkonoš, Zdroj dat: ČGS, AOPK ČR



3.5 Biogeografické poměry

Krkonoše se vyznačují nejvyšší biodiverzitou z celé soustavy hercynských hor (Flousek & Štursa, 2007). Lze je rozdělit do níže uvedených vegetačních stupňů.

Mezi hlavní ekosystémy **submontánního stupně** (400 – 800 m n.m.) patří listnaté a smíšené lesy a podhorské louky. K hlavním typům listnatých lesů patří (a) suťové lesy

s převládajícím javorem klenem a jasanem ztepilým, (b) květnaté bučiny, horské klenové bučiny s převládajícím bukem lesním, javorem klenem a s příměsí smrku ztepilého, (c) acidofilní bučiny, ve kterých je dominantní opět buk lesní s příměsí dalších listnáčů a jehličnanů (smrk ztepilý, jedle bělokorá). Sekundární bezlesí je představované zejména mezofilními ovsíkovými a vlhkými pcháčovými loukami (Chytrý et al., 2001).

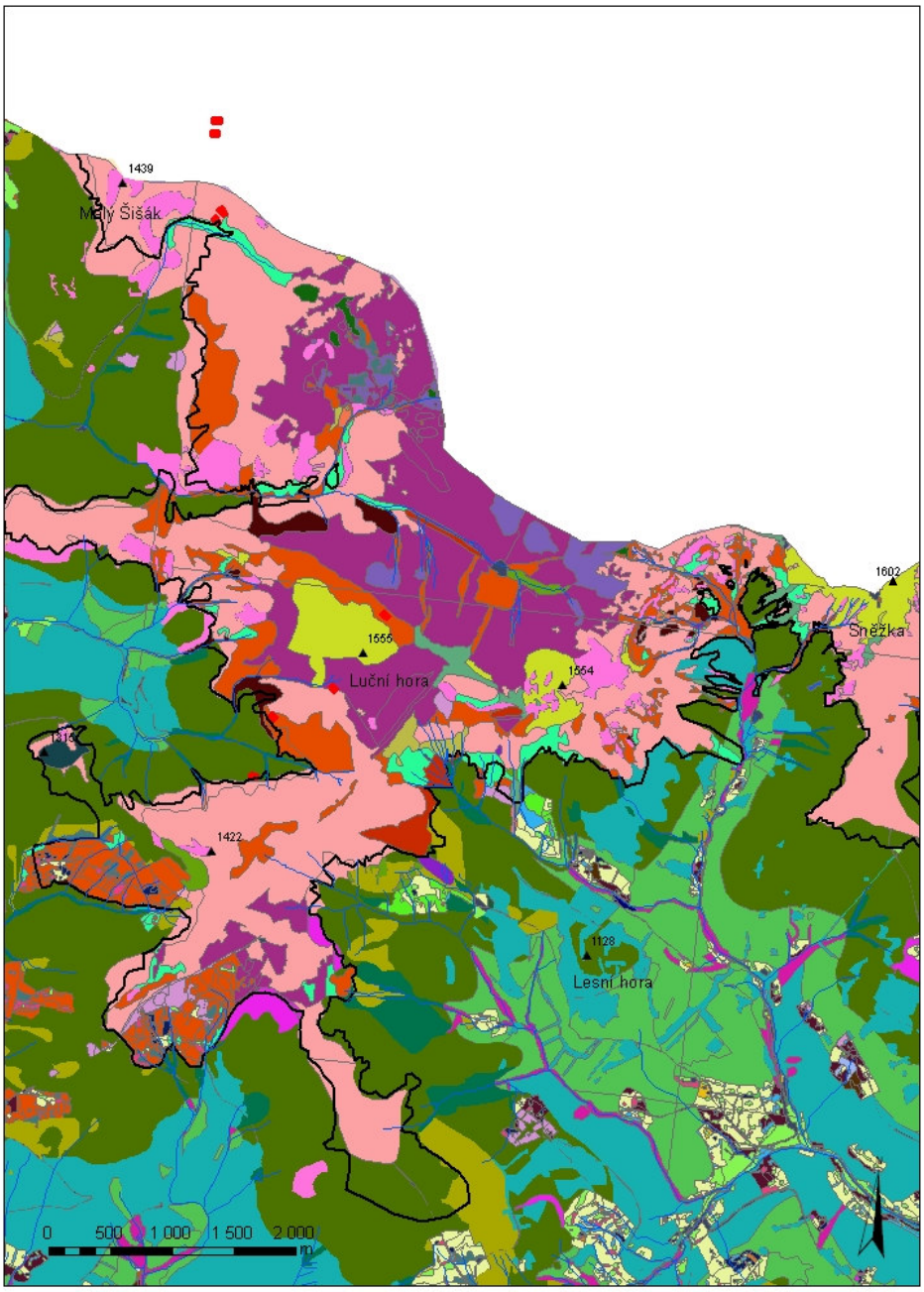
Montánní stupeň (800 – 1200 m n.m.) je tvořen jehličnatými lesy a horskými loukami. Vedle přirozených horských smrkových porostů, se zde mohou vyskytovat i floristicky chudší a jednotvárnější kyselé horské bučiny (Flousek & Štursa, 2007). Přirozené horské smrčiny se zachovaly pouze podél horní hranice lesa, na strmých svazích a v ledovcových karech (Flousek & Štursa, 2007).

Podle složení bylinného patra jsou smrčiny děleny na: (a) horské třtinové smrčiny, ve kterých se kromě smrku uplatňují i listnáče: jeřáb ptačí (*Sorbus aucuparia*), javor klen (*Acer pseudoplatanu*s) a buk lesní (*Fagus sylvatica*). Bylinnému patru dominuje třtina chloupkatá (*Calamagrostis villosa*) a brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillus*). Dalším typem jsou (b) rašelinné a podmáčené smrčiny, kde se mimo smrk vyskytují i břízy (*Betula pendula a B.pubescens*) a jedle bělokorá (*Abies alba*). V bylinném patře roste suchopýr pochvatý (*Eriophorum vaginatum*), klikva bahenní (*Oxycoccus palustris*) a vlochyně bahenní (*Vaccinium uliginosum*). Posledním typem jsou (c) horské papratkové smrčiny, se stejným stromovým zastoupením jako první skupina, bylinnému patru dominuje papratka horská (*Athyrium distentifofolium*) spolu s vysokými subalpínskými bylinami jako je mléčivec alpský (*Cicerbita alpina*) a havez česnáčkový (*Adenostyles alliariae*) (Chytrý et al., 2001).

Montánní stupeň ustupuje na hranici lesa přirozenému bezlesí, dle Soukupové et al. (1995), **arkto-alpinské tundře**. Arkto-alpinská tundra, formovaná kryogenními, eolickými a nivačními pochody, je udržována současným kvaziperiglaciálním podnebím s průměrnými ročními teplotami v blízkosti 0ºC (Soukupová et al., 1995).

Arkto-alpinská tundra je dělena na tři zóny: kryo-eolickou, kryo-vegetační a niveo-glacigenní zónu (Soukupová et al., 1995). Dominantním druhem této oblasti je borovice kleč. V exponovaných polohách kleč ustupuje krátkostébelným alpinským trávníkům, mechorostům a lišejníkům (Soukupová et al., 1995).

Obr. 8: Klasifikace biotopů v rámci mapování Natura 2000 ve východních Krkonoších; Zdroj dat: Správa KRNAP.



- # kóty
- vodní toky
- ahl
- zájmové plochy
- biotopy Natura 2000
- Horské papratkové smrčiny
- Horské třtinové smrčiny
- Rašelinné a podmáčené smrčiny
- Rašelinné a podmáčené smrčiny
- Vyfoukávané alpinské trávníky
- Zapojené alpinské trávníky
- Alpisnká vřesoviště
- Subalpinská brusnivoá vřesoviště
- Acidofilní vegetace alpinských skal a droli
- Acidofilní vegetace alpinských skal a droli
- Skalní vegetace sudetských karů
- Kosodřevina
- Sněhová výležiska
- Subalpinské smilkové trávníky
- Subalpinské vysokostébelnaté trávníky
- Subalpinské vysokobylinné nivy
- Paseky s podrostem původního lesa
- Lesní kultury s nepůvodními dřevinami
- Subalpinské kapradinové nivy
- Subalpinské křoviny s vrbou laponskou
- Subalpinská prameniště
- Vysoké alpinské listnaté křoviny
- Horské olšiny s olší šedou
- Údolní jasanovo-olšové luhy
- Údolní jasanovo-olšové luhy
- Suťové lesy
- Květnaté bučiny
- Horské klenové bučiny
- Acidofilní bučiny
- Pobřežní vegetace potoků
- Štěrkové náplavy bez vegetace
- Devětsilové lemy horských potoků
- Luční prameniště bez tvorby pěnovců
- Lesní prameniště bez tvorby pěnovců
- Nevápnitá mechová slatiniště
- Přechodová rašeliniště
- Otevřená vrchoviště
- Vrchoviště s klečí
- Vrchovištní šlenky
- Štěrbinová vegetace silikátových skal a drolin
- Mezofilní ovsíkové louky
- Vegetace vlhkých narušovaných půd
- Horské trojštětové louky
- Poháňkové pastviny
- Vlhké pcháčové louky
- Vlhká tužebníková lada
- Horské smilkové trávníky s alpinskými druhy
- Podhorské a horské smilkové trávníky
- Sekundární podhorská a horská vrchoviště
- Makrofitní vegetace přirozeně eutrofních a mezotrofních stojatých vod

3.6 Antropogenní ovlivnění

Období vstupu člověka do horského prostředí Krkonoš a jeho vliv na lesy a přírodu není zcela uspokojivě objasněno (Speranza et al., 2000a). Dle palynologického rozboru na východním okraji Černohorského rašeliniště byl první vliv člověka v této oblasti zaznamenán již v 7.-8. století. Důvodem přítomnosti člověka v této vysokohorské oblasti byla pravděpodobně letní pastva nebo těžba železných rud (Speranza et al., 2000a). Vliv lidské aktivity se výrazně snížily nebo zcela ustaly v 9.-10. století. Druhá fáze lidského vlivu je datována na přelom 11. a 12. století a pokračuje až do dnešní doby. U obou období výzkum dokládá výskyt světlomilných dřevin, travin a plevelných druhů (Speranza et al., 2000a). 2. období zásahu člověka již koresponduje s historickými údaji. V 15. století zde dle písemných pramenů započala těžba rud, hutnictví a sklářství (Speranza et al., 2000b). K výrazné exploataci lesů došlo v 16. století, kdy se zde těžilo dřevo pro stříbrné doly v Kutné Hoře (Migoň & Pilous, 2007). Spolu s mýcením lesů došlo i k rozvoji pastevního hospodářství, které vedlo k odlesnění v přístupných horských polohách. Organizované lesnictví se začalo vyvíjet od začátku 18. století. Hlavní hospodářskou dřevinou se stal smrk ztepilý, který snadno zmlazoval. Obnově přirozených porostů se nevěnovala pozornost. Na konci 20. století díky tomuto hospodaření klesl podíl listnatých dřevin z 28 % na 10 %, zatímco podíl smrku ztepilého vzrostl z 54 % na 78 % (Vacek et al., 2006).

Krkonošské smrkové porosty byly v 2. polovině 20. století ovlivněny imisně ekologickými stresy. První výrazné poškození smrkových porostů bylo pozorováno v roce 1977, k prudkému nárůstu poškození došlo v r. 1983 (Vacek et al, 2006). V důsledku tohoto poškození (kombinovaného s dalšími stresovými faktory, zvláště hmyzem) bylo v Krkonoších vykáceno celkem ca 7000 ha lesních porostů (Vacek et al., 2006). Nejvíce zasažené porosty se nacházejí v severovýchodní a severozápadní část pohoří. Toto poškození bylo výrazně ovlivněno A-O systémy (Vacek et al., 2006).

3.7 Ochrana přírody v Krkonoších

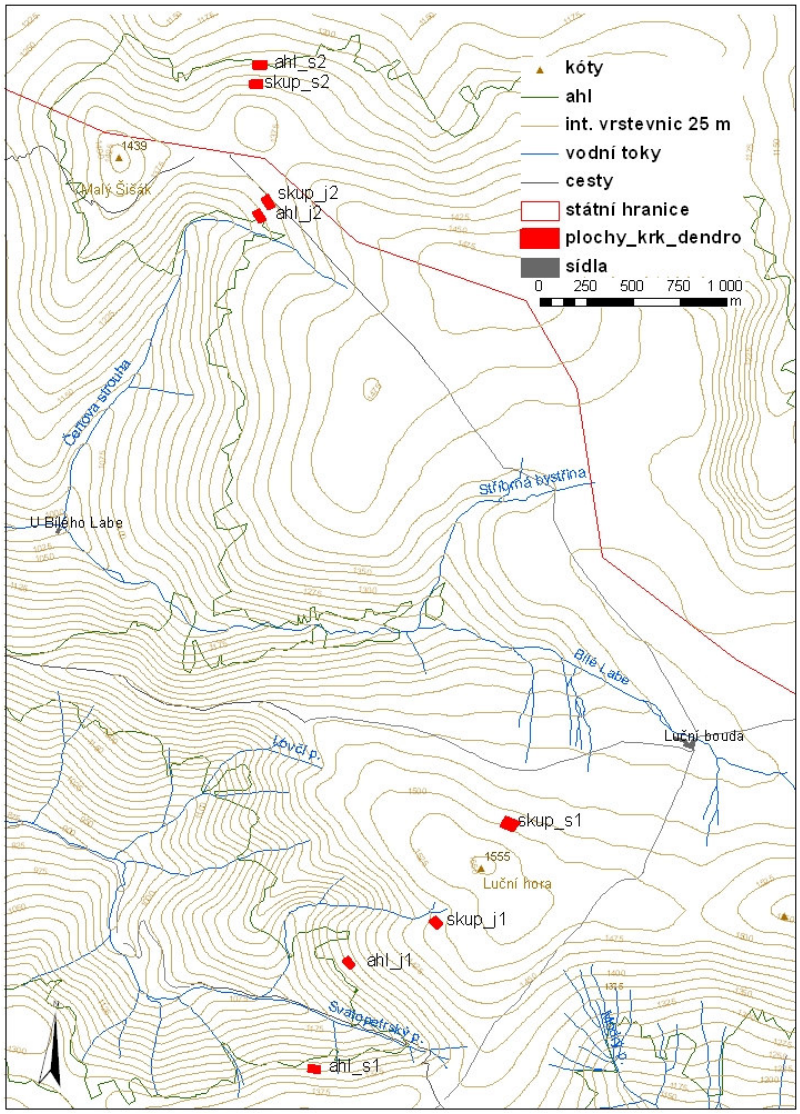
Krkonošský národní park byl zřízen 17.5. 1963. Celková rozloha národního parku činí 36 327 ha (Potocki & Štursa, 2007). Karkonoski Park Narodowy byl zřízen 16.1. 1959 a zaujímá plochu 5 580 ha (Šourek, 1969).

Ramsarskou konvencí je od roku 1993 chráněna Pančavská a Labská louka a Úpské rašeliniště. KRNAP je spolu s polským Karkonoským Parkem Narodowým od roku 1992

přeshraniční Biosférickou rezervací Krkonoše/Karkonoše (BRKK). Celá oblast je od r. 2004 součástí soustavy Natura 2000 (www.nature.cz).

3.8 Charakteristika zájmových ploch

Obr. 9: Zájmové území



Studované plochy se nachází ve Východních Krkonoších, v ekotonu alpinské hranice lesa, na severním a jižním svahu Malého Šišáku v nadmořské výšce 1275-1350 m (pracovní pojmenování lokalit na jižně orientovaném svahu: ahl_j2 a skup_j2, v severní expozici ahl_s2, skup_s2), plocha na hranici lesa na Luční hoře (ahl_j1) v nadmořské výšce 1300 m, stanoviště stromových skupinek (skup_j1, na severně orientovaném svahu skup_s2) se nachází v nadmořské výšce 1475-1500 m n.m. a jedna lokalita, suplující hranici lesa pro severní expozici Luční hory, na Zadní Planině ve 1300 m n.m. (ahl_s1). Velikost každé plochy je přibližně 20x50 m.

Lokality na hranici lesa Luční hory a Zadní Planiny se nacházejí na velmi strmém svahu (25-35°), lokalita stromových skupinek na Malém Šišáku na silně ukloněném svahu (5-15°), zbývající plochy jsou na strmém svahu (15-25°) (odvozeno z DMR).

Stanoviště na Malém Šišáku a stanoviště na severním svahu Luční hory jsou odvodňovány Čertovou strouhou do Bílého Labe, lokality jižního svahu Luční hory a Zadní Planiny jsou součástí povodí Svatopetrského potoka a dále Labe.

Z hlediska půdního zastoupení se na zájmových plochách vyskytuje podzol drnový a humózní s rankerem podzolovaným a modálním (Tomášek, 1992, 1993, 2005).

Zájmová stanoviště jsou porostlá smrkem ztepilým a borovicí klečí, na severním svahu Malého Šišáku se vyskytuje několik jedinců jeřábu ptačího. Dominanty bylinného patra jsou zejména třtina chloupkatá (*Calamagrostis villosa*), metlička křivolaká (*Avenella flesuosa*), brusnice borůvka (*Vaccinium myrtillus L.*). V oblasti stromových skupinek se pak nachází rovněž smilka tuhá (*Nardus stricta*), sítina trojklaná (*Juncus trifidus*), brusnice brusinka (*Vaccinium vitis*) a vřes obecný (*Calluna vulgaris L.*).

Tab. 2: Vybrané charakteristiky studovaných ploch

Plocha	Nadmořská výška (m n.m.)	Geologické podloží	Půdní typ	Orientace	Sklon (º)
ahl_s1	1300	Šedé muskovitické a albitické svory až fylity,	Podzol	S	32
ahl_j1	1300	Šedé muskovitické a albitické svory až fylity,	Podzol	JZ	27
ahl_s2	1275	Drobnozrnná biotická žula	Podzol	S	21
ahl_j2	1325	Drobnozrnná biotická žula	Podzol	JZ	18
skup_s1	1500	Šedé muskovitické a albitické svory až fylity,	Podzol	S	16
skup_j1	1500	Šedé muskovitické a albitické svory až fylity,	Podzol	JZ	16
skup_s2	1325	Drobnozrnná biotická žula	Podzol	S	24
skup_j2	1350	Drobnozrnná biotická žula	Podzol	JZ	13

4. Použité metody

Práce je založena na porovnání teplotních a růstových charakteristik na plochách opačné expozice vůči slunečnímu záření (S a J). Byly měřeny teploty vzduchu a půdy, výška a trvání sněhové pokrývky. Ze získaných teplotních údajů byly vypočteny teplotní indikátory. Dále byly získány dendrochronologické vzorky a aktuální délkové přírůsty větví. Z odebraných vývrtů byly zjištěny šířky letokruhů a byly vytvořeny stanovištní chronologie. Jak šířky letokruhů, tak stanovištní chronologie byly porovnávány mezi jednotlivými stanovišti.

4.1 Vzorky

4.1.1 Získávání vzorků

Vzorky byly odebírány v průběhu měsíců srpna až listopadu roku 2008 a během měsíce května a června 2009 z živých jedinců smrku ztepilého (*Picea abies*). Vzorkem se rozumí vývrt, který byl odebírán pomocí Presslerových přírůstových nebozezů o délce 20 až 50 cm.

K odběru vzorků byly vždy vybráni dominantní nebo ko-dominantní živí jedinci. Vývrty byly získány ve standardní výčetní výšce – přibližně 1,3 m nad patou kmene, ve směru po vrstevnici, aby došlo k eliminaci znehodnocení vývrtů reakčním dřevem. Odebírány byly vždy dva vývrty z jednoho kmene, z protilehlých stran kmene. V případě, že bylo vizuálně shledáno narušení letokruhové série výstředným dřevem, byl odebrán nový vzorek. Odebrané vývrty byly uloženy do desek. Dále byl každý vybraný jedinec lokalizován pomocí GPS přístroje. V terénu bylo tímto způsobem úspěšně odebráno 152 vývrtů.

Kromě odběru vzorků byly určovány vybrané dendrometrické charakteristiky smrku ztepilého. Byly měřeny aktuální délkové přírůsty větví, a to vždy z pěti dominantních větví po obvodu kmene. Aktuální délkový přírůst byl stanoven jako průměrný přírůst v cm za posledních 10 let stanovený dle přeslenů. Pro každý strom byla hodnota přírůstu určena jako průměr ze všech pěti větví. Dále byl měřen obvod kmene ve výčetní výšce a odhadována či měřena výška stromu.

4.1.2 Vytvoření letokruhových sérií

Odebrané a přepravené vzorky byly stabilizovány do dřevěných lišt v horizontální poloze odpovídající přirozené. Zbroušením povrchu byla připravena rovina, na které bylo v laboratoři provedeno měření šířek letokruhů. To bylo určováno pomocí binokulárního

mikroskopu a posuvného měřícího stolu s poloautomatickým odečítáním hodnot o přesnosti 0,01 mm, propojeného s osobním počítačem a dendrochronologickou aplikací PAST 4 (Knibbe, 2004). Takto vznikly křivky absolutních šířek letokruhů. Tímto způsobem bylo změřeno 150 vývrtů.

4.1.3. Datování

Po převodu materiálu do podoby letokruhových křivek byl každému letokruhu přiřazen rok vzniku za pomoci srovnávání jednotlivých sérií. Byla upřednostněna vizuální synchronizace před počítačově řízeným datováním. Pro účely datování byl proveden výběr významných roků, tzv. signatur (Kyncl & Kyncl, 2002). Základem byla práce Jandy (2008) za současného využití průběhu jednotlivých letokruhových sérií.

