

RŮSTOVÁ REAKCE SMRKU (*PICEA ABIES* (L.) KARST.) NA EXTRÉMNÍ IMISNĚ-KLIMATICKÝ STRES V PRŮBĚHU ZIMY 1995/96 V KRUŠNÝCH HORÁCH

GROWTH RESPONSE OF NORWAY SPRUCE (*PICEA ABIES* (L.) KARST.) TO EXTREME CLIMATIC AND POLLUTION STRESS DURING THE WINTER OF 1995/96 IN THE KRUŠNÉ HORY MOUNTAINS (CZECH REPUBLIC)

MONIKA VEJPUŠTKOVÁ ✉ - TOMÁŠ ČIHÁK

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i., Strnady 136, CZ - 252 02 Jiloviště

✉ e-mail: vejpuskova@vulhm.cz

ABSTRACT

The main objective of the study was to evaluate long-term growth response of spruce to extreme stress event during the winter of 1995/96 in the Krušné hory Mts. (Czech Republic) using methods of dendrochronology. For the purpose of the study, ten permanent monitoring plots located along the main ridge of the Krušné hory Mts. were selected. Increment cores were sampled in spring 2014 in all plots. For the 1995–2013 period, data from the regular evaluation of height growth, crown conditions, and the content of stress elements in needles were available. Radial and height growth both showed a clear reaction to the stress event, which manifested as an abrupt decrease in the values observed. Radial growth regenerated very quickly over three years regardless to damage level. Height growth seems to be more sensitive indicator with the five-year phase of regeneration on heavily damaged plots. Height increment had a significantly negative correlation both with degree of defoliation and fluorine content in needles, while tree-ring widths had no significant relationship to the other parameters of vitality. Principal component analysis showed that fluorine content in the second needle-year class is a significant parameter explaining the greatest proportion of data variability.

Klíčová slova: klimatický stres, letokruhová analýza, smrk ztepilý, znečištění ovzduší, výškové a tloušťkové přírůsty

Key words: climatic stress, tree-ring analysis, Norway spruce, air pollution, height and diameter increments

ÚVOD

V posledních desetiletích se zvyšuje četnost a intenzita extrémních klimatických jevů jako důsledek globálních změn klimatu. Tyto jevy mohou významně ohrozit lesní ekosystémy (ALLEN et al. 2010). Mezi nejvíce ohrožené patří porosty na exponovaných stanovištích nebo porosty oslabené vlivem acidifikace prostředí znečišťujícími látkami. Stromy stresované nepříznivými klimatickými podmínkami jsou navíc náchylnější k poškození dalšími abiotickými i biotickými faktory (DESPREZ-LOUSTAU et al. 2006; MATYSSEK et al. 2006). Klimatický stres přímo ovlivňuje fyziologické procesy stromů (BRÉDA et al. 2006). Při stresu dochází k redukci fotosyntézy a k narušení alokace uhlíku (GALIANO et al. 2012). Redukce tloušťkového a výškového růstu kmene je jednou z prvních reakcí stromu na stres, protože vytváření nových vrstev dřeva (letokruhů) není pro strom životně nezbytné (DOBBERTIN 2005). Dlouhodobý monitoring, resp. dendrochronologické zhodnocení zdravotního stavu a růstových reakcí lesních dřevin na stresové jevy, zůstávají důležitými nástroji i po odeznění extrémního imisního zatížení, a to zejména ve vztahu k výskytu extrémních jevů spjatých s klimatickou změnou (HLÁSNÝ et al. 2014).

Lesy v České republice jsou příkladem imisemi dlouhodobě stresovaných porostů. Rychlý pokles znečištění na začátku 90. let 20. stol. vedl ke zlepšování stavu lesa, zejména v nejvíce zatížených regionech (FIALA et al. 2002). Pozitivní vývoj zdravotního stavu byl přerušen roz-

sáhlým poškozením lesních porostů v severních pohořích v důsledku extrémních klimatických podmínek v průběhu zimy 1995/96, jejichž negativní vliv byl ve východní části Krušných hor ještě umocněn vysokými koncentracemi znečišťujících látek (LOMSKÝ, ŠRÁMEK 1999).

Hlavním cílem prezentované práce bylo retrospektivně vyhodnotit růstovou reakci smrku na extrémní imisně-klimatický stres v průběhu zimy 1995/96 v Krušných horách za použití dendrochronologických metod, a dále vyhodnotit vztah tloušťkových a výškových přírůstů k ostatním indikátorům vitality rutinně hodnoceným v rámci programu monitoringu zdravotního stavu lesů.

MATERIÁL A METODIKA

Práce vychází ze sítě trvalých monitoračních ploch (TMP) založených Výzkumným ústavem lesního hospodářství a myslivosti (VÚLHM) na počátku 90. let v mladých smrkových porostech v Krušných horách. Radiální tloušťkové přírůsty byly analyzovány celkem na 430 vývrtech z 10 vybraných TMP (obr. 1, tab. 1). Pro výběr ploch bylo určující hodnocení zdravotního stavu porostů (defoliace) z roku 1996, na jehož základě byly definovány 3 stupně poškození: slabé (defoliace do 40 %), střední (defoliace 40–60 %) a silné (defoliace nad 60 %). Dalšími kritérii při výběru porostu byl věk porostu a stanovištní podmínky. Přednost dostaly starší porosty, to znamená ty, které v roce 1996 spadaly do 3. a 4. věkového stupně, aby bylo možné studovat

vývoj tloušťkových přírůstů také před rokem 1996. Porosty byly vybrány v podobných stanovištních podmínkách – soubor lesních typů 7K nebo 7M; porosty na podmačených nebo rašelinných stanovištích byly z výběru vyjmuty.

