Klimatické gradienty a modelování lesních vegetačních stupňů v ČR

Climate gradients and modelling of the forest altitudinal zones in the Czech Republic

Karel Matějka
IDS, Na Komořsku 2017/2a, 143 00 Praha 4, e-mail matejka@infodatasys.cz

Abstract

The aim of this paper is the construction of a new general-purpose mathematical model for the borderlines between forest vegetation zones (FAZ). The presented model is based on the modelling of average air temperatures on the basis of a digital terrain model. Temperature correction due to the slope and exposure of a location is calibrated using an extensive database of phytocoenological relevés. The border temperatures of forest vegetation zones were determined using results of own field research, which took place primarily in Šumava Mts. (Bohemian Forest), but also in the Krkonoše Mts. (Giant Mountains) and the Krušné hory Mts. (Ore Mountains). The temperature corresponding to the alpine tree line ($8^{th}/9^{th}$ FAZ) is equal to 2.5 ° C. The relationship of FAZ boundaries of the ongoing present climate change was discussed. Pointed out is the fact that these boundaries are rather stable, but the composition of the ecosystems and the communities within those boundaries may change gradually.

Key words: climate, modelling, digital elevation model, forest altitudinal zones, temperature.

Úvod

Typologické mapování lesů bylo v České republice prováděno dlouhodobě, ale probíhalo samostatně v jednotlivých přírodních lesních oblastech (PLO). Tento stav trval, přes veškeré snahy o integraci výsledků z jednotlivých PLO, i v době zpracování oblastních plánů rozvoje lesů na přelomu 20. a 21. století. Na většině území ČR bylo potlačeno mapování 4. lesního vegetačního stupně (LVS), případně nebyl tento stupeň zaznamenáván vůbec. Navíc byl v různých oblastech kladen akcent na odlišné aspekty mapování. Na Šumavě byly zřejmé snahy o jakési vysvětlení vysokého zastoupení smrku tím, že byla chybně rozšířena plocha 8. a 7. lesního vegetačního stupně. Tento fakt je zřetelný při porovnání typologického mapování a mapy potenciální vegetace NP Šumava (NEUHÄUSLOVÁ, 2001). Přitom správné vymezení hranic vegetačních stupňů je významné pro správná rozhodnutí jak v rámci pěstební činnosti, tak při realizaci ochrany přírody. Z těchto hledisek má zvláštní význam správné umístění těch LVS, které představují ekotony (HANSEN et al., 1988; KARK et VAN RENSBURG, 2006) mezi různými biomy (ve smyslu CHYTRÝ, 2012). Jedná se tedy o 7. LVS mezi širokolistými opadavými lesy a tajgou a o 9. LVS mezi tajgou a tundrou. Z hlediska lesopěstebního tedy jde o vymezení pěstování horské formy smrku (*Picea abies*).

Cílem této práce je řešení výše uvedených problémů pomocí metod matematického modelování. Vycházeno přitom bylo z řady známých skutečností. Základem je teplotní model území, na němž je následně provedeno vymezení klimaticky podmíněných lesních vegetačních stupňů.

Bylo prokázáno, že druhové složení rostlinného společenstva lesů na Šumavě je nejvíce ovlivněno nadmořskou výškou (MATĚJKA, 2008). Je tomu tak proto, že složení přirozené vegetace na lokalitě je z velké části determinováno klimatickými poměry. Mezi nejvýznamnější klimatické charakteristiky patří průměrná teplota. Ta je závislá na geografické poloze, zejména na zeměpisné šířce, a nadmořské výšce, ale i na umístění lokality v terénu, zjednodušeně na svažitosti a expozici ke světovým stranám, protože na těchto faktorech závisí tepelný požitek stanoviště (MCCUNE et KEON 2002). Nově vyvinutý model vychází z principů analýzy tvaru terénu (WILSON et GALLANT, 2000), který společně s údaji o distribuci průměrných teplot na velkém území a s analýzou distribuce lesních fytocenóz (MATĚJKA, 2008) dokáže podat obraz o prostorovém rozmístění mapovaných jednotek potenciální vegetace, v tomto případě lesních vegetačních stupňů. Obdobné přístupy jsou aplikovány i pro jiné účely (FRANKLIN, 2009).

V transektu na Plechém (Šumava) byla objevena řada zákonitostí popisujících změny související s nadmořskou výškou v rozmezí 6. až 8. lesního vegetačního stupně. Jako zásadní se ukázala hranice 7. a 8. LVS, kde lze nalézt poměrně ostré rozdíly jak v půdním prostředí, tak ve struktuře a funkci sledovaných

společenstev (MATĚJKA et STARÝ, 2009; LEPŠOVÁ et MATĚJKA, 2010; MATĚJKA, 2011a). Tato hranice by měla mít zřejmě i vysokou důležitost při diferenciaci managementu lesů chráněných území. V 8. LVS se vyskytují (lesní) ekosystémy, které mají zvláštní charakter a chovají se podle zákonitostí, které jsou (částečně) odlišné od lesů nižších vegetačních stupňů, řada principů však může a musí být společná s lesy nižších poloh. Jedná se především o to, že půdotvorný proces se zde liší (MATĚJKA et STARÝ, 2009), částečně odlišně probíhá cyklus živin, liší se proces dekompozice organické hmoty, některé druhy edafonu a hub se mohou lišit nebo vytvářejí jiné vazby, tedy jiná společenstva (LEPŠOVÁ et MATĚJKA, 2010; BOHÁČ et MATĚJKA, 2010), světelný požitek při půdním povrchu je vyšší, v průběhu dynamiky lesa (která je spojena s rozvolněním až rozpadem stromového patra) se nemění tak výrazně jako u smíšených lesů. Z toho například vyplývá, že ani velkoplošný rozpad stromového patra se v různých společenstvech v tomto ekosystému neprojeví v takové míře, jako je tomu v nižších nadmořských výškách. Pro dobrou znalost ekosystémů podél tohoto transektu a vzhledem k jeho poloze, která je relativně neovlivněna některými lokálními specifiky (absence inverzních poloh, srážkového stínu a podobně), byl transekt vybrán jako modelový příklad pro řešení problému hranic různých lesních vegetačních stupňů.

Materiál a metodika

Model lesních vegetačních stupňů byl prvotně realizován v PLO Šumava (13). Konstrukce modelu byla rozdělena do několika následujících kroků.

Globální model průměrných teplot pro Českou republiku byl stanoven s použitím výsledků měření 22 vybraných klimatologických stanic Českého hydrometeorologického ústavu (MATĚJKA, 2010b). Pro výpočet byla zvolena data průměrných ročních teplot za období klimatického normálu 1961-1990. Model průměrných teplot (T) v závislosti na nadmořské výšce (A) a na zeměpisné šířce (φ) má podobu dvojnásobné lineární regrese

$$T = c + B_a A + B_\varphi \varphi ,$$

kde c, B_a a B_φ jsou regresní koeficienty, jejichž hodnoty byly vypočteny ve výši c = 25.80 °C, B_a = -0.00557 °C/m, B_φ = -0.318 °C/° (MATĚJKA, 2010b), z čehož vyplývá, že jeden stupeň zeměpisné šířky odpovídá 57 m nadmořské výšky.

Vliv konfigurace terénu na průměrnou teplotu byl vyhodnocen nepřímo s použitím dat 1748 fytocenologických snímků z lesů na nezamokřených půdách Šumavy. Pro tento účel byly použity snímky klasifikované ve všech třídách TWINSPAN mimo tříd *0011, *010 a *11 v boxu 4.5 (viz též MATĚJKA, 2008).

Tepelné a radiační indexy byly počítány z digitálního modelu terénu (DMT), přičemž byly použity následující indexy:

- heat – Heat load index – PARKER (1988)
- rad1 – Potenciální roční přímé záření v MJ cm^{-2} rok^{-1} – MCCUNE, KEON (2002), vzorec 1
- rad2 – Potenciální roční přímé záření v MJ cm^{-2} rok^{-1} – MCCUNE, KEON (2002), vzorec 2
- rad3 – Potenciální roční přímé záření v MJ cm^{-2} rok^{-1} – MCCUNE, KEON (2002), vzorec 3
- rad1heat – obdobně jako heat load index je počítán pro expozici korigovanou o konstantu tak, aby nejvyšší tepelný požitek vyšel ve směru k jihozápadu (používají se různé korekční konstanty, většinou 45° nebo 22,5°, zde bylo použito 22,5° ve všech případech), je zde počítán index podle modelu pro rad1 s "korigovanou expozicí"
- rad2heat - obdoba předchozího, index je počítán podle modelu pro rad2 s "korigovanou expozicí"
- rad3heat - obdoba předchozího, index je počítán podle modelu pro rad3 s "korigovanou expozicí"

Použit byl digitální model terénu s velikostí pixelu 30 m, který byl konstruován z vrstevnicové mapy terénu (data DMÚ25; výškový rozestup vrstevnic 5m). Jako poslední (doplňkový) index byla vypočtena celková křivost terénu. Výpočty všech indexů byly provedeny v programu PlotOA (MATĚJKA, 2009). Dále byly pro každou lokalitu fytocenologického snímku přiřazeny vypočtené hodnoty jednotlivých indexů.

Složení bylinné etáže (celkem 370 druhů, 1748 snímků na nezamokřených půdách) bylo analyzováno metodou CCA (LEPŠ et ŠMILAUER, 2003) s environmentálními proměnnými "nadmořská výška" a "heat load index". Skóre snímku podél první ordinační osy (CCA_1) silně koreluje s nadmořskou výškou. Byla zkoušena dvojnásobná lineární regrese CCA_1 s nadmořskou výškou (altitude) a teplotními indexy ve formě lineární kombinace

$$CCA_1 = \text{intercept} + B_{altitude} \times \text{altitude} + B_{index} \times x,$$

kde x je jeden z tepelných (radiačních) indexů. Jednotlivé regresní modely byly hodnoceny pomocí koeficientu vícenásobné korelace r, jehož kvadrát r^2 bývá označován jako index determinace. Pro další užití byl vybrán model (tepelný/radiační index užitý pro výše uvedený model) s nejvyšší dosaženou hodnotou r^2.

Extrapolace průměrných teplot odpovídajících období klimatického normálu na celé území Šumavy byla provedena na základě globálního modelu průměrných teplot a vybraného regresního modelu s radiačním indexem nad výše uvedeným digitálním modelem terénu. Tak byl vygenerován rastr průměrných teplot.

Hranice mezi 6./7. a 7./8. LVS[1] byla determinována v terénu na Šumavě s použitím výškového transektu na svahu Plechého, kde jsou rozmístěny dlouhodobě sledované výzkumné plochy. Hranice 5./6. LVS byla stanovena v blízkém okolí tohoto transektu. Hranice 8./9. LVS byla stanovena na území Krkonoš, kde se 9. LVS běžně vyskytuje. Jednotlivé lokality s výskytem hranice 8./9. LVS (hranice alpinského bezlesí, které je v Krkonoších na většině míst představovány porosty *Pinus mugo*) byly identifikovány na podkladu ortofotomap z roku 2009 (poskytovatel ČÚZK Praha) a následně ověřeny v terénu. Většina použitých lokalit se nachází ve východní části Krkonoš, protože v západní části byly lesy na rozsáhlých plochách postiženy imisní kalamitou v 80. letech 20. století (VACEK et al. 2007).