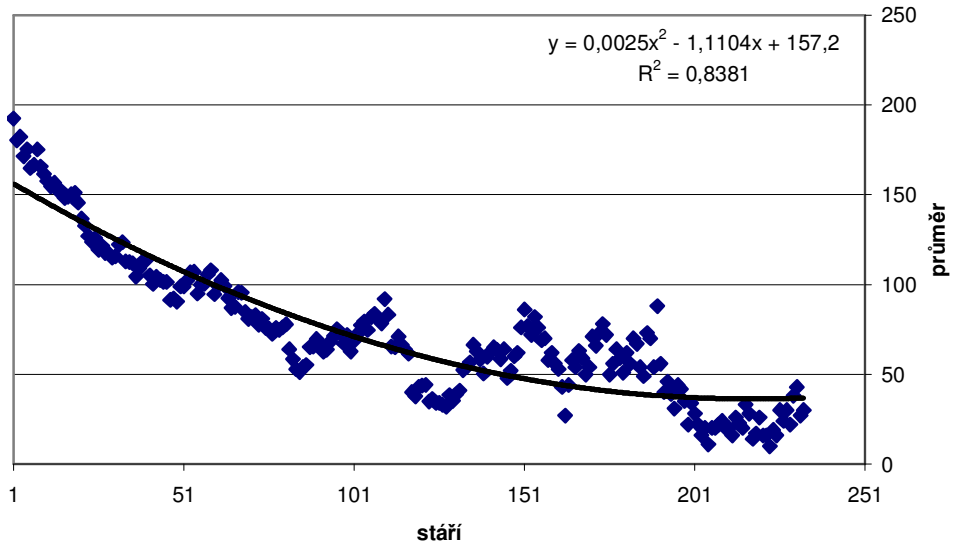
V případě datování dvou vzorků z jednoho kmene došlo ke křížovému datování obou vzorků. V případě, že oba odpovídaly vybraným signaturám standardu, došlo k vytvoření jejich průměru, který pak vstupoval do dalších analýz. V případě, že standardu odpovídal pouze jeden z odebraných vzorků, byl pro další analýzy použit jen tento „správný“ vzorek.

4.1.4 Korekce šířek letokruhů odstraněním věkového trendu

Porovnávání šířek letokruhů mezi jednotlivými lokalitami naráží na nestejnou věkovou strukturu na jednotlivých plochách. Proto bylo zapotřebí odstranit věkový trend v šířkách letokruhů. Na nedetrendovaných letokruhových řadách byla provedena korekce šířek letokruhů odstraněním věkového trendu podle metody aplikované Paulsenem et al. (2000) a Vittozem et al. (2008): z datového souboru všech sérií byly vyřazeni jedinci mladší 20 let (příliš mladí jedinci) a neúplné sekvence. Po odstranění těchto nevyhovujících letokruhových řad bylo k dispozici celkem 124 sérií. Tyto letokruhové sekvence byly seřazeny dle kambiálního stáří. Dále byla pro každý rok vypočtena průměrná šířka letokruhu. Vztah mezi průměrnou šířkou letokruhu a kambiálním stářím (x) byl stanoven proložením polynomu 2. řádu: $y=0{,}0025x^2-1{,}1104x+157{,}2$ (Obr. 7). Na základě proložené křivky bylo vizuelně určeno období, kdy již neexistuje závislost mezi stářím stromu a šířkou letokruhu. Z tohoto období byla vypočtena průměrná šířka letokruhu (b). Následovalo odstranění věkového trendu v jednotlivých šířkách letokruhů každé jednotlivé letokruhové sekvence (a), a to podle následující funkce: k=b*a/y. Na základě tohoto výpočtu byly získány pro všechny letokruhové řady detrendované šířky letokruhů (k), tedy 124 letokruhových sérií bez věkového trendu. Z těchto detrendovaných šířek byla spočtena průměrná šířka letokruhu (p)

pro komplementární lokality (S a J), která tvořila 100 % ($\Sigma k_{1-x}/x$). K tomuto průměru pak byly jednotlivé letokruhé sekvence vztaženy poměrem (k/p). Tj., pokud byla šířka detrendovaného letokruhu větší než průměrná šířka letokruhu byla danému letokruhu přiřazena hodnotou vyšší než 100 % a naopak.

Obr. 10: Vztah mezi kambiálním stářím a šířkou letokruhů, trend modelován polynomem 2. stupně.



4.1.5 Vytvoření stanovištních chronologií

Pro jednotlivé lokality byla zpracována stanovištní (standardní) chronologie. K jejímu vytvoření byl použit program Arstan (Cook, 1985). Jednotlivé chronologie byly detrendovány s využitím Hugershoffovi funkce a negativní exponenciální funkce. Jednotlivé vzorky byly následně zprůměrovány (dvojitý vážený robustní průměr) za účelem vytvoření stanovištní chronologie. Poměrově vypočtené letokruhové indexy tvořící nové série byly zhlazeny kubickým splinem.

4.1.6 Porovnání šířek letokruhů a dendrometrických charakteristik

V práci byly porovnávány jak reálné (aktuální) šířky letokruhů, tak šířky korigované.

Pro porovnání aktuálních šířek letokruhů byly vybrány vzorky podobného stáří. Pro hranici lesa na Luční hoře a Zadní Planině se jednalo o stromy se stářím 50-100 let, na hranici lesa na Malém Šišáku o jedince ve věku 70 až 50 let. Pro srovnání šířek letokruhů stromů ze

stromových skupinek byly vybrány vývrty vykazující stáří 50-20 let. Z takto vybraných sérií byl na každé ploše vytvořen celkový průměr, a ten srovnán v období posledních deseti let.

Korigované šířky letokruhů byly porovnávány v celém období růstu analyzovaných stromů.

Z korigovaných šířek letokruhů byla pro komplementární plochy vytvořena 10tiletá období, ve kterých byly šířky letokruhů srovnány pomocí krabicových grafů a analýzy variance.

Mezi jednotlivými lokalitami byly porovnávány také dendrometrické charakteristiky. Pro každou lokalitu byla vypočtena průměrná výška stromu ($\Sigma v_{1-x}/x$) a dále průměrný aktuální délkový přírůst ($\Sigma d_{1-x}/x$). Aktuální délkový přírůst byl mezi komplementárními lokalitami srovnán pomocí krabicových grafů a analýzy variance.

4.2 Teplotní data

4.2.1 Teplotní měření

K měření teplot byly použity dataloggery EMS Minikin, zaznamenávající teplotu vzduchu a půdy každou hodinu s přesností ±0,2°C. Naměřená data byla 2x za rok stažena.

Na každé lokalitě jsou umístěny dva dataloggery: jeden se nachází u vzrostného vrcholu (měření teplot vzduchu čidlem umístěným ve stínítku), druhý 10 cm pod povrchem, v kořenové zóně stromu (měření teplot půdy). Místa, kde jsou situovány dataloggery zaznamenávající teplotu půdy, se nachází v zástinu větví tak, aby nedocházelo k přímému slunečnímu svitu na povrch půdy.

Nejdelší teplotní měření (od r. 2005) probíhá na Zadní Planině a na jižním svahu Luční hory (hranice lesa i stromové skupinky). Od r. 2006 dochází k měření i na severně orientovaném svahu Luční hory. V r. 2005 byly měřeny pouze teploty půdy, od r. 2006 jsou postupně zaznamenávány i teploty vzduchu (Tab. 3). Teplota vzduchu a půdy je na lokalitách Malého Šišáku měřena od 4.7.2008 (Tab. 4).

Vzhledem k technickým problémům dataloggerů nejsou použitelná data teploty půdy z letního období 2008 z jižního svahu na hranici lesa na Luční hoře (ahl_j1) a Malém Šišáku (ahl_j2).

Tab. 3: Teplotní měření na Luční hoře a Zadní Planině

	Teplota půdy		Teplota vzduchu	
Rok	Hranice lesa	Stromové skupinky	Hranice lesa	Stromové skupinky
2005	1.7.-9.10.	23.7.-9.10.	-	-
2006	od 19.5.	24.7.-9.10.	od 19.5.	-
2007	nepřetržité měření	Od 16.6.	nepřetržité měření	od 16.6.
2008	nepřetržité měření	nepřetržité měření	nepřetržité měření	nepřetržité měření

Tab. 4: Teplotní měření vzduchu a půdy na Malém Šišáku

Rok	Hranice lesa	Stromové skupinky
2008	od 4.7.	Od 4.7.

4.2.2 Počítané teplotní indikátory

Pro každou lokalitu byly pro sledované období (Tab. 5) vypočteny následující teplotní indikátory: průměrná měsíční teplota ($\Sigma T_{1\text{-}31}/31$), absolutní minimum a maximum (T_{min}, T_{max}), suma teplot s hodnotami vyššími než 5°C ($\Sigma T_{\geq 5°C}$), průměrná teplota nejteplejšího měsíce ($\Sigma T_{1\text{-}31}/31$) a průměrná teplota ve sledovaném období ($\Sigma T_{1\text{-}x}/x$).

Tab. 5: Sledovaná časová období, u kterých byly k dispozici data ze všech stanovišť.

Rok	Hranice lesa, stromové skupinky
2005	23.7.-9.10.
2006	24.7.-9.10
2007	16.6.-16.10.
2008	4.7.-30.10.

Pokud to zaznamenané hodnoty teplot dovolily, bylo vymezeno vegetační období. Toto období začíná dnem, kdy teplota půdy na jaře poprvé překročí hodnotu 3,2°C a je ukončeno prvním dosažením 3,2°C v podzimních měsících (Körner & Paulsen, 2004). Pro vegetační období byla vypočtena jeho délka (počet dní/ $\Sigma d_{<3,2°;3,2°C>}$), průměrná teplota ($\Sigma T_d/\Sigma d$), absolutní minimum a maximum (T_{min}, T_{max}) a suma teplot s hodnotami vyššími než 5°C ($\Sigma T_{\geq 5°C}$).

4.2.3 Srovnání teplotních ukazatelů s tepelným požitkem stanoviště

Průměrná teplota vzduchu a půdy sledovaného období 2007 a 2008 byla graficky porovnána s heat load indexem (HLI), tzv. tepelným požitkem (McCune & Keon, 2002, 2007). Tepelný požitek je bezrozměrná veličina, která závisí na zeměpisné šířce, sklonu a orientaci svahu. Výpočet byl proveden v programu ArcView 3.1 pomocí skriptu Avenue (Parks, 2003):

Pro severní polokouli je nejprve vypočtena orientace:

Folded aspect = 180 – | Aspect – 225 |

Hodnoty orientace jsou převedeny z dekadických stupňů na radiány, následuje výpočet rovnice s koeficienty pro 30º-60º zeměpisné šířky a svažitost menší než 60º (McCune & Keon, 2002):

Heat load index = 0,339 + 0:808 * COS(latitude) * COS(slope) – 0,196 * SIN(folded aspect) * SIN(slope) – 0,482 * COS(folded aspect) * SIN(slope).

4.3 Měření výšky sněhové pokrývky

Na počátku jarního období 2009 byla měřena výška sněhové pokrývky. K tomuto měření docházelo z důvodu porovnání odtávání sněhu na opačně orientovaných svazích a porovnání nástupu počátku vegetačního období. K měření došlo lavinovými sondami ve třech časových horizontech: 8.4. (18.4.), 30.4. (1.5.) a 13.5. (15.5.) 2009 a bylo provedeno na sledovaných plochách a jejich blízkém okolí. Vzdálenost jednotlivých měření byla přibližně 5 m. Místo každého měření bylo lokalizováno pomocí GPS přístroje, výška sněhové pokrývky v každém měřeném bodě byla zaznamenána, jednotlivé lokality byly fotograficky zdokumentovány. Ze zjištěných údajů byla vypočtena průměrná výška sněhové pokrývky, její minimální a maximální stav.

4.4. Vztah mezi růstem stromů a teplotami

Z každé studované lokality byla pro rok 2007 a 2008 vytvořena průměrná šířka aktuálního a korigovaného letokruhu. Tyto hodnoty pak byly graficky srovnány s průměrnými teplotami vzduchu a půdy ve sledovaných obdobích 2007 a 2008.

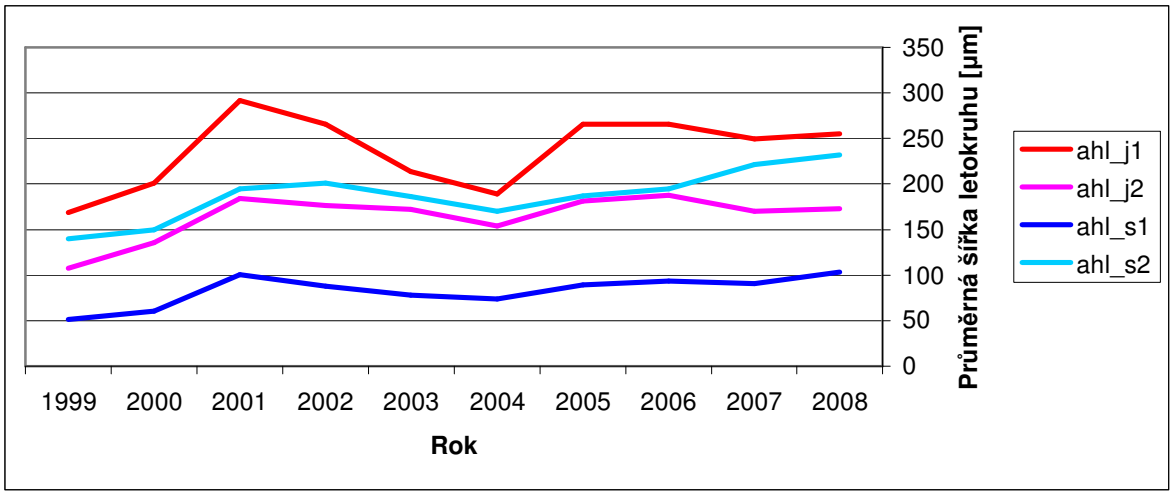
5. Výsledky

5.1 Aktuální šířky letokruhů

Pro srovnání reálné průměrné šířky letokruhů byly vybrány vzorky s podobným stářím.

Jednotlivé trendy v křivkách tloušťkových přírůstů na hranici lesa si vzájemně odpovídají (Obr. 11). Během posledních 10 let je hlavního přírůstového vrcholu dosaženo v roce 2001, druhotného maxima pak během let 2005 až 2007. Nejmenší přírůstky byly naměřeny v roce 2004. Nejvíce přirůstají smrky na jižním svahu Luční hory (ahl_j1), nejméně na svahu Zadní Planiny (ahl_s1). Na svazích Malého Šišáku více přirůstají jedinci na severně orientovaném svahu (ahl_s2) než na svahu jižním (ahl_j2).

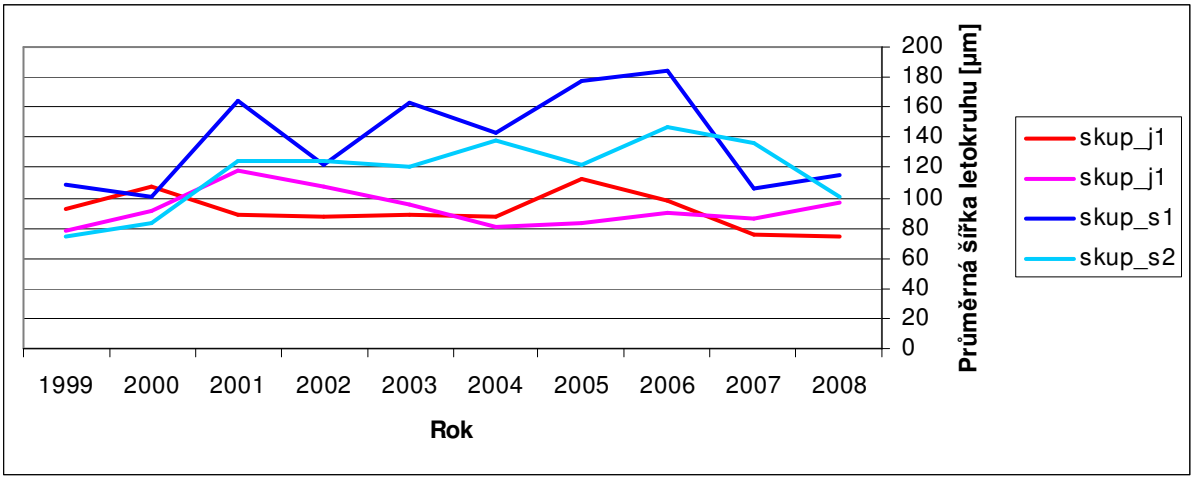
Obr. 11: Průměrná šířka letokruhů na hranici lesa za posledních 10 let



Trendy v tloušťkových přírůstech stromových skupinek za posledních 10 let nemají podobný průběh (Obr. 12). Nejvíce přirůstali jedinci na severním svahu Luční hory (skup_s1), nejméně naopak na jižně orientovaném svahu Luční hory (skup_j1), kromě let 2005 a 2006, kdy došlo ke zvětšení průměrné šířky letokruhů. Na svazích Malého Šišáku více přirůstají stromy na severním svahu (skup_s2). V roce 2001 bylo dosaženo největšího přírůstu na 3 lokalitách, v roce 2006 pak na 2 lokalitách.

U stromových skupinek byl zaznamenán větší tloušťkový přírůst na obou severně exponovaných svazích (skup_s1, skup_s2). Rozdíly mezi komplementárními lokalitami nejsou zanedbatelné, dosahují rozdílu až 86 µm (rok 2006) na Luční hoře (skup_j1, skup_s1), na svazích Malého Šišáku činí maximální rozdíl v přírůstu 58 µm (rok 2006, skup_j2, skup_s2).

Obr. 12: Průměrná šířka letokruhů stromových skupinek za posledních 10 let



Pokud srovnáme aktuální šířky letokruhů mezi plochami na hranici lesa a stromovými skupinkami zjistíme, že za posledních 10 let nejvíce přirůstali stromy na hranici lesa Luční hory (ahl_j1) a obě lokality na hranici lesa Malého Šišáku (ahl_j2, ahl_s2). Následovali stromy ve stromových skupinkách na severně orientovaném svahu Luční hory (skup_s1) a severním svahu Malého Šišáku (skup_s2).

5.2 Korigované šířky letokruhů

Křivky, očištěné od věkového trendu („korigované šířky letokruhů“), znázorňující růst stromů na hranici lesa (Obr. 13) mají podobný průběh. První výrazná kladná anomálie v šířkách letokruhů byla zaznamenána během první dekády 20. století (ahl_s2 a ahl_s1). K výraznému nárůstu došlo mezi 30. lety a polovinou let 70. Výjimkou je zde plocha na hranici lesa na Luční hoře (ahl_j1), kde je v období 1944-1947 zaznamenán pokles růstu. Mezi lety 1978 a 1988 vykazují smrky růstovou depresi, která v následujících letech postupně odeznívá. Další růstová deprese je patrná v letech 1996, 1999 a v roce 2004.

Největší přírůsty byly zjištěny u jedinců na jižně orientované lokalitě na Luční hoře (ahl_j1), dále na lokalitách Malého Šišáku (ahl_j2, ahl_s2). Nejmenší přírůstky byly zaznamenány na severně orientované ploše Zadní Planiny (ahl_s1). Nejstarší smrky se nacházejí na lokalitě Zadní Planiny (ahl_s1), nejmladší na Luční hoře (ahl_j1). Opačně orientované lokality na svazích Malého Šišáku (ahl_j2, ahl_s2) mají podobnou věkovou strukturu.

Na hranici lesa (na všech sledovaných stanovištích) více přirůstali jedinci na jižně orientovaných lokalitách, významný rozdíl vykazuje růst stromů na Zadní Planině a Luční

hoře (ahl_s1 x ahl_j1), rozdíl v růstu na opačně orientovaných svazích Malého Šišáku je zanedbatelný.

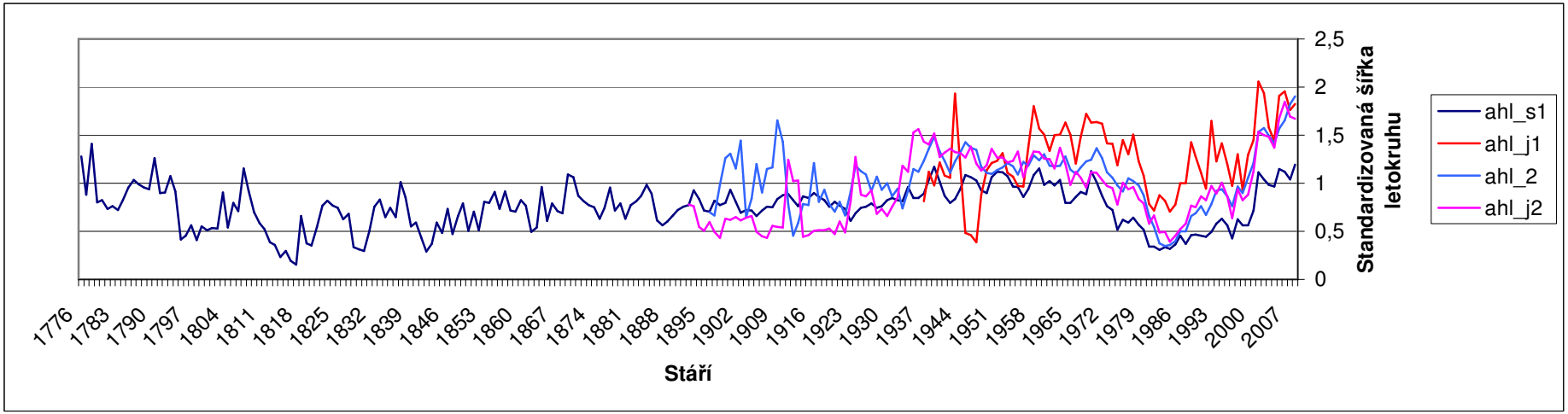
Letokruhové série stromových skupinek mají také podobný průběh v čase (Obr. 14). Výrazný přírůst nastal během 30. let, a koncem 50. let 20. století. Růstová deprese patrná u stromů na lokalitách na hranici lesa z 80. let zde není zcela výrazná a je omezena na období mezi lety 1981-1984.

Největších přírůstů dosáhli jedinci na severně orientované lokalitě Luční hory (skup_s1), nejméně pak přirůstali jedinci v jižní expozici Luční hory (skup_j1) a na severním svahu Malého Šišáku (skup_s2). Nejstarší stromy se vyskytují na severně orientovaném svahu Malého Šišáku (skup_s2), nejmladší v severní expozici Luční hory (skup_s1).