Vývrty byly odebrány přírůstovým nebo zezem ve výčetní výšce minimálně z 20 úrovnových stromů na ploše, po 2 vývrtech z každého stromu (tab. 1). Šířky letokruhů byly měřeny na měřícím stole Time-Table 2 s přesností na 0,01 mm.

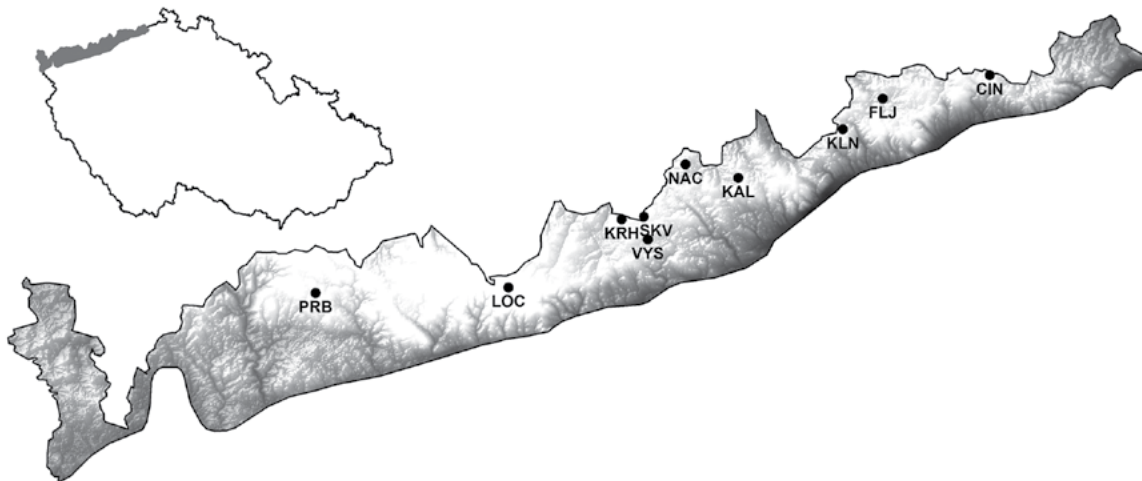
Naměřené letokruhové série byly vizuálně křížově datovány. Data byla statisticky verifikována v programu Cofecha (HOLMES 1983). V celé délce každé letokruhové série byly identifikovány náhle poklesy přírůstu, výskyt nekompletních (vykliňujících) či zcela chybějících letokruhů, které lze považovat za indikátory působícího stresu.

Přirozený pokles přírůstů s věkem (věkový trend) byl odstraněn ze sérií šířek letokruhů procesem standardizace. Měřené šířky letokruhů

byly vyděleny příslušnou hodnotou standardizační funkce, použita byla Hugershoffova funkce (WARREN 1980), a konvertovány na letokruhové indexy (standardní letokruhová chronologie). Tímto způsobem byl z řad šířek letokruhů odfiltrován vliv věku a stanovištních podmínek.

Výškový přírůst, tj. délka terminálního výhonu, je na monitoračních plochách měřen na konci každé vegetační sezóny. V letech 1996–2002 byly výškové přírůsty zjišťovány pomocí teleskopické výškoměrné tyče Sokkia, od roku 2003 je používán výškoměr Vertex.

Rozdíly v defoliaci a ve velikosti tloušťkových a výškových přírůstů mezi skupinami ploch s různým stupněm poškození byly testovány jednofaktorovou analýzou variance (Anova). Testy byly provedeny pro jednotlivé roky v post-stresovém období 1996–2003. Pokud byl výsledek Anovy signifikantní, byl následně aplikován Tukeyho test mnohonásobných srovnání k detekci rozdílů mezi jednotlivými úrovn



Obr. 1.
Lokalizace odběrových míst

Fig. 1.
Location of study sites

Tab. 1.
Charakteristika odběrových lokalit a lesních porostů
Characteristics of study sites and forest stands

Plocha/ Plot	Souřadnice/ Coordinates		Nadm. výška/ Altitude	Exp.	Věk. st./ Age class*	Lesní typ/ Forest type**	Půda/ Soil	Poškoz./ Level of damage 1995/96	Počet vývrvtů/ Number of cores
	Y	X							
PRB: Přebuz	864532,61	993937,83	885	-	6	7M3	PZoh	slabé/slight	48
LOC: Loučná	839595,89	993239,23	990	SZ/NW	5	7K1	KP	slabé/slight	42
VYS: Výsluní	821557,60	987059,20	810	JZ/SW	5	6K4	KP	slabé/slight	44
NAC: Načetín	816671,80	977359,60	795	-	6	7K3	PZhm	střední/medium	44
KAL: Kálek	809840,91	979101,47	815	JZ/SW	6	7K3	PZhm	střední/medium	42
FLJ: Fláje	791175,41	968867,61	750	JZ/SW	6	7K4	KPmo	střední/medium	42
KRH: Kryšt. Hamry	824929,44	984446,29	900	Z/W	6	7K3		silné/heavy	40
SKV: Skelný vrch	822108,54	984114,82	875	SV/SE	5	7K3	PZhm	silné/heavy	42
KLN: Klíny	796352,01	972834,50	800	-	6	7K3	PZhm	silné/heavy	44
CIN: Cínovec	777321,85	965822,91	820	SZ/NW	6	7K3	PZhm	silné/heavy	42

