

MODELOVÁ ANALÝZA INVAZIVNÍ STRATEGIE LÝKOŽROUTA SMRKOVÉHO V PODMÍNKÁCH LS DVŮR KRÁLOVÉ

MODEL ANALYSIS OF THE BARK BEETLE INVASIVE STRATEGY IN CONDITIONS OF THE DVŮR KRÁLOVÉ FOREST DISTRICT ADMINISTRATION (CZECH REPUBLIC)

TOMÁŠ HILLERMANN¹⁾ ✉ - JAROMÍR ŠTŮSEK²⁾

¹⁾Lesy České republiky, s. p., Lesní správa Dvůr Králové n. L., 28. října 787, 544 01 Dvůr Králové nad Labem, Czech Republic

²⁾Česká zemědělská univerzita v Praze, Provozně ekonomická fakulta, Kamýcká 129, 165 21 Praha 6 - Suchbátka, Czech Republic

✉ e-mail: tomas.hillermann@lesycr.cz

ABSTRACT

The submitted paper is a result of the 10-year monitoring of the occurrence of the bark beetle in conditions of an organization unit in a state enterprise Forest of the Czech Republic (Lesy České republiky, s. p.). The statistical findings were further elaborated based on the hypothesis of the dynamic intersection of the factor sets within several years-long development of acceptances of a specific progress of natural-climatic conditions in the area. Although the extracted volumes of bark beetle mass are again alarming, the negative economic effect, which the forest owners in the Czech Republic must face is generally underestimated. The aim of the paper is to show some underestimated relations in the subject area when the invasive strategy of the bark beetle (*Ips typographus*) behaves according to the law of large numbers and geometric series with a high degree of coefficient. The hypothetical processed model is documented on verified values based on statistical surveys carried out by the author of the paper in the reference period 2007–2016. The issue of the invasion of the bark beetle is in the current period (November 2017) a very frequent topic, and it is a subject to many non-economic debates. The secondary aim of the paper is to show the biologically-mathematical nature and the principle of the bark beetle invasive behaviour.

For more information see Summary at the end of the article.

Klíčová slova: krizový stav; lýkožrout smrkový; množina neovladatelných faktorů; smrkové porosty; stochastický simulační model; invaze; prediagnostika a diagnostika

Key words: state of emergency; bark beetle; uncontrollable factors; spruce forests; stochastic simulation model; invasion; prediagnosics and diagnostics

ÚVOD

Škody způsobené lýkožroutem smrkovým (dále pouze kůrovec) je v posledních letech velmi diskutované téma. Jeho důležitost nikterak nesnižuje přítomnost dalších druhů kůrovců, jako jsou lýkožrout severský *Ips duplicatus* (S.) či lýkožrout lesklý *Pityogenes chalcographus* (L.), na kalamitách. V posledních třech letech objem nahodilých těžeb, způsobených kůrovcem, v České republice výrazně stoupl. Ve smyslu vyhlášky MZe ČR č. 101/1996 Sb., v platném znění, je lýkožrout smrkový považován za kalamitního škůdce.

Ekologická stabilita přírodních ekosystémů je výsledkem dvou schopností ekosystému, a to jednak setrvávat v dynamickém stálém stavu, pokud jej nenaruší vnější činitelé, jednak nevrátit se neměnit, nebo se vrátit do původního stavu po narušení vnějšími činiteli (ŠVESTKA et al. 1998).

Pokud bychom se zabývali historickými fakty v souvislosti s kůrovcovými kalamitami, tak nejstarší záznamy o výskytu škod na lesích, způsobených kůrovcem, pocházejí ze 17. století. Je více než pravděpodobné, že kůrovcové kalamity existovaly i v minulosti, ale soudobí kronikáři tomuto tématu nepřikládali patřičnou důležitost. Největší kůrovcová kalamita proběhla na území České republiky v letech 1868–1878 v oblasti Šumavy (JELÍNEK 2008). Primárním spouštěčem kalamity byly vichřice, které v letech 1868 a 1870 poškodily rozsáhlé plochy šumavských porostů smrku. Následně v důsledku namnožení kůrovců na kalamitním dříví došlo k napadení porostů, přeživších ráděním vichřice.

Důvodem kůrovcových kalamit v minulosti a současnosti je souběh několika faktorů příznivých pro jejich vznik. Mezi nejdůležitější patří průběh teplot v období jaro – podzim, množství dlouhodobých srážek

v předmětné oblasti, vitalita a případně primární poškození jedinců smrku, stanovištní podmínky, druhové složení lesních porostů a samotný reprodukční cyklus kůrovce. Jeden faktor sám o sobě v případě negativního působení nemůže způsobit vznik kalamity. Jejím spouštěčem je pouze negativní souběh několika nepříznivých jevů.

Působení kůrovce na lesní porosty nemusí být vždy negativní. Pokud dojde ke zpracování napadených a odumírajících stromů včas, je také ztráta na kvalitě dřevní hmoty minimální. Kůrovec je v podstatě součástí lesního prostředí a celkového přírodního procesu. V případě zničení porostu vyšších věkových stupňů (9 a více) dochází k nové obnově, kde vlastník může dále ovlivňovat zastoupení dřevin na stanovišti. Negativní je pouze narušení systému postupu obnovy v rozsáhlejších porostech. Pokud stav kůrovce ovlivňuje porosty nižších věkových stupňů, je tím narušena samotná podstata hospodářského lesa, kde nedochází k absolutnímu naplnění produkčních možností porostů a návratnost nákladů na obnovu a výchovu formou zpeněžení dřevní hmoty je snížena.

Mimo faktory ovlivňující podmínky vývoje kůrovce hraje v procesu ochrany lesa proti negativnímu přemnožení čas. Rychlost provedených opatření k zamezení šíření kůrovce je zásadní a je závislá mimo jiné na rozhodovacích schopnostech konkrétního řídicího pracovníka. V současné době se většina lesníků rozhoduje intuitivně na základě zavedených postupů uvedených v odborné literatuře a z vlastní praxe předchozích let.

Lesy patří mezi nejpřirozenější ekosystémy, které u nás máme a jejich funkce pro společnost jsou rozsáhlé a nezastupitelné. Na základě pozorování životního prostředí, ve kterém se pohybujeme, je zřejmé, že v rámci destabilizace přírodně-klimatického systému dochází k významným poruchám, jejichž výsledkem jsou různé druhy krizových situací, které se v lesnické terminologii nazývají kalamity.

Příčinami vzniku kalamitních situací v lesním prostředí je zejména zásadní ovlivnění původního přírodního lesa člověkem, především změna původní dřevinné skladby. Plánované hospodaření v lesích České republiky je v současné době výrazně ovlivňováno vnějšími vlivy, které podstatně zasahují do fungování celého lesnicko-dřevařského sektoru. Lesní hospodářství za více než 200 let své racionální fáze vypracovalo soustavu zásad a postupů k obhospodařování lesů.

Základní úlohou hospodaření v lesích je natrvalo zachovat, případně vytvořit stabilní a zdravé lesní ekosystémy, které v naší krajině optimálně plní všechny ekonomické, ekologické a sociální funkce společnosti požadované. Pod pojmem trvalosti (trvalé udržitelnosti) obecně rozumíme snahu o zachování stavu působení určitého systému na sledované úrovni při dlouhodobém udržení, nebo zlepšení systémových zdrojů. Tato definice naznačuje, že trvalost je potřeba chápat v souvislosti s lidským jednáním (činností), že je možno ji aplikovat na nejrůznější systémy, a že má určitou etickou náplň (POLENO 1997). Kalamitní situace ve stávajícím systému managementu lesní správy jsou obvykle řešeny na tzv. pragmatické bázi, kdy se průběžně zpřesňují údaje o jejich jednotlivých vzniklých typech, přičemž realizace nápravy je založena na okamžité intuitivní improvizaci nasazení lidských a technických zdrojů pro likvidaci následků. Volba řešení vzniklé krizové situace je vždy závislá na rozhodnutí konkrétního řídicího pracovníka, který se rozhoduje na základě místních znalostí a dosavadních zkušeností získaných při řešení obdobných kalamitních situací v minulosti. Míra zvolené optimálnosti řešení se zjistí po dokončení likvidace následků krizové situace a celkovém rozboru výsledku. Jelikož se jedná o rozhodnutí intuitivní, je výsledek řešení předem nejistý.