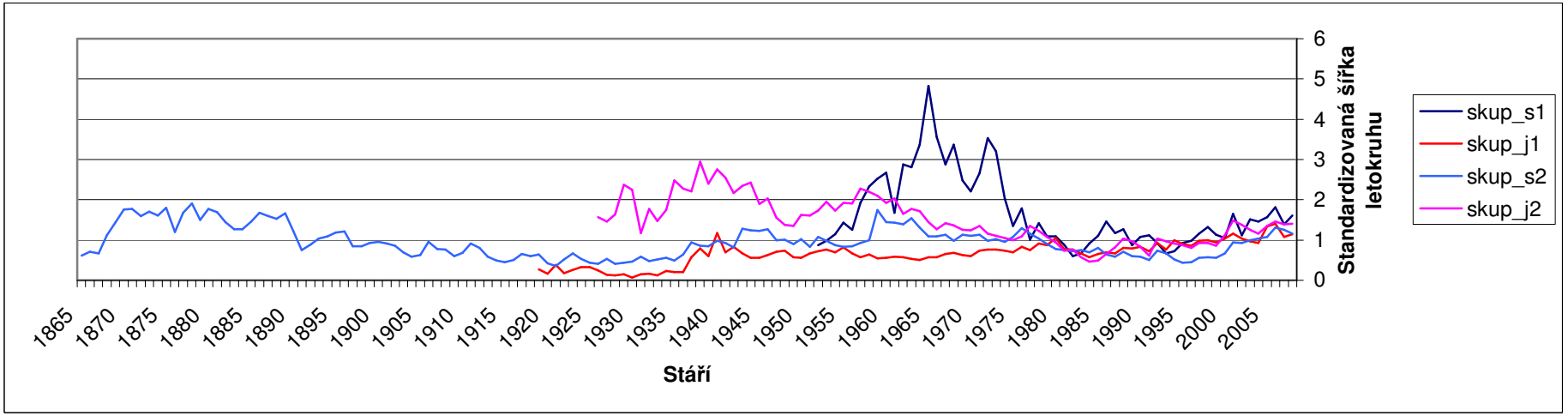
Ve stromových skupinkách více přirůstali jedinci na jižně orientované lokalitě Malého Šišáku (skup_j2), a to s významným rozdílem do poloviny 70. let, od této doby do současnosti je rozdíl zanedbatelný. Významný rozdíl vykazuje růst stromů na opačně exponovaných svazích Luční hory (skup_s1 x skup_j1), kde stromy severního svahu přirůstají v celém období mnohem výrazněji.

Pokud srovnáme korigovanou šířku letokruhů mezi stromy na hranici lesa a stromovými skupinkami zjistíme, že ve 30. letech a během 60. a 70. let více přirůstaly stromy ve stromových skupinkách na severně orientované ploše Luční hory (skup_s1) a v jižní expozici Malého Šišáku (skup_j2), v následujícím období více přirůstají stromy na hranici lesa, a to hlavně na jižním svahu Luční hory (ahl_j1) a obou svazích Malého Šišáku (ahl_j2, ahl_s2). V posledních dvaceti letech je růst srovnatelný s největšími přírůsty na jižně orientovaném svahu hranice lesa Luční hory (ahl_j1).

Obr. 13: Standardizovaná šířka letokruhů na hranici lesa



Obr. 14: Standardizovaná šířka letokruhů stromových skupinek

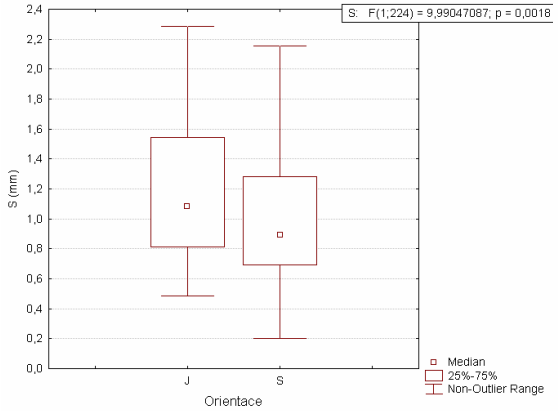


Při srovnání korigovaných šířek letokruhů mezi komplementárními lokalitami za desetiletá období zjistíme, že na hranici lesa Luční hory (ahl_j1) a Zadní Planiny (ahl_s1) (Obr. 15) více přirůstají stromy na jižním svahu. Statistická významnost rozdílů je patrná v celém sledovaném období 1949-2008, ve kterém postupně roste (hodnota F testu vzrůstá od 10 do 216). Na hranici lesa Malého Šišáku (ahl_s2, ahl_j2) (Obr. 16) dochází ke kolísání růstu. V období 1939-1948 více přirůstají stromy na jižní lokalitě (ahl_j2), poté až do roku 1988 dochází k většímu přírůstu na severních svazích, a během posledních 20 let dochází k většímu přirůstání stromů na jižně orientovaných stanovištích. V žádném sledovaném období nebyl rozdíl statisticky významný (p=0,1-1).

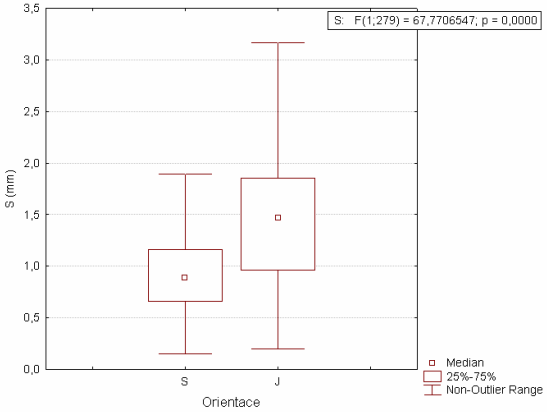
Při srovnání růstu stromů ve stromových skupinkách na Luční hoře (skup_j1, skup_s1) (Obr. 17) došlo v celém sledovaném období k většímu přirůstu stromů na severním svahu, statistická významnost se neprokázala (p=0,12-0,34). Na plochách na Malém Šišáku (skup_j2, skup_s2) vykazují jižně orientované svahy větší přírůst v letech 1949-1998, v posledním desetiletí více narůstají stromy na severním svahu (Obr. 18). Statistická významnost rozdílů byla zjištěna pro období 1949-1968 ($p \leq 0,01$) a pro období od roku 1989 do současnosti ($p \leq 0,01$).

Obr. 15: Srovnání šířky letokruhů na hranici lesa (ahl_s1 x ahl_j1) v 10letých obdobích

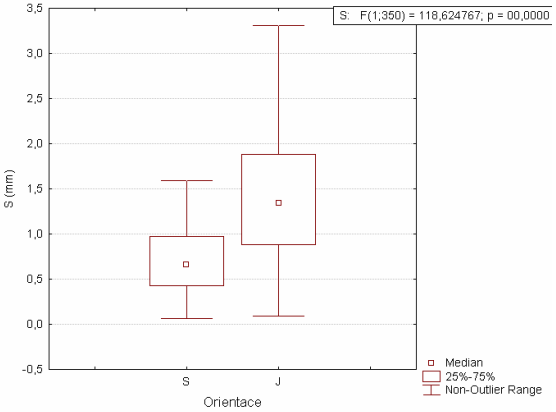
1949-1958



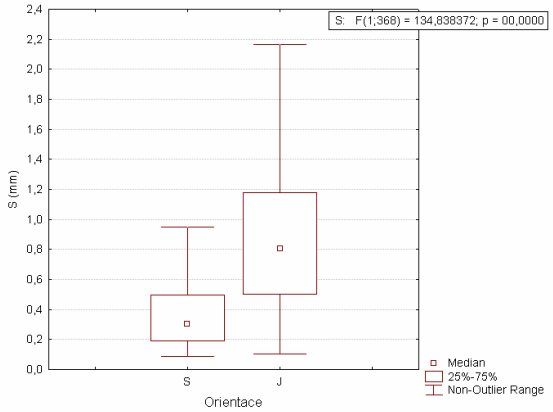
1959-1968



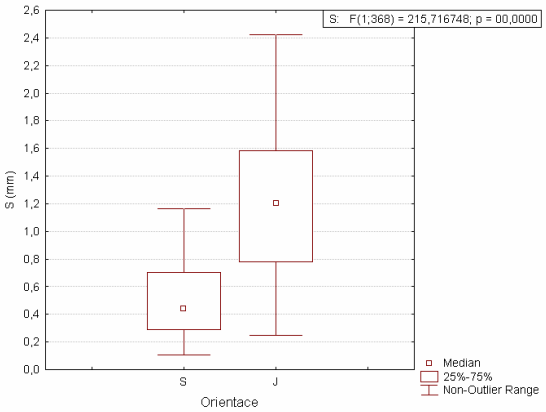
1969-1978



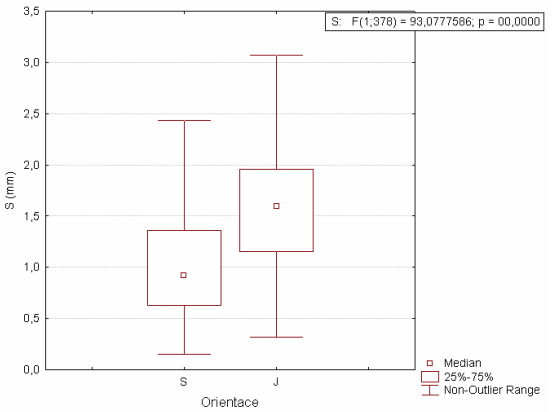
1979-1988



1989-1998

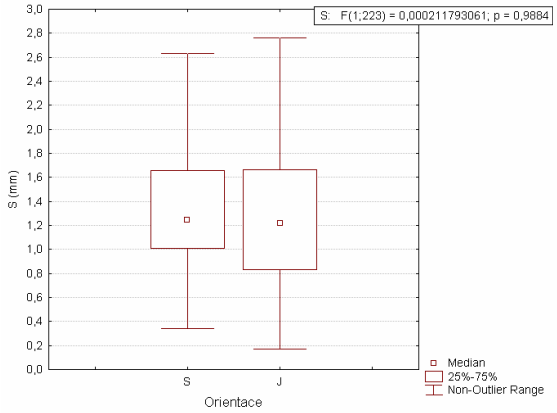


1999-2008

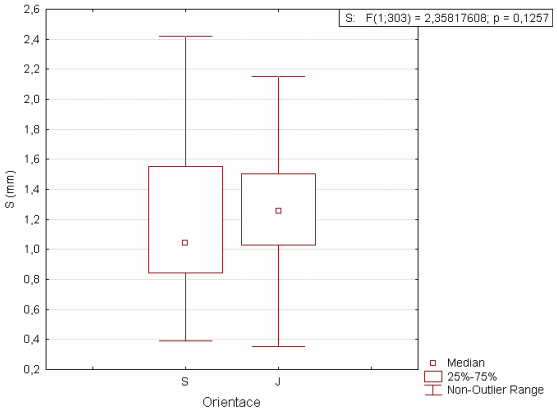


Obr. 16: Srovnání šířky letokruhů na hranici lesa (ahl_s2 x ahl_j2) v 10letých obdobích

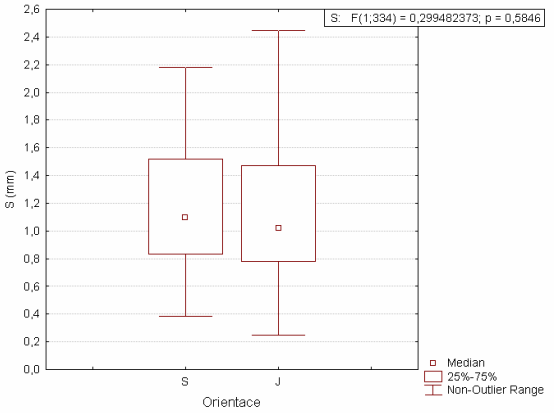
1939-1948



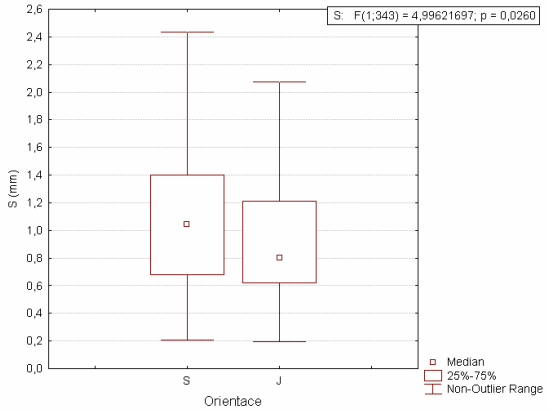
1949-1958



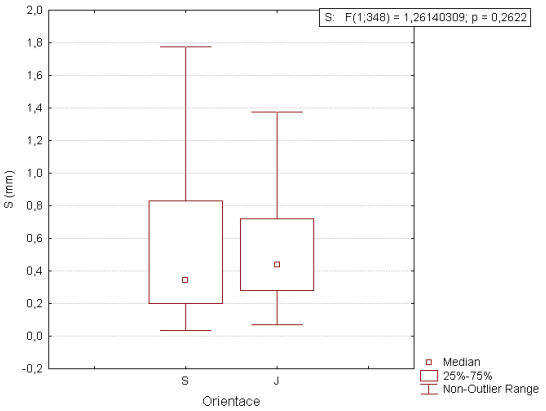
1959-1968



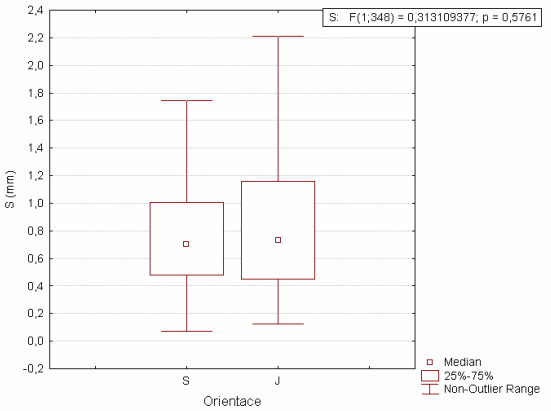
1969-1978



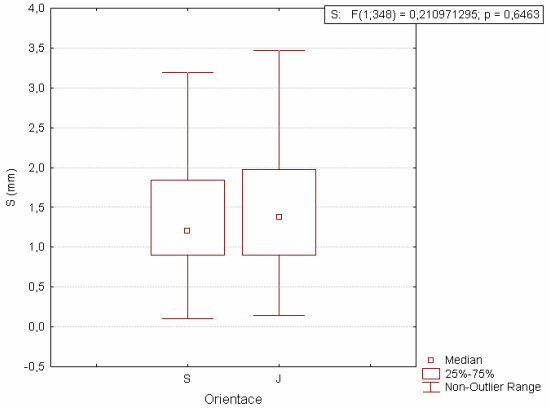
1979-1988



1989-1998

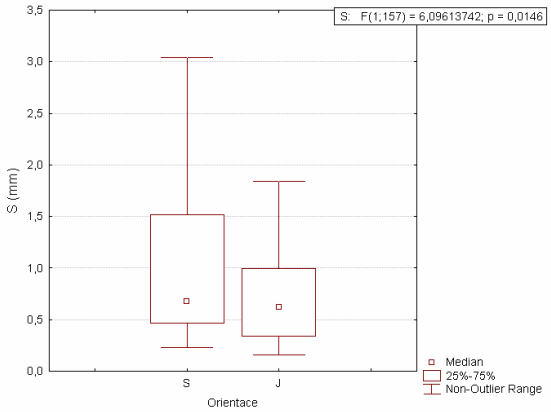


1999-2008

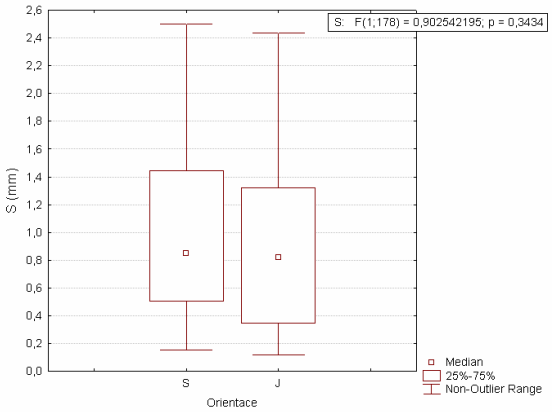


Obr. 17: Srovnání šířky letokruhů stromových skupinek (skup_s1 x skup_j1) v 10letých obdobích

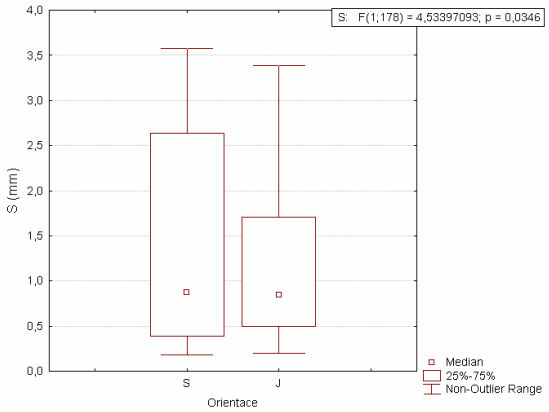
1979-1988



1989-1998

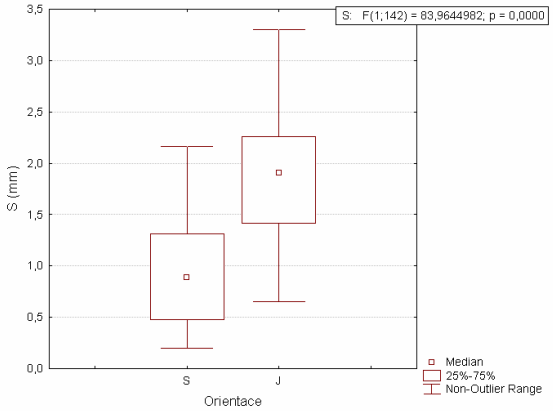


1999-2008

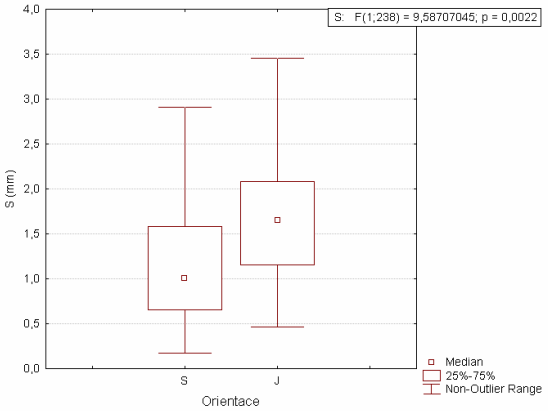


Obr. 18: Srovnání šířky letokruhů stromových skupinek (skup_s2 x skup_j2) v 10letých obdobích

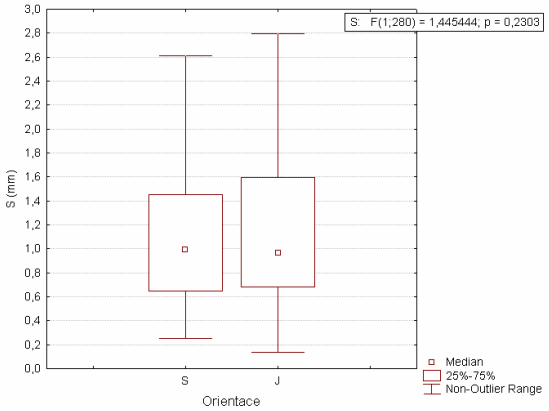
1949-1958



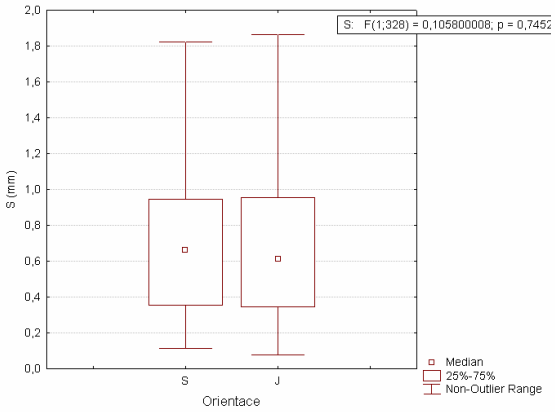
1959-1968



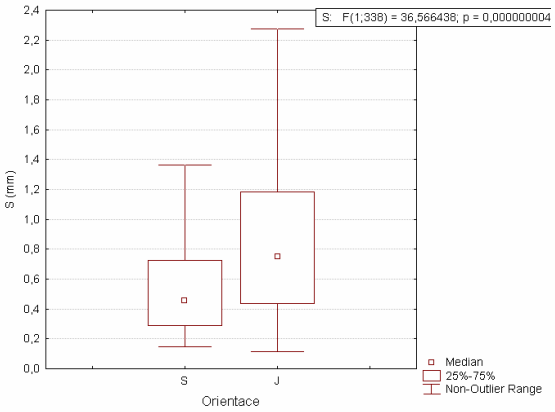
1969-1978



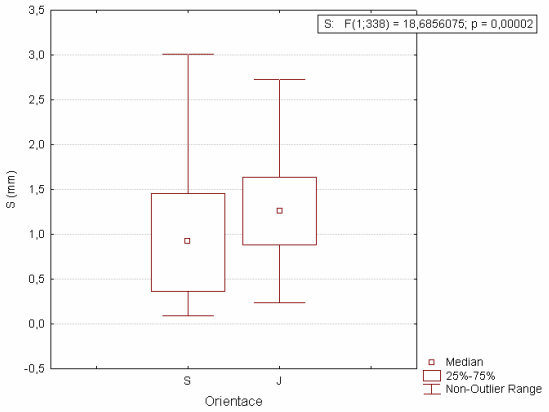
1979-1988



1989-1998



1999-2008



5.3 Stanovištní chronologie

Období zvýšeného radiálního přírůstu je na hranici lesa zaznamenáno na přelomu 30. a 40. let, na konci 50. a na počátku 70. let 20. století (Obr. 19). Mezi lety 1978 a 1986 je na všech stanovištích jasně zřetelná růstová deprese. Po tomto období dochází ke střídání období většího a menšího přírůstu, a to až do roku 2001, kdy stromy začínají na sledovaných plochách opět významně přirůstat.