*Age class 5: 40–50 years; Age class 6: 50–60 years; **Forest type: 6K – Acidic Spruce – Beech; 7K– Acidic Beech – Spruce; 7M – Nutrient-poor Beech – Spruce

němi poškození. Délka fáze regenerace byla poté určena jako počet let po poškození, kdy byl identifikován významný rozdíl mezi silně a slabě poškozenými plochami.

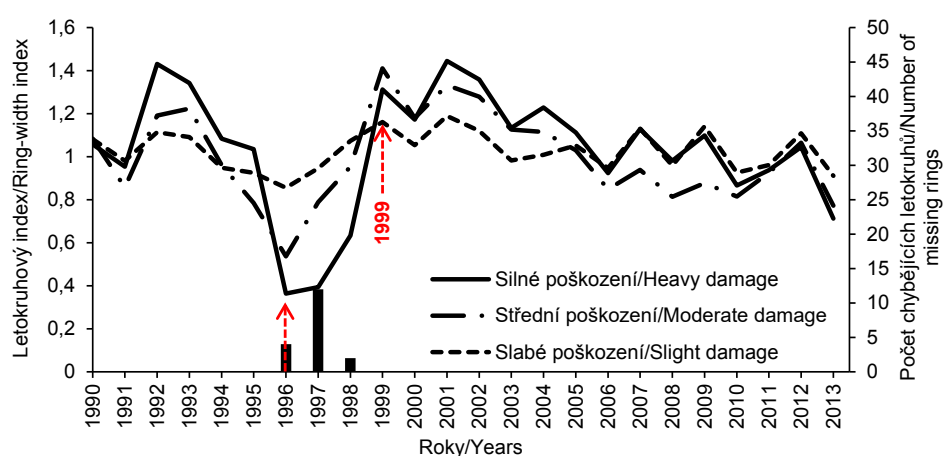
Pokles přírůstů v letech 1996–1998 byl kvantifikován ve vztahu k předchozímu referenčnímu období 1993–1995. Ztráty na tloušťkovém přírůstu byly vyjádřeny jako procentický podíl přírůstu ve stresovém období k referenční periodě.

Vztah mezi radiálními tloušťkovými přírůsty a dalšími indikátory vitality stromu (defoliace, počet ročníků jehličí, výškový přírůst, obsah zátěžových prvků síry a fluoru v 1. a 2. ročníku jehličí) byl analyzován metodami korelační analýzy a analýzy hlavních komponent (MELOUN et al. 2012). Pro analýzy byla použita data z pravidelného hodnocení monitoračních ploch, která jsou k dispozici za období 1996–2013. Výpočty byly provedeny v programu Statistica.

VÝSLEDKY

Radiální tloušťkový přírůst reagoval na stres v zimním období 1995/96 velmi citlivě (obr. 2). Hluboký pokles přírůstů v roce 1996 je patrný u silně a středně poškozených porostů. Na silně poškozených plochách byly nízké přírůsty zaznamenány i v roce 1997, v roce 1998 začíná přírůst stoupat a v roce 1999 dosahuje, až překračuje, velikost tloušťkových přírůstů na slabě poškozených plochách. U středně poškozených ploch je vzestup přírůstů patrný již v roce 1997. O výrazném účinku stresu na tloušťkový růst svědčí i výskyt chybějících letokruhů detekovaných v letokruhových sériích v období 1996–1998 (obr. 2). Nejvíce poruch bylo zaznamenáno v roce 1997, kdy se letokruh nevytvořil u 2,7 % z celkem 430 hodnocených vývrtů.

V důsledku stresu v zimním období 1995/96 výrazně poklesl v následujícím roce také výškový přírůst, a to u silně a středně poškozených porostů (obr. 3). Pokles byl srovnatelný pro oba stupně poškození.

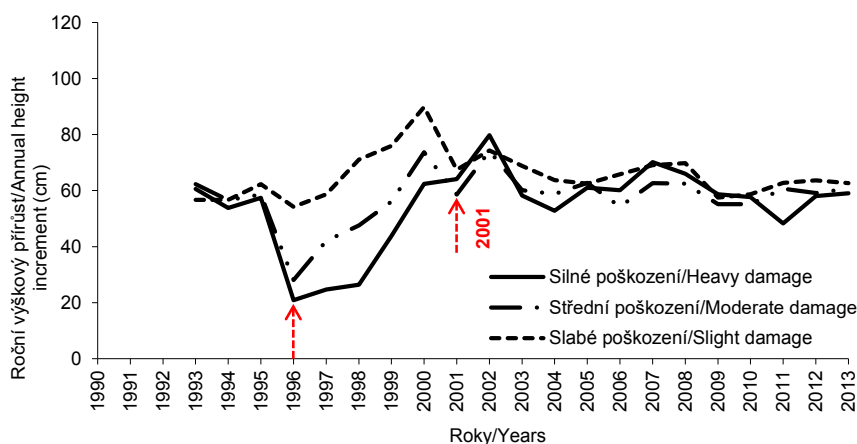


Obr. 2.