Cíl práce je zaměřen na možnosti implementačního využití kvantitativních metod analýzy systému. Základním cílem je vytvořit funkční analytický simulační model jako návod pro rozhodování vlastníků, případně správců lesních majetků. Práce byla zpracována na pod-

kladě dat o výskytu kůrovce na lesním hospodářském celku (LHC) Podkrkonoší, lesní správy Dvůr Králové v letech 2008–2016. Vytvoření simulačního modelu má za cíl zvýšit možnosti vlastníka lesa na prediagnostiku a analýzu chování kůrovce v nadcházejících obdobích na základě zjištěných a zároveň předpokládaných stochasticky orientovaných proměnných.

MATERIÁL A METODIKA

Charakteristika zájmového území

Lesní správa Dvůr Králové vznikla 1. 1. 1997 transformací tří lesních závodů – Horní Maršov, Vrchlabí, Harrachov. Samostatný vylišený LHC Podkrkonoší byl poprvé samostatně zřízen jako lesní hospodářský plán (LHP) k 1. 1. 2002. Dne 1. 1. 2005 byla od LHC Podkrkonoší oddělena západní část (bývalý LHC Harrachov), která byla dále zřizována samostatně. K 1. 1. 2012 byl LHP po deseti letech platnosti obnoven. Současné platné období pro LHC Podkrkonoší je 1. 1. 2012 – 31. 12. 2021.

Výměra pozemků určených k plnění funkcí lesa je 9 863 ha (2012). Území je rozděleno na sedm revírů. Na LHC jsou zastoupeny tři přírodní lesní oblasti. PLO 23 – Podkrkonoší převažuje na 91 % území, dále následují PLO 24 – Sudetské mezihoří (8,9 %) a minimálně zasahuje PLO 17 – Polabí (0,1 %). Lesní hospodářský celek zahrnuje druhý až pátý lesní vegetační stupeň (LVS) s převahou 4. LVS (53 %); 5. LVS pokrývá 26 %. Nejvíce zastoupenými cílovými hospodářskými soubory jsou 43 – kyselá stanoviště středních poloh, 45 – živná stanoviště středních poloh. Cílové hospodářské soubory 43, 45, 53, 55 dohromady zaujímají 81 % území. Na základě kategorizace lesů je 28 ha zařazeno do lesů ochranných, 64 ha do lesů zvláštního určení. Převažují lesy hospodářské na ploše 9 771 ha.

Věková struktura porostů je poměrně vyrovnaná. Nadnormálně je výrazně zastoupen 9. věkový stupeň, který je vůči normálnímu zastoupení 2,5× vyšší. Důvodem je mnišková kalamita z 20.–30. let 20. století. Mírně nadnormální jsou 10. a 11. věkový stupeň, což je částečně způsobeno zpracováním kalamit v letech 2007–2012 a minimem těžby úmyslné.

Druhová struktura porostů je tvořena převážně jehličnany, a to z 85 % (SM 70, BO 8, MD 6, JD 1). Listnáče jsou zastoupeny 15 % (BK 4, BR 4, DB 2, KL 2, OST. 3) zejména v 1., 2. a 9. věkovém stupni. V roce 2012 s obnovou LHP dosáhl objem zalesnění melioračními a zpevňujícími dřevinami za předchozí období výše 28 %.

Převažující nadmořské výšky se pohybují v rozmezí 350–600 m n. m. Geomorfologicky se jedná o pahorkatinu až vrchovinu, pozvolně se od severu svažující směrem k jihu až jihovýchodu. Oblast Žacléře je specifická bezprostředním sousedstvím s Krkonošemi. Průměrné roční srážky kolísají mezi 650–900 mm. Délka vegetační doby se pohybuje mezi 140–160 dny.

Analýza dat 2008–2016

Pro výzkum byla analyzována data výroby lesní správy Dvůr Králové za období let 2008–2016 spojené s výskytem kůrovce (tab. 1). Jedná se zejména o výše nahodilých těžeb větrných a kůrovcových ve vztahu k jednotlivým rokům a počty provedených opatření. Dále byly analyzovány počty obranných opatření v jednotlivých letech. Uvedená data byla seřazena do časové řady a dále byly zkoumány závislosti jednotlivých faktorů mezi sebou a následně i jejich vliv na výsledný stav.

Dále byla analyzována data průměrných měsíčních teplot (tab. 2) a průměrných měsíčních srážek (tab. 3). Zdrojem dat byly přehledy

Tab. 1.

Přehled vytěžených objemů dříví dle druhu za sledované období a počty provedených opatření proti kůrovci
 List of extracted timber volumes according to the species over the reference period and number of the measures against bark beetle

rok/ year	těžba živelná/ salvage logging	těžba kůrovcová/ post-outbreak logging due to bark beetle	objem zpraco- vaných lapáků/ volume of pro- cessed trap trees	celková těžba za období/ total cut	počet instalovaných opatření proti kůrovci/ number of measures against bark beetle	poměr objemu obranných opatření a objemu kůrovcové těžby v roce T ₋₁ / ratio of protective measures and bark beetle salvage cut in the year T ₋₁
x						x
	m ³					
2008	46 433	15 458	2 240	72 055	1 939	0,00
2009	55 098	10 582	15 531	88 503	12 529	1,00
2010	16 209	3 843	2 853	37 369	2 030	0,27
2011	9 241	1 425	1 078	38 466	828	0,28
2012	4 910	1 181	651	84 912	514	0,46
2013	3 545	1 882	573	90 360	477	0,48
2014	5 205	1 025	967	85 950	812	0,51
2015	11 336	3 529	632	81 211	473	0,62
2016	8 517	4 070	2 944	93 321	2 480	0,83
Sa	160 494	42 995	27 469	672 147	22 082	0,56

Tab. 2.

Přehled rozdílů průměrných teplot od normálu let 1981–2010 dle měsíců pro Královehradecký kraj, zdroj ČHMÚ
 Differences in average temperatures from the normal in 1981–2010 by months for the Hradec Králové region; source: Czech Hydrometeorological Institute

rok/ year	leden/ Jan	únor/ Feb	březen/ Mar	duben/ Apr	květen/ May	červen/ June	červenec/ July	srpen/ Aug	září/ Sept	říjen/ Oct	listopad/ Nov	prosinec/ Dec	rok průměr/ year average
x	°C												
2008	3,30	3,30	0,10	-0,10	0,50	1,60	0,20	0,10	-0,50	0,10	1,90	2,10	1,05
2009	-2,10	0,20	0,70	4,30	0,10	-1,10	0,30	1,50	2,30	-1,10	2,70	0,00	0,65
2010	-3,00	-0,60	-0,10	0,30	-1,50	1,20	2,50	-0,10	-1,50	-1,70	2,20	-4,10	-0,53
2011	0,70	-0,90	1,00	2,70	0,20	1,20	-1,30	0,70	1,50	-0,20	-0,10	2,70	0,68
2012	1,50	-4,40	2,00	0,30	1,40	0,80	0,30	0,70	0,00	-0,90	2,30	-0,70	0,28
2013	0,00	-0,10	-3,90	-0,10	-0,90	0,20	1,50	0,50	-1,20	1,30	1,40	2,60	0,11
2014	2,60	3,40	3,50	1,80		0,00	1,90	-1,30	1,50	1,90	3,60	2,50	1,70
2015	3,00	1,30	1,30	-0,20	-0,80	-0,10	2,00	4,30	0,60	0,00	2,60	4,70	1,56
2016	0,10	4,00	0,60	-0,30	0,70	1,40	0,80	-0,10	3,30	-0,30	-0,20	0,30	0,86
průměr/ average	0,68	0,69	0,58	0,97	-0,14	0,58	0,91	0,70	0,67	-0,10	1,82	1,12	0,71

Tab. 3.