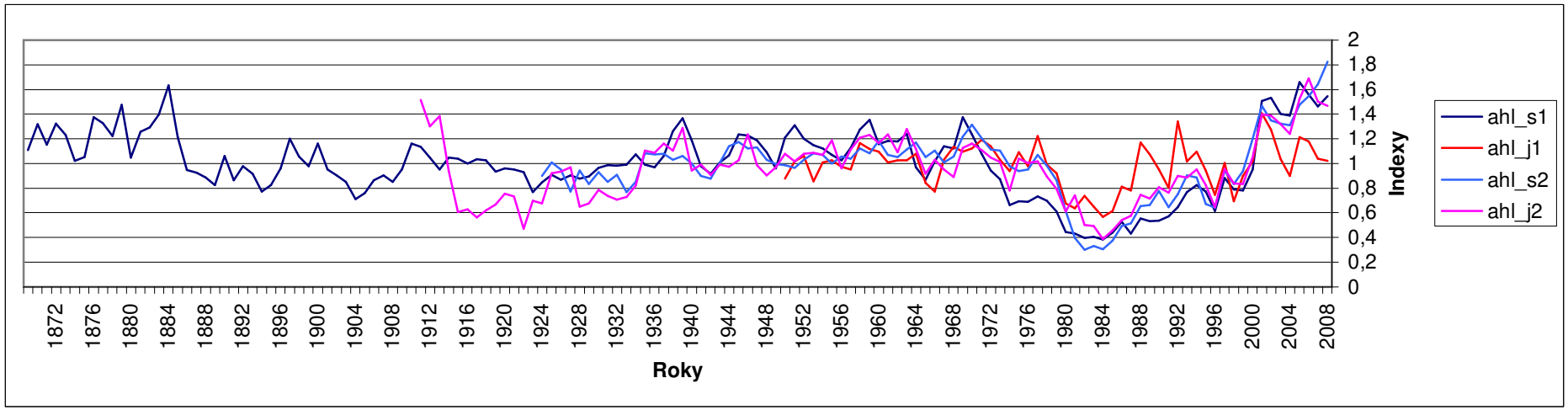
Při srovnání stanovištní chronologie mezi severně a jižně orientovaným svahem na hranici lesa se ukazuje, že trendy většího a menšího období růstu jsou shodné, období růstové deprese započalo na severně orientovaných svazích (ahl_s1, ahl_s2) dříve než na komplementárních jižně exponovaných lokalitách.

U stromových skupinek (Obr. 20) je patrný kolísavý růst během celého růstového období. V polovině 60. a během 70. let je patrné zvýšení růstu. Růstová deprese je u stromů ve skupinkách ve srovnání s jedinci na hranici lesa minimální, a zřetelná pouze mezi lety 1983-1986. V tomto období je rozdílný přírůst na severně orientovaném svahu Luční hory (skup_s1). Stromy zde dosahují nízkých radiálních přírůstů již v období 1982-1984, poté následuje akcelerace růstu.

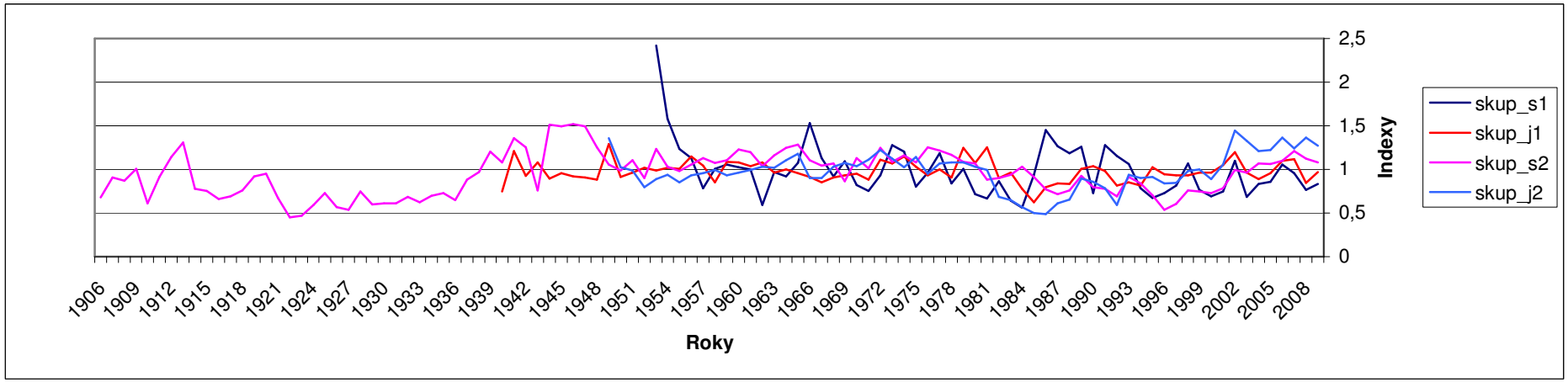
Růst stromů ve stromových skupinkách na svazích Malého Šišáku vykazuje podobné trendy během růstového období, jediný rozpor mezi severně a jižně orientovanou lokalitou je v období růstové deprese, která na severně orientovaném svahu (skup_s2) začíná dříve. Severně a jižně orientovaná plocha stromových skupinek na Luční hoře nevykazuje podobné trendy. V polovině 50. let a na počátku let 60. je na severně orientované ploše (skup_s1) zřetelná růstová deprese, na jižně orientovaném svahu (skup_j1) k poklesu růstu nedošlo. Další významný rozdíl je možno zaznamenat v 80. letech, kdy je na severně orientované ploše (skup_s1) zřetelné období zvýšeného růstu, zatímco v jižní expozici (skup_j1) se projevuje růstová deprese (Obr. 20).

Při srovnání stanovištní chronologie mezi souvisle zapojeným lesem a stromovými skupinkami zjistíme, že se v obou oblastech vyskytuje období zvýšeného přírůstu v 70. letech, naopak během části 80. let 20. století se shodně v celém ekotonu projevuje růstová deprese.

Obr. 19: Stanovištní chronologie na hranici lesa



Obr. 20. Stanovištní chronologie stromových skupinek



5.4 Dendrometrické znaky smrku ztepilého

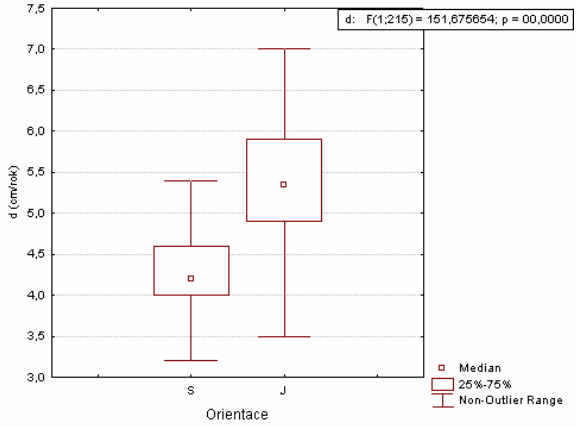
Na základě pozorování se na sledovaných plochách vyskytují větší aktuální délkové přírůsty větví na jižních lokalitách (10letý průměr ze sledovaných jedinců plochy, Tab. 6). Na všech sledovaných lokalitách jsou rozdíly statisticky významné, nejvyšší hodnota F testu byla vypočtena při srovnání hranice lesa na Luční hoře (ahl_j1) a Zadní Planině (ahl_s1), (F=152). (Obr. 21). Průměrná výška stromů je silně závislá na stáří jedinců, proto se nejvyšší stromy nacházejí na severním svahu Zadní Planiny (ahl_s1) a Malého Šišáku (ahl_s2).

Tab. 6: Dendrometrické znaky smrku ztepilého

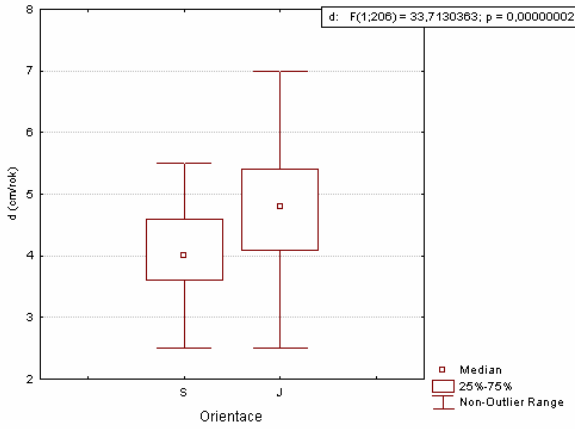
Průměrné aktuální délkové přírůsty větví za posledních 10 let (cm/rok)				Výška (m)			
ahl_s1	4,3	ahl_j1	5,4	ahl_s1	7,8	ahl_j1	6,7
ahl_s2	4,0	ahl_j2	4,8	ahl_s2	7,9	ahl_j2	7,2
skup_s1	3,8	skup_j1	4,4	skup_s1	2	skup_j1	3,0
skup_s2	3,9	skup_j2	4,4	skup_s2	3,2	skup_j2	4,9

Obr. 21: Srovnání aktuálních délkových přírůstů na hranici lesa

ahl_s1 x ahl_j1

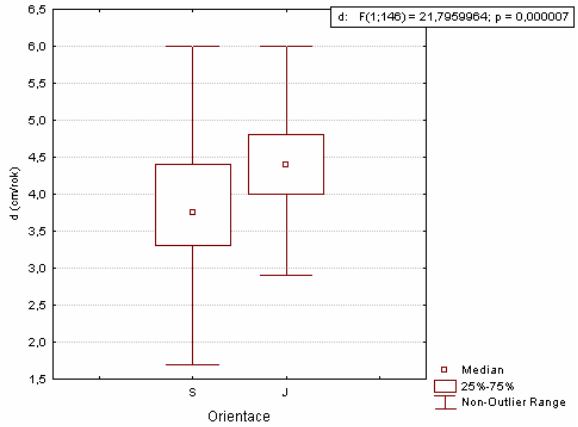


ahl_s2 x ahl_j2

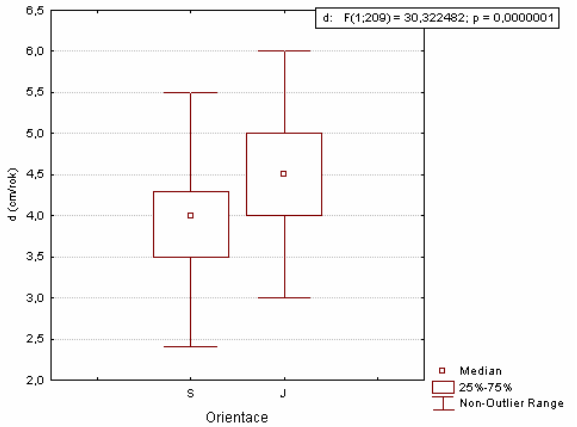


Obr. 22: Srovnání aktuálních délkových přírůstů stromových skupinek

skup_s1 x skup_j1



skup_s2 x skup_j2



5.5 Teplotní indikátory

Z naměřených teplotních dat byly vypočítány vybrané teplotní indikátory.

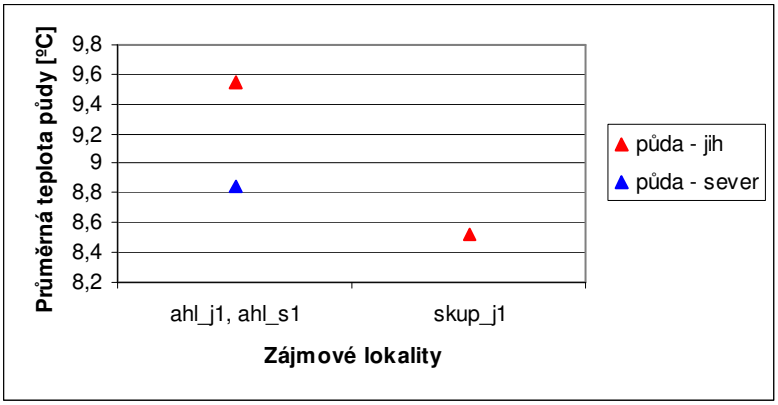
V roce 2005 došlo k zaznamenání hodnot teplot půdy pouze na stanovištích Zadní Planiny (ahl_s1), a jižně orientovaných lokalitách Luční hory (ahl_j1, skup_j1).

Ve sledovaném časovém období 23.7.-9.10.2005 byly naměřeny nejvyšší absolutní a nejnižší absolutní údaje teploty půdy v jižní expozici stromových skupinek Luční hory (skup_j1) (Tab. 7). Rozdíl mezi průměrnou teplotou sledovaného období mezi opačně orientovanými svahy (ahl_s1 x ahl_j1) činí 0,7ºC ve prospěch jižně orientované lokality, nejnižší průměrná teplota byla zjištěna ve stromových skupinkách (skup_j1) (Obr. 23). V jižní expozici na hranici lesa byla také zjištěna vyšší hodnota sumy teplot 5ºC a více (Tab. 7), a to i přes stejný počet dní s teplotou vyšší než 5ºC (79 dní na obou lokalitách hranice lesa). Nižší suma teplot 5ºC byla spočtena ve stromových skupinkách (skup_j1), což odpovídá nižšímu počtu dní (73) s touto 5ºC hodnotou.

Tab. 7: Vybrané ukazatele teploty půdy (-10 cm) za období 23.7.-9.10.2005

Lokalita	Suma teplot >5°C	Absolutní minimum (°C)	Absolutní maximum (°C)	Průměrná teplota sledovaného období (°C)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce (°C)
ahl_s1	699	5,9	12,9	8,8	9,4 (srpen)
ahl_j1	754	6,6	12,8	9,5	9,8 (září)
skup_j1	648	3,0	13,5	8,5	9,1 (srpen)

Obr. 23: Průměrná teplota půdy v období 23.7.-9.10.2005



V roce 2006 byly měřeny teploty půdy na hranici lesa Zadní Planiny (ahl_s1), Luční hory (ahl_j1) a na opačně orientovaných stanovištích stromových skupinek Luční hory (skup_s1, skup_j1). Teploty vzduchu byly zaznamenány pouze pro plochy na hranici lesa.

Ve sledovaném období (24.7.-9.10. 2006) byl na všech plochách naměřen stejný počet dní (78) s teplotou půdy minimálně 5ºC. Suma teplot půdy s minimem 5ºC je však na různých stanovištích rozdílná: vyšší hodnoty teplotní sumy byly vypočteny na severně orientovaných plochách hranice lesa i stromových skupinek (ahl_s1, skup_s1) (Tab. 8). Na hranici lesa vychází vyšší absolutní minimum a nižší hodnota absolutního maxima teploty půdy na severně orientované ploše (ahl_s1), ve stromových skupinkách je na severně orientovaném svahu (skup_s1) hodnota absolutního minima nižší, naopak hodnota absolutního maxima vyšší (Tab. 8). Průměrné teploty půdy měřeného období jsou srovnatelné (Obr. 24, Tab. 8).

Tab. 8: Vybrané ukazatele teploty půdy (-10 cm) za období 24.7.-9.10.2006

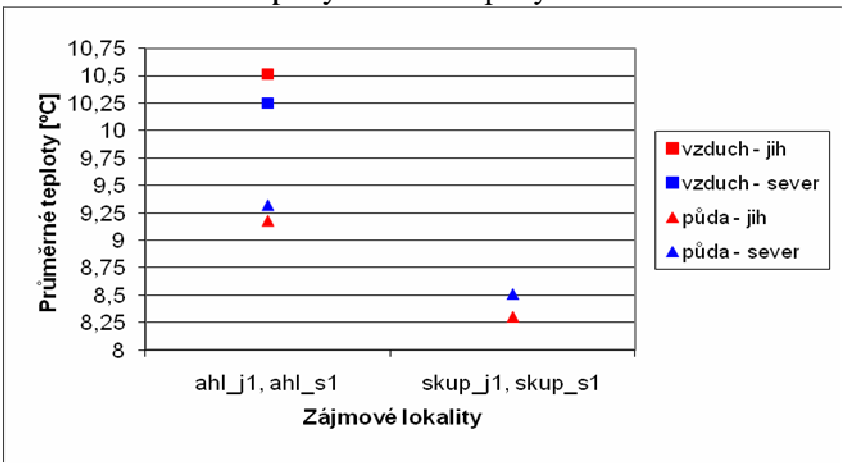
Lokalita	Suma teplot >5°C	Absolutní minimum (°C)	Absolutní maximum (°C)	Průměrná teplota sledovaného období (°C)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce (°C)
ahl_s1	727	6,7	11,9	9,3	10,5 (červenec)
ahl_j1	715	4,9	13,8	9,2	11,5 (červenec)
skup_s1	664	5,0	12,7	8,5	12,1 (červenec)
skup_j1	648	5,9	11,9	8,3	11,4 (červenec)

Absolutní minima a maxima teploty vzduchu jsou srovnatelné (Tab. 9) s vyššími hodnotami teplot zjištěnými na jižně orientovaném svahu. Průměrná teplota vzduchu sledovaného období je také podobná (Obr. 24). Vyšší suma teplot vzduchu s hodnotami vyššími než 5ºC byla zjištěna v jižní expozici hranice lesa. Nejteplejším měsícem z měřeného období byl na všech lokalitách červenec (Tab. 8, 9).

Tab. 9: Vybrané ukazatele teploty vzduchu v období 24.7.-9.10.2006

Lokalita	Suma teplot >5°C	Absolutní minimum (°C)	Absolutní maximum (°C)	Průměrná teplota sledovaného období (°C)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce (°C)
ahl_s1	779	1,5	23,4	10,3	16,4 (červenec)
ahl_j1	798	1,7	25,6	10,5	16,6 (červenec)

Obr. 24: Průměrné teploty vzduchu a půdy v období 24.7.-9.10.2006



V roce 2007 byly měřeny jak teploty půdy, tak teploty vzduchu na komplementárních lokalitách Zadní Planiny a Luční hory (ahl_s1, ahl_s1) a také na komplementárních lokalitách stromových skupinek Luční hory (skup_s1, skup_j1).

V tomto roce již bylo vymezeno vegetační období na dvou sledovaných plochách: v severní expozici Zadní Planiny (ahl_s1), kde trvá v intervalu 6.5.-20.10., a na jižně orientovaném svahu Luční hory (ahl_j1), kde je vymezeno od 4.5. do 23.10. 2007. Vypočítané teplotní indikátory pro vegetační období na těchto dvou lokalitách jsou uvedeny v závorce v Tab. 10 a Tab.11.

Ve sledovaném období 16.6.-16.10.2007 byla zjištěna vyšší suma teplot půdy nad 5°C na jižně orientovaném svahu na hranici lesa (ahl_j1), což odpovídá i vyššímu počtu dní s teplotou půdy nad 5°C (ahl_s1 115 dní, ahl_j1 121 dní). Ve stromových skupinkách byla suma teplot půdy vyšší v severní expozici (skup_s1) (Tab. 10), a to i přes nižší počet dní s touto mezní hodnotou (skup_s1 100 dní, skup_j1 107 dní). Hodnoty absolutních minim půdy jsou nižší na severně orientovaných svazích, a to pro hranici lesa (ahl_s1) i pro stromové skupinky (skup_s1) (Tab.10). Vyšší absolutní maximum teploty půdy na hranici lesa bylo zaznamenáno pro plochu v jižní expozici (ahl_j1), pro stromové skupinky byla vyšší hodnota maximální teploty půdy zjištěna na severně orientované ploše (skup_s1). Průměrná teplota půdy sledovaného období je na hranici lesa shodná, pro stromové skupinky srovnatelná (Obr. 25, Tab. 10). Nejteplejším měsícem je pro severně exponované stanoviště na hranici lesa na Zadní Planině (ahl_s1) červenec, pro ostatní plochy je nejteplejším měsícem srpen (Tab. 10).

Tab. 10: Vybrané ukazatele teploty půdy (-10 cm) v období 16.6.-16.10. 2007, v závorce uvedené hodnoty pro vegetační období

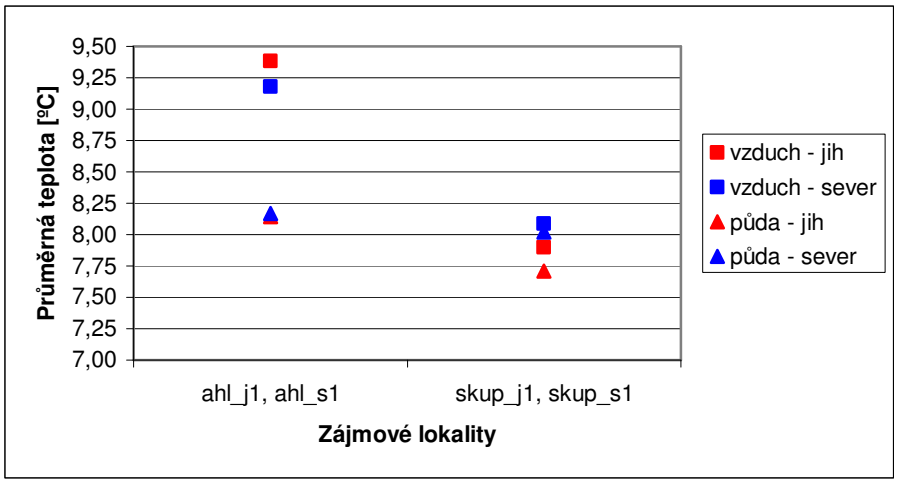
Lokalita	Délka vegetačního období (dny)	Suma teplot >5°C	Absolutní minimum (°C)	Absolutní maximum (°C)	Průměrná teplota sledovaného období (°C)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce (°C)
ahl_s1	168	970 (1194)	3,3 (2,8)	11,7 (11,7)	8,1 (7,7)	10,0 (červenec)
ahl_j1	173	992 (1263)	4,3 (2,9)	12,1 (12,6)	8,1 (7,8)	9,7 (srpen)
skup_s1		892	2,3	14,0	8,0	10,2 (srpen)
skup_j1		878	3,0	12,1	7,7	9,6 (srpen)

Ve sledovaném období byla zjištěna vyšší suma teplot vzduchu s minimální hodnotou 5ºC na jižně orientované lokalitě na hranici lesa (ahl_j1). Což odpovídá i vyššímu počtu dní s touto minimální teplotou: ahl_s1 99 dní, ahl_j1 100 dní. Ve stromových skupinkách byla zjištěna vyšší hodnota sumy teplot vzduchu nad 5ºC na severně orientovaném stanovišti, což odpovídá i vyššímu počtu dní s touto mezní hodnotou: skup_j1 89 dní, skup_s1 94 dní. Absolutní minima teplot vzduchu jsou na všech stanovištích během sledovaného období velmi podobná. Vyšších hodnot absolutních maxim vzduchu je dosaženo na obou jižně orientovaných lokalitách (Tab. 11) Průměrná teplota ve sledovaném období je srovnatelná v obou komplementárních lokalitách, s rozdílem 0,2ºC (Tab. 11, Obr. 25). Nejteplejším měsícem z hlediska teploty vzduchu je pro všechny sledované lokality srpen (Tab. 11).