Průměrné letokruhové chronologie smrkových porostů s různým stupněm poškození po zimě 1995/96; červené šipky označují trvání přírůstové deprese

Fig. 2.

Mean ring-width chronologies of spruce stands of different damage level after winter 1995/96; red arrows highlight the duration of growth depression



Obr. 3.

Průměrný výškový přírůst smrkových porostů s různým stupněm poškození v zimě 1995/96; červené šipky označují trvání přírůstové deprese

Fig. 3.

Mean height increment (e.g. length of annual terminal shoots) of spruce stands of different damage level after winter 1995/96; red arrows highlight the duration of growth depression

Zatímco u středně poškozených porostů výškový přírůst postupně regeneroval již od roku 1997, u silně poškozených porostů výškový přírůst v letech 1996–1998 stagnoval a regenerace započala až v roce 1999.

Délka fáze regenerace se pohybovala od 3 do 7 let v závislosti na posuzovaném indikátoru (tab. 2). Tloušťkový přírůst regeneroval velmi rychle v průběhu tří let bez ohledu na míru poškození. U výškových přírůstů byla regenerace pomalejší. K vyrovnání výškových přírůstů mezi silně a slabě poškozenými plochami došlo až po 5 letech, tedy v roce 2001. Jako nejcitlivější indikátor se jeví defoliace. Plochy se střední mírou poškození regenerovaly 5 let, silně poškozené dokonce 7 let.

Pokles přírůstů v období přírůstové deprese v letech 1996–1998 byl kvantifikován ve vztahu k předchozímu referenčnímu období 1993–1995. Na silně poškozených plochách se redukce přírůstů pohybovala

od 42 % do 66%, na středně poškozených plochách od 15 % do 30 %. Na slabě poškozených plochách Přebuz a Výsluní byl tloušťkový přírůst redukován v průměru o 8 %, na ploše Loučná přírůst oproti srovnávacímu období dokonce stoupl o 7 % (obr. 4).

Vztah mezi tloušťkovými přírůsty a dalšími indikátory stresu za období 1996–2013 prezentuje tab. 3. Šířka letokruhů významně koreluje pouze s výškovými přírůsty, k defoliaci a obsahu zátěžových prvků nemá tloušťkový přírůst vztah. Naproti tomu výškový přírůst je významně záporně ovlivněn nejen mírou odlistění, ale také obsahem fluoru v jehličí. Defoliace kladně koreluje s obsahem fluoru, zatímco obsah síry nemá na míru odlistění významný vliv.

Analýza hlavních komponent potvrdila, že obsah fluoru v jehličí je vysoce signifikantní parametr vysvětlující největší část variability dat

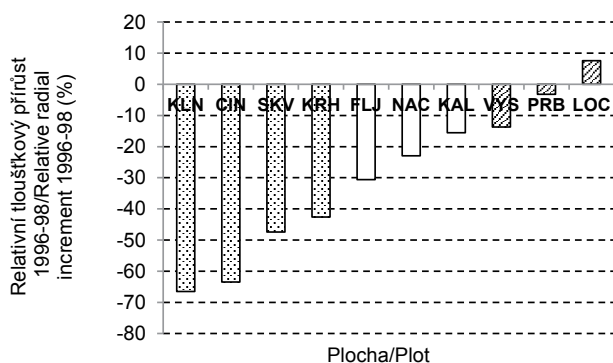
Tab. 2.

Výsledky Tukeyho testu mnohonásobných srovnání rozdílů v defoliaci a ve velikosti tloušťkových a výškových přírůstů mezi skupinami ploch s různým stupněm poškození v post-stresovém období 1996–2003

Results of Tukey's multiple comparison tests of differences in defoliation, radial and height increments between the plots of individual damage levels in the post-stress period 1996–2003

Indikátor/ Indicator	Srovnávané stupně poškození/ Compared levels of damage	Hodnota pravděpodobnosti P/Probability level P							
		1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
RI	S1=S2	**	**	**					
	S2=S3	**	**	**					
	S1=S3	**	**	**					
HI	S1=S2	**	**	**	**	**	**		
	S2=S3		**	**	*	**			
	S1=S3	**	**	**	**	**			*
DEF	S1=S2	**	**	**	*	**	**		
	S2=S3	**	**	**	**	**			
	S1=S3	**	**	**	**	**	**	**	

Signifikantní rozdíl jsou označeny * pro $P < 0.05$ a ** pro $P < 0.01$ /Significant differences are denoted by * $P < 0.05$ level and ** $P < 0.01$ level
RI – radiální přírůst/radial increments; HI – výškový přírůst/height increments; DEF – defoliace/defoliation; S1 – slabě poškození/slight damage; S2 – střední poškození/medium damage; S3 – silně poškození/heavy damage



Obr. 4.