Přehled rozdílů průměrných srážek od normálu let 1981–2010 dle měsíců pro Královehradecký kraj [%]; zdroj ČHMÚ
 Differences in average precipitation from the normal in 1981–2010 by months for the Hradec Králové Region [%]; source: Czech Hydrometeorological Institute

rok/ year	leden/ Jan	únor/ Feb	březen/ Mar	duben/ Apr	květen/ May	červen/ Jun	červenec/ Jul	srpen/ Aug	září/ Sept	říjen/ Oct	listopad/ Nov	prosinec/ Dec	rok průměr/ year average
x	%												
2008	87	102	118	114	97	71	70	77	53	131	103	47	89
2009	56	115	132	16	132	115	125	59	26	161	64	85	91
2010	95	52	82	119	194	53	98	205	174	22	134	103	111
2011	87	21	47	51	88	114	175	73	102	100	2	132	83
2012	164	104	25	77	94	105	170	104	81	100	62	85	98
2013	97	96	51	84	170	204	55	71	132	84	88	44	98
2014	49	10	86	86	176	53	84	82	126	88	28	74	79
2015	116	21	102	53	74	85	33	71	34	118	178	38	77
2016	66	121	65	77	76	101	92	39	31	131	72	64	78
průměr/ average	91	71	79	75	122	100	100	87	84	104	81	75	89

Českého hydrometeorologického ústavu, vztahující se ke Královohradeckému kraji za období let 2008–2016, v porovnání s normativem teplot a výší srážek za období let 1981–2010.

V terénu byla zjišťována data vyjadřující mortalitu vývojových stadií (počty larevných chodeb s dokončeným vývojem) na napadených stromech zpracovaných v měsících září a říjen běžného roku, v případech zjištění nedokončení vývoje jednotlivých stadií byl vybrán jiný vzorek. Vzorek byl průřezově odebírána na šesti revírech. Byl vytvořen jednotný postup vyhodnocení stavu požerků. Odebrány byly požerky (snubní komůrka a navazující matečné chodby) v počtu 5 ks v bazální části kmene ve vzdálenosti do 3 m od začátku řezu na oddenku, 5 ks v místě přechodu kmene do zavětvené části a 5 ks v místě horní třetiny kmene. Celkově proběhlo sledování 15 ks požerků na 1 napadený strom. Na každém revíru byl stanoven počet sledovaných stromů na 10 ks za období září – říjen s maximem 2 ks stromu v jednom ohnisku. Důvodem rozdělení bylo maximální pokrytí plochy LHC zjištěnými vzorky. Celkem za rok a plochu celého LHC Podkrkonoší se jedná o 900 ks požerků. Na základě zjištěných hodnot byly hodnoty zprůměrovány dle revírů a období. Zároveň byl zjišťován počet matečných chodeb pro jednu snubní komůrku za účelem zjištění poměru pohlaví. Údaje jsou uvedeny v tab. 4 a 5.

Simulační model

Simulace napodobuje procesy, probíhající v reálném systému. Cílem simulačních experimentů na modelech je odřet charakteristiky systému, a tím přezkoušet funkční schopnost modelovaného systému. Simulační metody se v současnosti ukazují jako jediná prakticky dostupná metoda, vhodná pro zkoumání provozu složitých systémů (HOUSKA 2009).

Z hlediska tvorby simulačního modelu byl zvolen následující postup prací:

- formulace problému a definování analyzovaného systému,
- tvorba systémového schématu včetně kvantitativních parametrů stochastického typu pro určení klíčových fází dynamiky vývoje,
- charakteristika systému jako celku dle struktury funkcí,
- určení požadavků na vypovídací schopnost modelu,
- stanovení komponent modelu a klíčových funkčních stavů,
- určení struktury cílových exogenních proměnných kvantifikující požadované výstupy simulace,
- definování stavových proměnných a jim přiřazené struktury funkčních vztahů jako kvantitativní výsledky náhodných oprav hodnot endogenních proměnných,
- definování exogenních proměnných jako vstupních vnějších parametrů dané simulace při volbě libovolného parametru ze zadaného pragmaticky určeného intervalu,

Tab. 4.

Výsledky sledování mortality vývojových stadií kůrovce – % mrtvých jedinců k celku
Results of the mortality rate of the development stages of bark beetle – % of the dead individuals to the whole

revír/district	období zjišťování/ period of survey	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	průměr/ average
x	x	%									
Hradiště	podzim T ₋₁	34	26	48	52	42	22	29	38	42	37
Vlčice	podzim T ₋₁	25	30	54	42	56	63	44	34	36	43
Žacléř	podzim T ₋₁	16	21	42	15	35	42	38	20	18	27
Království	podzim T ₋₁	45	56	67	42	39	18	19	24	23	37
Mostek	podzim T ₋₁	32	33	52	35	42	36	26	32	44	37
Podhůří	podzim T ₋₁	48	46	75	45	55	62	55	42	24	50
LHC Podkrkonoší	podzim T₋₁	33	35	56	39	45	41	35	32	31	39

Tab. 5.

Průměrné počty matečných chodeb na snubní komůrku
Average number of maternity corridors per wedding chamber

revír/district	období zjišťování/ period of survey	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	průměr/ average
x	x	ks/pcs									
Hradiště	podzim T ₋₁	2,16	2,26	2,14	2,47	2,54	2,95	2,82	2,75	2,79	2,54
Vlčice	podzim T ₋₁	2,08	1,96	2,08	2,13	2,37	2,42	2,24	2,14	2,11	2,17
Žacléř	podzim T ₋₁	2,32	2,57	2,74	2,57	2,44	2,59	2,64	2,42	2,62	2,55
Království	podzim T ₋₁	2,44	2,32	2,24	2,35	2,52	2,63	2,72	2,65	2,52	2,49
Mostek	podzim T ₋₁	2,08	2,19	2,27	2,32	2,22	2,58	2,62	2,75	2,46	2,39
Podhůří	podzim T ₋₁	2,25	2,35	2,28	2,54	2,77	2,85	2,95	2,74	2,85	2,62
LHC Podkrkonoší	podzim T₋₁	2,22	2,28	2,29	2,40	2,48	2,67	2,67	2,58	2,56	2,46

- i) stanovení doplňkových funkcí, které rozšiřují vypovídací schopnost modelu pro oblast reálných výsledků.

Základní schéma logiky funkce Modul jednoho roku invazivní strategie kůrovce

Obrázek 1 popisuje základní modelovou logiku jako základ celkového simulačního modelu. Schéma zasahuje do dvou období:

- a) rok T_{-1} – předchozí rok vlastního modelu, ze kterého přechází do analyzovaného období přeživší dospělí jedinci a přeživší vývojová stadia (vejčička, larvy, kukly, nedospělá imaga), kteří jsou schopni se zúčastnit prvního rojení v simulovaném roce T_0
- b) rok T_0 – v rámci daného roku se uplatňují zadané zjištěné a stochastické parametry a je podrobně řešen vývoj jednotlivých dílčích skupin od dospělců předchozího roku do ukončení vývoje jedinců vzniklých z 1. rojení

Cyklický rekurzivně-simulační princip aplikovaný v tabulkovém procesoru je založen na časové orientaci simulovaného cyklu a termínováním počátečního a konečného stavu systému srovnatelného s běžným kalendářním rokem.

Z tohoto důvodu je při kvantitativním zadání počátečních stavů, tj. analýze struktury škůdce a jeho množství bezprostředně před prvním rojením, nezbytné provádět pragmatickou stochastickou úpravu jednotlivých základních vstupních exogenních parametrů.