V místech, kde se v terénu vyskytuje daná hranice, tak byl proveden odečet modelovaných průměrných teplot a tyto teploty byly položeny rovny hraničním teplotám odpovídajícím dané hranici vegetačních stupňů. Pro body odpovídající hranici 8./9. LVS v Krkonoších byl vypočten průměr a směrodatná odchylka průměrných ročních teplot a nadmořských výšek (dle DMT). Jako hraniční teplota byla použita zjištěná průměrná teplota. Poté byla provedena extrapolace těchto hraničních teplot přes celý rastr modelovaných teplot, čímž vznikl model hranic příslušných vegetačních stupňů.

Výpočty globálního teplotního modelu pro Českou republiku byly rovněž realizovány v programu PlotOA (MATĚJKA, 2009).

Validace modelu byla na Šumavě provedena na základě dat z povodí Čertova jezera získaných v rámci projektu GA ČR číslo 206/07/1200 "Biologické zotavování horských ekosystémů Šumavy", který je řešen Hydrobiologickým ústavem BC AV ČR v Českých Budějovicích. V lesních ekosystémech bylo provedeno šetření na 75 plochách velikosti 2500 m^2, kde byly zaznamenány všechny stromy (*Picea abies*, *Abies alba*, *Fagus sylvatica* a *Sorbus aucuparia*). V povodí byl proveden výpočet modelu průměrných teplot vzduchu na základě digitálního modelu terénu s velikostí pixelu 0,2 m a s týmiž parametry modelu, jako v území celé Šumavy. Hodnoceno bylo zastoupení dřevin s ohledem na polohu ploch ve srovnání s modelovanými hranicemi vegetačních stupňů.

Struktura rostlinných společenstev lesů Krkonoš byla analyzována v souvislosti s posouzením diversity těchto společenstev v práci MATĚJKA (2007). Tam byly analyzovány indexy diversity, jejichž vztah k nadmořské výšce a modelovaným lesním vegetačním stupňům je dále analyzován:

- Druhová bohatost *S*, která je rovna prostému počtu druhů.
- Shannon-Wienerův index $H' = -\sum_i p_i \cdot \log_2 p_i$, kde p_i je zastoupení *i*-tého druhu ve snímku.
- Druhová vyrovnanost $e = H' / \log_2 S$.
- Simpsonův index $Simpson = \frac{1}{\sum_i p_i^2}$.
- Rao koeficient funkční diversity $Rao = \sum_i \sum_j d_{ij}\, p_i\, p_j$, který byl počítán pomocí výsledků klasifikace druhů procedurou TWINSPAN (d_{ij} jsou distance druhů počítané na základě této klasifikace).
- Počet funkčních skupin druhů $S_{Rao} = \frac{1}{1 - Rao}$.

Dále byla spočítána ordinace DCA, jejímž účelem bylo potvrdit homogenitu snímkového materiálu, zvláště vyloučit výrazně odlehlé snímky.

Celá databáze sestává z 2936 fytocenologických snímků přírodních lesních oblastí Krkonoše (22) a Podkrkonoší (23) pořízených na pracovištích ÚHÚL Brandýs nad Labem, z nichž některé jsou opakované na stejných typologických plochách. Na základě klasifikace TWINSPAN (MATĚJKA, 2007) byly z další analýzy vyloučeny ty skupiny, které jsou charakteristické výskytem na zamokřených půdách. V Krkonoších to byly skupiny *0010 (lesy nižších nadmořských výšek s indikačními druhy *Cirsium oleraceum* a *Chaerophyllum hirsutum*; dle současné typologické mapy se jedná o polohy 2. až 5. LVS a především o edafické kategorie L, U, V a G) a *101 (společenstva rašelinných půd s *Vaccinium uliginosum*, *V. vitis-idaea* a *Eriophorum vaginatum*

[1] Lesní vegetační stupně jsou rozlišovány podle typologické školy Mezera – Mráz – Samek (viz například PRŮŠA, 2001).

snímky jsou řazeny do 8. a 9. LVS, převažuje edafická kategorie R, méně jsou řazeny do kategorií M, P a T). Celkem bylo vybráno 2808 fytocenologických snímků, v nichž bylo přítomno celkem 504 druhů bylinného patra. Další zpracování proběhlo obdobně jako v území Šumavy.

Průměrná teplota odpovídající období klimatického normálu, která odpovídá hranici lesních vegetačních stupňů podle současného mapování prováděného na pracovištích ÚHÚL, byla zjištěna z celé databáze fytocenologických snímků tak, aby pravděpodobnost chybného přiřazení snímku k vyššímu LVS, nežli je přiřazení podle teplotního modelu, byla rovna pravděpodobnosti chybného přiřazení snímku k nižšímu LVS, nežli je přiřazení podle teplotního modelu.

Mapy modelovaných lesních vegetačních stupňů všech tří oblastí byly vytvořeny na základě stejného modelu, který byl kalibrován na základě dat ze Šumavy.

Výsledky

Šumava

Přestože kanonické ordinační osy CCA (obr. 1) popisují pouze 1,0 % celkové datové variance, jsou vybrané faktory prostředí (nadmořská výška a heat load index) vysoce signifikantní pro určení druhového složení rostlinného společenstva (Monte Carlo test, p = 0,002). Současně fakt, že první největší nekanonická osa popisuje pouze 3,6 % celkové datové variance, ukazuje na skutečnost, že složení rostlinného společenstva je ovlivněno mnoha nekorelovanými faktory.

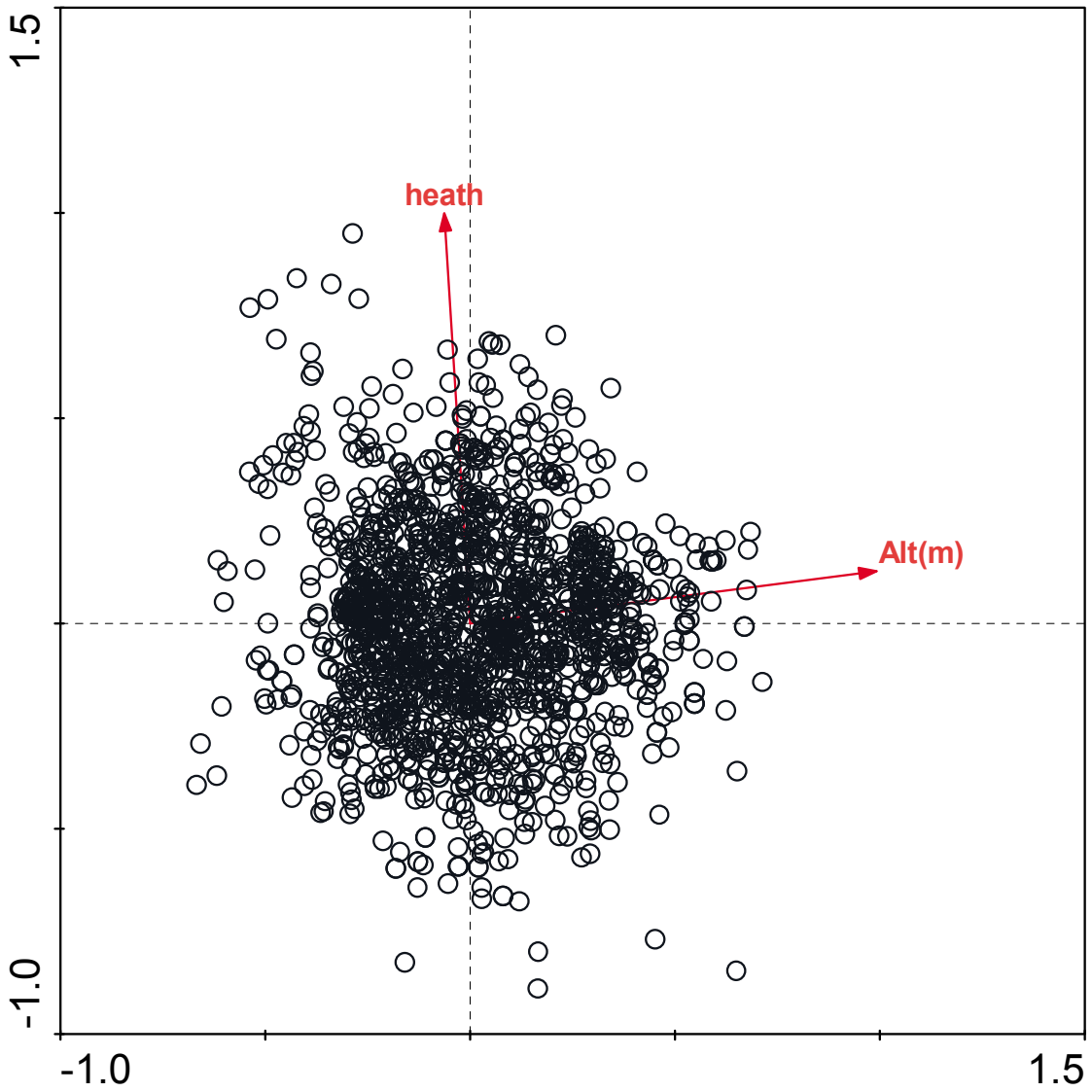
Regresní modely mezi ordinačním skóre podél 1. osy CCA, nadmořskou výškou a vybranými teplotními/tepelnými indexy jsou hodnoceny v tabulce 1. Nejvyšší hodnota koeficientu vícenásobné korelace r byla získána pro index rad1. Ten byl proto použit pro další výpočty.

Tabulka 1. Parametry regresních modelů mezi ordinačním skóre podél 1. osy CCA, nadmořskou výškou a některými teplotními indexy v PLO Šumava. r - index determinace.
Table 1. Parameters of the regression models between ordination scores along the first CCA axis, altitude and heat or radiation indices in the natural forest region Šumava (Bohemian Forest). r - determination index.

teplotní index *heath index*	heat	rad1	rad2	rad3	rad1heat	rad2heat	rad3heat
intercept	-6,246	-5,004	-5,111	-5,473	-5,204	-5,300	-5,631
$B_{altitude}$	0,00677	0,00684	0,00682	0,00677	0,00678	0,00677	0,00675
B_{index}	-1,039	-1,959	-1,688	-0,896	-1,577	-1,350	-0,684
$B_{index}/B_{altitude}$	-153,4	-286,4	-247,4	-132,4	-232,6	-199,2	-101,4
r	0,588 *	0,592 *	0,588 *	0,582	0,589 *	0,586 *	0,582