Tab. 11: Vybrané ukazatele teploty vzduchu v období 16.6.-16.10. 2007, v závorce uvedené hodnoty pro vegetační období

Lokalita	Suma teplot >5°C	Absolutní minimum (°C)	Absolutní maximum (°C)	Průměrná teplota sledovaného období (°C)	Průměrná teplota nejteplejšího měsíce (°C)
ahl_s1	1052 (1477)	-2,9 (-5,2)	26,9 (26,9)	9,2 (9,3)	11,9 (srpen)
ahl_j1	1077 (1525)	-2,9 (-6,7)	27,4 (27,4)	9,4 (9,3)	12,1 (srpen)
skup_s1	920	-6,0	24,6	8,1	10,5 (srpen)
skup_j1	876	-6,1	25,7	7,9	10,4 (srpen)

Obr. 25: Průměrné teploty vzduchu a půdy v období 16.6.-16.10. 2007



V roce 2008 byly poprvé měřeny teploty vzduchu a půdy také na plochách na hranici lesa (ahl_s2, ahl_j2) a plochách ve stromových skupinkách (skup_s2, skup_j2) na Malém Šišáku. V tomto roce bylo možno vymezit vegetační období pouze na severně orientovaném svahu Zadní Planiny (ahl_s1), a to od 23.5. do 25.10., pro jižní expozici stromových skupinek na Luční hoře (skup_j1): 24.5.-26.10., a pro severně orientovanou plochu stromových skupinek Luční hory (skup_s1): 26.5.-4.10.2008. Teplotní indikátory pro tato vegetační období jsou uvedena v závorce v Tab. 12 a Tab. 13. Vzhledem k technickým závadám dataloggerů neexistují data pro jižně orientované svahy hranice lesa (ahl_j1, ahl_j2).

Plocha stromových skupinek na severně orientovaném svahu Luční hory (skup_s1) vykazuje větší sumu teplot půdy převyšujících mez 5ºC než komplementární lokalita na jižně orientovaném svahu (skup_j1), a to i přes stejný počet dní převyšujících hranici 5ºC (77 dní). Naopak, vyšší suma teplot půdy odpovídá na jižně orientované lokalitě Malého Šišáku (skup_j2) vyššímu počtu dnů s minimální teplotou 5ºC (skup_s2 77 dní, skup_j2 90 dní). Hodnoty absolutního minima půdy stromových skupinek na Luční hoře (skup_s1, skup_j1) jsou srovnatelné (rozdíl 0,2ºC) s nižší hodnotou na severně orientované ploše (Tab. 12). Ve stromových skupinkách na Malém Šišáku bylo nižší hodnoty absolutního minima půdy také dosaženo na severně orientovaném stanovišti (skup_s2). Vyšší maximální teploty půdy byly ve sledovaném období shodně zjištěny v severních expozicích (Tab. 12). Průměrné teploty sledovaného období se na komplementárních lokalitách stromových skupinek liší o 0,4ºC, vyšší průměrné teploty půdy byly na Luční hoře zjištěny na severně orientovaném svahu (skup_s1), na Malém Šišáku pak na jižně orientovaném svahu (skup_j2) (Tab. 12, Obr. 26). Nejteplejším měsícem je srpen (Tab. 12).

Tab. 12: Vybrané ukazatele teploty půdy (-10 cm) v období 4.7.-31.10. 2008, v závorce uvedené hodnoty pro vegetační období

Lokalita	Délka vegetačního období (dny)	Suma teplot >5°C	Absolutní minimum (°C)	Absolutní maximum (°C)	Průměrná teplota sledovaného období (ºC)	Průměrná t nejteplejšího měsíce (°C)
ahl_s1	156	722 (1033)	2,7 (2,7)	11,2 (11,3)	7,3 (7,6)	9,6 (srpen)
ahl_j1		-	-	-	-	-
ahl_s2		774	1,7	13,4	7,6	10,2 (srpen)
ahl_j2		-	-	-	-	-
skup_s1	132	716 (1022)	1,9 (2,1)	13,0 (13,0)	7,2 (8,3)	9,6 (srpen)
skup_j1	156	666 (959)	2,1 (2,1)	11,1 (11,1)	6,8 (7,1)	9,0 (srpen)
skup_s2		699	1,6	12,3	7,0	9,5 (srpen)
skup_j2		769	2,4	11,8	7,4	9,2 (srpen)

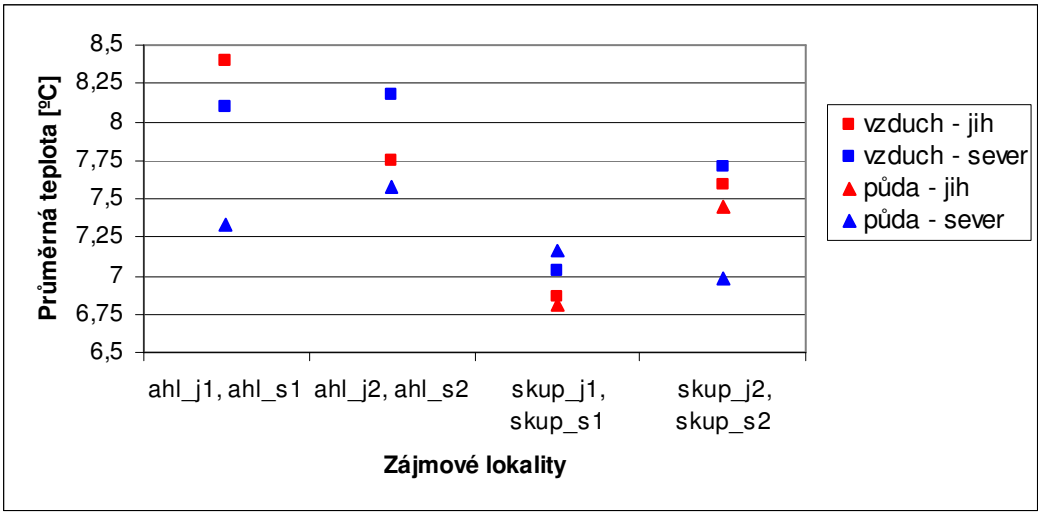
Poznámka: „-„ bez údajů

V severní expozici stromových skupinek byly vypočteny vyšší sumy teploty vzduchu nad 5ºC v porovnání s jižní expozicí, a to i přes odpovídající si počet dní s touto mezní teplotou (skup_s1 77 dní, skup_j1 76 dní, skup_s2 a skup_j2 81 dní). Nižší suma teplot nad 5ºC na hranici lesa Zadní Planiny (ahl_s1) odpovídá menšímu počtu dní převyšujících tuto hodnotu (ahl_s1 85 dní, ahl_j1 89 dní). Nižší suma teplot na jižně orientovaném svahu Malého Šišáku odpovídá menšímu počtu dní s teplotou vzduchu s minimem 5ºC (ahl_s2 85 dní, ahl_j2 82 dní). Na severně orientovaných svazích (ahl_s1, ahl_s2, skup_s1, skup_s2) byly zjištěny vyšší hodnoty absolutního minima v porovnání s komplementárními jižními lokalitami (Tab. 13). Na jižně orientovaných lokalitách na Luční hoře (ahl_j1, skup_j1) byly zjištěny vyšší maximální teploty vzduchu ve srovnání s lokalitami v severní expozici (ahl_s1, skup_s1). Naopak, na svazích Malého Šišáku byly vyšší maximální teploty vzduchu zjištěny na severně orientovaných svazích (ahl_s2, skup_s2) (Tab. 13). Průměrná teplota vzduchu sledovaného období je ve stromových skupinkách srovnatelná (rozdíly 0,1ºC, Tab. 13, Obr. 26), Průměrná teplota vzduchu sledovaného období je na hranici lesa Malého Šišáku vyšší na severně orientovaném svahu (ahl_s2, o 0,5ºC). Na hranici lesa Luční hory (ahl_j1) je průměrná teplota vzduchu sledovaného období vyšší o 0,3ºC v porovnání s komplementární severní lokalitou (ahl_s1). Na lokalitách Zadní Planina (ahl_s1) a Luční hora (ah_j1) jsou nejteplejšími měsíci červenec, na Malém Šišáku je maximum posunuto na srpen.

Tab. 13: Vybrané ukazatele teploty vzduchu v období 4.7.-31.10. 2008, v závorce uvedené hodnoty pro vegetační období

Lokalita	Suma teplot >5°C	Absolutní minimum (°C)	Absolutní maximum (°C)	Průměrná teplota sledovaného období (ºC)	Průměrná t nejteplejšího měsíce (°C)
ahl_s1	903 (1386)	-4,0 (-2,5)	22,5 (22,5)	8,1 (9,3)	11,6 (červenec)
ahl_j1	946	-4,1	23,8	8,4	11,8 (červenec)
ahl_s2	915	-4,1	22,8	8,2	11,5 (srpen)
ahl_j2	856	-4,4	22,4	7,7	10,9 (srpen)
skup_s1	771 (1099)	-4,9 (-2,9)	20,9 (20,9)	7,0 (8,8)	10,3 (červenec)
skup_j1	751 (1137)	-5,1 (-3,8)	21,5 (21,9)	6,9 (7,9)	10,1 (červenec)
skup_s2	859	-4,4	23,1	7,7	11,1 (srpen)
skup_j2	840	-4,7	21,8	7,6	10,8 (srpen)

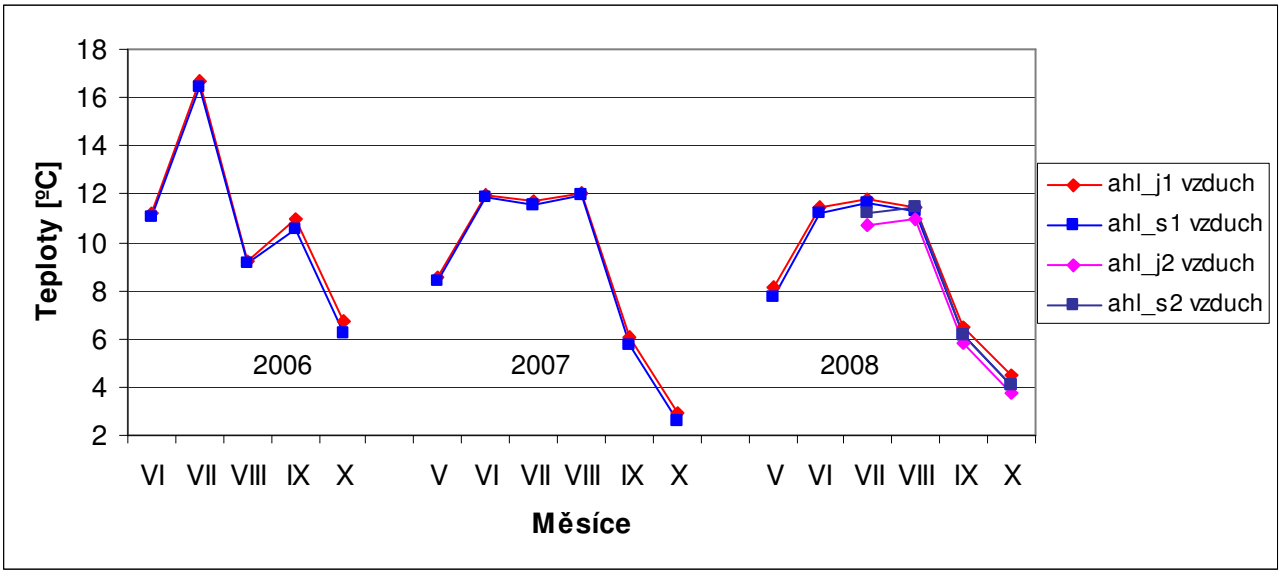
Obr. 26: Průměrné teploty vzduchu a půdy v období 4.7.-31.10. 2008



5.6 Průměrné měsíční teploty

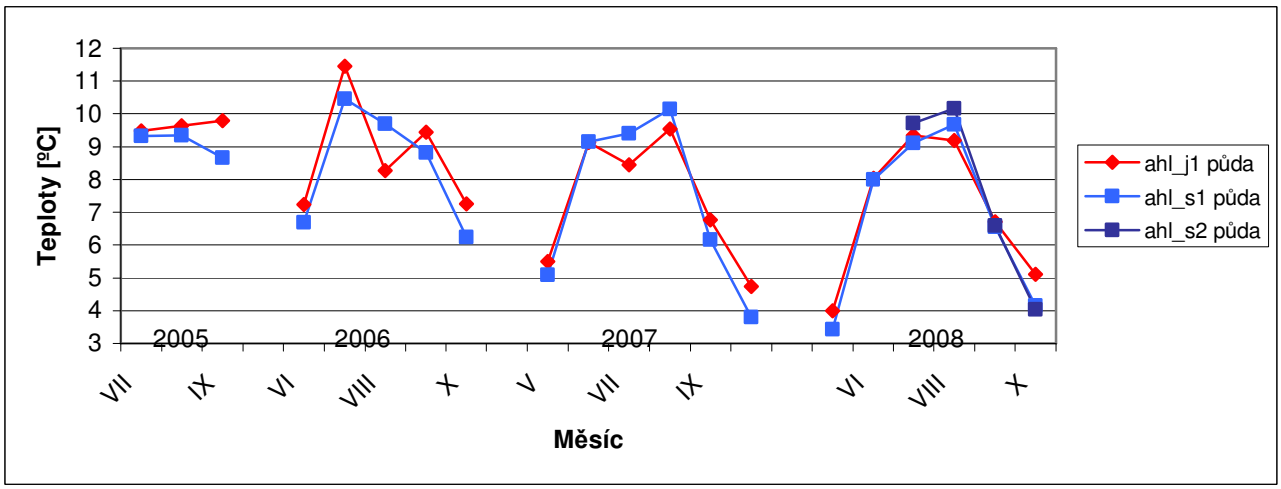
Průměrné měsíční teploty vzduchu během vegetačního období (Obr. 27) vykazují na hranici lesa na jižním svahu Luční hory (ahl_j1) a na severním svahu Zadní Planiny (ahl_s1) podobný průběh teplotních poměrů. V září a říjnu jsou severní svahy chladnější vlivem zastínění. Na severní lokalitě Malého Šišáku byly vypočteny vyšší měsíční průměrné teploty vzduchu než na jižním svahu. Rozdíl je však maximálně o 0,5ºC.

Obr. 27: Průměrné měsíční teploty vzduchu během vegetačního období na hranici lesa



Průměrné měsíční teploty půdy v 10 cm pod povrchem jsou vyšší na jižně orientovaných svazích sledovaných lokalit na hranici lesa (Obr. 28). V srpnových měsících 2006 a 2007 je pokles teplot na těchto svazích pravděpodobně způsoben změnou sklonu dopadajících paprsků mezi korunami stromů. V září a říjnu jsou severní svahy chladnější, a to vlivem zastínění. Severně orientovaný svah Malého Šišáku má vyšší průměrné měsíční teploty, a to až o 0,6ºC (červenec 2008).

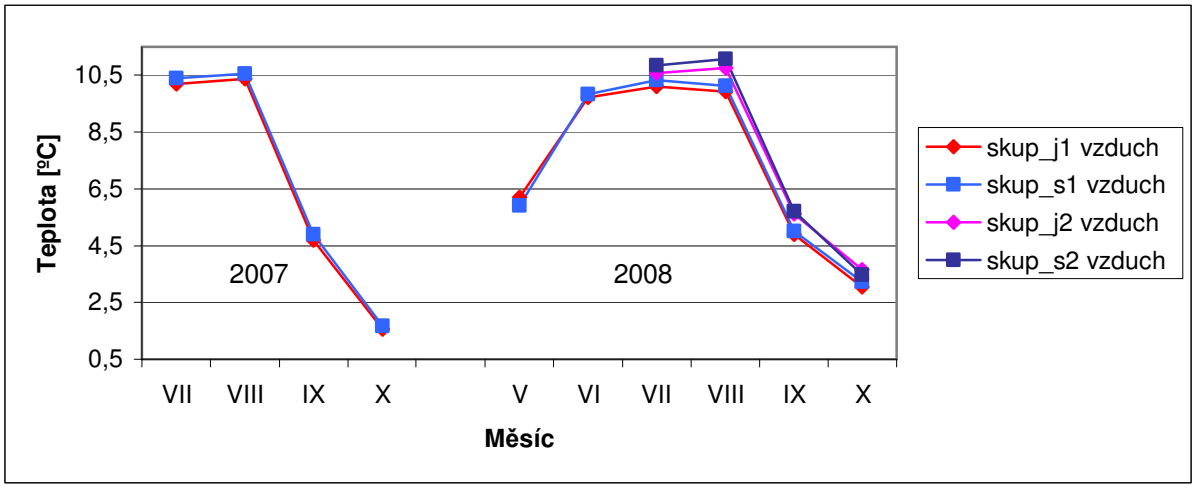
Obr. 28: Průměrné měsíční teploty půdy (-10 cm) během vegetačního období na hranici lesa



Měsíční teplotní průměry vzduchu stromových skupinek mají podobný chod na severním i jižním svahu během vegetačního období (Obr. 29). Jižní svahy jsou stejně jako u

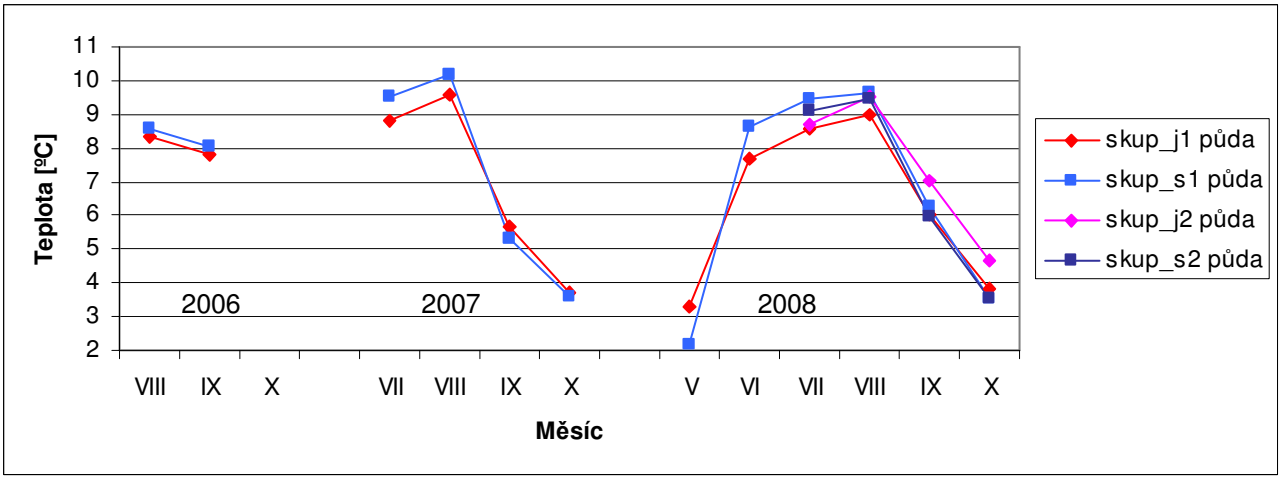
průměrného měsíčního chodu teplot půdy chladnější. Na Luční hoře je severně orientovaný svah teplejší o 0,2ºC, na Malém Šišáku o 0,3ºC.

Obr. 29: Průměrné měsíční teploty vzduchu stromových skupinek



Průměrné měsíční teploty půdy na stanovištích stromových skupinek vykazují podobný průběh během vegetačního období. Teplejší je však severně orientovaný svah, a to o až 0,9ºC na Luční hoře, a o 0,4ºC na severním svahu Malého Šišáku (Obr. 30). Během září a října jsou tyto rozdíly smazány a teplejšími se stávají svahy s jižní expozicí z důvodu zastínění svahů severních.

