

MORTALITA SMREKA OBYČAJNÉHO INDIKOVANÁ HRÚBKOVÝM RASTOM V CHRÁNENEJ KRAJINNEJ OBLASTI POĽANA

MORTALITY OF NORWAY SPRUCE INDICATED BY DIAMETER GROWTH IN THE POĽANA PROTECTED LANDSCAPE AREA

Denisa Sedmáková¹, Peter Jaloviar¹, Marek Ježík², Patrícia Priščová¹,
Zuzana Parobeková¹, Ján Pittner¹

¹Lesnícka fakulta, Technická Univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovensko

²Ústav ekológie lesa SAV, L. Štúra 2, 960 01 Zvolen, Slovensko

Abstrakt

Prebiehajúca klimatická zmena zvyšuje mortalitu drevín v lesoch mierneho klimatického pásma. Porovnaním 77 vitálnych a odumierajúcich jedincov sa preukázali výrazné rozdiely v dimenziách stromov, hrúbkovom prírastku, senzitivite rastu, výskyte reakcií na uvoľnenie a sile korelácie s referenčnou chronológiou. Najvýraznejšie rozdiely sa začali prejavovať po roku 1974, čo poukazuje na vplyv klimatického stresu. Na základe vybraných prediktorov bol vytvorený mortalitný model pomocou logistickej regresie s presnosťou klasifikácie 84,42 %. Výsledky naznačujú, že zvolené ukazovatele (hrúbka kmeňa, senzitivita a miera rastovej divergencie) môžu byť účinne využité pri hodnotení vitality smrekových porastov a prispieť k lepšiemu plánovaniu výchovných zásahov, selekcii perspektívnych stromov a zachovaniu produkčného potenciálu smreka v meniacich sa klimatických podmienkach.

Kľúčové slová: rastová vitalita, stromová mortalita, vysokohorské lesy, klimatický stres

Abstract

Ongoing climate change has increased the mortality rates of tree species in temperate forests. A comparison between 77 vital and declining Norway spruce trees revealed significant differences in the stem diameter, diameter increment, growth sensitivity, occurrence of growth releases and strength of correlation with the reference chronology. The most pronounced differences between groups became evident after 1974, pointing to the impact of climatic stress. Based on selected indicators, a mortality model was created using logistic regression. The model achieved a classification accuracy of 84.42%. The results suggest that the selected predictors (stem size, growth sensitivity and growth divergence) can be effectively applied to assess vitality in Norway spruce stands. Their use in forestry practice may improve decision-making in tending strategies, the selection of resilient trees, and contribute to maintaining the productive potential of spruce forests under changing environmental conditions.

Keywords: growth performance, tree death, high mountains, climate-induced stress

1 ÚVOD

Klimatické extrémny, ako sú suchá, víchrice či zmeny v zrážkových režimoch, významne ovplyvňujú stabilitu a vitalitu smrekových porastov, čím zvyšujú ich náchylnosť na biotické aj abiotické stresové faktory (Hlásny *et al.*, 2012). Na základe dlhodobých satelitných pozorovaní z obdobia 1984–2016 bol v európskych lesoch mierneho klimatického pásma zaznamenaný ročný nárast korunovej mortality o 2,4%, čo znamená, že plocha zasiahnutá mortalitou sa od roku 1984 zdvojnásobila (Senf *et al.*, 2018). Dlhodobé výskumy preukázali, že zmeny vo vodnom režime

lesných pôd predstavujú rozhodujúci faktor ovplyvňujúci mortalitu smrekových porastov, a to najmä v období opakovaných suchých rokov (Spiecker a Kahle, 2023). Fatálne prejavy degradácie vitality sa vyskytujú častejšie v rovnorodých porastoch, kde absencia druhej diverzity znižuje adaptačnú kapacitu celého lesného ekosystému (Pretzsch *et al.*, 2020). Aj napriek vysokej náchylnosti na poškodenie suchom (Konôpka a Kunca, 2018), smrek obyčajný patrí na Slovensku k najrozšírenejším hospodárskym drevinám a jeho drevo má vďaka svojim technologickým vlastnostiam široké uplatnenie v spracovateľskom priemysle (Národné lesnícke centrum, 2023). Predstavuje kľúčový zdroj stavebného reziva aj papierenského dreva a tvorí významný podiel celkovej ťažby (Hanewinkel *et al.*, 2013). Vzhľadom na pretrvávajúci hospodársky význam tejto dreviny a súčasne zvýšené riziko jej odumierania v dôsledku meniacej sa klímy je nevyhnutné, aby sa poznatky o jej rastovej výkonnosti a vitalite premietli do lesníckej praxe. Cieľom tohto príspevku je analyzovať mortalitu smreka obyčajného (*Picea abies* [L.] Karst.) v podmienkach Chránenej krajiny oblasti Poľana na základe rastových prejavov jednotlivých stromov a to prostredníctvom identifikácie rozdielov medzi vizuálne vitálnymi a odumierajúcimi jedincami. Dôraz sa kladie na prepojenie medzi zdravotným stavom stromu a jeho minulým rastom, pričom cieľom je posúdiť, do akej miery sa tieto rozdiely dajú kvantifikovať a interpretovať pomocou dendrochronologických analýz. Zistené rozdiely môžu poukazovať na to, že odumierajúce stromy vykazujú špecifické rastové trendy predchádzajúce odumretiu, ktoré ich odlišujú ešte pred objavením sa zreteľných vizuálnych prejavov poškodenia. Na základe týchto rozdielov bude vytvorený individuálny mortalitný model, s cieľom odhadnúť pravdepodobnosť odumretia jednotlivých stromov na základe ich predchádzajúcej rastovej výkonnosti.