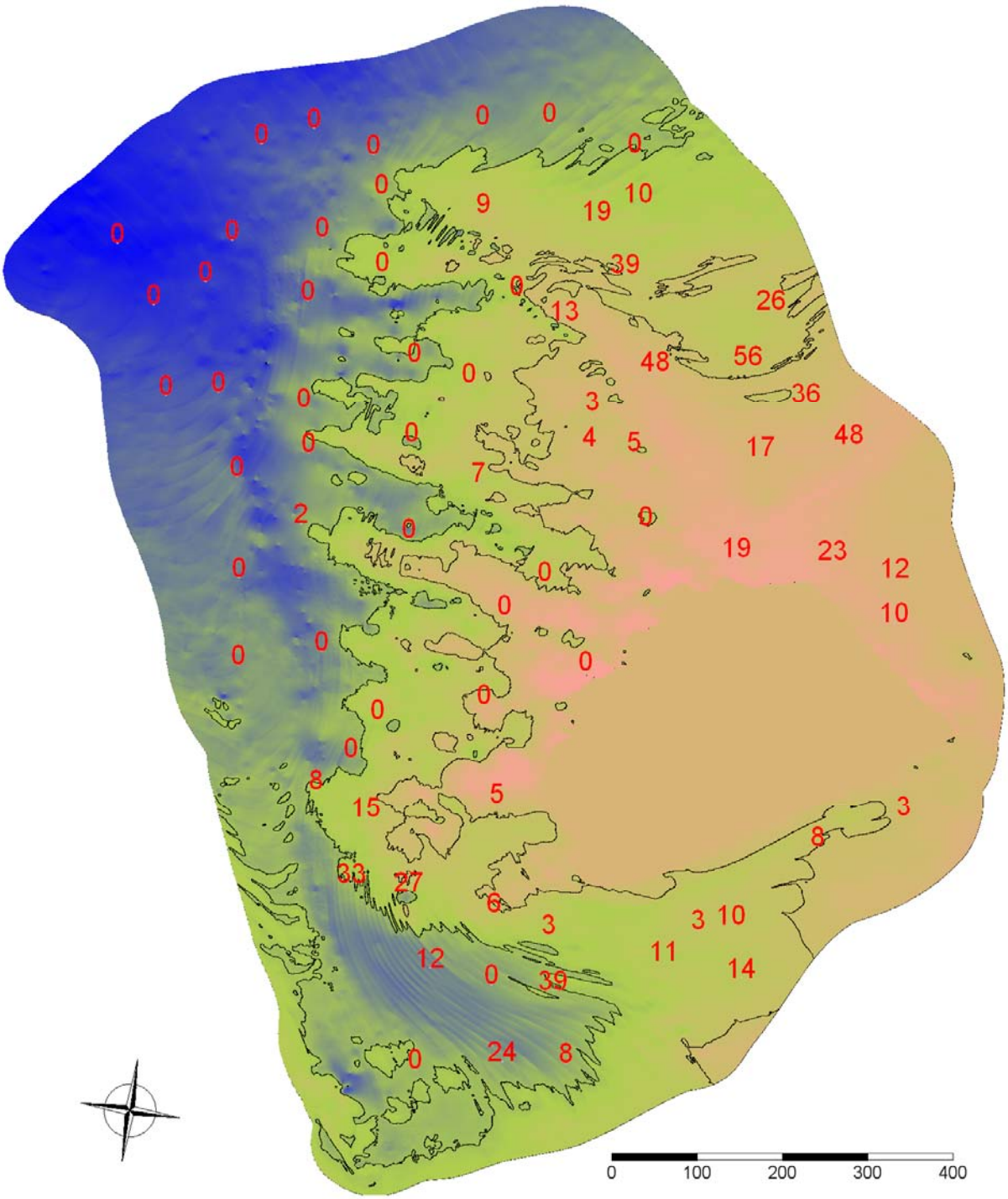
V terénu byly hranice vegetačních stupňů identifikovány při terénním šetření v oblasti Plechého v jihovýchodní části Šumavy. Tam leží trvalé výzkumné plochy P12 až P20, které se nacházejí v rozmezí 6. a 8. LVS. Vegetace na těchto plochách byla analyzována dříve (MATĚJKA et VIEWEGH, 2008), kde bylo poukázáno i na plynulý charakter gradientu nadmořské výšky, což poukazuje na relativně pozvolný přechod mezi vegetačními stupni.

Hranice 6./7. LVS zde odpovídá modelované průměrné teplotě 4,2 °C. Obdobně byla identifikována hranice mezi 7. a 8. LVS odpovídající modelované průměrné teplotě 3,7 °C. V blízkosti byla obdobně identifikována hranice 5./6. LVS odpovídající teplotě 5,2 °C. V širším území byla hranice 4./5. LVS stanovena na 6.2 °C. Na základě znalosti těchto mezních teplot byla konstruována mapa stupňů pro Šumavu a její okolí (příloha 1; příloha je součástí elektronické verze příspěvku). Popis rozmístění takto vylišených klimaxových smrčin 8. LVS na Šumavě uvádí KINDLMANN et al. (2012). Tam je rovněž na základě teplotního modelu ukázáno, proč se na Šumavě nemůže vyskytovat primární alpinské bezlesí, jehož nejnižší polohy jsou representovány klečovým stupněm (9. LVS) - klimaticky odpovídající lokality jsou na Šumavě příliš malé na to, aby se na nich ekosystémy odpovídající 9. LVS mohly vyvinout. Nicméně řada lesních ekosystémů má strukturu blízkou smrčinám v blízkosti alpinské hranice lesa: jedná se o rozvolněné porosty, kde je smrk zavětven velmi nízko, druhová struktura společenstev je blízká subalpinským společenstvům. Jmenovat je možno lokality v okolí Luzného, na Medvědí hoře (takzvaný Židovský les) nebo okolo Plechého.



Obr. 1. Ordinační prostor prvých dvou os CCA s rozmístěním analyzovaných fytocenologických snímků z PLO Šumava. Jako proměnné prostředí byly užity nadmořská výška (Alt) v metrech a heath load index (heath).
Fig. 1. Ordination space of the first two axes of CCA with position of all analyzed relevés from the natural forest region Šumava. Altitude (Alt) and heath load index (Heath) were used as environmental variables.

Jedna z verifikací modelu lesních vegetačních stupňů byla provedena v povodí Čertova jezera, které leží na opačné straně PLO Šumava, nežli je území, kde byla prováděna kalibrace modelu. Tam bylo šetření prováděno na 75 plochách, kde bylo též podrobně zaznamenáváno složení stromového patra. Relativní zastoupení jedinců *Fagus sylvatica* a *Abies alba* v povodí Čertova jezera bylo vyneseno do mapy průměrných ročních teplot modelovaných programem PlotOA (obr. 2). Ukázalo se, že pouze dvě plochy s výskytem jedle a buku překračují modelovanou spodní hranici 8. LVS, a to ne o více než 30 m.



Obr. 2. Vymezení 6. (převažující růžová barva), 7. (zelená barva) a 8. (modrá barva) LVS v povodí Čertova jezera na Šumavě na základě průměrných ročních teplot 4,2 a 3,7 °C modelovaných programem PlotOA na základě DEM s pixelem 0,2 m. Čísla udávají relativní zastoupení *Fagus sylvatica* a *Abies alba* ze všech stromů na 75 pokusných plochách.

Fig. 2. Delimitation of the 6th (predominant pink color), 7th (green) and 8th (blue color prevails) forest altitudinal zones in the catchment of the Čertovo Lake in Šumava (Bohemian Forest) on the basis of modeled average annual temperature equals to 4.2 and 3.7 °C (marked by lines). The PlotOA program was employed with digital elevation model of 0.2 m in pixel size. Numbers indicate the relative proportion of *Fagus sylvatica* and *Abies alba* trees in all 75 experimental plots; the other trees represent *Picea abies* species.

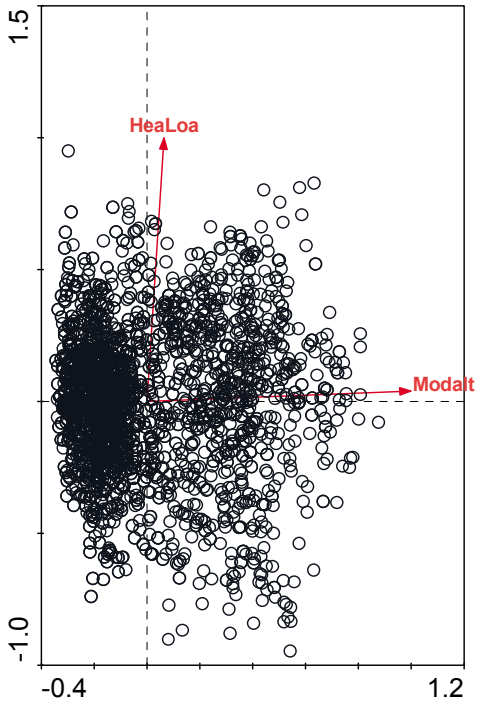
Krušné hory

Výsledná mapa lesních vegetačních stupňů Krušných hor je uvedena v příloze 2. Z ní je patrné, že 5. LVS se v Krušných horách nevyskytuje zdaleka na tak velké ploše, jak je tomu na Šumavě. Většina území je tedy představována 6. LVS. Naopak 7. LVS je nalézán na pouze omezené ploše. Vlastní 8. LVS se v Krušných horách vyskytuje pouze zřídka - jedná se o dvě lokality, větší v okolí Klínovce a o velmi malou enklávu u vrcholu Božídarského Špičáku.

Verifikace polohy hranice jednotlivých LVS k Krušných horách byla provedena pomocí fytocenologických snímků (příloha 4-6), které ukazují na jasné odlišení klimaxových smrčin (7.-8. LVS) a smíšených lesů. Je-li smrk pěstován v nižších polohách (snímek 4), může být druhové složení rostlinného společenstva velmi podobné klimaxové smrčině, ale okolní vegetace ukazuje na příslušnost k nižšímu vegetačnímu stupni. Umělé pěstování smrku je zřejmě příčinou toho, proč je v současnosti v Krušných horách špatně mapována hranice vegetačních stupňů.

Krkonoše

I v Krkonoších je zřejmé, že struktura rostlinných společenstev lesů je ovlivněna mnoha faktory prostředí. Proto i první dvě ordinační osy DCA popisují pouze 2,3 respektive 1,7 % celkové datové variability. Stejně tak první dvě kanonické osy CCA (obr. 3) popisují pouze 1,1 respektive 0,1 % datové variability. Přitom však je významnost faktoru spojeného s první kanonickou osou (nadmořská výška) statisticky vysoce průkazná (Monte Carlo test; p = 0,002). Výsledky (tabulka 3) ukazují, že modelace terénu má v Krkonoších ve srovnání se Šumavou slabší vliv na druhové složení bylinného patra v rostlinných společenstvech lesů.



Obr. 3. Ordinační prostor prvých dvou os CCA s rozmístěním analyzovaných fytocenologických snímků z PLO Krkonoše (22) a Podkrkonoší (23). Jako proměnné prostředí byly užity nadmořská výška (Modalt) v metrech podle digitálního modelu terénu a heath load index (HeaLoa).
Fig. 3. Ordination space of the first two CCA axes with position of all analyzed relevés from the forest natural region Krkonoše (Giant Mountains). Altitude (Modalt) according the digital elevation model and heath load index (HeaLoa) were used as environmental variables.

Mimo triviálních korelací ordinačních os CCA je zajímavý pohled na korelace ordinačních os DCA s nadmořskou výškou a s dalšími sledovanými parametry odvozenými z digitálního modelu terénu. Ukazuje se, že nadmořská výška stejně jako modelovaná průměrná teplota ovlivňují ordinační skóre podél každé z prvních tří os DCA. Tyto proměnné mají rovněž signifikantní vliv na parametry druhové i funkční diversity bylinné etáže lesů. Na základě výsledků regresní analýzy, průměrný počet druhů klesá o 0,68 druhu na 100 m nadmořské výšky a roste o 1,15 druhu na 1 ºC. Celková druhová diversita měřená Shannon-Wienerovým indexem klesá o 0,0579 na

100 m nadmořské výšky a roste o 0,0978 na 1 ºC. Zajímavé je, že až na druhovou bohatost má mírně větší vliv na diversitu křivost terénu nežli průměrná teplota. S křivostí terénu souvisí především vlhkost (zamokření a vysýchavost) půd. To je jeden z důvodů, proč pro analýzy CCA, které sloužily k odvození parametrů teplotního modelu ve vztahu ke sklonu a k expozici, byly vybrány snímky s výjimkou společenstev na zamokřených půdách.