Obr. 30: Průměrné měsíční teploty půdy (-10 cm) stromových skupinek

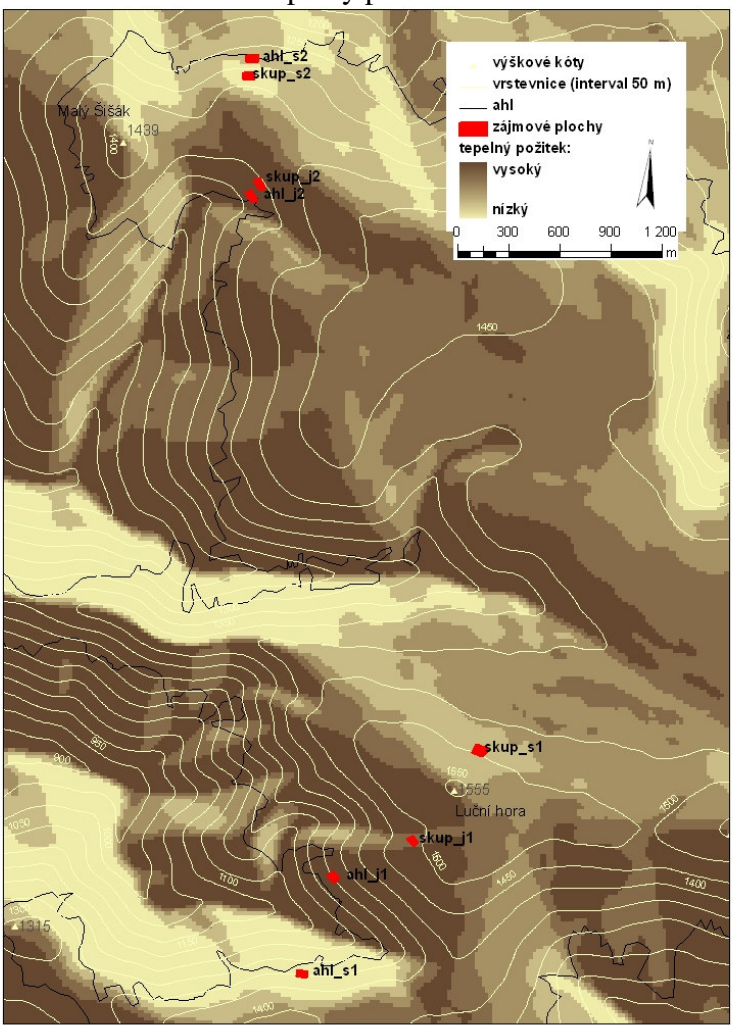


5.7 Vztah potenciálního tepelného požitku a měřených teplot

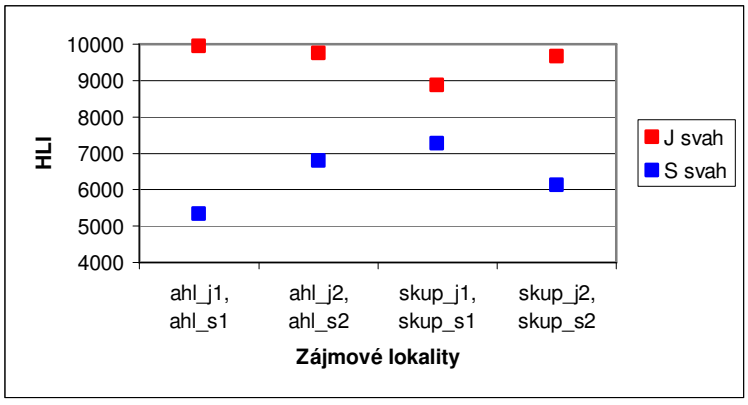
Pokud srovnáme průměrné hodnoty tepelného požitku (Obr. 31) zjistíme, že nejvyšších potenciálních hodnot teplot přízemní vrstvy vzduchu (resp. povrchu půdy) by mělo být

dosaženo na hranici lesa na lokalitě Luční hora (ahl_j1, Obr. 32). Druhé nejvyšší hodnoty by měla mít plocha na hranici lesa na jižním svahu Malého Šišáku (ahl_j2). Naopak nejnižší hodnoty bychom měli nalézt na severně orientovaném svahu Zadní Planiny (ahl_s1) a dále ve stromových skupinkách na severně orientovaném svahu Malého Šišáku (skup_s2) (Obr. 32).

Obr. 31: Potenciální tepelný požitek

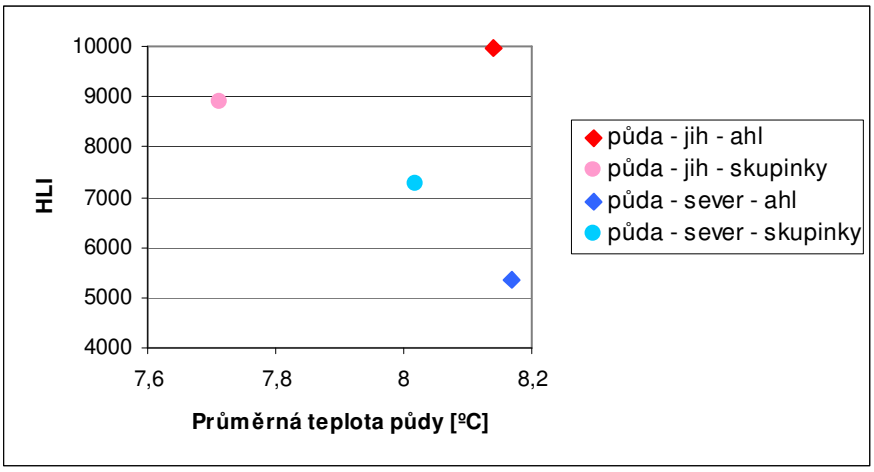


Obr. 32: Srovnání lokalit dle průměrné hodnoty HLI



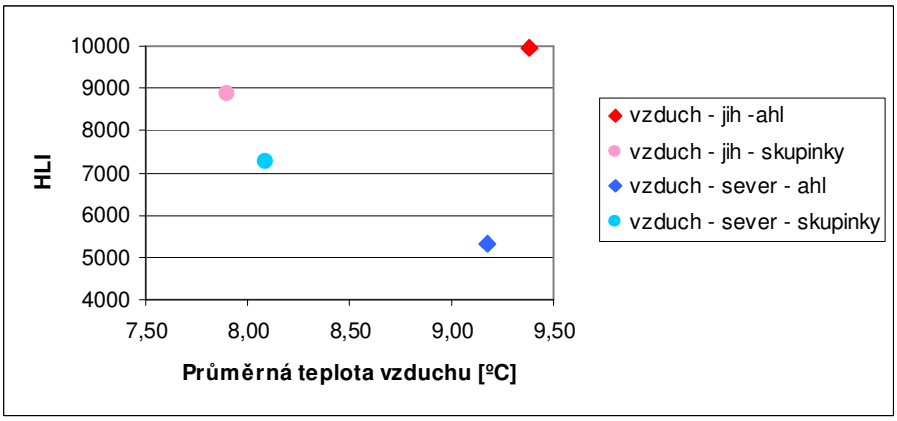
Pokud srovnáme průměrné teploty půdy roku 2007 s potenciálním tepelným požitkem ukazuje se, že na hranici lesa vyšším hodnotám průměrné teploty půdy odpovídají vyšší hodnoty HLI. U stromových skupinek si hodnoty průměrné teploty a heat loadu neodpovídají (obr. 33).

Obr. 33 : Vztah mezi průměrnou teplotou půdy ve sledovaném období 2007 a HLI



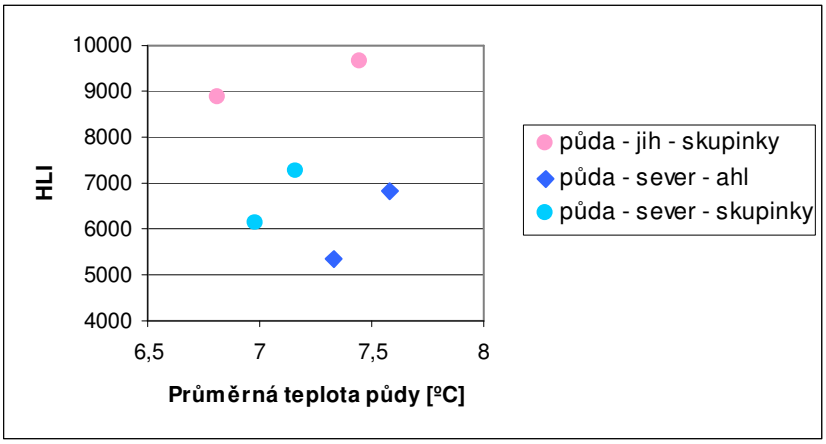
Průměrné teploty vzduchu sledovaného období 2007 v porovnání s odpovídající hodnotou potenciálního tepelného požitku ukazují, že na hranici lesa vyšší hodnota HLI odpovídá vyšším naměřeným hodnotám, u stromových skupinek si změřené teploty a tepelný požitek neodpovídají (Obr. 34).

Obr. 34: Vztah mezi průměrnou teplotou vzduchu ve sledovaném období 2007 a HLI



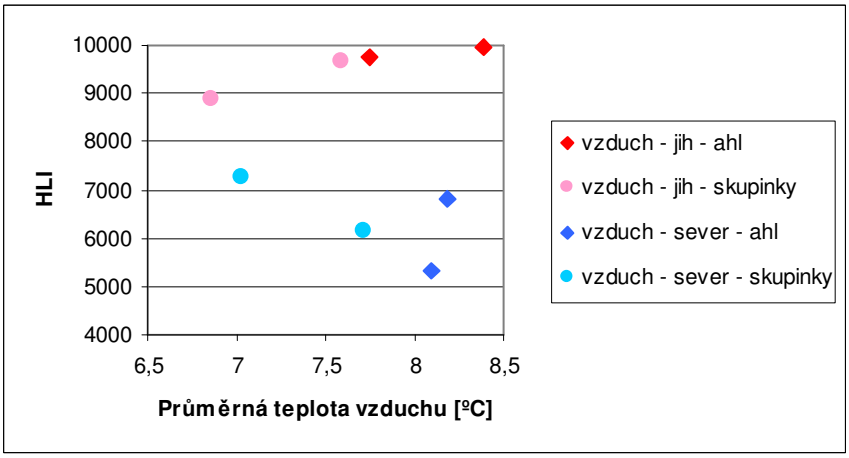
Vztah mezi průměrnou teplotou půdy roku 2008 a odpovídajícím tepelným požitkem v oblasti stromových skupinek není (Obr. 35).

Obr. 35: Vztah mezi průměrnou teplotou půdy ve sledovaném období 2008 a HLI



Zdá se, že mezi hodnotami průměrné teploty vzduchu a odpovídajícím tepelným požitkem v roce 2008 neexistuje žádný vztah v oblasti hranice lesa ani v oblasti stromových skupinek (obr. 36).

Obr. 36: Vztah mezi průměrnou teplotou vzduchu ve sledovaném období 2008 a HLI



5.8 Odtávání sněhové pokrývky

Na studovaných plochách bylo v jarních měsících sledováno odtávání sněhové pokrývky. V prvním sledovaném období (8.4. 2009) ležela na všech lokalitách souvislá sněhová pokrývka. Na lokalitě na Zadní Planině (ahl_s1) došlo k měření až 18.4., proto zde vychází nižší průměrná hodnota ve srovnání s lokalitou na Luční hoře (ahl_j1) (Tab. 14).

Tab. 14: Průměrná, min. a max. výška sněhové pokrývky (cm), pokryvnost (%) 8.4. a 18.4.2009

Plocha	Průměr	Min	Max	Pokrytí sněhem (%)	Poznámka
ahl_s1	144	35	190	100	Sníh po celé ploše
ahl_j1	147	85	190	100	Sníh po celé ploše
ahl_s2	203	80	275	100	Sníh po celé ploše
ahl_j2	142	110	180	100	Sníh po celé ploše
skup_s1	123	80	195	100	Sníh po celé ploše
skup_j1	94	50	140	100	Sníh po celé ploše
skup_s2	170	120	220	100	Sníh po celé ploše
skup_j2	133	70	200	100	Sníh po celé ploše

Ve druhém sledovaném období (30.4., 1.5. 2009) se souvislá sněhová pokrývka nacházela pouze na severních svazích. Místa bez sněhu byla pouze v okolí stromů. Na jižních svazích byla pozorována pouze sněhová pole (Tab. 15).

Tab. 15: Průměrná, min. a max. výška sněhové pokrývky (cm), pokryvnost (%) 30.4., 1.5. 2009

Plocha	Průměr	Min	Max	Pokrytí sněhem (%)	Poznámka
ahl_s1	111	50	175	90	Okolí stromů bez sněhu
ahl_j1	48	-	-	25	Nesouvislá
ahl_s2	69	40	130	90	Okolí stromů bez sněhu
ahl_j2	28	-	-	20	Sněhové pole
skup_s1	50	30	95	80	Okolí stromů bez sněhu
skup_j1	15	-	-	30	Nesouvislá
skup_s2	56	30	130	90	Okolí stromů bez sněhu
skup_j2	27	-	-	10	Nesouvislá

Na hranici lesa na Luční hoře (ahl_j1) byla maximální výška sněhové pokrývky 90 cm, sníh pokrýval cca 25 % plochy lokality. Na Zadní Planině (ahl_s1) se výška sněhové pokrývky pohybovala mezi 50 a 175 cm (Tab. 15). K odtání došlo pouze u kmenů stromů. V oblasti stromových skupinek na jižním svahu Luční hory (skup_j1) byla maximální výška sněhu 20 cm, nacházelo se zde jen jedno sněhové pole, na přibližně 30 % plochy. Na severním svahu Luční hory (skup_s1) ležela sněhová pokrývka přibližně na 80 % plochy. K odtání došlo jen v blízkosti stromů.

Na hranici lesa jižního svahu Malého Šišáku (ahl_j2) se nacházela dvě sněhová pole, která pokrývala přibližně 20 % stanoviště. Na severně orientovaném svahu na hranici lesa Malého Šišáku (ahl_s2) došlo k odtání pouze v okolí stromů. Výška sněhové pokrývky se pohybovala v rozmezí 40 a 130 cm (Tab. 15). Sníh v oblasti stromových skupinek v jižní expozici Malého Šišáku (skup_j2) se nacházel na méně než 10 % plochy. V severní expozici

stromových skupinek svahu (skup_s2) se nacházela souvislá sněhová pokrývka, k tání sněhu došlo pouze na kleči.

V posledním sledovaném období (13. a 15.5.2009) se sníh nevyskytoval na žádném sledovaném svahu jižní orientace (Tab. 16). Na hranici lesa Malého Šišáku (ahl_s2) se nacházela sněhová pole s výškou sněhu mezi 20 a 60 cm. Pole zaujímala plochu přibližně 50 % lokality. Na Zadní Planině (ahl_s1) se výška sněhových polí pohybovala mezi 30 a 40 cm (Tab. 16). Sněhová pole pokrývala přibližně 25 % zájmového území.

Sněhové pole u stromových skupinek Malého Šišáku (skup_s2) zaujímalo přibližně 50 % studované plochy. Výška sněhu se zde pohybovala mezi 20 a 110 cm. Lokalita stromových skupinek na severním svahu Luční hory (skup_s1) byla pokryta sněhovým polem z přibližně 50 %. Mocnost sněhu se pohybovala v rozmezí 10 a 95 cm (Tab. 16).

Celkově lze shrnout, že na severních svazích docházelo k odtávání sněhu pomaleji, než na svazích jižních. Sněhová pokrývka se na svazích s nevýhodnou expozicí udržovala o několik dní déle, byla zde také zjištěna větší mocnost sněhu v celém sledovaném období. V prvních dvou sledovaných časových horizontech byla změřena větší výška sněhu na stanovištích na hranici lesa, v posledním časovém období byla zjištěna vyšší mocnost sněhu u stromových skupinek.

Tab. 16: Průměrná, min. a max. výška sněhové pokrývky (cm), pokryvnost (%)
13.5., 15.5. 2009

Plocha	Průměr	Min	Max	Pokrytí sněhem (%)	Poznámka
ahl_s1	30-40	-	-	25	Nesouvislá
ahl_j1	0	-	-	0	Bez sněhu
ahl_s2	20-60	-	-	50	Nesouvislá
ahl_j2	0	-	-	0	Bez sněhu
skup_s1	57	10	95	50	Nesouvislá
skup_j1	0	-	-	0	Bez sněhu
skup_s2	50	20	110	50	Nesouvislá
skup_j2	0	-	-	0	Bez sněhu

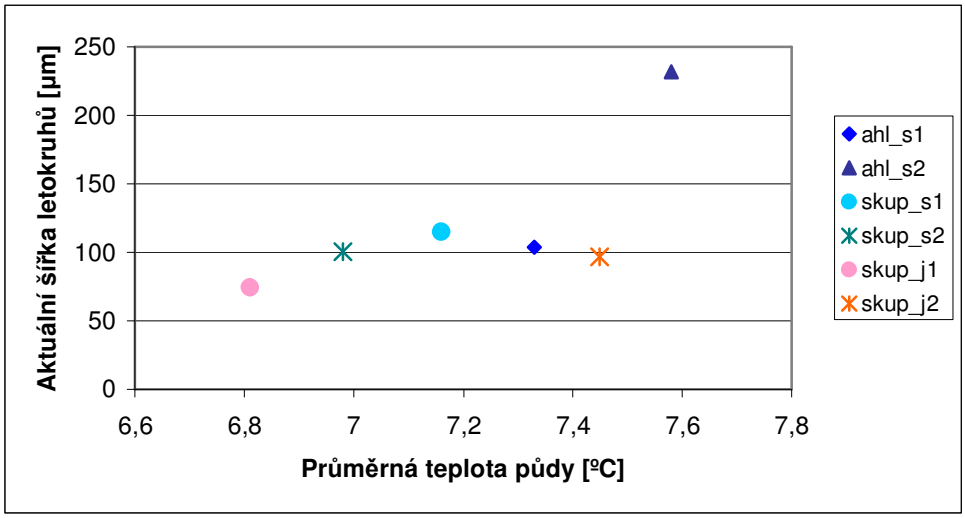
5.9 Vztah mezi růstem stromů a teplotami

5.9.1 Aktuální šířky letokruhů

Při srovnání růstu stromů dle aktuálních šířek letokruhů s naměřenými teplotami půdy v roce 2008 se ukazuje, že se vzrůstající průměrnou teplotou půdy roste průměrná aktuální šířka letokruhu (Obr. 37). V oblasti stromových skupinek se objevuje anomálie, vyšší

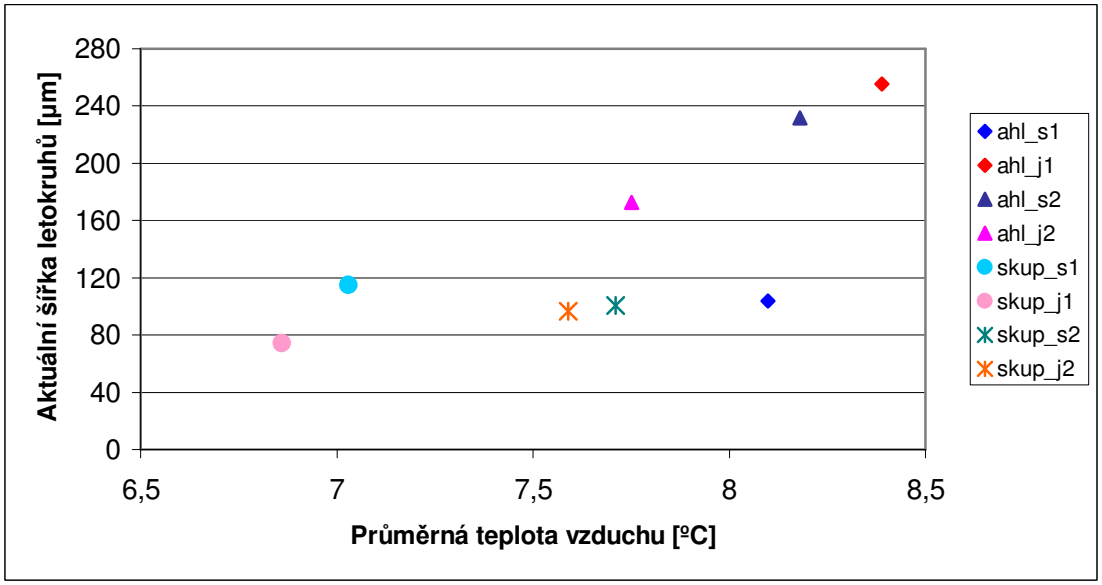
průměrné teploty půdy byly naměřeny na jižně orientovaném svahu (skup_j2), ale větší aktuální šířka letokruhu byla zjištěna na severně orientovaném svahu (skup_s2).

Obr. 37: Vztah mezi průměrnou teplotou půdy a aktuální šířkou letokruhů v roce 2008



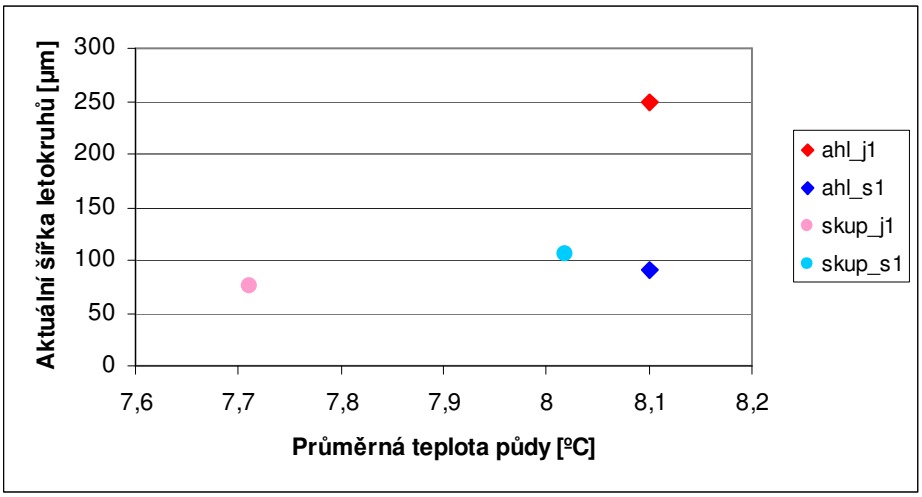
Pokud srovnáme růst stromů se změřenými teplotami vzduchu v roce 2008 zjistíme, že průměrné vyšší teplotě vzduchu odpovídají větší průměrné aktuální šířky letokruhů. Výjimku tvoří stanoviště skup_s2, skup_s1 a ahl_s1, kde je i při vyšších teplotách naměřena v porovnání s ostatními lokalitami menší šířka aktuálního letokruhu (Obr. 38). Pokud tyto tři lokality pomineme, jednalo by se o lineární závislost mezi aktuálním růstem stromů a teplotou vzduchu.