2 MATERIÁL A METODY

Skúmané územie Poľana sa nachádza v strednej časti Slovenska a tvorí významný geomorfologický celok v rámci Slovenského stredohoria. Ide o výrazne modelovaný reliéf vzniknutý sopečnou činnosťou, pričom celý horský masív predstavuje pozostatok vyhasnutého stratovulkánu. Klimaticky sa Poľana vyznačuje chladnejším a vlhším horským podnebím. Priemerné ročné teploty sa pohybujú v rozpätí od 3 do 7 °C v závislosti od nadmorskej výšky. Ročný úhrn zrážok dosahuje hodnoty medzi 700 a 1000 mm. Priemerné sumy teplôt a zrážok sú vypočítané za obdobie 1901–2012. Oblasť je známa vysokou relatívnou vlhkosťou vzduchu, čo má pozitívny vplyv na mikroklimatickú stabilitu porastov (Sedmáková *et al.*, 2019).

2.1 Empirický materiál

2.1.1 Výberový dizajn

V roku 2012 boli vo vybraných smrekových porastoch 7. lvs v rámci záujmového územia založené dočasné relaskopické výskumné plochy (RVP). Priemerné údaje prevzaté z opisu plánov starostlivosti pre dané porasty sú: vek 145 rokov, zastúpenie smreka 95 %, kruhová základňa 47 m².ha⁻¹, bonita 27 m. Prvá plocha bola vybraná náhodne pri vstupe do vybraného porastu a ostatné plochy boli zakladané v približne rovnakých rozstupoch v smere po vrstevnici. Založených bolo 27 RVP v 8 porastoch s umiestnením hrúbkovo dominantného jedince v strede RVP. V roku 2023 bol počet RVP navýšený o 12 novozaložených plôch v 3 ďalších porastoch. Na každej RVP boli vizuálne hodnotené vitálne dominantné a ko-dominantné jedince a k nim dimenzionálne prislúchajúci odumierajúci jedinec, pričom uprednostnené boli mŕtve stojace stromy. Za vitálne boli považované stromy s celkovou defoliáciou do 35 % a za odumierajúce s celkovou defoliáciou nad 75 %. Celkovo bolo založených 39 RVP a pre vybraných 78 stromov, na ktorých bola meraná hrúbka, výška a výška nasadenia koruny a vizuálne ohodnotené parametre korún, boli odobrané vývrtové vzorky.

2.1.2 Odber a spracovanie vzoriek

Prírastkové vzorky (vývrty) sa odoberali vo výške 1,3 m nad zemou z rôznej strany po obvode kmeňa v snahe vyhnúť sa reakčnému drevu. Všetky prírastkové vzorky boli spracované štandardnými dendrochronologickými postupmi (Cook a Kairiukstis, 1990). Vývrty s hnilobou alebo fragmentované vzorky boli z ďalšej analýzy vylúčené (1 vývrtová vzorka). Vzorky boli uskladnené v plastových slamkách v chlade. Následne boli vývrty v laboratóriu po vysušení na vzduchu a nalepení na drevené lišty zbrúsené, aby sa zvýraznili ročné kruhy a digitalizované systémom ATRICS (Levanič, 2007). Na výsledných snímkach bola zmeraná šírka letokruhov s presnosťou 0,01 mm a vizuálne a štatisticky krížovo datovaná pomocou softvéru Coorecorder/CDendro (verzia 9.8.1., Cybis Elektronik & Data AB, Švédsko). Kvalita datovania bola overená softvérom COFECHA (Holmes *et al.*, 1986).

2.1.3 Príprava údajov

Na vytvorenie dvoch priemerných chronológií vitálnych a odumierajúcich stromov, boli použité letokruhové série s nameranými šírkami ročných kruhov – ŠRK (mm). Pre zostavené chronológie boli vypočítané základné popisné charakteristiky a to: sl – dĺžka série; min/ $\bar{x}$ /max – minimálna / priemerná / maximálna hodnota ŠRK; $S\bar{x}$ – smerodajná odchýlka hodnôt ŠRK; Ar1 – autokorelácia prvého rádu a ms – priemerná senzitivita hodnôt ŠRK.

Do databázy údajov (n=77 stromov; 1 vývrtová vzorka bola vylúčená kvôli hnilobe) boli zahrnuté nasledujúce základné morfológické a rastové parametre stromov: $d_{1,3}$ – priemer kmeňa meraný vo výške 1,3 m, h – výška stromu, hnk – výška nasadenia koruny, cl – dĺžka živej koruny, cr – pomer dĺžky koruny z výšky stromu (korunovosť), sc – štihlý koeficient, Mai – priemerný ročný hrúbkový prírastok, Pru – počet uvoľnení, Fru – frekvencia uvoľnení. Nasledujúce údaje: $d_{1,3}$ (cm); h(m); hnk(m) boli merané v teréne; cl(m) = h-hnk; cr = h/cl; sc = h/ $d_{1,3}$; Vek(rok) = vek odhadnutý v stržni; Mai(cm.rok⁻¹) = $d_{1,3}$ /Vek; Pru – počet uvoľnení (stanovený graficky); Fru – frekvencia uvoľnení (Vek/Pru).

2.2 Metodika

2.2.1 Základné morfológické a rastové parametre stromov

Rozdiely v základných morfológických a rastových parametroch stromov medzi vitálnymi a odumierajúcimi jedincami boli testované Studentovým t-testom na hladine významnosti $\alpha=5\%$. Pre kvalitatívne znaky bol pre testovanie rozdielov použitý χ^2 -test.

2.2.2 Výpočet vstupných údajov

Podľa identifikovaného začiatku rastovej divergencie (rok 1974), a to grafickým znázornením priebehu zostavených priemerných chronológií vitálnych a odumierajúcich jedincov, boli z letokruhových sérií pre dva približne rovnako dlhé 50-ročné časové intervaly 1924–1974 a 1975–2023 odvodené pre každý strom nasledujúce charakteristiky:

- Ar1 – hodnota autokorelácie prvého rádu – jej pohyblivého 50-ročného priemeru v roku 1974, respektíve hodnota v poslednom kalendárnom roku ≤ 2023
- ms – hodnota senzitivity letokruhovej série – jej pohyblivého 50-ročného priemeru v roku 1974, respektíve v poslednom kalendárnom roku ≤ 2023
- Korel_Ref – veľkosť Pearsonovho korelačného koeficienta (v rámci časového intervalu) medzi hodnotami ŠRK jednotlivej letokruhovej série každého individuálneho stromu a tzv. referenčnej – priemernej chronológie zostavenej pre skupinu vitálnych stromov
- ŠRK_priem (mm) – priemerná šírka ročného kruhu letokruhovej série jednotlivého stromu v rámci časového intervalu a jej smerodajná odchýlka ($S\bar{x}$ _ŠRK)