Tabulka 2. Pearsonův koeficient korelace r mezi nadmořskou výškou (A), indexy počítanými z digitálního modelu terénu v oblasti Krkonoš a Podkrkonoší a parametry popisujícími strukturu bylinného patra lesů (indexy diversity a hodnotami skóre podél ordinačních os DCA a CCA). Počet snímků n = 2808. Hodnoty statisticky průkazné na hladině α ≤ 5 % jsou označeny *.

Table 2. Pearson's correlation coefficient r between altitude (A), landscape indices calculated from the digital elevation model in the Giant Mountains, and the parameters describing structure of the forest herb layer (diversity indices H' [Shannon-Wiener's index], e [species equitability], S [species richness], Simpson [Simpson's diversity index], Rao [modified Rao's index of functional diversity], S_{Rao} [number of functional groups] and scores along ordination axes DCA and CCA). Total number of relevés n = 2808. Values statistically significant at the level α ≤ 5% are marked with *.

	H'	e	S	Simpson	Rao	S_{Rao}	DCA_1	DCA_2	DCA_3	CCA_1	CCA_2
A (m)	-0.18*	-0.09*	-0.21*	-0.17*	-0.11*	-0.10*	0.44*	0.22*	0.38*	0.74*	-0.03
heath	-0.06*	-0.03	-0.06*	-0.08*	-0.03	-0.02	0.06*	0.06*	-0.04*	0.04	0.33*
rad1	-0.06*	-0.03	-0.07*	-0.08*	-0.03	-0.02	0.06*	0.07*	-0.04*	0.04*	0.33*
T (°C)	0.17*	0.09*	0.21*	0.16*	0.10*	0.09*	-0.43*	-0.21*	-0.39*	-0.74*	0.07*
celková křivost terénu *total terrain curvature*	-0.20*	-0.12*	-0.18*	-0.18*	-0.15*	-0.13*	0.18*	0.17*	-0.07*	0.08*	0.12*

Tabulka 3. Parametry regresních modelů mezi ordinačním skóre podél 1. osy CCA, nadmořskou výškou a indexy: heath load index (heat) a potenciální přímé záření (rad1).

Table 3. Parameters of the regression models between ordination scores along the first CCA axes, altitude and indexes - heath load index (heat) and potential direct solar radiation (rad1).

teplotní index *heath index*	heat	rad1
intercept	-2,026	-1,811
$B_{altitude}$	0,00328	0,00328
B_{index}	-0,239	-0,335
$B_{index}/B_{altitude}$	-73,0	-102,1
r	0,741 *	0,741 *

Tabulka 4. Statistické charakteristiky lokalit odpovídajících hranici 8./9. LVS v Krkonoších.

Table 4. Statistical characteristics of the sites corresponding to the border between 8th and 9th forest altitudinal zone in the Giant Mountains.

	území *region*	počet lokalit *number of sites*	průměr *mean*	směrodatná odchylka *standard deviation*	minimum *minimum*	maximum *maximum*
teplota (°C) *temperature*	východ / *east*	28	2,57	0,38	1,58	3,29
	západ / *west*	5	2,47	0,24	2,12	2,68
nadmořská výška (m) *altitude*	východ / *east*	28	1322	27	1232	1370
	západ / *west*	5	1312	42	1274	1379

Na základě zhodnocení výskytu alpinské hranice lesa (hranice 8./9. LVS) v Krkonoších (tabulka 4) byla stanovena odpovídající průměrná teplota vzduchu v období klimatického normálu na 2,5 °C. Údaje ze západní části Krkonoš jsou pouze orientační pro nízký počet použitých lokalit, přesto se zdá, že mezi oběma částmi pohoří neexistuje signifikantní rozdíl v poloze alpinské hranice lesa vzhledem k průměrným teplotám (testováno analýzou variance; p = 60%).

Vyvinutý model (příloha 3) byl v území Krkonoš srovnáván s leteckými snímky z roku 2009 (data ČÚZK Praha). Ukázalo se, že rozšíření *Fagus sylvatica* (respektive dospělých listnatých porostů) skutečně končí v místech modelem vymezené hranice mezi 7. a 8. LVS (v okolí Kotle). Tato zjištění potvrzují správnost vytvořeného modelu i to, že jeho parametry jsou platné pro širší území, nežli pouze pro Šumavu. Pro jiné území je však vždy potřeba provést alespoň jednoduchou validaci výsledků.

Diskuse

Nejvýznamnější problémy s použitím předvedeného modelu spočívají v nedokonalosti jeho hlavní části, t.j. v chybách teplotního modelu, který pouze málo zohledňuje lokální odchylky teplot, jakými mohou být například mrazové kotliny, výskyt výrazných teplotně inverzních poloh nebo poloha u velkých vodních nádrží či v lokalitách s vysokou zásobou vody v půdě (rašeliniště, rozsáhlé mokřady u větších vodních toků). Specificky se pravděpodobně chovají i různé anemo-orografické systémy (JENÍK, 1961). Přesnost teplotního modelu je možno odhadnout například porovnáním průměrných teplot modelovaných a evidovaných na meteorologických stanicích ČHMÚ (KVĚTOŇ, 2001). V oblasti Krkonoš bylo možno užít následující stanice: Benecko (odchylka modelované teploty od měřené Δ = -0,1 °C), Desná - Souš (Δ = +0,8 °C), Harrachov (Δ = +0,7 °C), Holovousy (Δ = 0 °C), Janské Lázně (Δ = +0,5 °C), Turnov (Δ = +0,3 °C) a Vysoké nad Jizerou (Δ = 0 °C). Obdobné odchylky byly zjištěny i v rámci stanic na Šumavě: Husinec (Δ = +0,1 °C), Churáňov (Δ = 0 °C), Kašperské Hory (Δ = +0,2 °C), Lenora - Houžná (Δ = +0,6 °C), Nová Pec (Δ = +0,6 °C), Strakonice (Δ = -0,1 °C), Sušice (Δ = -0,1 °C), Vráž (Δ = 0 °C) a Vyšší Brod (Δ = +0,3 °C). Problém těchto srovnání však spočívá v tom, že na většině stanic nebylo měření prováděno po všechny roky 1961-1990, respektive bylo měřeno na různých místech, protože se stanice přesouvala, a měřené hodnoty (průměry) byly až následně korigovány - využívány byly takzvané technické řady (KVĚTOŇ, 2001).

Další možnost zpřesnění předvedeného teplotního modelu může spočívat v započtení zeměpisné délky jako další proměnné globálního modelu teplot (KVĚTOŇ, 2001; MATĚJKA, 2011b) a/nebo regionálních odchylek, které lze počítat pomocí geostatistických metod (kriging). Přehled o regionálních odchylkách průměrných teplot v období klimatického normálu podává MATĚJKA (2011b). Celkově lze předpokládat, že zpřesnění modelu teplot tímto způsobem nebude v rámci ČR větší než 0,2 °C.

Pro menší území je možno vytvořit dosti přesný klimatický model, jak ukazuje například HADAŠ (1997) pro Beskydy. Problémy však vyvstanou při snaze o extrapolaci takového modelu pro rozsáhlejší území. Interpretace modelů založených na regresní analýze s polynomy vyšších stupňů (HADAŠ /1997/ užívá polynomy až 6. stupně) je sporná a extrapolace mimo šetřené území je prakticky nemožná.

Princip použitého modelování byl ověřen i v jiných studiích, kde byl sledován vztah mezi vegetací, teplotou a konfigurací terénu. Jednu takovou studii uveřejnili nedávno REGER et al. (2011) z německé části Alp. Ti užili globální teploty vztažené k lokální nadmořské výšce podle klimatického atlasu a parametrů terénu (svažitost a expozice), aby provedli regresi s indikační hodnotou pro teplotu podle místního složení vegetace. I jejich výsledky vyšly jako statisticky průkazné, pro modelování však použili průměrné teploty ve vegetačním období (květen až září).

Jeden z prvních pokusů o modelování LVS provedl VOLAŘÍK (2010) na území Zlínského regionu. Jeho model uvažuje nadmořskou výšku a potenciální globální radiaci, nikoli geografickou polohu – může tedy být užitý pouze v menším území; například rozsah Šumavy odpovídá rozdílu nadmořské výšky hranice stupně cca 50 m.

V Krušných horách celkem jistě nesestupuje supramontánní stupeň tak výrazně pod 1000 m n.m., jak bývá někdy uváděno, a to zvláště v porovnání s ostatními pohořími ČR. Dokládá to například výskyt *Fagus sylvatica*, který se vyskytuje na řadě míst podél modelované spodní hranice 8. LVS. Nižší polohu supramontánního stupně uvádí například Chytrý (2012). Současný rozsah lesů s dominantním smrkem je dán pěstováním smrku, čímž došlo i ke změně stanovištních podmínek a současná rostlinná společenstva tak mají velmi podobné složení, jako klimaxové smrčiny v 8. LVS, přestože se nacházejí v nižších polohách.

Průběh alpinské hranice lesa v Krkonoších sledoval TREML (2004), který uvádí polohu této hranice v souvislosti s nadmořskou výškou pro lokality Zadní Planina (1260-1290 m), Luční hora (1220-1325 m), Důl Bílého Labe (1225-1235 m), Modrý důl (1300-1325 m) a Růžová hora (1350-1360 m).Dochází tedy k obdobným závěrům, jako v této studii (tabulka 4). Při porovnávání výsledků je potřeba zdůraznit, že alpinská hranice lesa může být v důsledku lidské činnosti snížena, k čemuž zřejmě v Krkonoších v minulosti často docházelo; (MATĚJKA, 2010c), ale nikoli zvýšena (případné výsadby by většinou byly neúspěšné).

Porovnání průměrných teplot odpovídajících hranicím lesních vegetačních stupňů (tabulka 4) ukazuje, že horní hranice lesa (hranice 8./9. LVS) je určena konzistentně ve všech sledovaných případech. V Krkonoších je zřejmě dosud úžeji vymezován 8. LVS. Naopak velmi široce je tam vymezen 5. LVS a to zvláště na úkor 4. LVS. 4. LVS bývá naopak zřejmě mapován v místech, které odpovídají nižším vegetačním stupňům. Spodní hranice 6. až 9. LVS jsou v Krkonoších a v Podkrkonoší mapovány vcelku konzistentně (pravděpodobnost chybného zařazení plochy k LVS vzhledem k teplotní hranici stupně P_{min} je ve všech případech menší než 5 %). Pro spodní hranice 4. a 3. LVS to však již neplatí, protože pravděpodobnost chybného zařazení plochy ke stupni je vyšší než 10 % (tabulka 5, obr. 4). Obdobné vyhodnocení pravděpodobnosti chyb při aktuálním typologickém mapování v území Šumavy není uváděno, protože panuje shoda, že v tomto území je mapování stupňů