Obr. 38: Vztah mezi průměrnou teplotou vzduchu a aktuální šířkou letokruhu v roce 2008



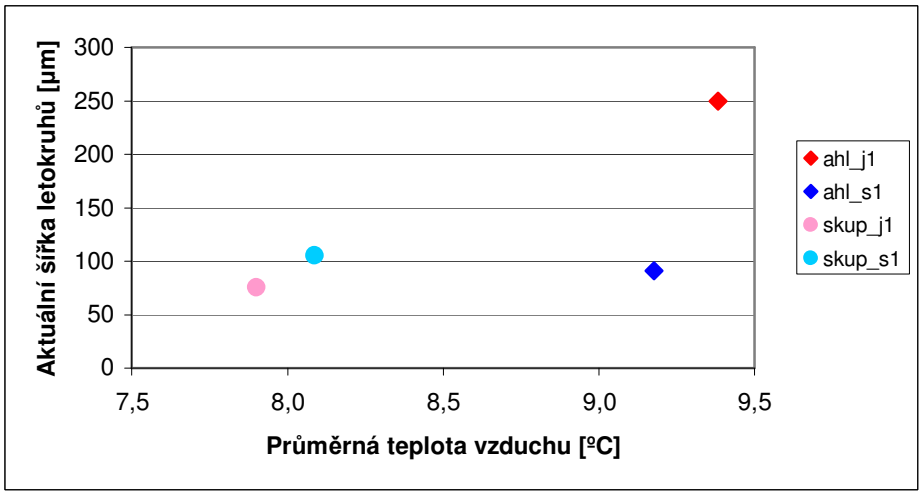
Při srovnání aktuální šířky letokruhů a teploty půdy v roce 2007 se ukazuje, že jak v oblasti stromových skupinek, tak na hranici lesa odpovídá vyšší naměřená teplota půdy větší aktuální šířce letokruhů. V celkovém srovnání graf napovídá exponenciální závislosti mezi aktuálním růstem stromů a průměrnou teplotou půdy v roce 2007 (Obr. 39).

Obr. 39: Vztah mezi aktuální šířkou letokruhů a průměrnou teplotou půdy v roce 2007



V roce 2007 odpovídá vyšší naměřená teplota vzduchu větší aktuální šířce letokruhu na srovnávaných dílčích stanovištích. Z celkového lineárního trendu se vymyká stanoviště ahl_s1, kde je při vyšších naměřených teplotách vzduchu zjištěna menší průměrná aktuální šířka letokruhu v porovnání se zbývajícími lokalitami (Obr. 40).

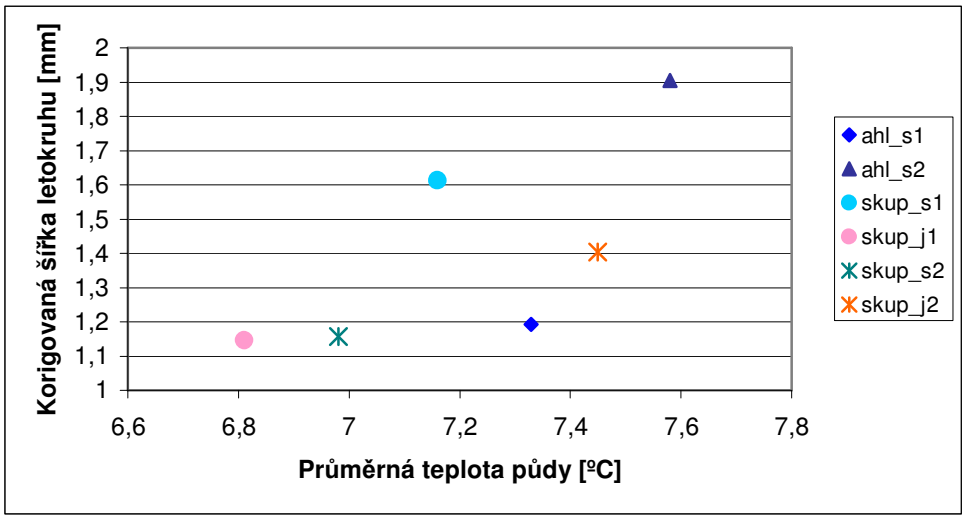
Obr. 40: Vztah mezi aktuální šířkou letokruhů a průměrnou teplotou vzduchu v roce 2007



5.9.2 Korigované šířky letokruhů

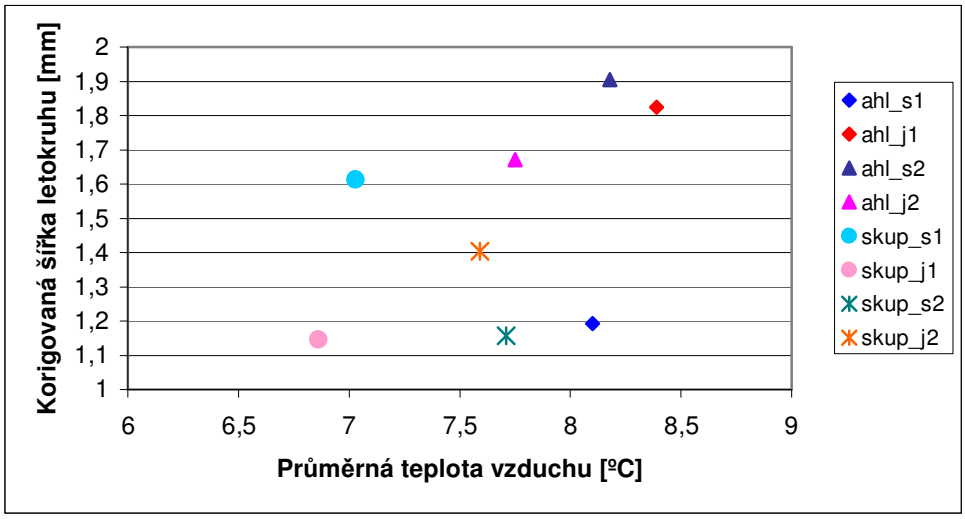
Při srovnání korigované šířky letokruhů a průměrné teploty půdy v roce 2008 zjistíme, že vyšší naměřené teploty půdy odpovídají vyšším hodnotám korigovaných šířek letokruhů. Vztah mezi těmito dvěma proměnnými se zdá být exponenciální. Z celkového trendu se odlišuje plocha skup_s1, kde je v porovnání s ostatními lokalitami zjištěna větší korigovaná šířka letokruhu (Obr. 41).

Obr. 41: Vztah mezi korigovanou šířkou letokruhu a průměrnou teplotou půdy v roce 2008



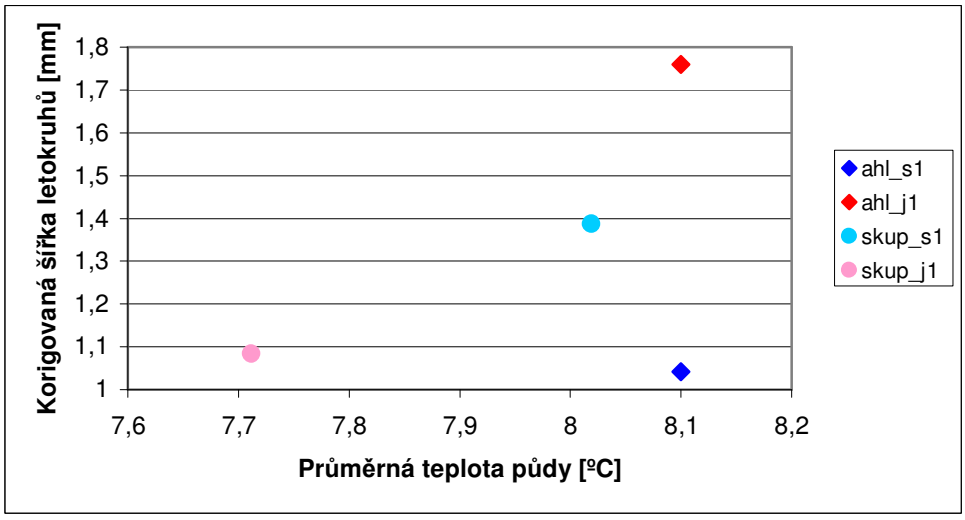
Při srovnání průměrné teploty vzduchu a korigované šířky letokruhu v roce 2008 lze pozorovat přibližně lineární závislost růstu stromů na teplotách vzduchu. Výjimku zde tvoří stanoviště skup_s2 a skup_j2, kde byla vyšší teplota vzduchu naměřena na severně orientovaném svahu (skup_s2), zatímco vyšší průměrná korigovaná šířka letokruhu byla zjištěna na jižně orientovaném svahu (skup_j2) (Obr. 42). Další anomálie je pozorovatelná v případě plochy ahl_s1, kdy v celkovém srovnání relativně vyšší teplotě vzduchu odpovídá nízká hodnota korigované šířky letokruhu.

Obr. 42: Vztah mezi korigovanou šířkou letokruhů a průměrnou teplotou vzduchu v roce 2008



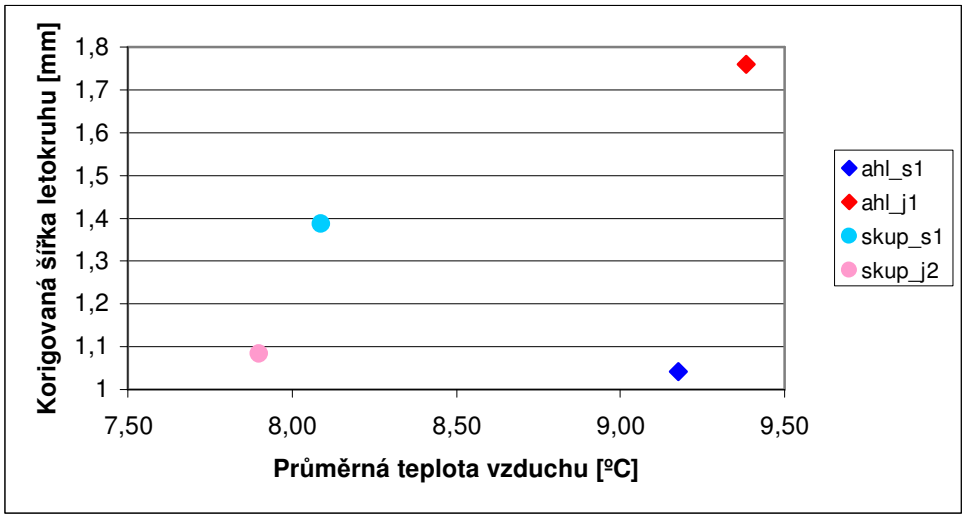
V roce 2007 odpovídá vyšší naměřená teplota půdy větší korigované šířce letokruhu na srovnávaných dílčích stanovištích. Z celkového lineárního trendu se vymyká stanoviště ahl_s1, kde je při vyšších naměřených teplotách vzduchu zjištěna menší průměrná korigovaná šířka letokruhu ve srovnání se zbývajícími lokalitami (Obr. 43).

Obr. 43: Vztah mezi korigovanou šířkou letokruhu a průměrnou teplotou půdy v roce 2007



Pokud srovnáme růst stromů dle korigované šířky letokruhu se změřenými teplotami vzduchu v roce 2007 zjistíme, že na jednotlivých lokalitách platí závislost vyšší naměřená teplota vzduchu – větší korigovaná šířka letokruhu. V celkovém srovnání tvoří výjimku plocha ahl_s1, kde mírně vyšším teplotám vzduchu odpovídá nižší hodnota korigované šířky letokruhu (Obr. 44).

Obr. 44: Vztah mezi korigovanou šířkou letokruhů a průměrnou teplotou vzduchu v roce 2007



6. Diskuze

Na vybraných stanovištích Východních Krkonoš byla porovnávána šířka letokruhů dominantních a kodominantních jedinců smrku s naměřenými teplotami vzduchu a půdy.

Na hranici lesa více přirůstaly stromy na jižním svahu Luční hory (ahl_j1), kde byly současně naměřeny i mírně vyšší teploty půdy i vzduchu během vegetačního období. Růstové charakteristiky na opačně orientovaných svazích Malého Šišáku vykazují od 40. let minulého století podobné trendy s mírně větším přírůstem na severním svahu, kde také byly naměřeny mírně vyšší teploty vzduchu během části vegetační sezony 2008.

Růst stromů v rozdílné expozici reliéfu zjišťoval ve své práci Rossi et al. (2007). Na základě sledování kambiální aktivity (dělení buněk) zjistil, že růst stromů během roku začne na severně orientovaných plochách o 1-2 týdny později a je zde také dříve ukončen. Počátek tvorby letokruhu byl pozorován o 3-10 dní dříve na jižně orientovaných lokalitách, kde byl také později ukončen. Větší přírůst odpovídá v oblasti italských Alp vyšším teplotám půdy, teploty vzduchu však byly naopak menší (0,2ºC) na jižně orientovaných lokalitách. Pokud jeho výsledky srovnáme s výsledky této práce, zjistíme, že zjištěná větší šířka letokruhů a vyšší průměrná teplota vzduchu v jižní expozici na hranici lesa v Krkonoších odpovídá většímu růstu stromů ve stejné expozici v Alpách.

U stromových skupinek byly zjištěny větší tloušťkové přírůsty na severní lokalitě Luční hory v celém růstovém období. Tento větší přírůst také koreluje s vyššími naměřenými hodnotami teploty vzduchu a půdy. Na lokalitách Malého Šišáku podle korigovaných šířek letokruhů více přirůstali jedinci na jižně orientované straně, což nesouhlasí s mírně vyššími naměřenými teplotami vzduchu během měřeného období 2008 v severní expozici.

Pokud srovnáme růst stromů na hranici lesa s růstem ve stromových skupinkách zjistíme, že dochází ke kolísání rozdílů v přírůstech mezi těmito dvěma typy stanoviště. Důvodem může být stáří stromů. Nejstarší stromy se nacházejí v severní expozici na hranici lesa na Zadní Planině (ahl_s1), kde stromy vykazují také nejmenší přírůst. Naopak nejmladší stromy rostou na severně orientovaném svahu stromových skupinek na Luční hoře (skup_s1), kde stromy nejvíce přirůstají. Jak uvádí Drápela & Zach (2000) akcelerace tloušťkového přírůstu u smrku je zpočátku poněkud pomalejší, ale trvá déle a kulminace nenastává ihned v ranném věku stromu.

Rozdílný růst stromů na odpovídajících stanovištích je pravděpodobně také způsoben nestejnou věkovou strukturou. Ta je zřejmá zejména na stanovištích umístěných na Luční hoře (J svah) a Zadní Planině (S svah). Dá se předpokládat, že se zcela nepodařilo odstranit věkový trend použitou metodou. Ze sledovaných stanovišť byla zejména Luční hora až do

konce 2. světové války ovlivněna pastvou a travařením, a proto se tam stromové porosty etablovaly později (Lokvenc, 1995).

Porovnáním detrendovaných šířek letokruhů s průměrnými měsíčními hodnotami se v ekotonu alpinské hranice lesa ve Švýcarských Alpách zabývali Paulsen et al. (2000). Tito autoři na základě svého výzkumu zjistili, že průměrná šířka letokruhů obecně koresponduje se zvýšenými teplotami vzduchu ve sledovaném období. Uvádí však také, že v některých kratších obdobích může dojít k nesouladu mezi těmito dvěma proměnnými. Pokud srovnáme jejich výsledky s výsledky této práce, zjistíme, že si odpovídají.

Při srovnání růstových charakteristik smrku s klimatickými podmínkami a antropogenním ovlivněním ve 20. století zjistíme, že zvýšené tempo růstu stromů mezi 30. a polovinou let 70. 20. století může být důsledkem vzrůstající průměrné teploty, která byla zaznamenána hlavně konci 40. a v 50. a 60. letech 20. století (Glowicki, 1998, Janda, 2008). Zmenšení tloušťkového přírůstu v 70. a 80. letech odpovídá imisní kalamitě, se kterou synergicky negativně spolupůsobila řada biotických škůdců a abiotických činitelů (Vacek et al., 2006). V období silného poškození se roční odlistění pohybovalo kolem 3,9 % (Vacek et al., 2006). Kratší a méně znatelné období růstové deprese v oblasti stromových skupinek může být způsobeno menší plochou olistění (nižším věkem). Mladší jedinci mají lepší vitalitu, jsou více odolní vůči patogenům a kyselé depozici. Od poloviny 90. let dochází ke zvětšení radiálních přírůstů, které je možné vysvětlit nárůstem teplot vzduchu a zkracováním délky zimního období v 90. letech (Dubicka & Glowicki, 2000). Období zvýšených přírůstů na mnou analyzovaných plochách, stejně jako růstová deprese, se také shoduje s dendrochronologickým šetřením provedeným Jandou (2008). Pokud srovnáme jednotlivé stanovištní chronologie mezi opačně orientovanými svahy, zjistíme podobné růstové trendy s výjimkou období růstové deprese během 70. a 80. let. Tuto depresi dříve zaznamenaly lokality na severně orientovaném svahu.

Porovnáním výšky stromů na mnou studovaných plochách na horní hranici lesa ve Východních Krkonoších s podobnými plochami v italských Alpách (modřín opadavý a smrk ztepilý) (Rossi et al., 2007) se ukazuje, že v zatímco v Alpách je větší výšky stromů dosaženo na jižně orientovaných lokalitách (rozdíl až 3 m), tak v Krkonoších to bylo na severně orientovaných svazích. Rozdíl v průměrné výšce stromů je na plochách v Krkonoších pravděpodobně způsoben nestejnou věkovou strukturou porovnávaných stromů. V Alpách byly srovnávané stromy staré přibližně 45-70 let, v Krkonoších stáří kolísá mezi 50-110 lety v případě severně orientovaného svahu Zadní Planiny a jižního svahu Luční hory. Na opačně orientovaných svazích Malého Šišáku byla zjištěna podobná výška stromů stejně jako

podobná věková struktura na obou plochách. Naráží to však na rozdílnou výškovou polohu studovaných stromů v ekotonu hranice lesa (severně orientovaná plocha je o cca 40 m níže než plocha jižní).

Na sledovaných lokalitách byly z naměřených teplotních dat počítány vybrané teplotní indikátory. Pokud však interpretujeme teplotní měření, je důležité porovnat je s dlouhodobým průměrem (1961-1990, ČHMÚ). Rok 2006 byl teplotně nadnormální, a to přibližně o 2°C (měsíc červen-říjen 2006). Vegetační sezona 2007 a 2008 byla v dlouhodobém průměru přibližně o 1°C teplotně nadnormální (měsíc květen-říjen 2008) (ČHMÚ).

Körner (1998) a Paulsen & Körner (2004) uvádějí průměrnou teplotu vzduchu během vegetačního období v rozmezí 5,5°-7,8°C. Dále uvádějí průměrnou teplotu půdy během vegetačního období mezi 6,4°-7,8°C. V této práci byly zjištěny průměrné teploty vzduchu během vegetačního období v rozmezí 7,9°-9,3°C (na hranici lesa 9,3°C, u stromových skupinek 7,9°-8,8°C), průměrné teploty půdy během vegetačního cyklu kolísají mezi 7,1°-8,3°C (na hranici lesa 7,6°-7,8°C, u stromových skupinek 7,1°-8,3°C).

Výsledky této práce vykazují jasně vyšší hodnoty, než udává Körner (1998) a Paulsen & Körner (2004). Tento rozdíl však nemusí být tak velký, pokud vezmeme v úvahu, že zmínění autoři se zabývají tímto indikátorem v celosvětovém měřítku, a že naše teplotní měření bylo provedeno v teplotně nadnormálním období. V úvahu musíme dále vzít i možnou odchylku měření, která se v případě použitých dataloggerů ve Východních Krkonoších pohybuje na hranici chyby ±0,2ºC. Gehrig-Fasel et al. (2008) zjistili pro oblast Švýcarských Alp tyto hodnoty: průměrné teploty vzduchu kolísají mezi 8°-8,8°C, průměrné teploty půdy pak mezi 7°-7,1°C. Paulsen & Körner (2004) pro oblast Alp udávají hodnoty půdy 6,3°-7,7°C. Pokud tedy srovnáme údaje získané pro oblast Alp (Gehrig-Fasel et al., 2008, Paulsen & Körner, 2004) se získanými údaji této práce, zjistíme, že si výsledky zhruba odpovídají.

Dalším počítaným indikátorem byla délka vegetačního období. Paulsen & Körner (2004) zjistili, že délka vegetačního období celosvětově kolísá mezi 92 a 365 dny. Pro oblast Alp zaznamenali, že vegetační sezona trvá 117-150 dní. V případě Východních Krkonoš byla zjištěna délka mezi 132 a 173 dny. Délka vegetační sezony si tedy zhruba odpovídá. Dubicka & Glowicki (2000) uvádí v Krkonoších během let 1900-2000 průměrnou délku vegetačního období 116 dní, s minimálním počtem 61 dní v roce 1984 a maximem 181 dnů v roce 1969. Autoři pro vymezení vegetačního období použili průměrnou teplotu vzduchu s minimem 5ºC. Takto vymezené vegetační období je kratší než dle Paulsena & Körnera (2004). Na sledovaných lokalitách by takto vymezené období dosáhlo délky 108-113 dní, s průměrnou délkou vegetační sezóny 111 dní, se shodnými hodnotami na opačně orientovaných svazích.

Pokud tedy srovnáme délku vegetačního období na základě vymezí 5ºC, vychází nám obdobné výsledky jako Dubicke & Glowickemu (2000).

Dubicka & Glowicki (2000) zjistili, že suma teplot vzduchu během letního čtvrt roku (6.-8. kalendářní měsíc) s minimem 5°C kolísá v Krkonoších během minulých 100 let v rozmezí 405°C (rok 1913) a 935°C (rok 1992), s průměrnou hodnotou 638°C. Na základě našich teplotních měření v ekotonu AHL byly zjištěny sumy teplot nad 5°C vzduchu v takto vymezeném období v intervalu 874º-1078ºC, s průměrem 1001ºC. Suma teplot vzduchu vyšší 5ºC vychází během vegetačního období (limitní hodnota půdy 3,2ºC) vyšší (rozmezí 1099°-1525°C, s průměrem 1343°C). Vyšší hodnoty sumy teplot nad 5ºC na mnou studovaných plochách jsou pravděpodobně způsobeny zaznamenáváním teplot v teplotně nadnormálním období.