Relativní periodický přírůst v období přírůstové deprese 1996–98 vztahovaný k referenčnímu období 1993–1995

Fig. 4.

Relative periodical radial increment in the period of growth depression 1996–1998 related to the reference period of 1993–1995

Tab. 3.

Korelace mezi tloušťkovými přírůsty a dalšími hodnocenými indikátory vitality stromu za období 1994–2013

Correlation matrix of time series of selected parameters (stress indicators) for the period of 1994–2013

	LI	HI	DEF	ROČ	S1	S2	F1	F2
LI								
HI	0,35							
DEF	0,07	-0,35						
ROČ	-0,23	0,27	-0,87					
S1	-0,23	-0,06	0,08	-0,11				
S2	-0,08	0,08	-0,06	0,01	0,74			
F1	-0,25	-0,39	0,33	-0,26	0,40	0,20		
F2	-0,14	-0,40	0,53	-0,48	0,27	0,21	0,71	

Tučně uvedené hodnoty jsou signifikantní na hladině významnosti $\alpha = 0,95$ /Correlation values significant at the 95% confidence limit are in bold;
LI – letokruhový index/ring-width index; HI – výškový přírůst/height increment; DEF – defoliace/defoliation; ROČ – počet ročníků jehličí/number of needle year classes; S1, S2 – obsah síry v 1. a 2. ročníku jehličí/sulphur content in the 1st and 2nd needle year class; F1, F2 – obsah fluóru 1. a 2. ročníku jehličí/fluorine content in the 1st and 2nd needle year class

(obr. 5). Tři hlavní komponenty s eigenvalue $\lambda > 1$ vystihují 78,3 % společného rozptylu dat. V komponentě PC1 (37,9 % rozptylu dat) je určujícím faktorem obsah fluoru v jehličí, v PC2 (23,5 %) je dominantní obsah síry, pro PC3 (16,9 %) jsou určující růstové parametry (tloušťkový a výškový přírůst).

DISKUSE

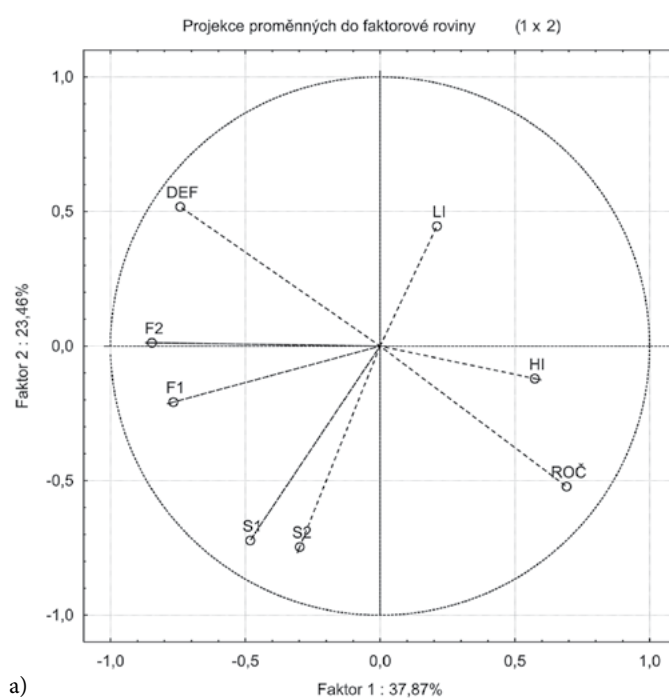
Klimatický stres ve spojení s vysokou imisní zátěží v zimě 1995/96 se projevil náhlým poklesem jak tloušťkových, tak výškových přírůstů. Intenzita redukce přírůstů závisela na míře poškození plochy, vyjádřené stupněm odlisnění. Zajímavé je srovnání fáze regenerace podle jednotlivých parametrů a úrovní poškození. Tloušťkový přírůst plně regeneroval v průběhu 3 let jak na středně, tak na silně poškozených plochách. Na středně poškozených plochách je patrný vzestup přírůstů již v roce 1997, na silně poškozených plochách o rok později. Redukce tloušťkových přírůstů v důsledku vysoké defoliace je nejčastěji popisována ve spojení s žíry různých druhů defoliátorů. Při ztrátě listění nad 60 % dochází k významné redukci tloušťkových přírůstů jak v roce výskytu stresové události, tak v dalších 2–3 letech po odeznění stresu (ARMOUR et al. 2003; KURKELA et al. 2005). Přírůst reaguje nejcitlivěji, pokud byly zasaženy fotosynteticky nejvíce aktivní ročníky (STRAW et al. 2002). Průměrná hodnota defoliace smrku v Krušných horách se pohybovala v roce 1997 okolo 46 % pro středně a 66 % pro silně poškozené plochy, v roce 1998 dosahovaly hodnoty defoliace 44 %, respektive 55 %. Z těchto údajů je patrné, že radiální přírůst byl schopen regenerovat při relativně vysokých hodnotách defoliace okolo 50 %. Výskyt poruch v tvorbě letokruhů na silně poškozených plochách byl maximální v roce 1997. Tento fakt indikuje, že se stres může v tloušťkových přírůstech projevit s časovým zpožděním. Také AXELSON et al. (2014) zaznamenal u douglasky maximální redukci přírůstů s jedno- až dvouletým zpožděním po maximu žíry obaleče západního.