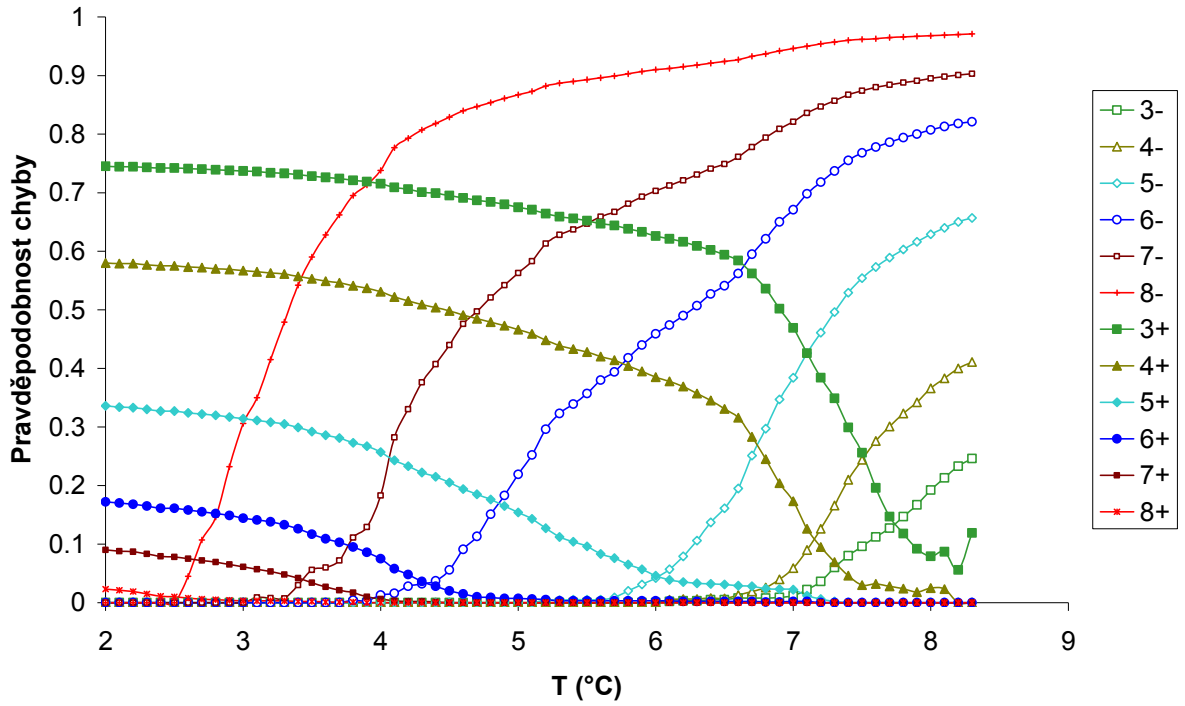
provedeno chybně, což dokládá například i porovnání s mapou potenciální vegetace (NEUHÄUSLOVÁ et al., 2001), které je provedeno v práci MATĚJKA (2008).

Teplotní hranice stupňů, které byly kalibrovány na Šumavě se blíží průměrným teplotám, které uvádí PRŮŠA (2001).

Tabulka 5. Porovnání teplotních limitů (°C) pro hranice jednotlivých lesních vegetačních stupňů.
Table 5. Comparison of the temperature limits (°C) for the boundaries between forest altitudinal zones (FAZ).

Hranice LVS *FAZ boundary*	Šumava - PLO 13 (kalibrace Plechý) *Bohemian Forest (calibration at Plechý Mt.)*	Krkonoše - PLO 22+23 (kalibrace dle databáze) *Giant Mts. (calibration according database)*	PRŮŠA (2001)
8./9.	(2,5)	2,54 (P_{min} = 0,016)	2,5
7./8.	3,7	3,44 (P_{min} = 0,041)	4,0
6./7.	4,2	4,33 (P_{min} = 0,033)	4,5
5./6.	5,2	6,03 (P_{min} = 0,046)	5,5
4./5.	6,2	7,15 (P_{min} = 0,109)	6,0
3./4.		7,74 (P_{min} = 0,135)	6,5

Otázkou zůstává, jaké teplotní průměry je vhodné (je optimální) zvolit pro modelování. Bylo například prokázáno, že růst smrku v Krkonoších je nejvíce ovlivněn průměrem teplot v měsících květen až srpen (MATĚJKA, 2011c). To odpovídá i tomu, že PRETZSCH (2009, p. 385) srovnává výškový růst smrku a buku s průměrnou teplotou ve vegetačním období. Rovněž REGER et al. (2011) došli k závěru, že nejlepším modelem je ten, který je založen na průměrných teplotách ve vegetačním období, přičemž toto období položili rovno měsícům květen až září. Nicméně je jasné, že zvláště v omezeném geografickém prostoru, jakým může být třeba Česká republika, spolu navzájem silně korelují takové proměnné, jako průměrná roční teplota, průměrná teplota ve vegetačním období, průměrná teplota za období několika (tří a více) určitých měsíců a délka vegetačního období. Má-li model pracovat v tomto omezeném regionu, není tedy příliš podstatné, jaká z těchto proměnných bude zvolena. Zásadní to však může být při práci v rámci rozsáhlejšího území.



Obr. 4. Pravděpodobnost chybného přiřazení plochy (fytocenologického snímku) k lesnímu vegetačnímu stupni při různých teplotách podle databáze snímků z Krkonoš a Podkrkonoší. Rozlišena je pravděpodobnost chybného řazení k nižšímu LVS (-) a pravděpodobnost chybného řazení k vyššímu LVS (+) při dané průměrné teplotě.
Fig. 4. Probability of erroneous assignment of a site (relevé) to the forest altitudinal zone (FAZ) by temperature T according to the database of relevés in the Giant Mountains. Probabilities of erroneous shift to a lower FAZ (-) and to a higher FAZ (+) were separated.

Lesní vegetační stupně v kontextu klimatické změny

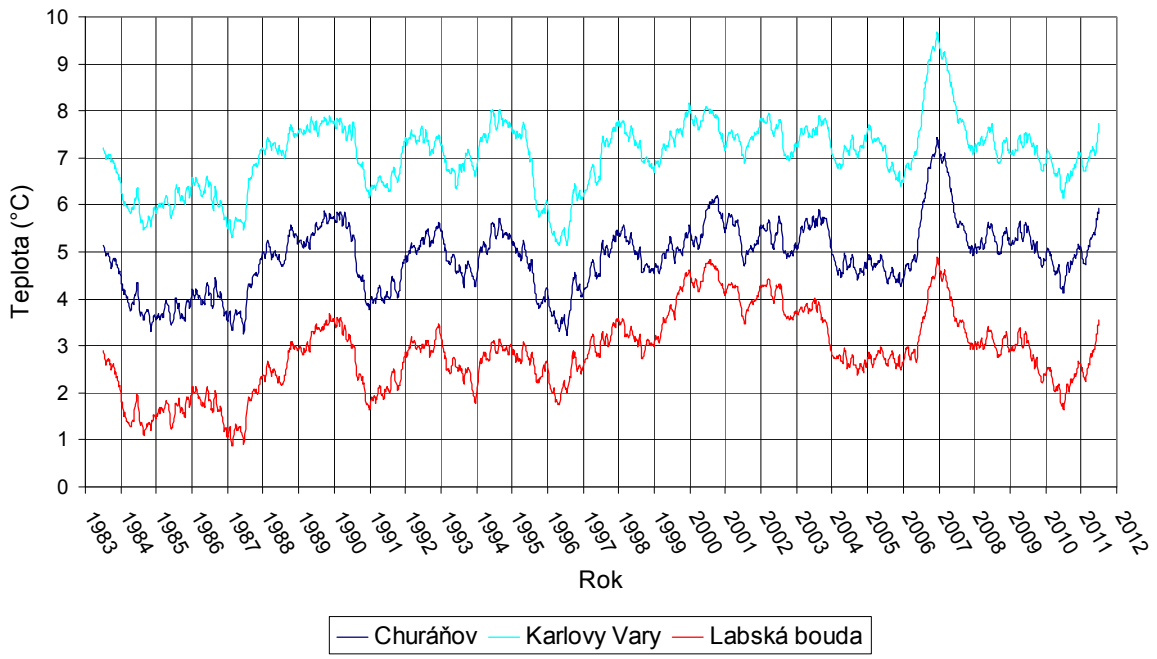
Není žádný pochyb o tom, že klima představuje dynamický systém, jehož parametry se neustále vyvíjejí (http://www.ipcc.ch/). Poslední změny teplot a srážek lze tak jen těžko rozlišit na změny například cyklické a na jednosměrné posuny (například oteplování) - to bude možno provést až s delším časovým odstupem. Vývoj průměrných teplot ve třech výše sledovaných regionech za posledních třicet let lze doložit grafem (obr. 5), který dokládá signifikantní vzestup teplot. Tento vzestup je tím výraznější, v čím chladnější lokalitě stanice leží. Lineární trend lze popsat rovnicemi

Karlovy Vary - letiště: $T = 0{,}0380$ rok - $68{,}8$ ($r^2 = 0{,}175$) [zpracování MATĚJKA, 2012]
Churáňov: $T = 0{,}0412$ rok - $77{,}4$ ($r^2 = 0{,}220$) [zpracování MATĚJKA, 2011d]
Labská bouda: $T = 0{,}0510$ rok - $99{,}0$ ($r^2 = 0{,}245$) [zpracování MATĚJKA, 2011c]

Tyto výsledky odpovídají poznatkům pro celou střední Evropu (BRÁZDIL et al., 2010; DOBROVOLNÝ et al., 2010).

Lesní vegetační stupně (ve výše sledovaném rozmezí; tabulka 4) mají rozsah 0,5 až 1,2 °C. Uvedený lineární trend zvyšování teplot by tak mohl potenciálně znamenat posun o jeden vegetační stupeň v okolí stanice Labská bouda (9. LVS) za 24 let a na stanici Karlovy Vary (4. LVS) za 10-20 let. Takovéto náhlé změny však dosud pozorovány nebyly, přestože dílčí změny ve struktuře vegetace jsou popisovány často. Je to způsobeno skutečností, že taková změna celkového charakteru ekosystému, jakou je přechod do jiného vegetačního stupně, je příliš komplexní změnou, která se týká nejen jednotlivých druhů, ale i jejich vzájemných vazeb a zvláště pak vazeb na půdu. Na LVS nejsou vázány pouze druhy dřevin a společenstva (rostlinná, hmyz, houby atd.), ale i půdy.Byly například popsány různé odchylky ve funkci půdy smíšených a smrkových lesů (MATĚJKA et STARÝ, 2009). Tyto odlišné procesy mají mnohem vyšší stabilitu nežli rozšíření jednotlivých druhů. Ke změně půdního typu a navázané půdně-chemické dynamiky nemůže dojít tak rychle. Výjimkou snad může být posun alpinské hranice lesa (8./9. LVS), kdy se smrk může šířit do míst, kde dosud neměl konkurenci. Tomu by odpovídalo i pozorování z Krkonoš

Obdobné otázky vyvstávají i z hlediska syntaxomie, kdy jsou rostlinná společenstva studována metodami curyšsko-montpellierské školy. Základy syntaxonomie byly položeny cca v polovině 20. století. Tehdy byla pořízena většina primárních fytocenologických snímků a poté došlo k významné změně klimatu. Dnešní snímky vykazují často změněné složení. Lze však jen obtížně odlišit z jaké míry je tato změna dána klimatem a co je způsobeno jinými vlivy (management, znečistění ovzduší aj.). Základní otázka tedy zní: mění se postupně charakter společenstva (může tedy vykazovat jiné znaky, druhové složení, ...) nebo se vytvářejí nová, odlišná společenstva? Kde je možné pozorovat výrazné změny? Jedná se o místa s limitním výskytem nějaké složky ekosystému, které mají často charakter ekotonu - v lesích se typicky jedná o okolí alpinské hranice (tedy 8. a 9. LVS) nebo o hranici mezi biomy (ve smyslu Chytrý 2012) širokolistých opadavých lesů (smíšenými lesy do 7. LVS) a tajgou (8. LVS). O skutečnosti, že existují určité "klimaticky citlivé" zóny v rámci výškové stupňovitosti lesů, vypovídají i závěry práce BÄSSLER et al. (2010). Autoři kladou takovou zónu v Bavorské části Šumavy do nadmořské výšky 1100 až 1200 m n.m., což odpovídá hranici 7. a 8. LVS, tedy skutečně hranici obou zmiňovaných biomů. Velký vliv pro dynamiku lesů na této hranici mají také gradace lýkožrouta (*Ips typographus*), který je považován za klíčový druh těchto ekosystémů (MÜLLER et al., 2008). Jeho gradace jsou však rovněž ovlivňovány vzrůstem průměrných teplot, ale především výskytem klimatických extrémů (KINDLMANN et al., 2012).