Obecné vztahy jednotek simulačního modelu

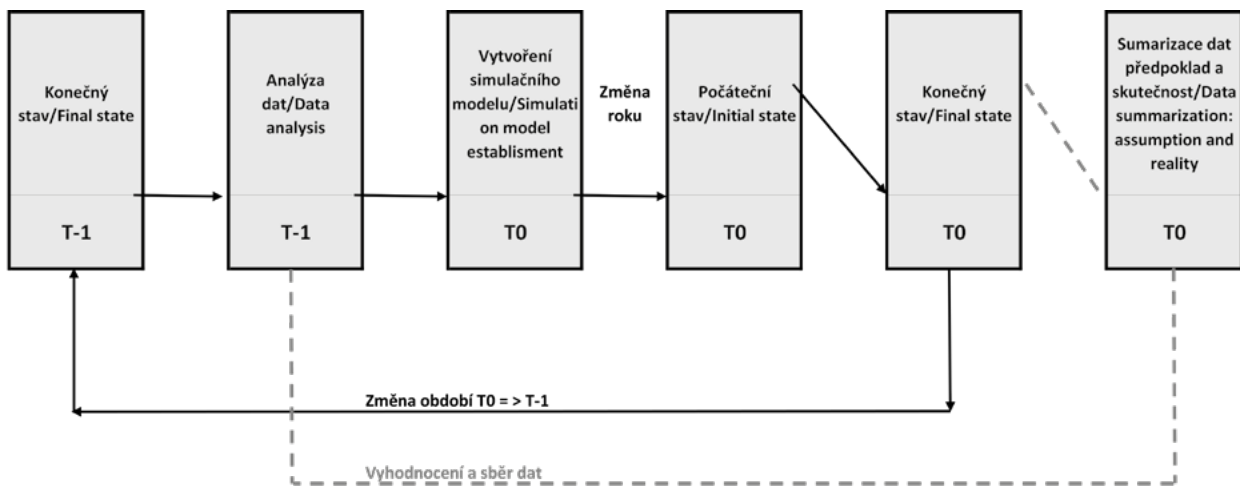
Výsledkem je návrh simulačního modelu, kde byly vylíšeny vstupní údaje systému, které mají zásadní vliv na vývoj kůrovce. Pro vytvoření simulačního modelu byla nejdříve zkoumána závislost jednotlivých zjištěných hodnot a vzájemná souvislost, případně fakt, zda hodnota zásadně ovlivňuje invazivní strategii kůrovce.

Vstupní hodnoty simulačního modelu:

- a) průměrná měsíční teplota,
- b) průměrný objem srážek,
- c) poměr pohlaví v době rojení,
- d) mortalita vývojových stadií,
- e) průměrný počet kladených vajíček 1 samicí,
- f) % samic vytvářejících sesterské pokolení,
- g) počet obranných opatření z roku T_{-1} , plánovaných pro jarní rojení roku T_0 .

Z výše uvedených proměnných vycházejí tyto výsledky:

- a) průměrná měsíční teplota v roce T_{-1} – vzhledem k systému tvorby simulačního modelu byla hodnota aplikována pouze jako pomocná, bez použití v simulačním modelu,
- b) průměrný objem srážek v roce T_{-1} – důležitá veličina, která udává vliv na obranný potenciál stromů, do simulačního modelu použita ve formě koeficientu, který vyjadřuje vztah průměrného ročního objemu srážek a dlouhodobého normativu za období let 1981–2010,
- c) poměr pohlaví pro jarní rojení – vycházím z výsledků zkoumání požerků z měsíců září – říjen roku T_{-1} ; vyjádřeno poměrem,
- d) mortalita vývojových stadií – vycházím z výsledků zkoumání požerků z měsíců září – říjen roku T_{-1} ; vyjádřeno poměrem,
- e) průměrný počet kladených vajíček 1 samicí – vycházím z odborné literatury dle průměrných hodnot (použito 60 ks), v modelu možno měnit dle místních znalostí,
- f) % samic vytvářející sesterské pokolení – vycházím z odborné literatury dle průměrných hodnot (použito 0,5 ks vstupujících do jarního rojení), v modelu možno měnit dle místních znalostí,
- g) počet obranných opatření z roku T_{-1} , plánovaných pro jarní rojení roku T_0 – vyjádřeno dle doporučeného postupu přípravy obranných opatření pro jarní rojení (kalamitní základ).



Změna období = Change of the period; Vyhodnocení a sběr dat = Data evaluation and collection; Změna roku = Change of the year

Obr. 1.
Cyklický simulační princip
Fig. 1.
Cyclic simulation principle

VÝSLEDKY

Základní výpočty simulačního modelu:

- a) výpočet počtu jedinců kůrovce, které opouštějí napadené stromy v období 8-12/ T_{-1} a přezimující:

$$PJZ = [(KC \times 1,00) + (KP \times 0,20)] \times PJO$$

- b) výpočet množství samic připravených k rojení v jarním období

$$SJO = PJZ [(KC \times 1,00) + (KP \times 0,20)] \times PJO \times PH \times MR1$$

kde:

SJO – počet samic připravených k rojení pro jarní období T_0

KC – objem zpracované kůrovce hmoty zcela opuštěno v roce T_{-1} , použit koeficient 1,00 pro výpočet množství obranných opatření v roce T_0

KP – objem zpracované kůrovce hmoty zčásti opuštěno v roce T_{-1} , použit koeficient 0,20 pro výpočet množství obranných opatření v roce T_0

PJO – počet jedinců opouštějící jeden kůrovcem zničený strom

PH – poměr pohlaví předpokládaný pro jarní rojení

MR1 – mortalita vývojových stadií na podzim T_{-1}

- c) výpočet potenciálu zničení stromů bez opatření jarní rojení

$$POT = VJO/PJO \times MR2$$

VJO – počet nakladených vajíček pro vývoj v jarním rojení

MR2 – předpoklad mortality vývojových stadií v jarním rojení

- d) výpočet předpokladu dokončení vývoje do stavu dospělý brouk po dokončení jarního rojení:

$$PDV = SJO \times MR2 \times PS \times PH \times M$$

MR2 – mortalita vývojových stadií v roce T_0

PS – poměr samic tvořící sesterské pokolení

PH – poměr pohlaví předpokládaný pro jarní rojení

M – stanovený průměrný počet kladených vajíček 1 samici

DISKUSE

V současné době jsou ve výrobním procesu lesního hospodářství vyřešeny zejména pracovní postupy dílčích operací lesnických činností. Jedná se o stanovená pravidla, jak postupovat v jednotlivých pracovních operacích zejména s ohledem na prováděnou činnost, vybavení pracovníků, dodržení zásad BOZP a hygieny práce. Rozhodovací procesy jsou mimo jiné v organizacích hospodařících s majetkem státu zakotveny v interní řízené dokumentaci. Převážně se jedná o obecné zásady na základech biologických a zákonných principů, matematické principy postupu se uplatňují ojediněle. Systém rozhodování postupu v kalamitních situacích je řešen pouze v rovině obecné, převážně intuitivním rozhodováním.

V oboru lesního hospodářství byly řešeny simulační modely pro obnovu lesních porostů v souvislosti s vývojem zastoupení dřevin (KUPKA 1999). Pro simulaci růstových možností lesních porostů na základě volby hospodářských režimů byl vytvořen simulátor Silva 2.2. (SIMON 2002). Racionalizací výrobních postupů pomocí simulačních modelů se zabýval v 80. letech LÍBAL (1980). V oblasti hospodářské úpravy lesa

bylo modelování použito pro simulaci vývoje přírůstu dřevin na základě stanovištních podmínek a výchovných postupů (PRETZSCH et al. 2002). Velmi zajímavé jsou růstové simulace vývoje porostů pomocí růstového modelu SIBYLA, které obsahují kromě predikce základních taxačních parametrů (počet jedinců, kruhová základna, zásoba porostu, štíhlostní kvocient apod.) také indexy charakterizující simulaci samovývoje: Clark-Evansův, Arten-profil a index porostní proměnlivosti (VACEK et al. 2010).