- Relativizovaná_ŠRK (mm) – priemerná hodnota relativizovaných širok ročných kruhov (radiálnych prírastkov) pre vybrané obdobie (časový interval 1924–1974 alebo 1975 ≤ 2023) a príslušná smerodajná odchýlka ($\bar{Sx}$ relativizovaných ŠRK). Relativizovaná hodnota v danom kalendárnom roku bola počítaná ako podiel ŠRK a rádiusu ($d_{1,3} \cdot 10/2$) v roku odoberania vývrtnu
- Mean_d1,3 (mm) – priemerná hodnota retrospektívne počítaných hrúbok pre vybrané obdobie a príslušná smerodajná odchýlka ($\bar{Sx}_{d1,3}$)
- Vek1974 (rok) – retrospektívne priradená hodnota veku stromu v stržni v kalendárnom roku 1974 na základe jeho odhadu a to v roku odoberania vývrtnu vo výške 1,3 m nad zemou
- d1,31974 (mm) – retrospektívne priradená hodnota hrúbky stromu v roku 1974 na základe jej merania v smere odoberania vývrtnu vo výške 1,3 m nad zemou
- Mai1974 (mm.rok^{-1}) – retrospektívne priradená hodnota priemerného ročného hrúbkového prírastku v roku 1974, počítaná ako $d_{1,31974} / \text{Vek1974}$

2.2.3 Analýza údajov

V našom prípade sa so závislou premennou (vitalita stromov) uvažuje ako s binárnou, to znamená, že premenná môže mať len dve možné hodnoty (0 – odumierajúci, 1 – vitálny). Napríklad strom buď prežije, alebo neprežije extrémnu klimatickú udalosť. V takomto prípade nás zaujíma odhad modelu, ktorý opisuje vzťah medzi jednou alebo viacerými spojitými nezávislými premennými ($x_1 \dots x_n$) a binárnou závislou premennou (y).

V prípade základnej logitovej regresie model obmedzuje závislú premennú len na dve hodnoty. Model si možno predstaviť aj ako rozšírenie logistického modelu pre binárne odpovede tak, že namiesto predpovedania binárnej premennej predpovedáme spojitú premennú, ktorá prirodzene zostáva v hraniciach 0–1. V nelineárnej logistickej regresii predpovedané hodnoty závislej premennej nikdy nebudú menšie (alebo rovné) ako 0, alebo väčšie (alebo rovné) ako 1, bez ohľadu na hodnoty nezávislých premenných. To sa dosiahne použitím regresnej rovnice v tvare:

(1)

$$\exp(b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n) / (1 + \exp(b_0 + b_1x_1 + \dots + b_nx_n))$$

Na základe súboru vybraných nezávislých premenných s preukázaným rozdielom medzi skupinami vitálnych a odumierajúcich jedincov bol zostavený binárny logistický model. Preverené boli rôzne kombinácie premenných. Výsledne boli do modelu zahrnuté štyri premenné: prirodzený logaritmus hrúbky kmeňa v roku 1974 ($\ln_{d_{1,3}1974}$), prirodzený logaritmus priemernej senzitivity prírastkov ($\ln_{ms}$), korelácia s referenčnou prírastkovou krivkou (Korel_REF) a prirodzený logaritmus frekvencie uvoľnení ($\ln_{\text{frekvencia_uvoľnení}}$). Vzhľadom na počet prípadov ($n=77$) nie je žiadúce, aby do modelu vstupovalo viac nezávislých premenných. Quasi-Newtonova metóda bola použitá pre odhad regresných parametrov modelu. Funkcia maximálnej vierohodnosti (zhody) s minimálnou celkovou stratou bola braná do úvahy pri selekcii najvhodnejšieho modelu spolu s percentom správne klasifikovaných prípadov a to s maximálnym a zároveň rovnomerne rozdeleným podielom správnych predpovedí medzi kategóriami 0 a 1. Regresné koeficienty ($b_1 \dots b_4$) s intervalmi spoľahlivosti boli vykreslené a porovnané v jednom grafe kvôli posúdeniu ich presnosti (významnosti) a dôležitosti v rámci zostaveného viacnásobného nelineárneho regresného modelu. Správnosť špecifikovaného modelu bola preverená graficky, a to grafom rozptylu predpovedaných a pozorovaných hodnôt a grafom rozdelenia početností reziduí.

3 VÝSLEDKY A DISKUSIA

3.1 Vizuálne hodnotenie vitality a základné parametre stromov

Stromy zaradené do kategórie vitálnych (1, n=44) dosahovali v priemere väčšie dimenzie ako odumierajúce (0, n=33) jedince (Tab. 1), a to tak v priemere kmeňa ($d_{1,3}$), ako aj vo výške (h) a dĺžke koruny (cl). Tieto rozdiely boli štatisticky významné, čo potvrdzuje, že rastová výkonnosť je úzko spätá s fyziologickým stavom stromu. Odumierajúce stromy vykazovali významne nižšie hodnoty priemerného ročného hrúbkového prírastku (Mai). Počet uvoľnení, teda počet rokov s výrazne zvýšeným prírastkom ako dôsledok zmeny konkurenčných pomerov, bol vyšší u vitálnych stromov, čo poukazuje na ich schopnosť aktívne reagovať na zmeny rastového priestoru. Vyššia frekvencia uvoľnení u odumierajúcich stromov indikuje približne dvojnásobne menej časté pozitívne rastové impulzy. Tieto zistenia poukazujú na úzky vzťah medzi rastovou výkonnosťou a fyziologickou stabilitou jednotlivých stromov. Vitálne jedince, ktoré dosahovali významne väčšie rozmery v priemere kmeňa, výške a dĺžke koruny, boli pravdepodobne dlhodobo úspešnejšie v súťaži o svetlo a priestor. Naše zistenia, že vitálne stromy smreka obyčajného dosahovali väčšie rozmery v priemere kmeňa, výške a dĺžke koruny, sú v súlade so štúdiou Salema a Sulonen (2008), ktorí preukázali negatívnu koreláciu medzi triedou defoliácie a rastovými parametrami smreka obyčajného. Taktiež štúdia Ferrettiho *et al.* (2021) potvrdzuje, že defoliácia a poškodenie koruny sú negatívne spojené s rastom kmeňa, čo naznačuje, že vyššia vitalita stromov je spojená s lepším rastovým výkonom. Vencurik *et al.* (2013) z výberkových lesov ukazujú, že výškový rast prirodzenej obnovy úzko súvisí s vertikálnou štruktúrou porastu, najmä s výmerou strednej a hornej vrstvy, čo ovplyvňuje aj celkové rastové tempo jednotlivcov. Samotná štruktúra porastu, najmä intenzita svetla a konkurenčný tlak, zohrávajú kľúčovú úlohu pri udržiavaní vitality jedincov. Zároveň je potrebné zohľadniť aj vnútroskupinovú variabilitu, keďže jednotlivé parametre rastu nemusia byť vždy konzistentné naprieč triedami vitality. Napríklad aj niektoré