U výškového přírůstu byla zaznamenána fáze regenerace v trvání 5 let. Relativně dlouhé období stagnace výškových přírůstů (1996–1998) na silně poškozených plochách zřejmě souvisí s doloženým až 90% poškozením pupenů po zimě 1995/96 (LOMSKÝ, ŠRÁMEK 1999). Smrk všeobecně patří mezi dřeviny s citlivou reakcí přírůstů na abiotické prostředí (SCHMIDT-VOGT 1977). Například v podmínkách Slovenska BOŠEĽA et al. (2013) matematickým modelováním demonstroval, že tloušťkový přírůst smrku výrazně citlivěji reagoval na kombinovaný vliv teploty vzduchu a deficitu nasycení vodními parami než buk.

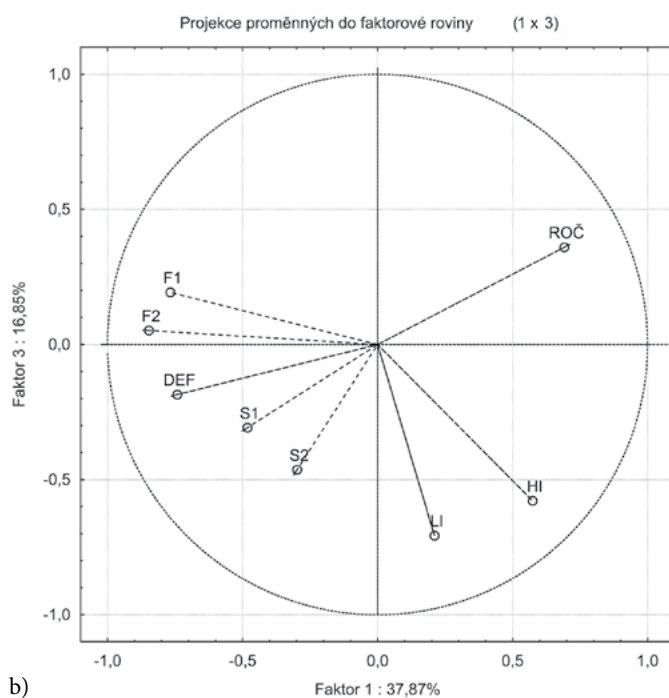
Stromy na sledovaných plochách reagovaly na zlepšení růstových podmínek výrazným zrychlením tloušťkového i výškového přírůstu. Dynamika jednotlivých typů přírůstu však byla odlišná. Zatímco rychlost tloušťkového přírůstu kulminovala v roce 1999, u výškového přírůstu zrychlení pokračovalo ještě v roce 2000. Při častěji se opakujících stresových epizodách může tento nepoměr negativně ovlivňovat charakteristiky stability smrkových porostů a zvyšovat citlivost k poškození abiotickými činiteli, jako je vítr nebo námraza.

V celém post-stresovém období 1996–2013 vykazuje výškový přírůst signifikantní vztah k dalším indikátorům stresu, jako je míra odlisnění a obsah zátěžových prvků v jehličí. Naproti tomu přírůst tloušťkový nemá k těmto parametrům žádný vztah. To je pravděpodobně dáno tím, že výškový přírůst je výrazně méně ovlivněn kompeticí než přírůst tloušťkový (ŠEBÍK, POLÁK 1990) a právě kompetice může významně modifikovat roční tloušťkový přírůst a překrýt tak vliv dalších faktorů (PIUTTI, CESCATTI 1997; CASTAGNERI et al. 2012).

Pokud posuzujeme délku obnovy podle defoliace, pak středně poškozené porosty regenerovaly 5 let, silně poškozené dokonce 7 let. Podle Lomského a Šrámka (2004) byly stresovou událostí v zimě 1995/96 zasaženy 3–4 ročníky jehličí, opad byl na silně poškozených plochách zaznamenán v celé koruně. V následujících letech proto byly smrky nuceny postupně nahrazovat poškozený asimilační aparát. Délka obnovy koresponduje s počtem ročníků jehličí zaznamenaným v roce



a)



b)

Poznámka/Note: Význam popisků v obrázku se shoduje s tab. 3
For explanation of parameter codes see Tab. 3

Obr. 5.
Grafy komponentních vah (a) PC1 a PC2, (b) PC1 a PC3
Fig. 5.
PCA loadings plots: (a) PC1 and PC2, (b) PC1 and PC3

2002, tedy na konci fáze regenerace: na silně poškozených plochách měly smrky v průměru 6,4 ročníků, na slabě poškozených plochách 7,3 ročníků jehličí.

Analýza hlavních komponent ukazuje na významnost hodnoty obsahu fluoru v jehličí. Z výsledků listových analýz v oblasti Krušných hor je patrné, že po zimě 1995/96 koncentrace fluoru v 1. ročníku jehličí na většině monitoračních ploch překračovaly limit toxicity 5 mg.kg⁻¹. Během následující periody se koncentrace postupně snižovaly, v roce 2000 byla průměrná koncentrace fluoru nižší než 2 mg.kg⁻¹ na všech plochách. V posledních letech je však pozorován opětovný mírný nárůst, epizody s výrazně zvýšenou zátěží tímto prvkem byly zaznamenány v letech 2005 a 2010 (LOMSKÝ et al. 2013).

