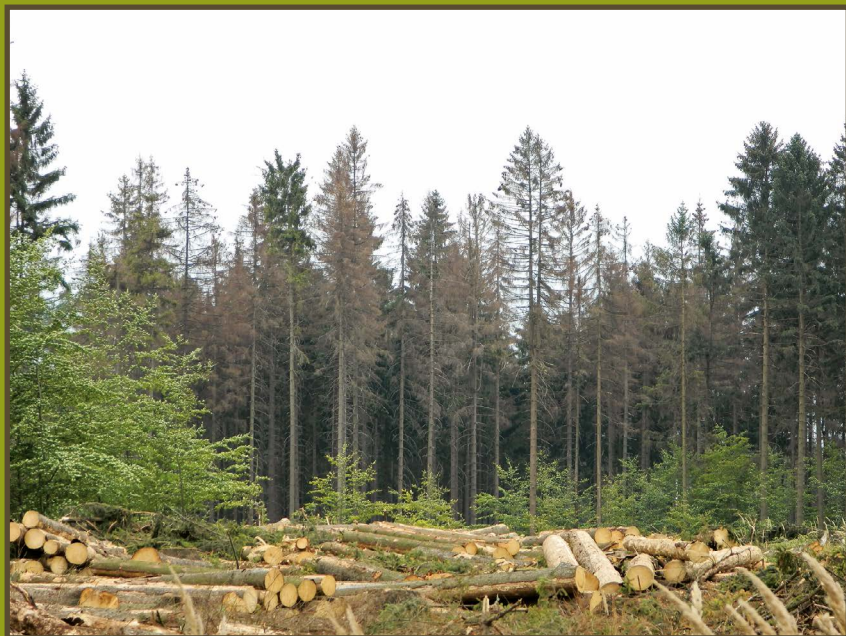


TANABBO II
MODEL PRO HODNOCENÍ RIZIKA NAPADENÍ
LESNÍCH POROSTŮ LÝKOŽROUTEM SMRKOVÝM
IPS TYPOGRAPHUS (L.)
[COLEOPTERA: CURCULIONIDAE]



Ing. RASTISLAV JAKUŠ, PhD.
a kol.

TANABBO II
model pro hodnocení rizika napadení
lesních porostů lýkožroutem smrkovým
***Ips typographus* (L.)**
[Coleoptera: Curculionidae]

Certifikovaná metodika

Ing. Rastislav Jakuš, PhD.
Ing. Miroslav Blaženec, PhD.
doc. Mgr. Milan Koreň, PhD.
Mgr. Ivan Barka, PhD.
Mgr. Karolina Lukášová, Ph.D.
Ing. Bc. Jan Lubojacký, Ph.D.
prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Lesnický průvodce 1/2017

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i.

Strnady 136, 252 02 Jíloviště

www.vulhm.cz

Publikace vydané v řadě Lesnický průvodce jsou dostupné v elektronické verzi na:

http://www.vulhm.cz/lesnicky_pruvodce

Vedoucí redaktor: Ing. Jan Řezáč; e-mail: rezac@vulhm.cz

Výkonná redaktorka: Miroslava Valentová; e-mail: valentova@vulhmop.cz

Grafická úprava a zlom: Klára Šimerová; e-mail: simerova@vulhm.cz

ISBN 978-80-7417-135-2

ISSN 0862-7657

**TANABBO II - MODEL OF RISK ASSESSMENT
INFESTATION OF FOREST BY BARK BEETLE
IPS TYPOGRAPHUS (L.)
[COLEOPTERA: CURCULIONIDAE]**

Abstract

For ten years, there is a model TANABBO (JAKUŠ et al. 2005) implemented for the conditions of Central Europe. This model has been recently finalized and reformulated into model TANABBO II, representing a system providing maps and statistical evaluation of the risk of stands infested by bark beetle.

The aim is to describe in detail TANABBO II model for assessing the dynamics of the spruce bark beetle and its use, and comments of its weak points.

Prognosis of damage spread by insects is based on the synthesis of a large number of factors that affect the risk of attack of spruce bark beetle. Selection of factors was carried out on the analysis of literary sources and with regard to the availability of data in the Czech Republic. For this reason, the model is built on the use of basic environmental data and data that can be derived from forest management plans and records. Conversely, the model does not use, for example, physiological indicators in trees that are difficult to access.