Tab. 1: Porovnanie základných morfológických a rastových parametrov medzi vitálnymi a odumierajúcimi stromami

Comparison of basic morphological and growth parameters between vital and declining trees

	$\bar{x}$ (0)	$S\bar{x}$ (0)	$\bar{x}$ (1)	$S\bar{x}$ (1)	p
$d_{1,3}$ (cm)	47,1	10,9	54,9	11,2	0,0031
h (m)	24,6	4,7	27,9	4,3	0,0023
hnk (m)	9,6	3,8	9,7	3,8	0,8799
cl (m)	15,1	5,1	18,2	4,5	0,0056
cr	60,5	15,6	65,2	12,7	0,1435
sc ($h/d_{1,3}$)	0,5	0,1	0,5	0,1	0,4567
Vek (rok)	137,5	39,0	140,0	35,3	0,7694
Mai (cm)	0,354	0,08	0,409	0,11	0,0160
Pru (ks)	2,6	1,4	3,3	1,1	0,0403
Fru (Vek/Pru)	67,0	36,1	50,4	25,8	0,0209

Poznámka: 0 – odumierajúce, 1 – vitálne, $\bar{x}$ – aritmetický priemer, $S\bar{x}$ – smerodajná odchýlka, p – hodnota (udáva štatistickú významnosť rozdielu medzi skupinami), $d_{1,3}$ – priemer kmeňa meraný vo výške 1,3 m, h – výška stromu, hnk – výška nasadenia koruny, cl – dĺžka živej koruny, cr – pomer dĺžky koruny z výšky stromu (korunovosť), sc – štíhlostný koeficient, Mai – priemerný ročný hrúbkový prírastok, Pru – počet uvoľnení, Fru – frekvencia uvoľnení

vitálne jedince môžu v určitých rastových ukazovateľoch dočasne zaostávať, zatiaľ čo niektoré stromy so zníženou vitalitou môžu krátkodobo vykazovať zvýšený prírastok, ide teda o dynamický a viacfaktorovo podmienený jav (Seidl a Blennow, 2012).

Tieto zistenia podporujú interpretáciu, že rastové rozmery, Mai aj frekvencia uvoľnení môžu slúžiť ako dôležité indikátory fyziologickej stability stromov a ich dlhodobej adaptácie na stres.

3.2 Hrúbkový rast pred a po roku 1974

Rastová dynamika stromov bola analyzovaná prostredníctvom priemernej šírky letokruhov za obdobie 1924 až 2023, pričom boli osobitne vyhodnotené dve časové fázy: pred rokom 1974 a po ňom. Takéto rozdelenie umožňuje identifikovať prípadné zmeny v strednodobom raste medzi skupinami vitálnych a odumierajúcich stromov v súvislosti s výraznými zmenami environmentálnych podmienok a zohľadňuje potenciálne dlhodobé stresové faktory pôsobiace na úrovni porastu. Za obdobie rokov 1924 až 1974 boli rozdiely medzi skupinami vitálnych a odumierajúcich jedincov relatívne malé. Priemerný radiálny prírastok dosahoval u vitálnych stromov hodnotu 1,72 mm, zatiaľ čo u odumierajúcich bol mierne nižší – 1,55 mm. Tento rozdiel však nebol štatisticky významný. Porovnateľné boli aj ďalšie parametre, ako napríklad autokorelácia prvého rádu (Ar1), priemerná senzitivita (ms) a miera synchronizácie rastu s referenčnou chronológiou vitálnych stromov (Korel_Ref), čo poukazuje na homogénnejšie prostredie bez zásadnejších rastových odchýlok medzi stromami rozdielnej vitality. Rozdiel v hrúbke predstavoval v roku 1974 približne 4 cm ($p < 0,1$). Kým v období pred rokom 1974 boli rozdiely medzi skupinami nevýznamné, v období po roku 1974 sa začali prejavovať významné odlišnosti (Tab. 2). Vitálne stromy si zachovali vyššiu rastovú dynamiku, zatiaľ čo odumierajúce jedince vykazovali znížený prírastok, vyššiu senzitivitu a nižšiu synchronizáciu s referenčnou rastovou krivkou. Zníženie synchronizácie medzi rastovými krivkami jednotlivých jedincov môže odrážať narastajúcu rozdielnosť v rastových reakciách smreka na stres (Buras *et al.*, 2018). Vitálne stromy si udržali priaznivý rastový profil, zatiaľ čo odumierajúce jedince vykazovali pokles rastového výkonu

Tab. 2: Charakteristiky hrúbkového rastu a prírastkov pre obdobie 1975–2023
Diameter growth and increment characteristics for the period 1975–2023