FAHSE a HEURICH (2011) se zabývali pochopením faktorů, které ovlivňují vývoj a šíření epidemie kůrovce a jsou nástrojem pro řízení lesního hospodářství včetně předvídaní rizik vzniku ohnisek. Simulační model byl konstruován v podmínkách národního parku Bavorský les. Tento model primárně poskytuje nástroj pro analýzu a pochopení prostorových a časových aspektů vzniku ohnisek kůrovců. Měl umožnit odhad účinnosti souběžných dopadů chování přirozených nepřátel a kůrovce na omezení dynamiky kalamity v praxi. Model použili k předpovědi pravděpodobnosti vypuknutí kalamity v různých nastaveních vstupních hodnot. Výsledky simulace ukázaly odlišné prahové chování systému v reakci na tlak antagonistů nebo na řízení populace kůrovce. Navzdory různým posuzovaným scénářům ze simulací vyvodili jednoduchou podmínku pro úspěšné řízení ohniska, kterou je zhruba 80% likvidace dospělých brouků v době rojení přirozenými nepřáteli. Navíc, pokud lesníci provedou včasnou asanaci, tak ke vzniku ohniska ani nedojde.

LAUSCH et al. (2013) zveřejnili další výsledky zkoumání simulačního modelu, viz výše. Cílem tohoto šetření bylo analyzovat a popsat dlouhodobé časoprostorové zamoření kůrovcem v národním parku Bavorský les a provést šetření prostorově-časových posunů bodů ohnisek napadení kůrovcem v letech 1988 až 2010. Zjištěné výsledky byly použity následovně:

- jako základ pro kritéria zlepšení parametrů prostorově-temporálních simulačních modelů,
- pro lepší pochopení vztahu kůrovce a existujících procesů fungování lesního prostředí, jako jsou modely řešící narušení nebo poškození smrku způsobených změnou klimatu,
- pro test hypotéz o vztazích mezi přítomností kůrovce a příslušnými charakteristikami stanovišť, jakož i kompilace prognózních modelů na rozptýlení kůrovce.

Tyto předpovědi byly určeny jako pomoc při implementaci konkrétních strategií řízení, aby se zabránilo šíření kůrovce.

V Norsku se simulačními modely kůrovce zabývala JÖNSSON et al. (2012). Ve své studii používá ekosystémový modelovací přístup k analýze vlivu různých environmentálních faktorů na riziko kalamitního přemnožení kůrovce. Modelové výpočty populační dynamiky byly vyvinuty a implementovány v rámci modelování ekosystému LPJ-GUESS. Výsledkem studie je závěr, kde pro přemnožení kůrovce je zásadní (a) dostupnost vhodného kalamitního dříví pro vývoj a (b) vliv klimatických podmínek v oblasti.

Z Rakouska pochází výzkum modelování chování kůrovce, kterým se zabývali PASZTOR et al. (2014). Důvodem studie byla potřeba vyvinout nástroje pro posouzení rizik škod způsobených kalamitami kůrovce, aby bylo možné rozvíjet a provádět adaptační opatření v obranných postupech.

Problematikou kůrovce na Šumavě se zabývá studie autorů BEREK et al. (2013), jejímž předmětem bylo vytvoření simulačního modelu narušení lesního ekosystému na Šumavě v souvislosti s přemnožením kůrovce v oblasti.

ZENKL (2014) řešil matematické modelování dynamiky populace kůrovce. Hlavním tématem bylo studium kritické hodnoty brouků potřebných k překonání stromové obrany jako funkce různých parametrů modelu. Dále popisuje diskrétní modely dynamiky populace

Vypracovaný simulační model invazivní strategie kůrovce pro $T_0 = 2017$
Simulační model prediagnostiky vývoje kůrovce/Simulation model of bark beetle development

hodnota/value	lokality:		LHC Podkrkonoší
	T_0	T_{-1}	2017 2016
	zkratka/Abbr	MJ	množství/amount
Objem zpracované kůrovcové hmoty zcela opuštěno T_{-1} The volume of processed bark beetle is completely abandoned by T_{-1}	KC	m ³	1 383
Objem zpracované kůrovcové hmoty částečně opuštěno T_{-1} The volume of processed bark beetle was partly abandoned by T_{-1}	KP	m ³	1 605
Objem zpracované kůrovcové hmoty v roce T_{-1} (8-12/2016) The volume of processed bark beetle in the year T_{-1} (8-12 / 2016)	VT ₋₁	m ³	2 988
Počet jedinců opouštějících 1m ³ kůrovcového dříví Number of individuals leaving 1m ³ of bark beetle	PJO	ks	190 000
Počet jedinců opustivších zničené stromy podzim T_{-1} The number of individuals leaves the abandoned trees autumn T_{-1} destroyed	PJZ	ks	340 800 000
Počet jedinců schopných zničit 1 m ³ stromu Number of individuals able to destroy 1 m ³ of tree	P	ks	4 000
koeficient vlivu průměrné roční teploty coefficient of influence of average annual temperature	T koef	koef.	0,80
koeficient vlivu průměrných ročních srážek average annual rainfall coefficient	S koef	koef.	1,24
stanovený počet kladených vajíček jednou samicí a fixed number of eggs placed by one female	M	ks	60
poměr samic tvořící sesterské pokolení the proportion of females that make up the sister's	PS	%	1,66
poměr pohlaví v době rojení - objem přezimujících samic sex ratio at the time of rooting - the size of the overwintering females	PH	%	0,72
mortalita vývojových stadií na podzim - přeživší populace mortality of developmental stages in the fall - population survivors	MR1	%	0,69
Počet samic připravených k rojení v jarním období Number of females ready for swarming in the spring season	SJO	ks	169 309 440
Počet nakladených vajíček pro vývoj v jarním období Number of eggs to be dispatched for spring development	VJO	ks	12 596 622 336
Předpoklad mortality v jarním období - přeživší populace The assumption of mortality in the spring period - the surviving population	MR2	koef.	0,69
Potenciál zničení stromů bez obraných opatření jarní rojení Potential of destroying trees without defensive measures of spring swarming	POT	m ³	43 458
Předpoklad dokončení vývoje dospělý brouk po dokončení jarního rojení Prerequisite completion of adult beetle development after completion of spring swarming	PDV	ks	8 377 647 807
Skutečně instalovaných obraných opatření měsíce 3-8/ T_0 Really installed defense measures of month 3-8/ T_0	OP	ks	1604
Objem zpracované kůrovcové těžby 8-12/ T_0 The volume of processed bark beetle extraction 8-12/ T_0	VT ₀	m ³	3886
Poměr skutečnosti zpracované kůrovcové hmoty k potenciálu POT The ratio of the actual processed bark beet mass to the POT potential		%	8,94
Trend VT_{-1}/VT_0 Trend VT_{-1}/VT_0			1,30