Key words: Tanabbo, *Ips typographus*, bark beetle, model, spruce

Oponenti: Ing. Jiří Foit, Ph.D.; *Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně*
Ing. Štěpán Křístek; *Ústav pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem, pobočka Frýdek-Místek*

Adresy autorů:

Ing. Rastislav Jakuš, PhD.

Ing. Miroslav Blaženec, PhD.

Ústav ekológie lesa SAV

L. Štúra 2, 96053 Zvolen

Slovenská republika

Mgr. Ivan Barka, PhD.

Národné lesnícke centrum

Lesnícky výskumný ústav Zvolen

T. G. Masaryka 22, 960 92 Zvolen

Slovenská republika

doc. Mgr. Milan Koreň, PhD.

Lesnícka fakulta

Technická univerzita vo Zvolene

Ul. T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen

Slovenská republika

Ing. Bc. Jan Lubojacký, Ph.D.

Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v.v.i.

Strnady 136, 252 02 Jíloviště

Česká republika

Mgr. Karolina Lukášová, Ph.D.

prof. Ing. Jaroslav Holuša, Ph.D.

Katedra ochrany lesa a entomologie

Fakulta lesnická a dřevařská ČZU

Kamýcká 1176, 165 21 Praha 6 - Suchbát

Česká republika

Obsah:

1	ÚVOD	7
2	CÍLE CERTIFIKOVANÉ METODIKY	8
3	METODIKA	9
3.1	Popis a východiska modelu	9
3.2	Databáze systému a import údajů	11
3.2.1	Import meteorologických údajů	12
3.2.2	Struktura databáze	12
3.2.3	Import záznamů o ohniscích žíru I. smrkového ...	16
3.2.4	Výpočet vegetačních indexů	17
3.3	Prognostická část	17
3.3.1	Dynamika výskytu ohnisek žíru I. smrkového	17
3.3.2	Prognózy a validace ohnisek žíru I. smrkového ...	23
3.3.3	Riziko vzniku a rozšiřování ohnisek žíru I. smrkového	25
3.3.4	Prognóza poškození porostů I. smrkovým	28
3.3.5	Management I. smrkového	30
3.4	Operační část	32
3.4.1	Fenologický model	32
3.4.2	Meteorologické parametry	36
3.4.3	Riziko sucha	40
3.5	Praktické použití programu TANABBO II	44
3.5.1	Vytvoření a naplnění geografické databáze	45
3.5.2	Výpočet vstupních vrstev	48
3.5.3	Výpočet prognóz a jejich validace	51

3.5.4	Model vývoje l. smrkového PHENIPS	53
3.5.5	Výpočet rizika sucha	55
4	NOVOST POSTUPŮ	58
5	POPIS UPLATNĚNÍ	59
6	EKONOMICKÉ ASPEKTY UPLATNĚNÍ	59
7	DEDIKACE	60
8	LITERATURA	61
8.1	Použitá literatura	61
8.2	Publikace, které předcházely metodice	65
9	SUMMARY	67
10	SEZNAM OBRÁZKŮ	68

1 ÚVOD

Škody způsobované komplexem biotických činitelů ve smrkových porostech mají obecně narůstající tendenci a vyžadují mnoho investic do ochranných a obranných opatření i komplexních postupů přeměn a rekonstrukcí postižených porostů. K omezení rozsahu škod a k dosažení vyšší efektivity realizovaných opatření je nutno mít k dispozici operativní informace a prognózy o intenzitě napadení porostů, gradační fázi škůdců, virulenci patogenů a jejich potenciálu šířit se v dalším období do zdravých porostů. Lýkožrout smrkový, *Ips typographus* (Linné, 1758), je jedním z nejvážnějších podkorních škůdců smrku ztepilého (*Picea abies* (L.) Karst.) v Eurasii (ANNILA 1969; SCHWENKE 1974). Při vysokých populačních hustotách může osídlovat relativně zdravé stromy, běžně se však rozmnožuje na čerstvě pokáceném smrkovém dříví a oslabených smrcích (SCHWENKE 1974; WESLIEN et al. 1989). Recentní gradace ve střední Evropě trvá od roku 2003 (KNÍŽEK et al. 2016).