Obr. 5. Průběh klouzavého ročního průměru teplot vzduchu a třech klimatologických stanicích ČHMÚ.
Fig. 5. The course of the moving annual average of air temperatures (2 m above the ground) at three stations of the Czech Hydrometeorological Institute.

Závěr

Představen byl model lesních vegetačních stupňů, který vychází z digitálního modelu terénu, který je základem pro výpočet modelu průměrných teplot vzduchu. Vliv svažitosti a expozice byl hodnocen prostřednictvím analýzy druhového složení rostlinných společenstev lesů. Základním předpokladem tohoto modelu je to, že struktura rostlinných společenstev (lesů) je prvořadě ovlivněna průměrnou teplotou.

Matematický model lesních vegetačních stupňů má oproti terénnímu mapování některé výhody. Jedná se zvláště o to, že díky jemu je možno sjednotit mapování stupňů na celém rozsáhlém území republiky, zvláště poté, co bude model zpřesněn započtením regionálních klimatických diferencí a bude provedena verifikace modelu v území Moravy a v teplých regionech Čech. Modelovat lze hranice "lesních" vegetačních stupňů i v místech sekundárního bezlesí, což může přispět například při rozhodování o užití různých druhů dřevin při zalesňování. Kombinací vrstvy modelovaných LVS a vrstvy edafických kategorií, které jsou vymezeny v rámci lesnicko-typologické mapy poměrně správně (s malým, nepodstatným podílem chyb), lze získat velmi přesnou mapu souborů lesních typů, která se může stát základem pro modelování přirozeného zastoupení dřevin (ČERNÍKOVÁ, 2011).

Výsledky je možno použít například pro stanovení cílů v rámci pěstování lesa (stanovení cílové druhové skladby dřevin) nebo pro účely ochrany přírody (vymezení zón s různým managementem).

Poděkování

Za připomínky k textu děkuji Pavlu Kindlmannovi (Centrum pro výzkum globální změny AV ČR a Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy), Martinu Haisovi (Přírodovědecká fakulta Jihočeské univerzity v Českých Budějovicích) a Jiřímu Vieweghovi (Fakulta lesnická a dřevařská ČZU v Praze).

Tento příspěvek vznikl díky podpoře projektu NAZV č. QI112A170 Možnosti cíleného pěstování a využití geneticky hodnotných částí populací sadebního materiálu smrku ztepilého s klimaxovou strategií růstu pro horské oblasti. Principy řešení úkolu modelování lesních vegetačních stupňů vycházejí z úkolů dříve řešených na pracovišti IDS, které byly zajištěny vlastními finančními zdroji.

Literatura

BÄSSLER C., MÜLLER J., DZIOCK F. (2010): Detection of Climate-Sensitive Zones and Identification of Climate Change Indicators: A Case Study from the Bavarian Forest National Park. - Folia Geobot, 45: 163-182

BOHÁČ J., MATĚJKA K. (2010): Sledování epigeických brouků na výškovém transektu na Plechém (Šumava) v roce 2009. http://www.infodatasys.cz/biodivkrsu/rep2009_Bohac.pdf.

BRÁZDIL R., DOBROVOLNÝ P., LUTERBACHER J., MOBERG A., PFISTER C., WHEELER D., ZORITA E. (2010): European climate of the past 500 years: new challenges for historical climatology. - Climatic Change, 101: 7–40.

ČERNÍKOVÁ Z. (2011): Analýza potenciálního rozšíření dřevin v lesích Šumavy. Ms. [Diplom. thesis; depon. in Přírodovědecká fakulta, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích], 103 p.

DOBROVOLNÝ P., MOBERG A., BRÁZDIL R., PFISTER C., GLASER R., WILSON R., VAN ENGELEN A., LIMANÓWKA D., KISS A., HALÍČKOVÁ M., MACKOVÁ J., RIEMANN D., LUTERBACHER J., BÖHM R. (2010): Monthly, seasonal and annual temperature reconstructions for Central Europe derived from documentary evidence and instrumental records since AD 1500. - Climatic Change, 101: 69–107.

FRANKLIN J. (2009) Mapping species distributions. Spatial inference and prediction. Cambridge University Press, Cambridge etc.

HADAŠ P. (1997): Speciální program pro odvození klimatických dat pro oblast Moravskoslezských Beskyd. Zpravodaj Beskyd "Vliv imisí na lesy a lesní hospodářství Beskyd", 9: 229-234.

HANSEN A.J., DICASTRI F., NAIMAN R.J. (1988): Ecotones: what and why? In: diCastri F., Hansen A.J. & Holland M.M. (eds.), A new look at ecotones: emerging international projects on landscape boundaries. - Biology International, Vol. 17, Special Issue, pp. 9-46.

CHYTRÝ, M. (2012): Vegetation of the Czech Republic: diversity, ecology, history and dynamics. - Preslia, 84: 427-504.

JENÍK J. (1961) Alpinská vegetace Krkonoš, Kralického Sněžníku a Hrubého Jeseníku. Praha.

KARK S., VAN RENSBURG B.J. (2006): Ecotones: marginal or central areas of transition? - Israel Journal of Ecology and Evolution, 52: 29-53.

KINDLMANN P., MATĚJKA K., DOLEŽAL P. (2012): Lesy Šumavy, lýkožrout a ochrana přírody. Karolinum, Praha, 326p.

KVĚTOŇ V. (2001): Normály teplot vzduchu na území České republiky v období 1961-1990 a vybrané teplotní charakteristiky období 1961-2000. - Národní klimatický program Česká republika, ČHMÚ, Praha, 30: 1-197.

LEPŠ J., ŠMILAUER P. (2003) Multivariate analysis of ecological data using CANOCO. Cambridge University Press, Cambridge.

LEPŠOVÁ A., MATĚJKA K. (2010) Mrtvé dřevo a společenstva makromycet podél výškového gradientu na Šumavě. http://www.infodatasys.cz/biodivkrsu/rep2009_makromyc.pdf.

MATĚJKA K. (2007): Nové postupy pro hodnocení diversity společenstev (s příklady lesních ekosystémů). In: Križová E., Ujházy K. (Eds.), Dynamika, stabilita a diverzita lesných ekosystémov. - TU vo Zvolene, Zvolen, pp. 161–170.

MATĚJKA K. (2008) Variabilita lesních společenstev Šumavy. IDS, Praha. http://www.infodatasys.cz/sumava/lesysumavy.pdf.

MATĚJKA K. (2009a) Nápověda k programu PlotOA. Plotting of ordination diagrams and cartograms. http://www.infodatasys.cz/software/hlp_PlotOA/plotoa.htm.

MATĚJKA K. (2010b) Globální gradienty teploty v České republice. IDS, Praha. http://www.infodatasys.cz/climate/globalgradients.pdf.

MATĚJKA K. (2010c): Landscape structure / development and vegetation in the example of the transect Vrchlabí – Bílé Labe springs. - Opera Corcontica, 47 (Suppl. 1): 107–122.

MATĚJKA K. (2011a) Management biodiversity v Krkonoších a na Šumavě - zpráva spoluřešitele za rok 2010. http://www.infodatasys.cz/biodivkrsu/IDSreport2010.pdf.

MATĚJKA K. (2011b): Globální gradienty teploty v České republice a diferenciace regionů. http://www.infodatasys.cz/climate/modeldif.pdf.

MATĚJKA K. (2011c): Zpráva spoluřešitele projektu QI112A170 za rok 2011. Možnosti cíleného pěstování a využití geneticky hodnotných částí populací sadebního materiálu smrku ztepilého s klimaxovou strategií růstu pro horské oblasti. http://www.infodatasys.cz/proj005/QI112A170_results2011.pdf

MATĚJKA K. (2011d): Rozbor průběhu počasí na Churáňově (Šumava) v období 1983-2010 a jeho možná interpretace z hlediska dynamiky ekosystémů. http://www.infodatasys.cz/climate/churanov1983-2010.pdf

MATĚJKA K. (2012): Zpráva spoluřešitele projektu QI112A170 za rok 2012. Možnosti cíleného pěstování a využití geneticky hodnotných částí populací sadebního materiálu smrku ztepilého s klimaxovou strategií růstu pro horské oblasti. http://www.infodatasys.cz/proj005/QI112A170_results2012.pdf

MATĚJKA K., STARÝ J. (2009) Differences in top-soil features between beech-mixture and Norway spruce forests of the Šumava Mts. Journal of Forest Science 55:540-555.

MATĚJKA K., VIEWEGH J. (2008): Vegetace na trvalých výzkumných plochách v lesích Šumavy a její vývoj. http://www.infodatasys.cz/sumava/vegetacetvp.pdf

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

MÜLLER J., BUSSLER H., GOSSNER M., RETTELBACH T., DUELLI P. (2008): The European spruce bark beetle Ips typographus in a national park: from pest to keystone species. Biodiversity and Conservation 17: 2979-3001.

NEUHÄUSLOVÁ Z. (ed.) (2001) Mapa potenciální přirozené vegetace Národního parku Šumava. The map of potential natural vegetation of the Šumava National Park. Karte der potentiellen natürlichen Vegetation des Šumava Nationalparks. Silva Gabreta Suppl. 1:1-189.

PARKER K.C. (1988) Environmental relationships and vegetation associates of columnar cacti in the northern Sonoran Desert. Vegetatio 78:125-140.

PRETZSCH H. (2009): Forest dynamics, growth and yield. Springer, Berlin et Heidelberg, 664 p.

PRŮŠA E. (2001): Pěstování lesů na typologických základech. Lesnická práce, Kostelec nad Černými lesy.