Vypracovaný simulační model invazivní strategie kůrovce pro $T_0 = 2016$ **Simulační model prediagnostiky vývoje kůrovce/Simulation model of bark beetle development**

	lokality: T_0 T_{-1}	LHC Podkrkonoší 2016 2015	
hodnota/value	zkratka/Abbr	MJ	množství/amount
Objem zpracované kůrovcové hmoty zcela opuštěno T_{-1} The volume of processed bark beetle is completely abandoned by T_{-1}	KC	m ³	4 006
Objem zpracované kůrovcové hmoty částečně opuštěno T_{-1} The volume of processed bark beetle was partly abandoned by T_{-1}	KP	m ³	2 073
Objem zpracované kůrovcové hmoty v roce T_{-1} (8-12/2016) The volume of processed bark beetle in the year T_{-1} (8-12 / 2016)	VT ₋₁	m ³	6 079
Počet jedinců opouštějících 1m ³ kůrovcového dříví Number of individuals leaving 1m ³ of bark beetle	PJO	ks	190 000
Počet jedinců opustivší zničené stromy podzim T_{-1} The number of individuals leaving the abandoned trees in autumn T_{-1} destroyed	PJZ	ks	884 120 000
Počet jedinců schopných zničit 1 m ³ stromu Number of individuals able to destroy 1 m ³ of tree	P	ks	4 000
koeficient vlivu průměrné roční teploty coefficient of influence of average annual temperature	T koef	koef.	1,50
koeficient vlivu průměrných ročních srážek average annual rainfall coefficient	S koef	koef.	1,25
stanovený počet kladených vajíček jednou samicí a fixed number of eggs placed by one female	M	ks	60
poměr samic tvořící sesterské pokolení the proportion of females that make up the sister's	PS	%	1,66
poměr pohlaví v době rojení - objem přezimujících samic sex ratio at the time of rooting - the size of the overwintering females	PH	%	0,72
mortalita vývojových stádií na podzim - přeživší populace mortality of developmental stages in the fall - population survivors	MR1	%	0,69
Počet samic připravených k rojení v jarním období Number of females ready for swarming in the spring season	SJO	ks	439 230 816
Počet nakladených vajíček pro vývoj v jarním období Number of eggs to be dispatched for spring development	VJO	ks	32 942 311 200
Předpoklad mortality v jarním období - přeživší populace The assumption of mortality in the spring period - the surviving population	MR2	koef.	0,69
Potenciál zničení stromů bez obraných opatření jarní rojení Potential of destroying trees without defensive measures of spring swarming	POT	m ³	113 651
Předpoklad dokončení vývoje dospělý brook po dokončení jarního rojení Prerequisite completion of adult beetle development after completion of spring swarming	PDV	ks	21 733 702 991
Skutečně instalovaných obraných opatření měsíce 3-8/ T_0 Really installed defense measures of month 3-8/ T_0	OP	ks	3868
Objem zpracované kůrovcové těžby 8-12/ T_0 The volume of processed bark beetle extraction 8-12/ T_0	VT ₀	m ³	2714
Poměr skutečnosti zpracované kůrovcové hmoty k potenciálu POT The ratio of the actual processed bark beet mass to the POT potential		%	2,39
Trend VT_{-1}/VT_0 Trend VT_{-1}/VT_0			0,45

kůrovce na úrovni celého lesa a zkoumá účinnost různých metod dohledu nad vypuknutím kůrovce kalami.

ABDULLAH et al. (2018) zaměřili výzkum na minimalizaci hospodářských ztrát a vyloučení vzniku ohnisek včasným odhalením napadení kůrovcem zejména v období, kdy stromy dosud nevykazují vizuální příznaky. Základem výzkumu, který probíhal v národním parku Bavorský les, je zjištění, že napadení kůrovcem ovlivňuje fyziologický a chemický stav stromu.

SAMARDŽIĆ-PETROVIĆ, DRAGIĆEVIĆ (2015) se zabývali možnostmi zvládnutí a prevencí napadení lesních porostů hmyzem a snížením významných hospodářských a ekologických ztrát na základě zlepšení znalostí o procesu napadení. Hlavním cílem této výzkumné studie bylo navrhnout a implementovat model založený na metodě prognózy prostorového šíření zamoření. Studie se prováděla v oblasti Bulkley-Nechako v Britské Kolumbii v Kanadě pomocí datových souborů pro tři časové body – 2004, 2008 a 2012.

Vytvoření simulačního modelu prediagnostiky vývoje kůrovce v budoucích obdobích je téma velice specifické. Základním problémem je množství stochastických jevů, které celý systém fungování ovlivňují. Většina autorů simulačních modelů kůrovce dochází ke stejnému zjištění. Jsou hodnoty, ze kterých lesní hospodář může pevně vycházet již v období přípravy na jarní rojení následného roku. Jedná se zejména o objem vytěžené dřevní hmoty napadené kůrovcem. Dále je možno na základě rozboru pozerků vývoje kůrovce posledního dokončeného vývoje zjistit rámcovou mortalitu vývojových stadií a předpoklad poměru pohlaví pro následující rojení.

Množství srážek vztažených k dlouhodobému normativu nám dává signál o předpokládaném odolnostním potenciálu jedinců smrku proti náletu kůrovce. Vývoj průměrné teploty vztažené k dlouhodobému normativu má vliv na rychlejší nebo pomalejší vývoj rojení kůrovce v běžném roce, což se projevuje objemem napadené hmoty v období září – prosinec a počty rojení v běžném roce.

Pro simulaci jsou potřebná jednotková čísla základních veličin specifikující chování celého cyklu napadení a zničení dospělého stromu. Jedná se o průměrné množství kladených vajíček samicí, počet samic nalétnutých do snubních komůrek a dalším vývojem způsobující odumření stromu, poměr samic, které vytvářejí sesterské pokolení, počet jedinců, kteří dosáhnou dospělosti po dokončení vývoje, přepočtené na 1 průměrný strom.

Vývojový cyklus kůrovce je uvozen obdobím jaro až podzim. Brouci po přezimování v půdě nebo pod kůrou stromů opouštějí zimoviště a za příhodných denních teplot v rozmezí 18–20 °C po několikadenní fázi tzv. dospívání jsou připraveni k náletu na stromy. Lýkožrout smrkový je polygamní, což znamená, že jeden samec oplodní i několik samic. Samec naletí na strom a začne se hned zavrtávat do kůry a pod ním ležícího lýka (floému). Samec v lýku vytváří tzv. snubní komůrku, do níž láká samičky. Jedna samička po oplodnění hloubí chodbu rovnoběžnou s osou kmene (matečnou chodbu) a do ní klade postupně vajíčka. Z nich se líhnou larvičky, které vytvářejí postranní chodbičky. Na stromě jsou tyto chodbičky umístěny horizontálně a bývají od sebe vzdáleny 2–10 mm. Jedna matečná chodba obsahuje průměrně 60 vajíček.

Vylíhlé larvy se živí pletivem stromu. Tak jak larvy rostou, chodbičky se postupně rozšiřují a na jejich konci larva třetího (posledního) instaru vytváří tzv. kukelní komůrku. Po kuklení vylézá z komůrky dospělý brouk – lýkožrout smrkový. Na jaře se tedy na stromě vyvíjí první generace lýkožrouta smrkového. Zahrnuje fázi vajíčka, larvy, kukly a dospělého hmyzu.

Část potomstva jedné samičky zahyne ve vajíčku, další část ve stadiu larev a kukel. Některým broukům se sice podaří ukončit vývoj, ale ne-

podarí se jim opustit prostor kukelní komůrky. Celkový vývoj jedné generace od stadia vajíčka, přes stadium larvy a kukly až k dospělému brouku trvá šest až deset týdnů. Z toho tvorba mateřské chodby a kladení vajíček 7–10 dnů. Délka larválního vývoje je závislá na teplotních podmínkách. Může proběhnout za 7 dnů, ale v chladném počasí se může protáhnout až na 40–50 dnů. Období kukly bývá také rozvleklé, ale v průměru trvá okolo 8 dnů. Populační potenciál je závislý na ovlivňujících faktorech, které se rozdělují na vnější a vnitřní. Základní vnější faktor jsou klimatické podmínky v aktivním období života. V podmínkách ČR dochází obvykle ke dvěma rojením, v případě příznivého teplého počasí může nastat i rojení třetí. První (jarní) rojení začíná v nadmořských výškách 400–700 m n. m. na přelomu měsíce dubna a května, druhé (letní) rojení probíhá na přelomu června a července. Ke třetímu rojení může dojít na přelomu měsíců srpna a září. Z vnitřních faktorů se jedná zejména o poměr pohlaví v dané generaci. V populaci rodičovských brouků je poměr samců k samicím v intervalu 1 : 1 – 1 : 3. V průběhu gradace se snižuje na 1 : 1, v období latence se blíží až k 1 : 3 (SKUHRAVÝ 2002).