	$\bar{x} (0)$	$S\bar{x} (0)$	$\bar{x} (1)$	$S\bar{x} (1)$	p
AR1	72,5	16,9	64,07	17,60	0,0374
ms	23,55	5,53	18,30	4,13	0,0000
Korel_Ref	0,13	0,34	0,47	0,23	0,0000
ŠRK_priem (mm)	0,854	0,59	1,300	0,58	0,0015
$S\bar{x}$ _ŠRK (mm)	0,298	0,19	0,346	0,21	0,3046
Relativizovaná_ŠRK	0,004	0,00	0,005	0,00	0,0145
$S\bar{x}$ relativizovaných ŠRK	0,001	0,00	0,001	0,00	0,9265
Mean_d _{1,3}	43,57	10,34	49,24	11,52	0,0279
$S\bar{x}$ _d _{1,3}	2,14	1,73	3,05	1,49	0,0165

Poznámka: Ar1 – autokorelácia prvého rádu, ms – priemerná senzitivita, Korel_Ref – korelačný koeficient prírastkov jednotlivých stromov (letokruhovej série) s priemernou (referenčnou) prírastkovou krivkou zostavenou z letokruhových sérií vitálnych jedincov, ŠRK_priem – priemerná šírka ročných radiálnych prírastkov v mm, $S\bar{x}$ _ŠRK – priemerná smerodajná odchýlka ročných radiálnych prírastkov, Relativizovaná_ŠRK – priemerný relativizovaný ročný radiálny prírastok a jeho smerodajná odchýlka ($S\bar{x}$ relativizovaných ŠRK), mean_d_{1,3} – priemer retrospektívne počítaných hrúbok pre obdobie 1924–1974 a ich smerodajná odchýlka ($S\bar{x}$ _d_{1,3})

a zvýšenú medziročnú variabilitu. Divergencia bola vysvetlená ako dôsledok klimatického stresu spôsobeného extrémne nepriaznivými podmienkami v rastovej sezóne 1974, konkrétne nízkou teplotou, vysokým úhrnom zrážok a nízkou intenzitou slnečného žiarenia, pričom daný rok predstavoval najsilnejší negatívny extrém v raste v celom sledovanom období (Sedmáková *et al.*, 2022). Divergencia v raste a rastovej odozve bola opakovane preukázaná ako významný ukazovateľ narastajúcej stresovej záťaže a zníženej adaptability smrekových porastov na meniace sa klimatické podmienky (Bošela *et al.*, 2014; Čermák *et al.*, 2017; Merlin *et al.*, 2024). Divergencia medzi oboma skupinami môže súvisieť s odlišnou schopnosťou fyziologickej adaptácie na stresové faktory. Pozorovaná divergencia rastu medzi vitálnymi a odumierajúcimi stromami po roku 1974 je v súlade s výsledkami Oreškoviča *et al.* (2024), ktorí identifikovali obdobie poklesu prírastku v smrekových a jedľových porastoch severozápadných Dinárskych Álp od roku 1980 do roku 2013, pričom predchádzajúce obdobie rokov 1950 až 1980 bolo charakterizované priaznivým rastovým trendom. Výsledky zhlukovej analýzy Oreškoviča *et al.* (2024) ukazujú, že v rámci porastov dochádza k diferenciacii stromov do viacerých rastových skupín, čo odráža rozdielnosť v adaptačnej kapacite jednotlivých stromov na zmenené environmentálne podmienky.

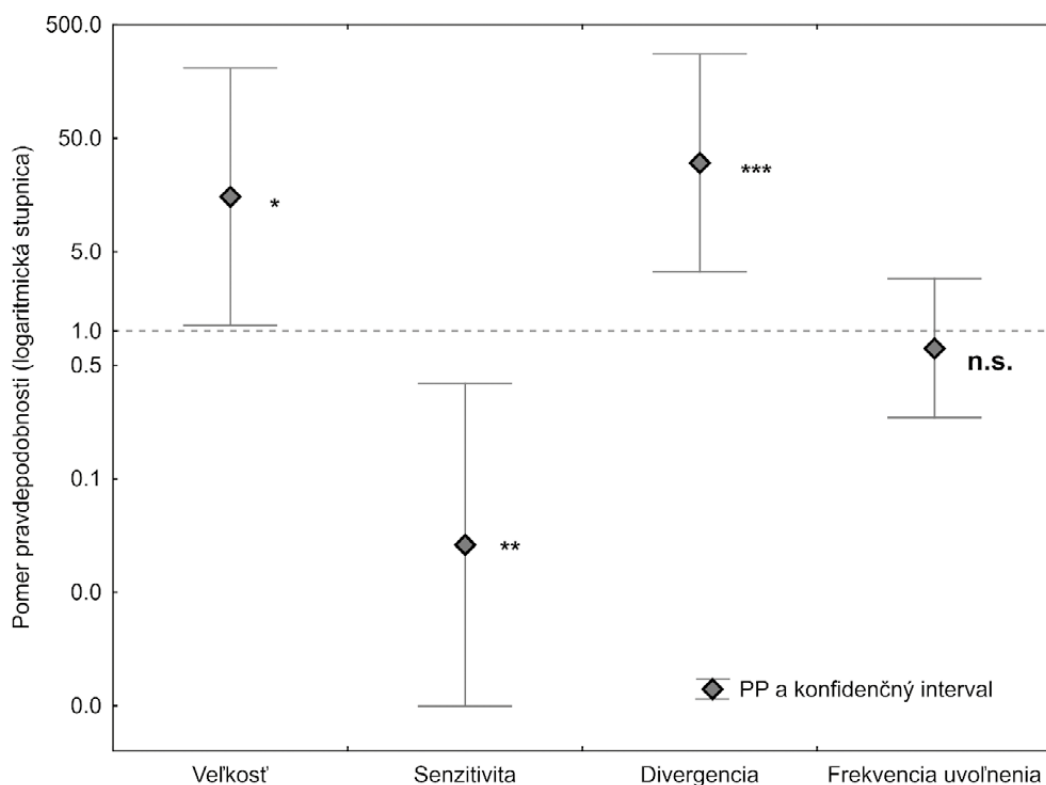
3.3 Logistický mortalitný model a klasifikácia stromov