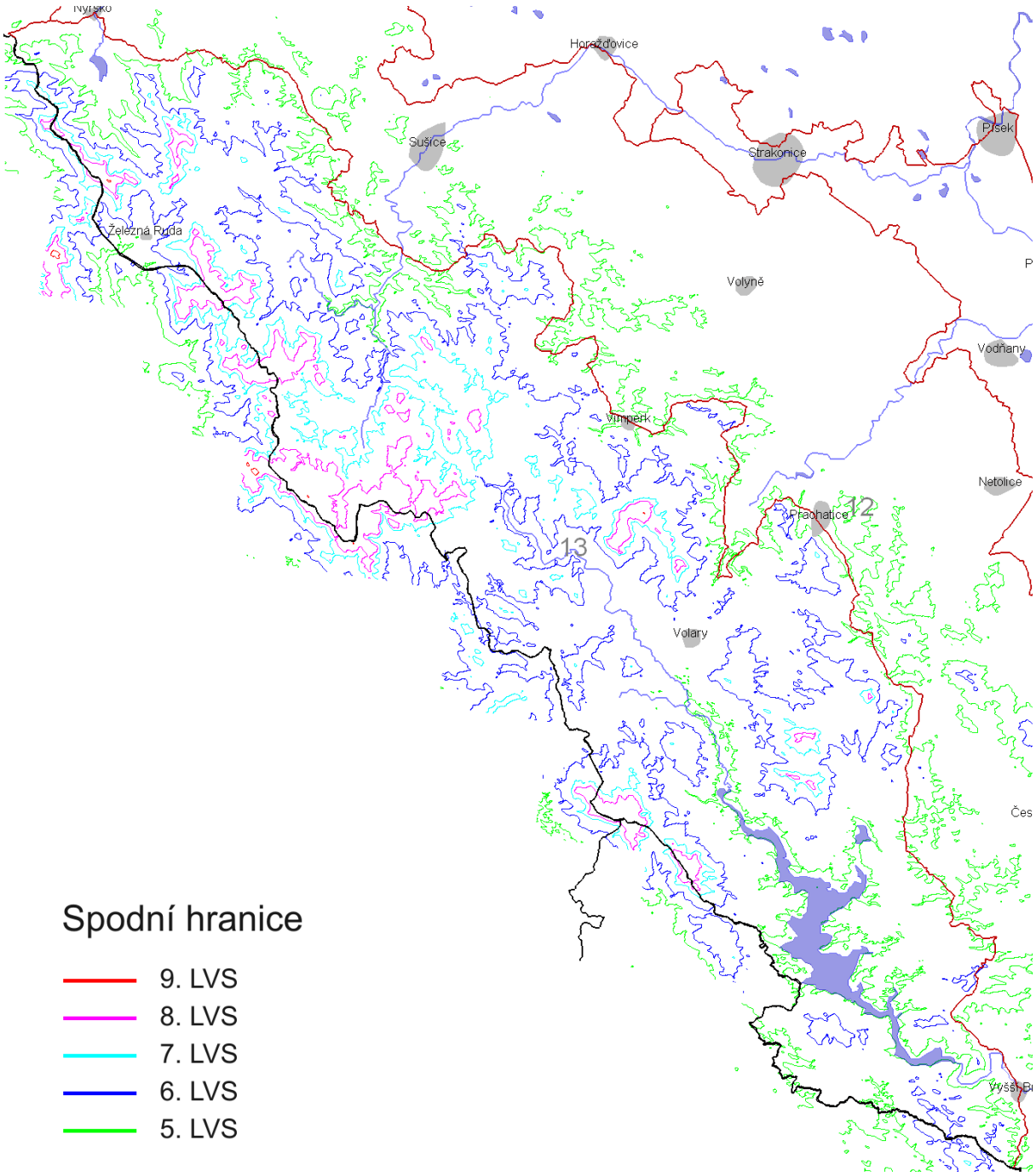
REGER B., KÖLLING C., EWALD J. (2011): Modelling effective thermal climate for mountain forests in the Bavarian Alps: Which is the best model? Journal of Vegetation Science 22:677-687.

TREML V. (2004): Recentní dynamika alpinské hranice lesa v Krkonoších. Opera Corcontica 41: 367–375.

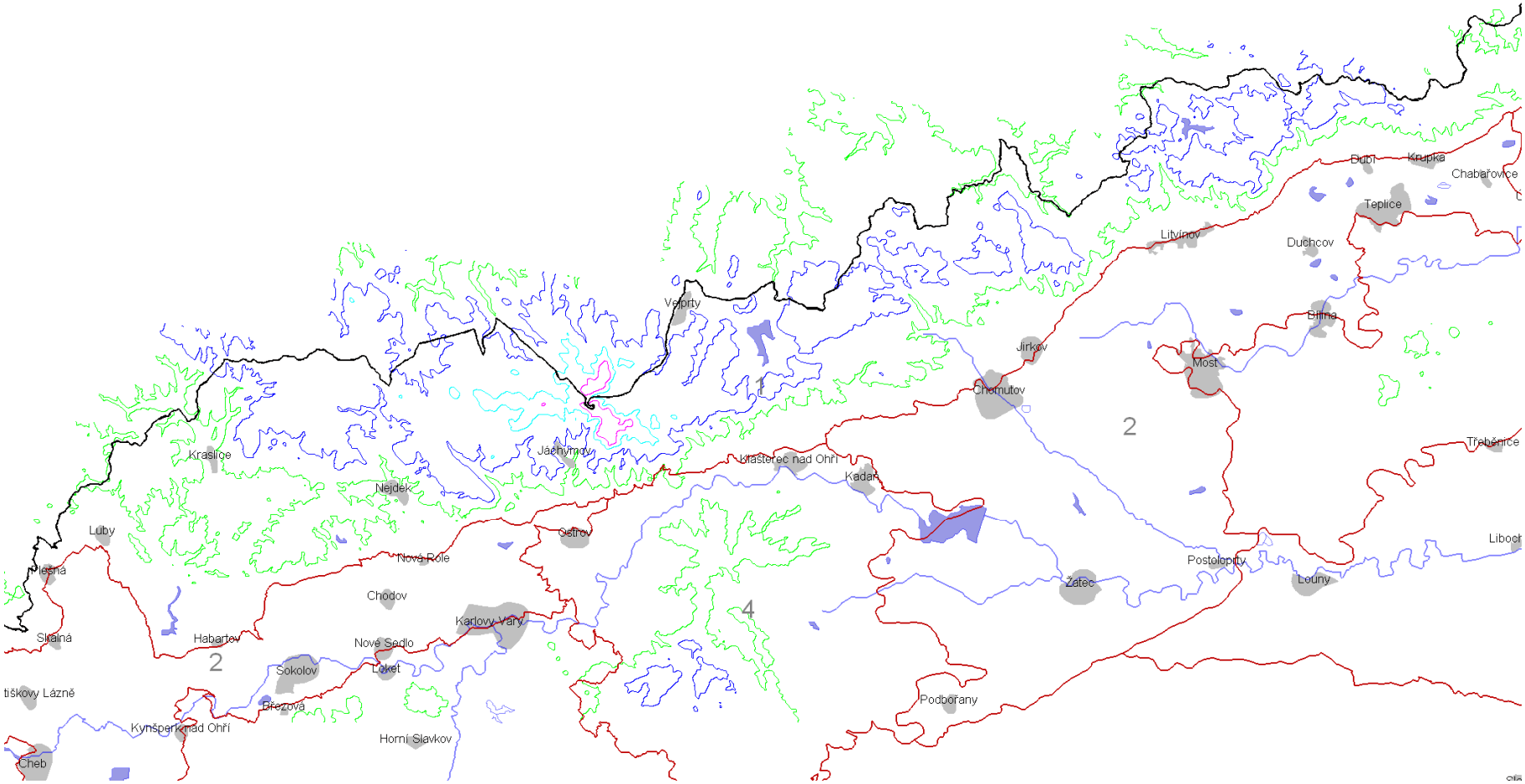
VACEK S., MATĚJKA K., SIMON J., MALÍK V., SCHWARZ O., PODRÁZSKÝ V., MINX T., TESAŘ V., ANDĚL P., JANKOVSKÝ L., MIKESKA M. (2007): Zdravotní stav a dynamika lesních ekosystémů Krkonoš pod stresem vyvolaným znečištěním ovzduší. In: Folia Forestalia Bohemica, Vol. 4. - Lesnická práce, s.r.o., Kostelec n. Černými lesy, 216 p.

VOLAŘÍK D. (2010): Application of digital elevation model for mapping vegetation tiers. - Journal of Forest Science, 56(3): 112-120.

WILSON J.P., GALLANT J.C. (eds.) (2000) Terrain analysis. Principles and applications. John Wiley & Sons, Inc., New York etc.

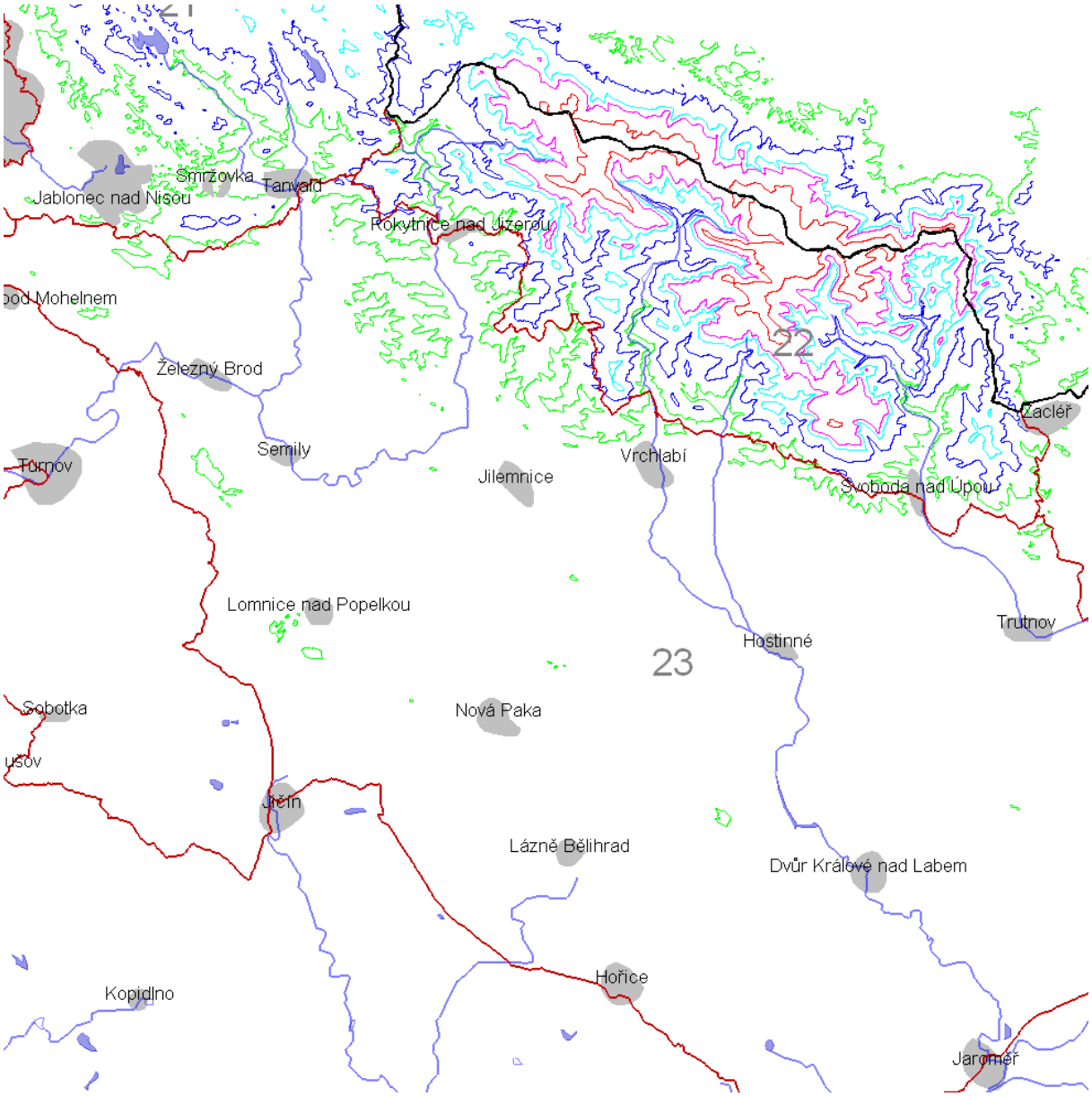


Příloha 1. Model hranic lesních vegetačních stupňů (LVS) zpracovaný na základě teplotního modelu v území Šumavy. Zobrazeny jsou hranice přírodních lesních oblastí.
Appendix 1. Model of the boundaries between forest altitudinal zones (LVS) developed on the basis of a temperature model in the Šumava Mts. (Bohemian Forest). The limits of the natural forest regions are shown.