Posledním zjišťovaným indikátorem byla průměrná hodnota nejteplejšího měsíce. V literatuře je často citována izoterma 10°C (Körner, 1998, 2003, 2007, Paulsen & Körner, 2004) nejteplejšího měsíce. Pro oblast Alp (Paulsen & Körner, 2004) byly zjištěny průměrné hodnoty 9,23ºC. V této práci byly zjištěny hodnoty pohybující se mezi 10,3° a 16,6°C. Průměrná hodnota nejteplejšího měsíce pak vychází 11,9°C, pokud vypočteme medián, dojdeme k hodnotě 11,3°C. Ve Východních Krkonoších tedy vychází vyšší hodnota nejteplejšího měsíce než výše citovaná izoterma 10°C. Musíme zde však zmínit, že tato vyšší hodnota je pravděpodobně způsobena měřením v teplotně nadnormálním období.

Teploty vzduchu mezi jednotlivými lokalitami vykazují menší rozdíly než teploty půdy. Tento menší rozdíl je způsoben větší vazbou na teploty volné atmosféry, a dále menším ovlivněním lokální topografií a vegetační nepravidelností (Körner & Paulsen, 2001). Srovnávané teplotní indikátory jsou s největší pravděpodobností ovlivněny mezoklimatickými specifiky oblasti. Jde o vliv anemo-orografických systémů (Jeník, 1961). Silné vzdušné proudění snižuje teploty omezením ohřevu povrchové vrstvy v oblasti relativně blízko pod exponovanými vrcholovými oblastmi (Jeník, 1961). Větrné proudění snižuje mocnost prohřáté přízemní vrstvy vzduchu, která se tvoří zejména v příznivé jižní expozici na strmějších svazích (Geiger, 1950), a tím ovlivňuje teploty u vzrostných vrcholů stromů.

Problematikou vlivu expozice na alpinskou hranici lesa se zabýval Treml & Banaš (2008). Tito autoři zjistili, že expoziční efekt se významně uplatňuje zejména u teplot nezastíněné půdy na volné ploše alpinského bezlesí. V oblasti stromových skupinek a v oblasti zapojeného lesa v oblasti alpinské hranice lesa Vysokých Sudet zjistili pouze slabé teplotní rozdíly. Předpokládají, že malý expoziční efekt je důsledkem shlazení teplotních rozdílů větrným prouděním. Jejich zjištění odpovídá i mým výsledkům teplotních měření.

V oblasti stromových skupinek se vyšší průměrné teploty půdy a vzduchu vyskytují na severně orientovaných svazích, rozdíl průměrných teplot vzduchu se pohybuje na hranici chyby měřícího teplotního čidla.

Zjištěné teplotní indikátory neukazují jasnou závislost na potenciální tepelném požitku daného místa. Pouze na jediném stanovišti (hranice lesa v jižní expozici Luční hory, ahl_j1) odpovídá nejvyšší hodnota heat load indexu nejvyšším naměřeným průměrným teplotám vzduchu a půdy. Nezávislost mezi sledovanými lokalitami a head load indexem je pravděpodobně způsobena jednak vlivem zápoje stromů (stínění kořenové zóny), výšky stromů (coupling s volnou atmosférou Körner & Paulsen, 2004) a jednak patrně i lokálními mikroklimatickými specifikami jednotlivých stanovišť.

Začátek vegetační sezony je ovlivněn odtáváním sněhu. Na sledovaných lokalitách docházelo k odtávání sněhu nejdříve na jižně orientovaných svazích, a to přibližně o 15 dní dříve než na svazích severně orientovaných. Ke stejnému výsledku došel i Rossi et al. (2007), stejně tak výsledky souhlasí i s předpokladem Holtmeiera (2009). Pokud předpokládáme, že k odtávání sněhu došlo nejprve na jižně orientovaných svazích i v předchozích letech 2007, 2008, odpovídá toto odtání i dřívějšímu nástupu vegetačního období na jižních lokalitách, jehož začátek je posunut o 2 dny. Je třeba podotknout, že zaznamenané teploty půdy (a následně počátek vegetačního období) během odtávání sněhu mohou být ovlivněny prvotním odtáním sněhu v blízkosti kmene stromů, kde jsou také umístěny teplotní čidla.

7. Závěr

Práce se zabývá vlivem teplotních poměrů na růst stromů v ekotonu alpinské hranice lesa ve Východních Krkonoších. Výsledky ukazují, že významné teplotní charakteristiky v ekotonu alpinské hranice lesa jen málo závisí na expozici svahu vůči slunečnímu záření, čemuž odpovídají i růstové poměry vzrostlých stromů.

Na hranici souvisle zapojeného lesa byly během sledovaného období zjištěny jen mírně vyšší hodnoty teplotních indikátorů na jižně orientovaných lokalitách. V oblasti stromových skupinek byly zjištěny mírně vyšší teploty půdy a vzduchu na severně orientovaných svazích, tedy v expozičně méně příznivých lokalitách.

Srovnání růstu stromů z hlediska tloušťkových přírůstů ukázalo, že na hranici lesa více přirůstají jedinci na jižně orientovaných lokalitách, ve stromových skupinkách dochází ke kolísání růstu nezávisle na orientaci svahu.

Na základě srovnání jednotlivých stanovištních chronologií bylo prokázáno období zvýšeného přírůstu (souhlasně pro stromy na stanovištích na hranici lesa, i na stanovištích stromových skupinek opačných expozic) částečně během 60. a 70. let, které je v souladu s zvýšením průměrné teploty v předchozím období. Naopak během části 80. let 20. století se shodně v celém ekotonu projevuje růstová deprese, která je na hranici lesa patrná v letech 1978 až 1986, u stromových skupinek je toto období zkráceno na období 1983-1986. Vysvětlením poklesu růstu je vliv imisní kalamity na zdravotní stav smrkové populace. Po tomto období, v 90tých letech následuje období zvýšeného růstu stromů jak v oblasti souvisle zapojeného lesa tak v oblasti stromových skupinek. Toto zvýšené tempo růstu může být důsledkem kombinace několika faktorů, a to odeznívání imisního stresu, nárůst depozice dusíku a zvýšení teplot vzduchu. Porovnáním stanovištních chronologií mezi severní a jižní expozicí bylo zjištěno, že opačně orientované svahy mají podobné růstové trendy, kromě období imisní kalamity, kdy se v severních expozicích dříve projevuje růstová deprese.

Za období získaných teplotních dat bylo zjištěno, že na studovaných lokalitách v ekotonu alpinské hranice lesa v Krkonoších vyšším naměřeným teplotám půdy a vzduchu odpovídá větší růstu stromů.

Z dílčích závěrů lze shrnout, že vliv potenciálně příznivé expozice se částečně projevuje na stanovištích na hranici lesa, v oblasti stromových skupinek nebyl expoziční efekt prokázán. To je pravděpodobně způsobeno lokální topografií a výrazným vzdušným prouděním v oblasti.

8. Seznam literatury

ASHCROFT, M. B., CHISHOLM, L. A., FRENCH, K. O. (2008): The effect of exposure on landscape scale soil surface temperatures and species distribution models. Landscape Ecology**,** 23, 2. s. 211-225.

BALATKA, B., KALVODA, J. (2006): Geomorfologické členění reliéfu Čech. 1. vydání. Kartografie Praha, Praha, 79 str.

BOLSTAD, P. V., SWIFT, L., COLLINS, F., RÉGNIÈRE, J. (1998): Measured and predicted air temperatures at basin to regional scales in the southern Appalachian mountains. Agricultural and Forest Meteorology, 91, 3, s. 161-176.

BURGA, C. A. (1988): Swiss vegetation history during the last 18000 years. New Phytolologist, 110, 4, s. 581-602.

COOK, E. R. (1985): A time series analysis approach to tree ring standardization. Dissertation at Graduate College, University of Arizona, Tucson, 171 str.

DUBICKA, M., GLOWICKI, B. (2000): Ekoklimat Karkonoszy w przekroju wieloletnim w świetle wskaźników kompleksowych. Opera Corcontica: Geoekologické problémy Krkonoš, 37, s. 55-67.

DULLINGER, S. et al. (2005): Interactions amog tree line conifers: differtial effects of pine on spruce and larch. Journal of Ecology, 93, 5, s. 948-957.

DRÁPELA, K., ZACH, J. (2000): Dendrometrie (Dendrochronologie). Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Brno, 149 str.

ENGEL, Z. (2007): Late pleistocene glaciations in the Krkonoše Mountains. In: Goudie, S., Kalvoda, J. (eds): Geomorphological Variations. Praha, Nakladatelství P3K, s. 269 – 285.

FLOUSEK, J, ŠTURSA, J. (2007): Vegetační stupně. In: Kol.: Krkonoše. Příroda, historie, život. BASET, s. 290-392.

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

GEIGER, R. (1950): Climate near the ground. Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 518 str.

Dostupné z:

[http://ia331305.us.archive.org/0/items/climatenearthegr032657mbp/climatenearthegr032657mbp.pdf]

GŁOWICKI,B. (1997): Wieloletnaia seria pomiarow temperatury powietzria na Śnieżce. Geoekologiczne problemy Karkonoszy I, s. 117–123.

HEIKKINEN, O., OBREBSKA-STARKEL, B., TUHKANEN, S. (1995): Introduction: The timberline – a changing battlefront. In: Heikkinen, O., Obrebska-Starkel, B., Tuhkanen, S: Environmental aspects of the timberline in Finland and in the Polish Carpathians. Uniwersytet Jagielloński, Kraków, s. 7-16.

HILLER, B., MÜTERTHIES, A. (2005): Humus Forms and Reforestation of an Abandoned Pasture at the Alpine Timberline (Upper Engadine, Central Alps, Switzerland). In: Broll, G., Keplin, B.: Mountain Ecosystems. Studies in Treeline Ecology. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, s. 203-218.

HLADNÝ, J., SÝKORA, B. (1983): Hydrologie, In: Sýkora, B. (eds): Krkonošský národní park. Státní zemědělské nakladatelství, Praha s. 37-41.

HOCH, G., POPP, M., KÖRNER, CH. (2002): Altitudinal increase of mobile carbon pools in Pinus Cembra suggests sink limitation of growth at the Swiss treeline. Oikos, 98, s. 361-374.

HOCH, G., KÖRNER, CH. (2003): The carbon charging of pines at the climatic treeline: a global comparison. Oecologia, 135, s. 10-21.

HOLTMEIER, F-K. (2009): Mountain timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. Advances in global change research. 36. Springer Netherlands, 437 str.

HUNČAROVÁ, E., PARZÓCH, K. (2007): Hydrologie. In: Kol.: Krkonoše. Příroda, historie, život. BASET, s. 157-165.

HRUŠKA, J., KOPÁČEK, J. (2005): Kyselý déšť stále s námi – zdroje, mechanismy, účinky, minulost a budoucnost. PLANETA, XII, 5, 24 str.

CHALOUPSKÝ, J. (1983): Geologický vývoj. In: Sýkora, B (eds): Krkonošský národní park. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, s. 11-19.

CHYTRÝ, M., KUČERA, T., KOČÍ, M. (2001): Katalog biotopů České republiky. Praha, AOPK, 307 str.

ISARD, S. A. (1986): Factors influencing soil moisture and plant community distribution on Niwot Ridge, Front range, Colorado, USA. Arctc and Alpine Research, 18, 1, s. 83-96.

JANDA, M. (2008): Letokruhová chronologie smrku pro Východní Krkonoše. Diplomová práce, PřF UK, Praha, 72 str.

JENÍK, J. (1961): Alpinská vegetace Krkonoš, Kralického Sněžníku a Hrubého Jeseníku. Teorie anemo-orografických systémů. Nakladatelství ČSAV, Praha. 412 str., 5 příloh

JENÍK, J, LOKVENC, T. (1962): Die alpine Waldgrenze im Krkonoše Gebirge. Rozpravy Československé akademie věd, 72, sešit 1, Nakladatelství ČSAV, Praha, 65 str.

JOBBÁGY, E. G., JACKSON, R. B. (2000): Global controls of forest line elevation in the northern and southern hemispheres. Global Ecology and Biogeography, 9, 3, Blackwell Publishing, s. 253-268.

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

KÖRNER, CH. (2003): Alpine plant life. Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems. 2nd Edition. Springer, 344 str.

KÖRNER, CH. (2007): Climatic treelines: conventions, global patterns, causes. In: Erdkunde, 61, s. 316-324.

KÖRNER, CH., PAULSEN, J. (2004): A world-wide study of high altitude treeline temperatures. Journal of Biogeography, 31, 5, s. 713-732.

KRÁL, V., PILOUS, V., PROSOVÁ, M., ŠEBESTA, J. (1983): Vývoj reliéfu. In: Sýkora, B. (eds): Krkonošský národní park. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, s. 19-28.

KŘÍŽEK, M., TREML, V., ENGEL, Z. (2007): Zákonitosti prostorového rozmístění periglaciálních tvarů v Krkonoších nad alpinskou hranicí lesa. In: Štursa, J., Knapik, R. (eds): Geoekologické problémy Krkonoš. Sborn. Mez. Věd. Konf., říjen 2006, Svoboda n. Úpou. Opera Corcontica, 44, 1, s. 67–79.

KULMAN, L., ÖBERG, L. (2009): Post-Little Ice Age tree line rise and climate warming in the Swedish Scandes: a landscape ecological perspektive. Journal of Ecology, 97, 3, s. 415-429.

KYNCL, T., KYNCL, J. (2002): Principy dendrochronologie. Živa, 6, s. 249-252.

LOKVENC, T. (1995): Analýza antropogenní podmíněných změn porostů dřevin klečového stupně v Krkonoších. Opera Concontica, 32, s. 99-114.

LOOKINGBILL, T. R., URBAN, D. L. (2002): Spatial estimation of air temperature differences for landscape-scale studies in montane environments. Agricultural and Forest Meteorology, 114, 3, s. 141-151.

McCUNE, B., KEON, D. (2002): Equations for potential annual direct incident radiation and heat load. Journal of Vegetation Science, 13, s. 603-606.

McCUNE, B. (2007): Improved estimates of incident radiation and heat load using non-parametric regression against topographic variables. Journal of Vegetation Science, 18, s. 751-754.

McCUTCHAN, M. H., FOX, D. G. (1986): Effect of Elevation and Aspect on Wind, Temperature and Humidity. Journal of Climate and Applied Meteorology, 25, 12, s. 1996-2013.

METELKA, L., MRKVICA, Z., HALÁSKOVÁ, O. (2007): Podnebí. In: Kol: Krkonoše. Příroda, historie, život. BASET, s. 147-155.

MIGOŃ, P., PILOUS, V. (2007): Geomorfologie. In: Kol.: Krkonoše. Příroda, historie, život. BASET, s. 103-124.

NĚMEČEK, J. a kol. (2001): Taxonomický klasifikační systém půd České republiky. Praha, ČZU, 78 str.

PARKS, S. (2003): Heat load index script (http://arcscripts.esri.com/disclaimer.asp) [10.7.2009]

PAULSEN, J., KÖRNER, CH. (2001): GIS-analysis of tree-line elevation in the Swiss Alps suggest to exposure effect. Journal of Vegetation Science, 12, s. 817-824.

PAULSEN, J., WEBER, U. M., KÖRNER, CH. (2000): Tree growth near treeline:Abrupt or Gradual Reduction with Altitude? Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 32, 1, s. 14-20.

PIERCE, K. B. Jr., LOOKINGBILL, T., URBAN, D. (2005): A simple method for estimating potential relative radiation (PRR) for landscape-scale vegetation analysis. Landscape Ecology, 20, s. 137-147.

PILOUS, V. (2007): Horopis. In: Kol.: Krkonoše. Příroda, historie, život. BASET, s. 19-28.

PLESNÍK, P. (1971): Horná hranice lesa vo Vysokých a v Belanských Tatrách. Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, 240 str., 5 mapových příloh.

PODRÁZSKÝ, V. et al. (2007): Půdy. In: Kol.: Krkonoše. Příroda, historie, život. BASET, s. 135-147.

PORTÉ, A., HUARD, F., DREYFUS, P. (2004): Microclimate beneath pine plantation, semi-mature pine plantation and mixed broadleaved-pine forest. Agricultural and forest meteorology, 126, s. 175-182.

POŠTA, P. (2005): Limnologická studie největšího jezera české strany Úpského rašeliniště v Krkonoších. Opera Corcontica, 42, 4. s. 55–68.

POTOCKI, J., VANĚK, J. (2006): Krkonošská rašeliniště. KRNAP, Vrchlabí, 32 str.

POTOCKI, J., ŠTURSA, J. (2007): Historie ochrany přírody v Krkonoších. In: Kol.: Krkonoše. Příroda, historie, život. BASET, s. 729-732.

QUITT, E. (1971): Klimatické oblasti Československa. Geografický ústav ČSAV, Brno.

ROSSI, S., DESLAURIES, A., ANFODILLO, T., CARRARO, V. (2007): Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. Oecologia, 157,1, s.1-12.

SOUKUPOVÁ, L. et al. (1995): Artic-alpine tundra in the Krkonoše, the Sudetes. Opera Concortica, 32, s. 5-88.

SPERANZA, A. et al. (2000a): Vliv člověka na vývoj lesa na Černé hoře v Krkonoších v pozdním holocénu. Archeologické rozhledy, LII, s. 632-642.

SPERANZA, A. et al. (2000b): Late-Holocene human impact and peat development in the Černá hora bog, Krkonoše Mountains, Czech Republic. The Holocene, 10, s. 575-585.

SPUSTA, V. sen., SPUSTA, V. jun. & KOCIÁNOVÁ, M. (2006): Lavinový katastr české části Krkonoš v zimním období 2003/04 a 2005/06. Opera Corcontica, 43., s. 81-93.

SVEINBJÖRNSSON, B. (2000): North Američan and European Treelines: External Forces and Internal Processes Controlling positron. Ambio, 29, 7, s. 388-395.

ŠOUREK, J. (1969): Květena Krkonoš. Český a polský národní park. Praha, Academia, 452 str.

TOLASZ, R. a kol. (2007): Atlas podnebí Česka. Praha, Olomouc, ČHMU, 255 str.

TOMÁŠEK, M., ZUSKA, V. (1983): Půdní poměry. In: Sýkora, B. (eds): Krkonošský národní park. Státní zemědělské nakladatelství, Praha, s. 59-63.

TOMÁŠEK, M (1992): Půdní mapa ČR 1:50 000: list 03-23 Harrachov. Praha, ČGU.

TOMÁŠEK, M (1993): Půdní mapa ČR 1:50 000: list 03-42 Trutnov. Praha, ČGU.

TOMÁŠEK, M (2005): Půdní mapa ČR 1:50 000: list 03-24 Malá Úpa. Praha, ČGU.

TRANQUILLINI, W. (1979): Physiological Ecology of the Alpine Timberline. Tree Existence at high Altitudes with Special Reference to the European Alps. Springer – Verlag Berlin Heidelberg New York, 131 str.

TREML, V. (2000): Horní hranice lesa v Dlouhém dolu v Krkonoších, stav a dynamika. Opera Conrcontica, 37, s. 524-531.

TREML, V. (2000): Recentní dynamika alpinské hranice lesa v Krkonoších. In: Štursa, J., Mazurski, K., R., Palácku, A., Potocka, J. (eds.): Geoekologické problémy Krkonoš. Sborník Mezinárodní vědecké konference. Opera Corcontica, Sklarska Poręba, s 367-375.

TREML, V., JANKOVSKÁ, V., PETR, L. (2008): Holocene dynamics of the alpine timberline in the High Sudetes. Biologia, 63, 1, s. 73-80.

TREML, V., BANAŠ, M. (2000): Alpine timberline in the High Sudeties. ACTA UNIVERSITATIS CAROLINAE, GEOGRAPHICA, Praha, 35, s. 83-99.

TREML, V., BANAŠ, M. (2008): The effect of exposure on alpine treeline position: a case study from the High Sudetes, Czech Republic. Artic, Antartic, and Alpine Research, 40, 4, s. 751-760.

TUHKANEN, S. (1993): Treeline in relation to climate, with special reference to oceanic areas. In: Alden, J., Mastrantonio, L., Odum, S.: Forest development in cold climates. University of Turku, Turku, s. 115-134.

VACEK, S. et al. (2006): Lesy a ekosystémy nad horní hranicí lesa v národních parcích Krkonoš. Lesnická práce, Praha, 112 str.

VACEK, S. (2007): Lesy a péče o lesní ekosystémy. In: Kol.: Krkonoše. Příroda, historie, život. BASET, s. 749-766.

VITTOZ, P., RULENCE, B., FRELÉCHOUX, F. (2008): Effect of Climate and Land-Use Change on the Establishment and Growth of Cembrain Pine (Pinus Cembra L.) over the Altitudinal Treeline Ecotone in the Central Swiss Alps. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 40, 1, s. 225-232.

WALTHER, G.-R., BEIßNER, S, POTT, R. (2005): Climate Change and High Mountain Vegetation Shifts. In: Broll, G., Keplin, B.: Mountain Ecosystems. Studies in Treeline Ecology. Springer – Verlag Berlin Heidelberg, s. 77-96.

WIESER, G. (2007): Climate at the Upper Timberline. In: Wieser, G., Tausz, M. (eds.): Trees at their upper limit. Springer, Dordrecht, 233 str.

www.nature.cz: [http://www.nature.cz/natura2000-design3/web_lokality.php?cast=1804&akce=karta&id=1000002974] 1.2.2009

Znečištění ovzduší a atmosférická depozice v datech. Tabelární ročenky (2008, 2007, 2006, 2005, 2004, 2003, 2002, 2001, 2000, 1999). Český hydrometeorologický ústav. Dostupné z: [http://www.chmi.cz/uoco/isko/tab_roc/tab_roc.html] 15.7.2009

Informace o klimatu, Český hydrometeorologický ústav.
Dostupné z: [http://www.chmi.cz/meteo/ok/infklim.html] 31.7.2009

KNIBBE, B. (2004): PAST 4. Brunn, SCIEM.