Na základe súboru vybraných premenných s preukázaným rozdielom medzi skupinami vitálnych a odumierajúcich jedincov bol zostavený binárny logistický model. Do modelu boli zahrnuté premenné: Veľkosť – prirodzený logaritmus hrúbky kmeňa v roku 1974, Senzitivita – prirodzený logaritmus priemernej senzitivity prírastkov za 1975–2023, Divergencia – korelácia s referenčnou prírastkovou krivkou za 1975–2023, FrekvenciaUvoľnenia – prirodzený logaritmus frekvencie uvoľnení. Výsledný model dosiahol vysokú úroveň štatistickej významnosti ($p < 0,00001$) a je vyjadrený v tvare:

(2)

$$Y = \exp(3,49 + 2,73 * \text{Veľkosť} - 4,33 * \text{Senzitivita} + 3,41 * \text{Divergencia} - 0,35 * \text{FrekvenciaUvoľnenia}) / [1 + \exp(3,49 + 2,73 * \text{Veľkosť} - 4,33 * \text{Senzitivita} + 3,41 * \text{Divergencia} - 0,35 * \text{FrekvenciaUvoľnenia})]$$

Najvýznamnejší vplyv na pravdepodobnosť prežitia majú hrúbka kmeňa v roku 1974 a korelácia s referenčnou rastovou krivkou. Naopak, frekvencia uvoľnení nebola významným prediktorom v rámci modelu. Priemerná senzitivita (ms), teda citlivosť letokruhových prírastkov na medziročné výkyvy prostredia, vykazuje záporný vzťah k prežitiu, čo znamená, že stromy so stabilnejším rastom mali vyššiu šancu na zachovanie vitality. Hodnota hrúbky, ktorá podľa modelu predstavuje prahovú hranicu medzi kategóriami sa pohybuje na úrovni približne 32 cm ($\ln = 3,465$; stromy s väčšou hrúbkou majú vyššiu ako 50% pravdepodobnosť prežitia). Stromy s hrúbkou pod touto hranicou boli častejšie klasifikované ako ohrozené, pričom najnižšie hodnoty boli zaznamenané pri stromoch s hrúbkou okolo 22 cm. Priemerná senzitivita hrúbkových prírastkov v období rokov 1974 až 2023 poukazuje na mieru reakcie stromov na medziročné zmeny podmienok prostredia. Klesajúca hodnota senzitivity býva spájaná s vyššou pravdepodobnosťou prežitia jedinca. V sledovanom období sa hodnota indexu senzitivity pohybovala od hraničnej úrovne 20, zodpovedajúcej prahovej hodnote $y = 0,05$, až po maximum na úrovni 37. Analýza korelácie medzi jednotlivými letokruhovými sériami a referenčnou prírastkovou krivkou vitálnych stromov v období rokov 1974 až 2023 ukázala, že vyšší stupeň zhody s touto priemernou krivkou zodpovedá vyššej pravdepodobnosti prežitia daného jedinca. Korelačné hodnoty sa pohybovali v intervale od 0,2, považovanom za hraničnú úroveň, až po maximálnu hodnotu 0,8. Frekvencia uvoľnení pozorovaná v priebehu celej letokruhovej série jednotlivých stromov poukazuje na dĺžku období bez výskytu rastového uvoľnenia. Kratšie časové úseky bez uvoľnenia vykazujú nevýznamný vplyv na pravdepodobnosť prežitia stromu, pričom ich účinok sa javí ako náhodný a štatisticky nepreukazný.



Obr. 1: Pomer šancí (odds ratio) vybraných premenných zahrnutých do modelu mortality vzhľadom na pravdepodobnosť prežitia stromov; každý bod v grafe reprezentuje konkrétnu nezávislú premennú, pričom hodnota pomeru šancí je vyjadrená kosoštvorcom a príslušný 95-percentný interval spoľahlivosti je znázornený vodorovnou úsečkou. * ($p < 0,05$), ** ($p < 0,1$), *** ($p < 0,001$), n.s. štatisticky nepreukazný rozdiel

The odds ratio of selected variables included in the mortality model with respect to the probability of tree survival; each point on the graph represents a specific independent variable, with the odds ratio value indicated by a diamond shape and the corresponding 95% confidence interval shown as a horizontal line. * ($p < 0.05$), ** ($p < 0.1$), *** ($p < 0.001$), n.s. statistically non-significant difference

Klasifikáciu stromov do dvoch kategórií na základe ich pravdepodobnosti prežitia vzhľadom na silu pôsobenia jednotlivých nezávislých premenných názorne zobrazuje Obr. 1. Ten vizualizuje, ako sa pri jednotkovej zmene hodnoty nezávislej premennej (napríklad hrúbky, senzitivity a pod.) mení pravdepodobnosť prežitia, resp. pomer šancí jednotlivcov na prežitie.

Pomer šancí spolu s 95-percentným intervalom spoľahlivosti bol stanovený pre každú nezávislú premennú zahrnutú v zostavenom modeli. Referenčná hodnota rovná jednej predstavuje hranicu, pri ktorej nezávislá premenná nemá štatisticky významný vplyv na pravdepodobnosť prežitia stromu. Aj na základe porovnania pozorovaných a modelom predikovaných výstupov (Tab. 3), zostavený model vykazuje dobrú klasifikačnú schopnosť rozlišovať medzi jedincami, ktoré prežívajú, a tými, ktoré vykazovali známky odumierania.

Dosiahnutá miera správnej klasifikácie vo výške 84,42 % naznačuje vysokú presnosť vytvoreného modelu pri rozlišovaní medzi vitálnymi a odumierajúcimi stromami. Z klasifikačnej matice vyplýva, že model bol úspešnejší pri predikcii vitality (88,64 %) ako pri identifikácii ohrozených jedincov (78,79 %). Táto asymetria je v ekologickom výskume častá a môže byť dôsledkom vyššej premenlivosti rastového správania u stromov nachádzajúcich sa v prechodnom štádiu vitality.