Počet vajíček kladených jednou samicí se u autorů výzkumných studií liší. FLEISCHER (1875) uvádí průměrný počet 60 vajíček, ESCHERICH (1923) 20–100 vajíček, v průměru 60. MARTINEK (1956, 1961) udává průměrný počet vajíček 10–40 ks. ZAHRADNÍK (2005) uvádí 20–100 vajíček, průměrně 60 ks. Pro výpočet modelu byl použit nejčastěji uváděný průměrný počet 60 ks vajíček.

Po základním kladení dochází u cca 2/3 samic ke kladení sesterského pokolení, kde dle jednotlivých zdrojů v literatuře je uváděn počet vajíček jako poloviční základnímu kladení, v průměru 30–40 ks. V publikacích MACEK (1962) a ZUMR (1995) jsou uvedeny zmínky o druhém sesterském pokolení. MARTINEK (1956, 1961) uvádí počty samic pro první sesterské pokolení ve výši 91 % a pro druhé sesterské pokolení 38 % z původního počtu při jarním rojení.

Mortalita vývojových stadií od vajíčka po dospělého brouka se pohybuje ve velmi rozsáhlém pásmu. THALENHORST (1958) prokázal vysokou úmrtnost v populaci. Uvádí vliv na mortalitu parazitoidy ve výši kolem 2 %, predátorů 25 % z celku. Z původního počtu přežívá pouze 7–22 % brouků. Za nejvýznamnější mortalitní faktor považoval intra-specifickou a intra-specifickou konkurenci. NIEMAYER (1987) uvádí ve svých studiích úmrtnost ve výši 50–75 %.

Pro překonání obranného potenciálu stromu je zásadní počet jedinců nalétávajících kůrovců, kteří následně překonávají obranný systém stromu a způsobují jeho zánik. Kritické množství je odvislé nejenom od počtu jedinců, ale i od prostorového rozmístění kůrovců na smrku, na vitalitě stromu a následně na schopnosti vyvolaných obranných opatření stromu. Strom hyne po přerušení vodivých pletiv (SKUHRAVÝ 2002). Ve studiích CHRISTIANSEN (1985) a MULLOCK, CHRISTIANSEN (1986) je uváděn počet 150–200 nalétnutých samic. Což při poměru pohlaví 1 : 3 činí až 600 ks samic. WESLIEN a REGNANDER (1990) zjistili počet ve výši 400–1000 jedinců samic. Podle GONZALESE et al. (1996) zahrnuje jeden plně obsazený strom 2000–10 000 jedinců. Lze vycházet z doporučených pravidel pro instalaci obranných opatření formou lapače, kde počet 4000 odchycených ks lýkožrouta smrkového tvoří imaginární hranici mezi středním a slabým náletem.

Důležitou hodnotou ve výpočtu simulačního modelu je počet jedinců, kteří se vyvinou na jednom zničeném stromu. V odborné literatuře se vyskytuje rozsáhlé rozmezí počtu dle jednotlivých autorů. FLEISCHER (1875) udává hodnotu 1260 tis. jedinců, RATZBURG (1839) 46 tis. jedinců, PFEFFER (1961) 230 tis. a více. V dalších pracích např. MARTINEK (1956) udává 200 jedinců, GONZALES et al. (1996) 35–72 tis. jedinců. Pro výpočet v simulačním modelu byla použita hodnota 190 tis. (ZAHRADNÍK 2004), jako pro současnost a území České republiky nej přesnější.

ZÁVĚR

Využití simulačního modelování v lesním hospodářství je činnost, která je vzhledem k množství stochasticky orientovaným vstupním údajům velmi problematická. Důvodem je samotná práce s životním prostředím, v tomto případě zastupované lesním společenstvem, kde výkonný lesní hospodář musí mimo plánované hospodářské opatření reagovat na vnější neovlivnitelné jevy a hledat optimální řešení vzniklé krizové situace. V tomto prostředí žádný simulační model samostatně neobstojí a je potřeba jej brát jako podporu pro volbu při rozhodování. Je vždy nutné skloubit výsledky a zkušenosti získané v praxi, odborné literatuře a rozhodnutí podpořit výsledky simulačního modelu. Většina autorů studií zabývajících se simulačním modelováním chování kůrovce konstatuje problematiku přesnosti výpočtu v souvislosti se stochastickými vlivy. Předkládaná studie simulačního modelu poskytuje možnosti prediagnostiky vývoje kůrovce na základě známých údajů, případně i analýzu dat skutečného chování kůrovce a výsledků matematicky spočítaného předpokladu. Porovnáním dat je dále možno posuzovat postupy lesního hospodáře a účinnost obranných opatření v běžném roce. Model poskytuje další možnosti rozvíjení a ověření důležitosti jednotlivých známých vstupujících veličin na vývoj kůrovce. Pro laickou veřejnost slouží jako ukázka chování kůrovce v lesním prostředí a možných následků v případě neuplatnění obranných opatření.

LITERATURA

- ABDULLAH H., DARVISHZADEH R., SKIDMORE A.K., GROEN T.A., HEURICH M. 2018. European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) green attack affects foliar reflectance and biochemical properties. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64: 199–209. DOI: 10.1016/j.jag.2017.09.009
- BEREC L., DOLEŽAL P., HAIS M. 2013. Population dynamics of *Ips typographus* in the Bohemian Forest (Czech Republic): Validation of the phenology model PHENIPS and impacts of climate change. *Forest Ecology and Management*, 292: 1–9. DOI: 10.1016/j.foreco.2012.12.018
- ESCHERICH K. 1923. Die Forstinsekten Mitteleuropas. Zweiter Band. Spezieller Teil. Abt. 1. die Urinsekten (Anamerentoma und Thysanuroidea), die Geradflügler (Orthopteroidea und Amphibiotica), die Netzflügler (Neuropteroidea) und die Käfer (Coleopteroidea). Systematik, Biologie, forstliches Verhalten und Bekämpfung. Berlin, Parey: 663 s.
- FAHSE L., HEURICH M. 2011. Simulation and analysis of outbreaks of bark beetle infestations and their management at the stand level. *Ecological Modelling*, 222 (11): 1833–1846. DOI: 10.1016/j.ecolmodel.2011.03.014
- FLEISCHER A. 1875. Lýkožrousti čili korovci (*Bostrychus typographus*, L.) v Šumavě a jejich nepřátelé. *Vesmír*, 4 (9): 97–99, 111–114, 128–129.
- GONZALES R., GREGOIRE J., DRUMONT A., DE WINDT N. 1996. A sampling technique to estimate within-tree populations of pre-emergent *Ips typographus* (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology*, 120 (9): 569–576. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1996.tb01654.x
- CHRISTIANSEN E. 1985. *Ips ceratocystis* – infection of Norway spruce: what is a deadly dosage? *Zeitschrift für Angewandte Entomologie*, 99 (1): 6–11.
- HOUŠKA M. 2009. Simulační modely I. Praha, Česká zemědělská univerzita, Provozně ekonomická fakulta: 57 s.
- JELÍNEK J. 2008. Větrná a kůrovcová kalamita na Šumavě z let 1868 až 1878. [Brandýs nad Labem, Ústav pro hospodářskou úpravu lesů]: 37 s.
- JÖNSSON A., SCHROEDER L.M., LAGERGREN F., ANDERBRANT O., SMITH B. 2012. Guess the impact of *Ips typographus* – an ecosystem modelling approach for simulating spruce bark beetle outbreaks. *Agricultural and Forest Meteorology*, 166: 188–200. DOI: 10.1016/j.agrformet.2012.07.012
- KUPKA I. 1999. Reálné možnosti změny druhové skladby lesů v ČR. *Lesnická práce*, 78: 546–549.
- LAUSCH A., HEURICH M., FAHSE L. 2013. Spatio-temporal infestation patterns of *Ips typographus* (L.) in the Bavarian Forest National Park, Germany. *Ecological Indicators*, 31: 73–81. DOI: 10.1016/j.ecolind.2012.07.026
- LÍBAL V. 1980. Organizace a řízení výroby. Praha, SNTL: 490 s.
- MACEK J. 1962. Ochrana lesa. Praha, SZN: 173 s. Lesnická knihovna, sv. P/8.
- MARTINEK V. 1956. Příspěvek k osvětlení problému sesterského pokolení u kůrovce *Ips typographus*. *Sborník ČAZV – Lesnictví*, XXIX (9): 615–644.
- MARTINEK V. 1961. Problém natality a gradace kůrovce *Ips typographus* L. ve střední Evropě. *Rozpravy Československé akademie věd, řada matematických a přírodních věd*, 71 (seš. 3): 77 s.
- MULOCK P., CHRISTIANSEN E. 1986. The threshold of successful attack by *Ips typographus* on *Picea abies*: a field experiment. *Forest Ecology and Management*, 14 (2): 125–132. DOI: 10.1016/0378-1127(86)90097-6
- NIEMAYER H. 1987. Erfahrungen mit der Bekämpfung rindenbrütender Borkenkäfer. *Österreichische Forstzeitung*, 3: 29–31.
- PASZTOR F., MATULLA CH., RAMMER W., LEXER M.J. 2014. Drivers of the bark beetle disturbance regime in Alpine forests in Austria. *Forest Ecology and Management*, 318: 349–358. DOI: 10.1016/j.foreco.2014.01.044
- PFEFFER A. 1961. Ochrana lesů. Praha, Státní zemědělské nakladatelství: 838 s.
- POLENO Z. 1997. Trvale udržitelné obhospodařování lesů. Praha, Ministerstvo zemědělství ČR: 105 s.
- PRETZSCH H., BIBER P., ĎURSKÝ J. 2002. The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *Forest Ecology and Management*, 162 (1): 3–21. DOI: 10.1016/S0378-1127(02)00047-6
- RATZBURG J.T.CH. (Hrsg.) 1839. Die Forst-Insekten, oder Abbildung und Beschreibung der in den Wäldern Preussens und der Nachbarstaaten als schädlich oder nützlich bekannt gewordenen Insekten: in systematischer Folge und mit besonderer Rücksicht auf die Vertilgung der Schädlichen. V. 1. Berlin, Nicolaische Buchhandlung: 168–186.
- SAMARADŽIĆ-PETROVIĆ M., DRAGIĆEVIĆ S. 2015. Modeling the propagation of forest insect infestation using machine learning techniques. In: Gervasi, O. et al. (eds): 15th International Conference on Computational Science and Its Applications – ICCSA 2015. Cham, Springer: 646–657. DOI: 10.1007/978-3-319-21470-2_47
- SIMON J. 2002. Kalibrace růstového simulátoru Silva 2.2 v podmínkách ČR. *Lesnická práce*, 81: 129.