Časová a prostorová distribuce podkorního hmyzu, stejně jako jeho populační dynamika, se v posledních letech výrazně mění (HLÁSNY, TURČÁNI 2009; HLÁSNY et al. 2011a, b, c; KAUSRUD et al. 2011) a doposud účinná obranná opatření v důsledku obecně vyšší početnosti škůdců selhávají, resp. jsou méně účinná a jsou aplikována ve větším rozsahu. Současně značně pokulhává včasná asanace aktivních kůrovcových stromů, takže je nutné klást důraz zejména na včasnost a důslednost asanace.

Biologie, ekologie a populační dynamika l. smrkového jsou relativně dobře známy, což vytváří předpoklady pro aplikaci účinných opatření, především ve fázích latence a počátečních stadiích přemnožení (WERMELINGER 2004). V důsledku očekávaného nárůstu teploty vzduchu bude u l. smrkového docházet k urychlení vývoje, dřívejšímu dokončení životního cyklu a zakládání další generace v sezóně (LANGE et al. 2006; HLÁSNY et al. 2011a, b, c). Abiotický stres, zejména mechanické poškozování a sucho, navíc ovlivňuje interakce mezi náchylností rostlin k napadení a chováním hmyzích škůdců (JÖNSSON et al. 2007). Herbivorní hmyz se přizpůsobí změnám nejrychleji a reaguje obzvláště na dostupnost hostitelských rostlin (ROUAULT et al. 2006).

Na krajinné úrovni bylo šíření lýkožrouta smrkového studováno obvykle s využitím dat z lesních porostů (MEZEI et al. 2015) nebo interpretací leteckých a satelitních snímků (WULDER et al. 2005; LAUSCH et al. 2011), hodnocením spektrálních snímků (KAUTZ et al. 2011), časových řad digitálních fotografií na vybrané síti lokalit (KÖSTER et al. 2009) nebo hodnocením sítě referenčních ploch v hospodářských lesích (GILBERT et al. 2005; HILCZANSKI et al. 2006). Na lokální úrovni, obvykle v bezzásahových územích, bylo šíření tohoto hmyzího druhu sledová-

no zpravidla terestrickým šetřením (SCHROEDER, LINDELÖW 2002; PLAŠIL, CUDLÍN 2005; GRODZKI et al. 2006; KOMONEN et al. 2011). Obecně platí, že významnými faktory šíření l. smrkového jsou velikost větrem disturbovaných ploch, vzdálenost od míst předchozího napadení (LAUSCH et al. 2011), expozice (JURC et al. 2006), věková struktura porostů (WERMELINGER 2004), porostní hustota a zastoupení smrku (HILCZANSKI et al. 2006). Predikce šíření l. smrkového, vycházející z těchto vztahů, nemusí být příliš přesné (WERMELINGER 2004), nicméně jsou velice rozšířené a sofistikované (cf. SEIDL et al. 2011).

Již deset let existuje model TANABBO (Tatra National park Bark Beetle Outbreak) (JAKUŠ et al. 2005), implementovaný do podmínek střední Evropy, který byl testován v oblasti Vysokých Tater. Tento model byl recentně dopracován a přeformulován do modelu TANABBO II, který představuje systém, jež poskytuje uživatelům mapy a statistické hodnocení rizika napadení porostů l. smrkovým.

2 CÍLE CERTIFIKOVANÉ METODIKY

Cílem metodiky je podrobně popsat model TANABBO II pro hodnocení dynamiky přemnožení lýkožrouta smrkového, která je určena pro všechny lesní majetky ve střední Evropě s významným zastoupením smrkových porostů.

Metodika je rozdělena do dvou částí, prognostické a operační. Pro obě jsou popsány vstupní údaje, práce s daty a naznačeny principy výpočtů. První část obsahuje moduly pro výpočet dynamiky a prognóz poškozování porostů l. smrkovým pro následující sezónu. Do operační části jsou zařazeny moduly pro výpočet vývoje l. smrkového podle modelu PHENIPS a hodnocení rizika sucha, což je nadstandardní a umožňuje kromě výpočtu stadia vývoje l. smrkového také definovat výrazné nebezpečí při souběhu stresu stromů a letové aktivity lýkožrouta.

3 METODIKA

3.1 Popis a východiska modelu

Systém na podporu rozhodování (DSS) „TANABBO II“ je vyšší verzí experimentálního programu TANABBO (JAKUŠ et al. 2005; KISSIYAR et al. 2005), který byl vyvíjen jako makro ke GIS software Erdas.