ZÁVĚR

Ve sledovaných růstových parametrech – šířce letokruhů a výškovém přírůstu – se jasně projevil vliv stresové události ze zimy 1995/96. Délka fáze regenerace se na silně poškozených plochách pohybovala od 3 do 7 let v závislosti na sledovaném parametru.

V celém hodnoceném období 1996–2013 výškový přírůst významně záporně koreluje s mírou defoliace a obsahem fluoru v jehličí. Naproti tomu šířky letokruhů nemají k těmto parametrům statisticky průkazný vztah. Analýza hlavních komponent ukázala, že obsah fluoru v druhém ročníku jehličí je signifikantní parametr vysvětlující největší část variability dat a lze jej proto považovat za významný indikátor stresu pro mladé porosty smrku v Krušných horách.

Poděkování:

Příspěvek vznikl v rámci řešení výzkumného projektu COST CZ – LD13007 „Růstová reakce smrku (*Picea abies* (L.) KARST.) na extrémní imisně-klimatický stres v průběhu zimy 1995/96“. Studie je součástí mezinárodní akce COST FP1106 STReESS – Studying Tree Responses to extreme Events: a SynthesiS.

LITERATURA

- ALLEN C.D., MACALADY A.K., CHENCHOUNI H., BACHELET D., McDOWELL N. et al. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forests Ecology and Management*, 259: 660–684. DOI: 10.1016/j.foreco.2009.09.001
- ARMOUR H., STRAW N., DAY K. 2003. Interactions between growth, herbivory and long-term foliar dynamics of Scots pine. *Trees – Structure and Function*, 17: 70–80. DOI: 10.1007/s00468-002-0212-4
- AXELSON J.N., BAST A., ALFARO R., SMITH D.J., GÄRTNER H. 2014. Variation in wood anatomical structure of Douglas-fir defoliated by the western spruce budworm: a case study in the coastal-transitional zone of British Columbia, Canada. *Trees*, 28: 1837–1846.
- BOŠEĽA M., PAJTIK J., KONŮPKA B., ŠEBEŇ V., VIDA T. 2013. Modeling effects of weather condition on seasonal dynamics of the stem circumference increment in a mixed stand of Norway spruce and European beech. *Lesnický časopis – Forestry Journal*, 59:180–188.
- BRÉDA N., HUCB R., GRANIERA A., DREYERA E. 2006. Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Science*, 63: 625–644.
- CASTAGNERI D., NOLA P., CHERUBINI P., MOTTA R. 2012. Temporal variability of size–growth relationships in a Norway spruce forest: the influences of stand structure, logging, and climate. *Canadian Journal of Forest Research*, 42: 550–560.
- DESPREZ-LOUSTAU M.L., MARÇAIS B., NAGELEISEN L.M., PIOUS D., VANNINI A. 2006. Interactive effects of drought and pathogens in forest trees. *Annals of Forest Science*, 63: 597–612. DOI: 10.1051/forest:2006040
- DOBBERTIN M. 2005. Tree growth as indicator of tree vitality and of tree reaction to environmental stress: a review. *European Journal of Forest Research*, 124: 319–333. DOI: 10.1007/s10342-005-0085-3
- FIALA J., BRETSCHEIDER B., MATERNA J. 2002. Development of the atmospheric pollution and forest decline in the Czech part of the Ore Mts. In: Lomský B. et al.: SO₂-pollution and forests decline in the Ore Mountains. Jiloviště-Strnady, Forestry and Game Management Research Institute: 50–85.
- GALIANO L., MARTINEZ-VILALTA J., SABATE S., LLORET F. 2012. Determinants of drought effects on crown condition and their relationship with depletion of carbon reserves in a Mediterranean holm oak forest. *Tree Physiology*, 32: 478–489. DOI: 10.1093/treephys/tps025
- HLÁSNÝ T., MÁTÁS C., SEIDL R., KULLA L., MERGANIČOVÁ K., TROMBIK J., DOBOT L., BARCZA Z., KONŮPKA B. 2014. Climate change increases the drought risk in Central European forests: What are the options for adaptations? *Lesnický časopis – Forestry Journal*, 60: 5–18.
- HOLMES R. 1983. Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree-Ring Bulletin*, 39: 77–82.
- KURKELA T., AALTO T., VARAMA M., JALKANEN R. 2005. Defoliation by the common pine sawfly (*Diprion pini*) and subsequent growth reduction in Scots pine: a retrospective approach. *Silva Fennica*, 39 (4): 467–480.
- LOMSKÝ B., ŠRÁMEK V. 1999. Damage of the forest stands in the Ore Mts. during the period 1995–1997. *Journal of Forest Science*, 45: 169–180.
- LOMSKÝ B., ŠRÁMEK V. 2004. Different types of damage in mountain forest stands of the Czech Republic. *Journal of Forest Science*, 50: 533–537.
- LOMSKÝ B., ŠRÁMEK V., NOVOTNÝ R. 2013. The health and nutritional status of Norway spruce stands in the Krušné hory Mts. 15 years subsequent to the extreme winter of 1995/96. *Journal of Forest Science*, 59: 359–369.
- MATYSSEK R., LE THIEC D., LÖW M., DIZENGREMEL P., NUNN A.J., HÄBERLE K.H. 2006. Interactions between drought and O₃ stress in forest trees. *Plant Biology*, 8: 11–17.
- MELOUN M., MILITKÝ J., HILL M. 2012. Statistická analýza vícerozměrných dat v příkladech. Praha, Academia: 760 s.
- PIUTTI E., CESCATTI A. 1997. A quantitative analysis of the interactions between climatic response and intraspecific competition in European beech. *Canadian Journal of Forest Research*, 27: 277–284. DOI: 10.1139/x96-176
- SCHMIDT-VOGT H. 1977. Die Fichte. Band I. Taxonomie, Verbreitung, Morphologie, Ökologie, Waldgesellschaften. Hamburg, Parey: 647 s.
- STRAW N.A., FIELDING N.J., GREEN G., PRICE J. 2002. The impact of green spruce aphid, *Elatobium abietinum* (Walker), on the growth of young sitka spruce in Hafren Forest, Wales: delayed effects on needle size limit wood production. *Forest Ecology and Management*, 157: 267–283. DOI: 10.1016/S0378-1127(00)00656-3
- ŠEBÍK L., POLÁK L. 1990. Náuka o produkci dřeva. Bratislava, Příroda: 322 s.
- WARREN W.G. 1980. On removing the growth trend from dendrochronological data. *Tree-Ring Bulletin*, 40: 35–44.