Tab. 3: Matica klasifikácie prípadov podľa modelu

Classification matrix of cases by model

Pozorované	Pomer šancí: 28.97, Perc. správne: 84.42%		
	Predpovedaná 0	Predpovedaná 1	Percento správne
0	26	7	78.79
1	5	39	88.64

Podobné prístupy boli úspešne aplikované aj v iných ekologických štúdiách. Kachaev *et al.* (2020) dosiahli pomocou logistickej regresie založenej na údajoch z letokruhov borovice sibírskej (*Pinus sibirica*) presnosť predikcie nad 80 %, čo potvrdzuje vhodnosť rastových údajov ako prediktorov vitality. Das a Stephenson (2015) dospeli k porovnateľným hodnotám presnosti (78,6–83,7 %) pri predikcii mortality u jedle bielej (*Abies concolor*) a borovice Lambertovej (*Pinus lambertiana*), pričom ako rozhodujúci ukazovateľ sa ukázal byť pomer medzi aktuálnym a potenciálnym rastom. Hoci predchádzajúce výskumy (Cailleret *et al.*, 2016, 2017) identifikovali šírku letokruhov ako dôležitý indikátor rizika mortality. Novšia štúdia toho istého autorského kolektívu (Cailleret *et al.*, 2019) rozšírila túto perspektívu o analýzu medzירוčne variability a synchronnosti rastu. Zistilo sa, že zvýšená variabilita a nízka synchronicita môžu signalizovať zvýšené riziko mortality, najmä u ihličnanov. Zároveň však autori upozorňujú na obmedzenia použiteľnosti týchto ukazovateľov, keďže náhle stresové udalosti ako napadnutie podkôrnym hmyzom alebo extrémne suchá sa nemusia prejaviť v trende radiálneho rastu predchádzajúcim odumretiu stromu. Navyše, variabilita rastovej reakcie medzi a v rámci druhov, ako aj samotné limity šírky letokruhov ako ukazovateľa vitality, znižujú predikčnú presnosť tohto prístupu. Z toho dôvodu sa odporúča kombinácia viacerých ukazovateľov, vrátane fyziologických a morfológických parametrov či modelovania kambiálnej aktivity, čím možno získať komplexnejší pohľad na procesy vedúce k odumieraniu stromov (Cailleret *et al.*, 2019).

4 ZÁVER

Cieľom tohto príspevku bolo analyzovať vybrané rastové a morfológické ukazovatele, ktoré by mohli slúžiť ako indikátory vitality smreka obyčajného (*Picea abies*) v podmienkach Chránenej krajinskej oblasti Poľana. Porovnaním skupiny vizuálne vitálnych a odumierajúcich stromov sa preukázali štatisticky významné rozdiely vo viacerých parametroch, predovšetkým v hrúbke kmeňa, veľkosti prírastkov, senzitivite rastu a miere zhody s referenčnou chronológiou. Vitálne stromy si udržali vyššiu a stabilnejšiu rastovú výkonnosť, zatiaľ čo odumierajúce jedince vykazovali znížený prírastok, vyššiu senzitivitu, dlhšie trvajúce útlmy rastu a nižšiu synchronizáciu s referenčnou chronológiou.

K výraznému rozlíšeniu medzi týmito skupinami začalo dochádzať po roku 1974, čo možno interpretovať ako dôsledok sezónnych klimatických zmien a narastajúcej záťaže v podobe iných stresových faktorov. Takýto priebeh vývoja je označovaný ako rastová divergencia a poukazuje na to, že rozdiely v citlivosti stromov na klimatické podmienky sa v čase prehlbujú. Najmenej stabilné jedince na túto záťaž reagovali znížením vitality ešte pred tým, ako sa prejavili zreteľné symptómy odumierania. Na základe identifikovaných rozdielov bol zostavený mortalitný model prostredníctvom binárnej logistickej regresie. Model dosiahol celkovú úspešnosť klasifikácie 84,42 %, pričom vyššia presnosť bola zaznamenaná pri identifikácii vitálnych stromov (88,64 %).

Záverom možno konštatovať, že rozdiely v základných biometrických a rastových parametroch medzi vitálnymi a odumierajúcimi stromami smreka obyčajného reflektujú komplexnú kombináciu genetických predispozícií, histórie rastových podmienok a schopnosti jednotlivcov

reagovať na meniace sa prostredie. Selekciou stromov na odstránenie podľa zostaveného modelu, to znamená stromov, ktoré vykazujú známky odumierania, poškodenia, zaostávania v raste alebo ak bránia rastu vitálnejšieho zdravšieho stromu je les, kde po ťažbe napríklad vo výberkovom systéme hospodárenia, zostanú zdravšie jedince s väčším prístupom k svetlu a zvýšenou schopnosťou rýchleho rastu.