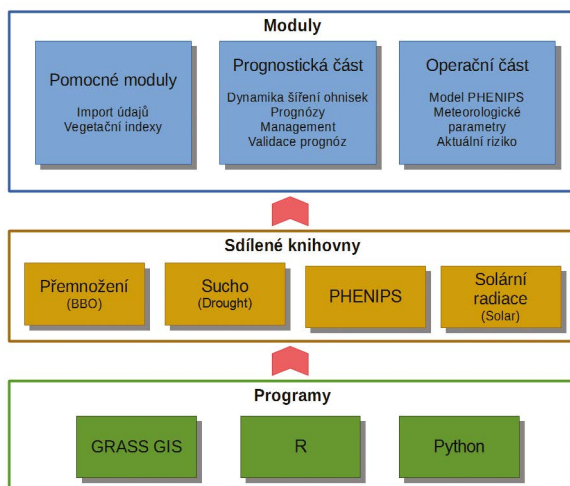
Nový systém TANABBO II je implementován do software s otevřeným zdrojovým kódem (OSS, *Open Source Software*). Zpracování geografických údajů a prostorové modelování bylo implementováno do systému GRASS GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*, grass.osgeo.org). Jedná se o komunitně vyvíjený GIS s otevřeným zdrojovým kódem, který je možné volně šířit a modifikovat za předpokladu dodržení podmínek licenční smlouvy GPL (www.gnu.org/licenses/gpl.html). Program GRASS GIS patří mezi nejstarší a nejčastěji používané GIS programy s otevřeným zdrojovým kódem. Jeho výhodou je zejména množství existujících modulů (dílčích nástrojů v podobě relativně samostatných programů) a funkcí pro práci s rastrovými daty a údaji dálkového průzkumu Země (DPZ), možnost relativně jednoduchého vytváření nových modulů v skriptovacím jazyku Python (www.python.org) nebo v programovacím jazyku C, přičemž nové moduly jsou vybaveny jak uživatelským rozhraním pro příkazový řádek (tzv. CLI – *command line interface*) s možností jejich využití v dalších skriptech a modulech, tak i grafickým uživatelským rozhraním (tzv. GUI – *graphical user interface*).

Program TANABBO II tvoří tři skupiny modulů, rozdělené podle účelu použití (Obr. 1). Přistupuje se k nim prostřednictvím menu, které bylo integrováno do menu programu GRASS GIS. Všechny moduly programu TANABBO II byly implementovány v jazyku Python. Ve skupině TANABBO II se nachází moduly pro vstup a úpravu údajů. Prognostická část obsahuje moduly pro výpočet dynamiky a prognóz poškození porostů lýkožroutem smrkovým, testování a validaci prognostických metod a podporu managementu lesních porostů. Do Operační části jsou zařazeny moduly pro výpočet vývoje l. smrkového podle modelu PHENIPS (BAIER et al. 2007), potenciální solární radiace, teploty vzduchu a kůry, korekci podle meteorologických měření, indexu sucha, rizika sucha a deficitu vláhy.

Prognóza šíření poškození porostů l. smrkovým je založená na syntéze většího počtu faktorů, které ovlivňují riziko napadení smrkových porostů l. smrkovým. Výběr faktorů byl realizován na základě rozboru literárních zdrojů a s ohledem na dostup-

nost dat v České republice. Z tohoto důvodu je model postaven na využití základních environmentálních dat a dat, která mohou být odvozena z lesních hospodářských plánů a evidence. Model naopak nevyužívá např. fyziologické ukazatele stavu stromů, které jsou obtížně dostupné.

Program TANABBO II je dostupný na webových stránkách: www.tanabbo.org. Registrovaní uživatelé mají přístup k aktuální i k předcházejícím verzím programu. V sekci Download se nachází instrukce pro instalaci programu, odkazy na zdrojové kódy a manuál uživatele.