GROWTH RESPONSE OF NORWAY SPRUCE (*PICEA ABIES* (L.) KARST.) TO EXTREME CLIMATIC AND POLLUTION STRESS DURING THE WINTER OF 1995/96 IN THE KRUŠNÉ HORY MOUNTAINS (CZECH REPUBLIC)

SUMMARY

Climate extremes are expected to increase in frequency and magnitude, thereby significantly threatening the functioning of forest ecosystems. Such events primarily endanger trees located on extreme sites or trees that had been weakened by the impact of air pollution. The Krušné hory Mountains in the Northern Bohemia (Czech Republic) can serve as an example of the Central European area with a long-standing history of air pollution load. Although the emission of pollutants – mainly SO₂ – decreased significantly during the 1990s, extreme stress event occurred during the winter of 1995/96. It was characterised by a sudden temperature break in November 1995, followed by heavy frosts and a long-term inversion situation associated with the accumulation of air pollutants (SO₂, F) in the inversion layer and subsequently also in the extreme rime.

The main objective of the study was to evaluate long-term growth response of spruce to extreme stress during the winter of 1995/96 in the Krušné hory Mts. using methods of dendrochronology, and to evaluate the relationship of radial and height growth to the other indicators of tree vitality routinely assessed in the frame of forest health state monitoring program.

For the purpose of the study, ten permanent monitoring plots located along the main ridge of the Krušné hory Mts. were chosen, covering the gradient of the forest damage that occurred during the winter of 1995/96 (Fig. 1, Tab. 1). Altogether, in spring 2014, 430 increment cores were sampled. For the 1995–2013 period data from the regular evaluation of height growth, crown condition and the content of stress elements in the needles were also available for all the plots.

In the 1996–2003 period, the differences in defoliation, radial, and height increments between the groups of plots with varying degrees of damage were tested by means of one-way ANOVA in particular years. Tukey's multi comparison test was applied to detect differences between individual damage levels. The length of the regeneration phase was then determined as the number of years after the damage during which the significant difference between the heavily and the slightly damaged plots was identified. The loss of the radial increment was expressed as a percentage of the increment during the 1996–1998 post-stress period compared to the increment during the 1993–1995 reference period. The relationship between radial and height increments, and the other indicators of tree vitality (defoliation, number of needle-year classes, content of stress elements fluorine and sulphur in needles) has been studied using the methods of correlation analysis and principal component analysis.

Both radial and height growth showed a clear reaction to the stress event that occurred during the winter of 1995/96, which manifested as an abrupt decrease in the values observed (Fig. 2 and 3). The Tukey's test indicated different lengths of the regeneration phase, with a duration lasting from 3 to 7 years subsequent to the stress event (Tab. 2). Diameter increment regenerated very quickly over three years regardless to damage level. On the contrary, defoliation seems to be the most sensitive indicator with the seven-year phase of regeneration on heavily damaged plots. Between 1996 and 1998, degree of the reduction of radial increments ranged between 42% and 66% for heavily-damaged, and 15% to 30% for medium-damaged plots, while on the two plots that experienced only slight damage the increment was reduced on average by 8%, and on the one slightly damaged plot the increment actually increased by 7% (Fig. 4). During the entire 1994–2013 period, the height increment had a significantly negative correlation both with the degree of defoliation and with the fluorine content in needles, while the tree-ring widths had no significant relationship to the other parameters of vitality (Tab. 3). The principal component analysis showed that the fluorine content in the second needle-year class is a significant parameter explaining the greatest proportion of variability in the data (Fig. 5), and therefore it can be considered as being a reliable indicator of stress in regard to the young spruce stands in the Krušné hory Mts.