LITERATÚRA

- BÄDERS, E., ROMĀNS, E., DESAINE, I., KRIŠĀNS, O., SEIPULIS, A., DONIS, J., JANSONS, Ā. 2022. An integration of linear model and 'random forest' techniques for prediction of Norway spruce vitality: A case study of the hemiboreal forest, Latvia. *Remote Sensing*. 14 (9), 2122.
- BOŠEĽA, M., SEDMÁK, R., SEDMÁKOVÁ, D., MARUŠÁK, R., KULLA, L. 2014. Temporal shifts of climate-growth relationships of Norway spruce as an indicator of health decline in the Beskids, Slovakia. *Forest Ecology and Management*. 325, 108–117.
- BURAS, A., SPYT, B., JANECKA, K., KACZKA, R. 2018. Divergent growth of Norway spruce on Babia Góra Mountain in the Western Carpathians. *Dendrochronologia (Verona)*. 50, 33–43.
- CAILLERET, M., BIGLER, C., BUGMANN, H., CAMARERO, J. J., CUFAR, K., DAVI, H., ... MARTÍNEZ-VILALTA, J. 2016. Towards a common methodology for reconciling statistical and mechanistic models of tree mortality. *Ecological Applications*. 26(7), 1827–1841.
- CAILLERET, M., JANSEN, S., ROBERT, E. M., DESOTO, L., AAKALA, T., ANTOS, J. A., ... MARTÍNEZ-VILALTA, J. 2017. A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global Change Biology*. 23(4). 1675–1690.
- CAILLERET, M., DAKOS, V., JANSEN, S., ROBERT, E. M., AAKALA, T., AMOROSO, M. M., ... MARTINEZ-VILALTA, J. 2019. Early-warning signals of individual tree mortality based on annual radial growth. *Plant Science*. 9, 1964.
- ČERMÁK, P., RYBNÍČEK, M., ŽID, T., ANDREASSEN, K., BØRJA, I., KOLÁŘ, T. 2017. Impact of climate change on growth dynamics of Norway spruce in South-eastern Norway. *Silva Fennica*. 51(2), 1784.
- COOK, E. R., KAIRIUKSTIS, L. A. 1990. *Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences*. Dordrecht: Springer Science+Business Media. 394 s.
- DAS, A. J., STEPHENSON, N. L. 2015. Improving estimates of tree mortality probability using potential growth rate. *Canadian Journal of Forest Research*. 45, 920–928.
- DIETZE, M. C., SALA, A., CARBONE, M. S., CZIMCZIK, C. I., MANTOOTH, J. A., RICHARDSON, A. D., VARGAS, R. 2014. Non-structural carbon in woody plants. *Annual Review of Plant Biology*. 65(1), 667–687.
- FERRETTI, M., GHOSH, S., GOTTARDINI, E. 2021. Stem radial growth is negatively related to tree defoliation and damage in conifers, Northern Italy. *Frontiers in Forests and Global Change*. 4, 1–10.
- HANEWINKEL, M., CULLMANN, D. A., SCHELHAAS, M. J., NABUURS, G. J., ZIMMERMANN, N. E. 2013. Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land. *Nature Climate Change*. 3(3), 203–207.
- HLÁSNY, T., SITKOVÁ, Z., BOŠEĽA, M., ZÚBRIK, M., TROMBIK, J., BARKA, I., ... SEDMÁK, R. 2012. *Zmena klímy a lesy Slovenska, Možné dopady, adaptácia a odporúčania pre prax*. Zvolen: NLC, Lesnícky výskumný ústav. 75 s.
- HOLMES, R. L. 1986. Quality control of crossdating and measuring. A users manual for program COFECHA. In: HOLMES, R. L., ADAMS, R. K., FRITTS, H. C. (eds.). *Tree-ring chronologies of western North America: California, Eastern Oregon and Northern Great Basin*. Chronology Series 6. Tucson: University of Arizona, p. 41–49.
- KACHAEV, A. V., PETROV, I. A., KHARUK, V. I., BELOVA, E. N. 2020. A new approach to developing a logistic regression model variables to predict tree mortality, based on tree-ring growth dynamics. *Sibirskij lesnoj žurnal*. 7(5), 37–44.
- KONÔPKA, B., KUNCA, A. 2018. Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) decline in the era of global warming: A Central European perspective. *Forest Systems*. 27(3), e010.
- LEVANIČ, T. 2007. ATRICS–A new system for image acquisition in dendrochronology. *Tree-Ring Research*. 63(2), 117–122.

- MERLIN, M., HYLEN, G., VERGARECHEA, M., BRIGHT, R. M., EISNER, S., SOLBERG, S. 2024. Climate-Growth relationships for Norway spruce and Scots pine remained relatively stable in Norway over the past 60 years despite significant warming trends. *Forest Ecology and Management*. 569, 122180.
- NÁRODNÉ LESNÍCKE CENTRUM. 2023. *Zelená správa o lesnom hospodárstve Slovenskej republiky 2022*. Zvolen: NLC, 66 s.
- OREŠKOVIĆ, M., TRLIN, D., ANIĆ, I., ORŠANIĆ, M., PRŠA, L., MIKAC, S. 2024. Climate sensitivity and tree growth patterns in subalpine spruce-dominated forests of the North-western Dinaric Alps. *Forests*. 15(11), 1972.
- PRETZSCH, H., GRAMS, T., HÄBERLE, K. H., PRITSCH, K., BAUERLE, T., RÖTZER, T. 2020. Growth and mortality of Norway spruce and European beech in monospecific and mixed-species stands under natural episodic and experimentally extended drought. Results of the KROOF throughfall exclusion experiment. *Trees*. 34, 943–960.
- SALEMMA, M., JUKOLA-SULONEN, E. L. 2008. Vitality rating of *Picea abies* by defoliation class and other vigour indicators. *Scandinavian Journal of Forest Research*. 5(3), 413–426.
- SEDMÁKOVÁ, D., SEDMÁK, R., BOSELA, M., JEŽÍK, M., BLAŽENEC, M., HLÁSNY, T., MARUŠÁK, R. 2019. Growth-climate responses indicate shifts in the competitive ability of European beech and Norway spruce under recent climate warming in East-Central Europe. *Dendrochronologia (Verona)*. 54, 37–48.
- SEDMÁKOVÁ, D., SEDMÁK, R., KÚDELA, P., ŽURICA, P., SANIGA, M., JALOVÍAR, P., KUCBEL, S. 2022. Divergent growth responses of healthy and declining spruce trees to climatic stress: A case study from the Western Carpathians. *Dendrochronologia (Verona)*. 76, 126023.
- SEIDL, R., BLENNOW, K. 2012. Pervasive growth reduction in Norway spruce forests following wind disturbance. *PLOS One*. 7(3), e33301.
- SENF, C., PFLUGMACHER, D., ZHIQIANG, Y., SEBALD, J., KNORN, J., NEUMANN, M., ... SEIDL, R. 2018. Canopy mortality has doubled in Europe's temperate forests over the last three decades. *Nature Communications*. 9(1), 4978.
- SPIECKER, H., KAHLE, H. P. 2023. Climate-driven tree growth and mortality in the Black Forest, Germany - Long-term observations. *Global Change Biology*. 29(20), 5908–5923.
- VENCURIK J., KUCBEL, S., SNOPOKOVÁ, Z. 2013. Štruktúra, rast a klimatická senzitivita prirodzenej obnovy smreka obyčajného (*Picea abies* /L./ Karst.) a jedle bielej (*Abies alba* Mill.) vo výberkových lesoch severozápadných Karpát. *Zprávy lesníckeho výzkumu*. 58(2), 123–130.

Poděkování

Táto práca vznikla vďaka podpore Vedeckej grantovej agentúry MŠVVaM SR a SAV prostredníctvom financovania projektu VEGA 1/0515/23 a APVV 21-0199.

Kontakty | Contact Information

Denisa Sedmáková: e-mail: denisa.sedmakova@tuzvo.sk