Příloha 2. Model hranic lesních vegetačních stupňů (LVS) zpracovaný na základě teplotního modelu v území centrálních Krušných hor. Zobrazeny jsou hranice přírodních lesních oblastí. Legenda shodná s přílohou 1.

Appendix 2. Model of the boundaries between forest altitudinal zones (LVS) developed on the basis of a temperature model in the Krušné hory Mts. (Ore Mountains). The limits of the natural forest regions are shown. The legend is the same as in Appendix 1.

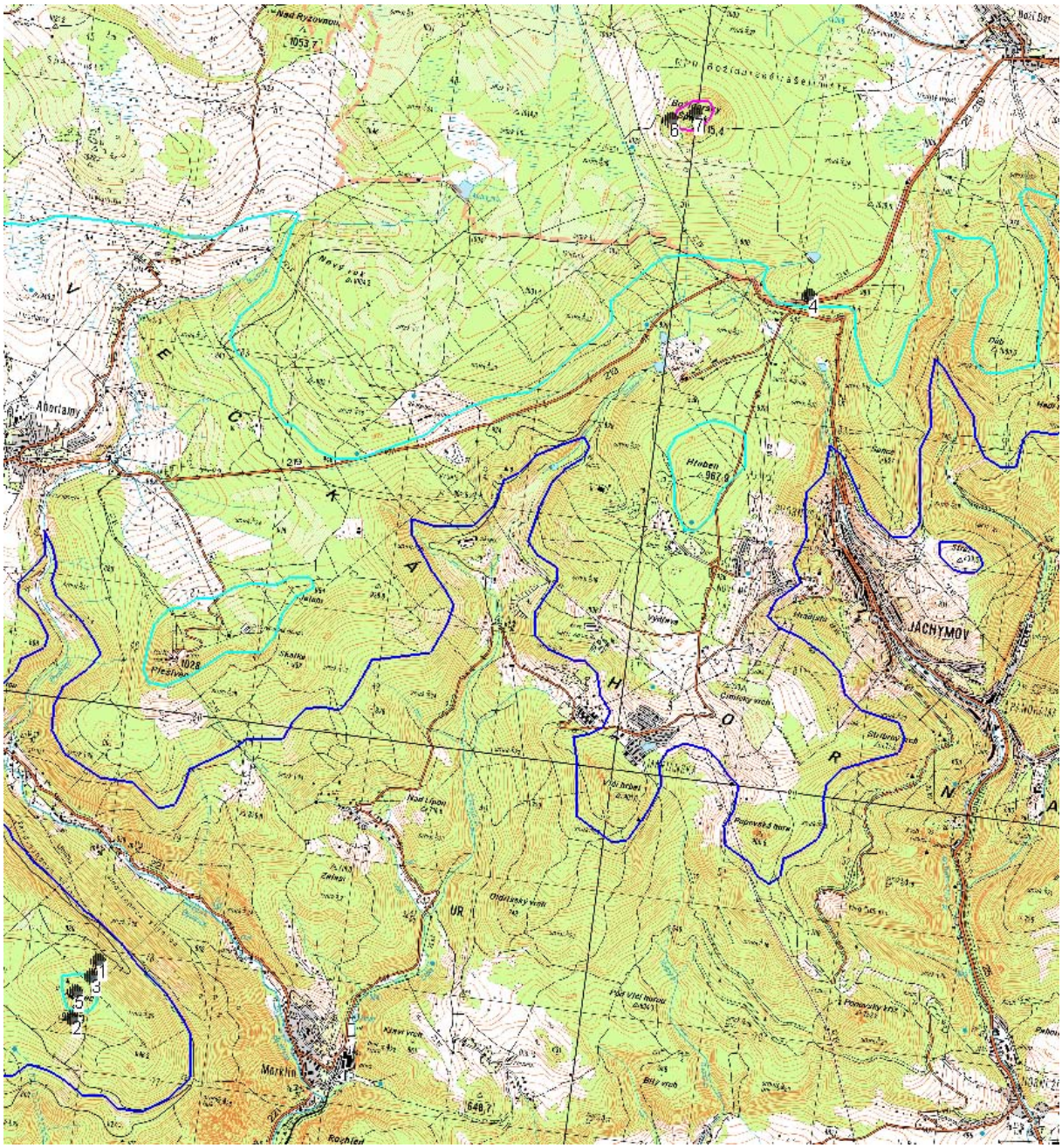


Příloha 3. Model hranic lesních vegetačních stupňů (LVS) zpracovaný na základě teplotního modelu v území Krkonoš a Podkrkonoší. Zobrazeny jsou hranice přírodních lesních oblastí. Legenda shodná s přílohou 1.
Appendix 3. Model of the boundaries between forest altitudinal zones (LVS) developed on the basis of a temperature model in the Krkonoše Mts. (Giant Mountains) The limits of the natural forest regions are shown. The legend is the same as in Appendix 1.

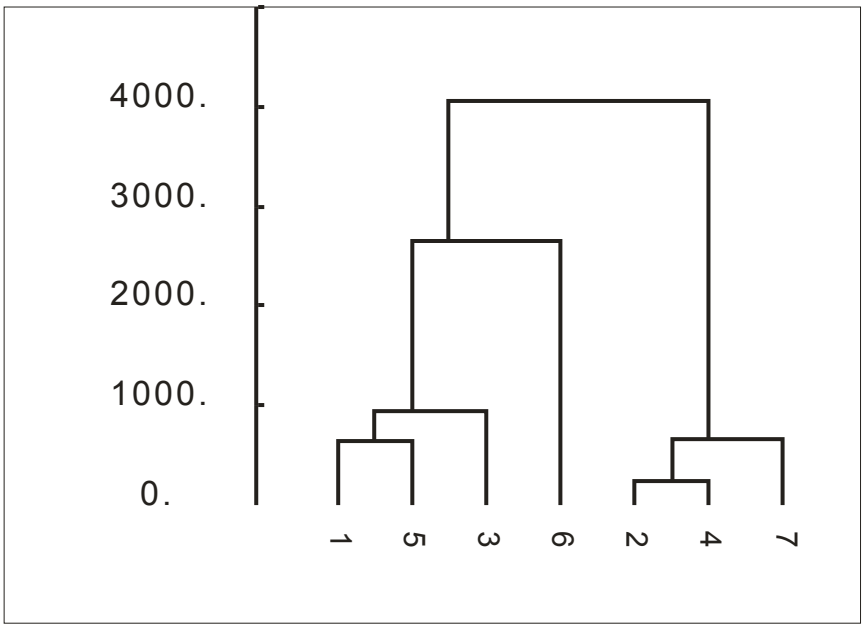
Příloha 4. Fytocenologické snímky z Krušných hor pořízené v roce 2012 pro validaci použitého modelu lesních vegetačních stupňů.
Appendix 4. Phytosociological relevés obtained from the Krušné hory Mts. (Ore Mountains) in 2012 for the validation of the model forest altitudinal zones (FAZ).

Snímek / *Relevé*	**1**	**2**	**3**	**4** [1)]	**5**	**6**	**7**
Originální označení / *Original designation*	12/2012	15/2012	13/2012	11/2012	14/2012	16/2012	4/2012
nadmořská výška / *altitude* (m)	909	953	946	987	971	1080	1117
sklon / *inclination* (°)	35	12	10	12	10	20	5
expozice / *exposition* (°)	45	210	42	205	10	310	5
teplota vzduchu 1961-1990 / *mean air temperature* (°C)	4.7	4.6	4.5	4.4	4.4	3.8	3.6
pokryvnost E_3 / *tree layer cover* (%)	75	55	60	40	75	30	25
pokryvnost E_2 / *shrub layer cover* (%)	10	0	1	0	0	15	30
pokryvnost E_1 / *herb layer cover* (%)	50	40	65	60	75	95	90
pokryvnost E_0 / *moss layer cover* (%)	10	5	10	30	15	30	30
LVS / *FAZ*	6.	6.	6./7.	6./7.	7.	7./8.	8.
E_3:							
Picea abies	15	1.1	30	40	60	30	24
Fagus sylvatica	52	54	30		15		
Acer pseudoplatanus	7.5						1.3
E_2:							
Fagus sylvatica	10		0.5				
Picea abies			0.5			15	30
Sorbus aucuparia						0.15	
E_1:							
Calamagrostis villosa	2	1	3	2	2	3	2-3
Vaccinium myrtillus	1	+	+-1	2	2	+	1
Dryopteris dilatata	1	r	+-1	+-1	1	+	1
Oxalis acetosella	2	+	1	+	+-1	1	+
Avenella flexuosa	r	3		3	1-2	+	3
Sorbus aucuparia	r	+-1	+	+-1	+	+	+
Picea abies	r	r	+	+-1	+-1	3	+-1
Acer pseudoplatanus	+						r
Fagus sylvatica	1	1	1		1		
Rubus idaeus	r		+	r	r	+-1	
Senecio ovatus	r		r	r		+	+
Urtica dioica	+-1		+				
Digitalis purpurea	r					r	
Rubus fruticosus agg.	+						r
Gymnocarpium dryopteris	+						
Galium saxatile		r			+	+	1-2
Rumex acetosella		r			r		
Maianthemum bifolium			+-1		+-1		
Stellaria nemorum			+			+	
Cardamine flexuosa			+				
Epilobium angustifolium			r				
Athyrium filix-femina				1			r
Prenanthes purpurea				r-+			
Trientalis europaea					r		1
Calamagrostis arundinacea						1	r
Homogyne alpina							+

Poznámky:
Pokryvnosti druhů v keřovém a stromovém patře jsou uvedeny v %.
[1)] Kulturní smrčina; na okraji lesa výskyt druhů *Agrostis capillaris*, *Athyrium filix-femina*, *Cirsium heterophyllum*, *Dactylis glomerata*, *Deschampsia caespitosa*, *Epilobium montanum*, *Hieracium laevigatum*, *Luzula luzuloides*, *Melampyrum pratense*, *Prenanthes purpurea*, *Rubus idaeus*, *Sambucus racemosa*, *Senecio ovatus*, *Silene dioica*, *Solidago virgaurea* a *Tanacetum vulgare*, které indikují příslušnost k 6. LVS.



Příloha 5. Lokalizace fytocenologických snímků (příloha 4) v Krušných horách. Zobrazeny jsou linie - spodní hranice 6. až 8. LVS (barvy podle legendy v příloze 1).
Appendix 5. Localization of relevés (Appendix 4) in the Ore Mountains. Shown are the lines - the lower limits of the 6th to 8th FAZ (colors according to the legend in Appendix 1).



Příloha 6. Klasifikace fytocenologických snímků z Krušných hor uvedených v příloze 4. Použita Wardova metoda s kvadrátem euklidovské distance. Data pokryvnosti druhů bylinného patra standardizované na celkovou sumu rovnou celkové pokryvnosti bylinného patra.

Appendix 6. Classification of relevés from the Ore Mountains listed in Appendix 4. The Ward's method with squared Euclidean distance was used. Data on cover of species in the herb layer were standardized to a sum equal to the total cover of the herb layer.

Připraveno pro sborník z konference *Geobiocenologie a její aplikace v lesnictví a krajinářství*, která se uskutečnila na Mendelově univerzitě v Brně 6.–7. prosince 2012.