- SKUHRAVÝ V. 2002. Lýkožrout smrkový a jeho kalamity. Praha, Agrospoj: 196 s.
- ŠVESTKA M., HOCHMUT R., JANČAŘÍK V. 1998. Praktické metody v ochraně lesa. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce: 311 s.
- THALENHORST W. 1958. Grundzüge der Populationsdynamik des grossen Fichtenborkenkäfers *Ips typographus* L. Frankfurt am Main, Sauerländer: 126 s. Schriftenreihe der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und Mitteilungen der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Bd. 21
- VACEK S., VACEK Z., SCHWARZ O. 2010. Struktura a vývoj lesních porostů na výzkumných plochách v národních parcích Krkonoš. [Structure and development of forest stands on research plots in the Krkonoše national parks]. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce: 567 s.
- WESLIEN J., REGNANDER J. 1990. Colonization densities and offspring production in the bark beetle *Ips typographus* (L.) in standing spruce trees. *Journal of Applied Entomology*, 109: 358–366. DOI: 10.1111/j.1439-0418.1990.tb00064.x
- ZAHRADNÍK P. 2004. Ochrana smrčín proti kůrovcům. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce: 39 s.
- ZAHRADNÍK P. 2005. Základy ochrany lesa v praxi. Kostelec nad Černými lesy, Lesnická práce: 127 s.
- ZENKL D. 2014. Analýza matematických modelů populační dynamiky kůrovce. Bakalářská práce. České Budějovice, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích: 57 s.
- ZUMR V. 1995. Lýkožrout smrkový – biologie, prevence a metody boje. Písek, Matices lesnická: 131 s. Dobové spisky, č. 1.

MODEL ANALYSIS OF THE BARK BEETLE INVASIVE STRATEGY IN CONDITIONS OF THE DVŮR KRÁLOVÉ FOREST DISTRICT ADMINISTRATION (CZECH REPUBLIC)

SUMMARY

In the last few years, spruce beetle (hereinafter referred to as „bark beetle“) has been a very discussed topic, mainly in connection with forest decay. However, the presence of other species of bark beetles, such as Nordic *Ips duplicatus* (S.), *Pityogenes chalcographus* (L.) glitter in calamities, does not diminish its importance. In the past three years, the ratio of salvage logging in the Czech Republic has changed significantly, where the volume of occasional harvests caused by bark beetles has grown markedly as well. Within the Decree of the Ministry of Agriculture of the Czech Republic No. 101/1996 Coll., as amended, spruce beetle is considered a calamitous pest.

Crisis management in the current forest management system is usually solved on a so-called pragmatic basis, where the data on the different types of crisis situations are constantly updated, and the solution is based on an instant intuitive improvisation of the deployment of human and technical resources for the elimination of consequences. The choice of the solution to the resulting crisis is always dependent on the decision of a manager who decides based on local knowledge and experience gained in resolving similar crises in the past. The chosen optimal solution will be determined once the crisis has been eliminated and an overall solution analyzed. Because it is an intuitive decision, the result of the solution is uncertain in advance.

The paper is focused on possibilities of implementation of quantitative methods of system analysis. The basic objective is to create a functional analytical simulation model (Fig. 1) as a guide for the decision-making process. The work was elaborated over the results of the occurrence of bark beetles at LHC Podkrkonoší, The Dvůr Králové forest district administration in 2008–2016 (Tab. 1). The creation of the simulation model aims to increase the forest owner's ability to prediagnostics and to analyze bark beetle behavior in the forthcoming periods based on the established and at the same time assumed stochastically oriented variables. Presently, the working processes of the sub-operation of forestry activities are solved in the production process of forestry. These are the stipulated rules on how to proceed in individual work operations, especially about the activity carried out, the equipment of the workers, the observance of the principles of occupational health and safety and the occupational hygiene. The decision-making processes are, among other things, in organizations managing state assets embedded in internal managed documentation. These are based on biological and legal principles and the mathematical principles of the procedure are applied singly. The system of decision-making in crisis situations is solved only in a general, mostly intuitive process.

The use of simulation modeling in forest management is an activity that is very problematic in terms of stochastically oriented input data. The reason for this is the environmental work in this case represented by the forestry community, where the executive farmer must respond to outside influences in addition to the planned economic measures and to find an optimal solution to the resulting crisis. In this environment, no simulation model is self-sufficient and needs to be taken as a support for decision-making process. It is always necessary to combine the results and experience gained in practice, professional literature and the decision to support the results of the simulation model. Most authors of the study, where the object is simulation modeling of bark beetle behavior, state the issue of accuracy of calculation in relation to stochastic influences. The present study of the simulation model provides both the possibility of diagnosis of the development of bark beetle based on known data, or the analysis of the actual behavior of bark beetle to the mathematically calculated assumptions. By comparing the data, it is also possible to assess forest manager practices and effectiveness of defensive measures in the current year. The model provides further opportunities to develop and validate the importance of each known input for the development of bark beetle. For the non-professional public it serves as an example of the behavior of bark beetle in the forest environment and possible consequences in the case of non-application of defensive measures.

Zasláno/Received: 22. 05. 2018

Přijato do tisku/Accepted: 19. 06. 2018