Obr. 1: Schéma programu TANABBO II (KOREŇ 2016)

3.2 Databáze systému a import údajů

Mezi hlavní zdroje údajů o **stavu lesních porostů** při počítačovém modelování patří satelitní snímky. Na jednom satelitním snímku je zachyceno rozsáhlé území, což umožňuje efektivně získávat informace o místě a rozsahu kalamitních ploch a o poškození porostů l. smrkovým, změnách průběhu porostních stěn, změně objemu biomasy, druhovém složení lesa apod. Snímky z některých senzorů, jako např. LANDSAT a MODIS, jsou veřejně přístupné. Satelitní údaje se importují do geografické databáze programu TANABBO II. Při importu se satelitní záznamy z originálního formátu konvertují do rastrů programu GRASS GIS, převádějí se do souřadnicového systému S-JTSK a ukládají se do vytvořeného katalogu. Každá vrstva obsahuje jeden spektrální kanál satelitního záznamu. Název rastrové vrstvy se skládá z názvu satelitu, čísla spektrálního kanálu a roku snímkování.

Nevýhodou satelitních záznamů LANDSAT je jejich velké prostorové rozlišení, tj. 30 m. Napadení porostů l. smrkovým je možné identifikovat na základě změny spektrální odrazivosti lesního porostu. Změna odrazivosti může být způsobená i jinými faktory. Pro korektní klasifikaci satelitních snímků a identifikaci ohnisek žíru l. smrkového je nutná znalost území a validace příčin poškození porostů. Zpracování satelitních záznamů by proto měl vykonávat kvalifikovaný personál. Výhodou satelitních záznamů je jejich pravidelné pořizování a nezatíženost subjektivními vlivy (MEDDENS et al. 2013).

Cenným zdrojem informací o ročním poškození lesů l. smrkovým jsou údaje o **nahodilých těžbách** z databáze lesní hospodářské evidence (LHE) jednotlivých vlastníků lesa. Na jejich základě lze odvodit informace o ročních objemech napadeného a vytěženého dříví na úrovni jednotlivých porostních skupin. Tyto údaje mohou sloužit ke zpřesnění a validaci polohy ohnisek žíru l. smrkového, které byly odvozeny ze satelitních snímků. Databáze lesních hospodářských plánů (LHP) a LHE nepatří mezi veřejně dostupné zdroje. Jejich zahrnutí do systému, využívání a zpracování je nutné dohodnout s vlastníky a uživateli lesů.

Údaje o nahodilých těžbách v LHE však nejsou všude na všech územích dostupné v požadované kvalitě a často jsou zatíženy různými chybami. Na některých územích údaje LHE nejsou dostupné vůbec. I přesto databáze LHP a LHE představují jeden z klíčových vstupních podkladů pro hodnocení dynamiky, výpočet rizika napadení a prognózy vzniku ohnisek žíru l. smrkového.

Údaje o **stanovištních podmínkách** jsou získávány z různých zdrojů a databází, mezi které patří digitální modely terénu (DTM), typologické mapy (skupiny lesních typů), mapy krajinného pokryvu apod. Základní vrstvou digitálních modelů terénu jsou nadmořské výšky. Údaje o nadmořských výškách jsou získávány vektově

rizací vrstevnic z analogových map, fotogrammetrickými metodami nebo leteckým laserovým skenováním. Nepravidelné vstupní bodové pole nadmořských výšek je vhodnými metodami interpolováno do pravidelného rastru se stejným rozlišením, jaké mají satelitní snímky a ostatní rastrové vrstvy v geografické databázi. Z rastru nadmořských výšek jsou poté odvozovány vrstvy sklonu a orientace reliéfu. Rastr nadmořských výšek je také základním vstupem pro výpočet potenciální solární radiace, modelování prostorového rozložení teploty vzduchu a teploty kůry stromů. Jinou alternativou je využití kvalitního DMR4G (byť zpoplatněného), příp. globálního DEM z družice Aster (velikost pixelu je 30 m).

Z databáze CORINE Land Cover (<http://www.eea.europa.eu/publications/COR0-landcover>) jsou importovány údaje o krajinném pokryvu do geografické databáze modelu. Vstupní data jsou zpracována podle požadavků modelu, prostorová data jsou konvertována do topologického formátu a následně procházejí validací topologie. Atributy prostorových objektů jsou ukládány do relační databáze s předepsanou strukturou.

3.2.1 Import meteorologických údajů

Riziko napadení lesních porostů l. smrkovým, vznik a rozšiřování ohnisek žíru silně ovlivňují lokální klimatické podmínky a aktuální meteorologická situace (JÖNSSON et al. 2007). Model TANABBO II proto využívá údaje z meteorologických stanic, které se nacházejí v zájmovém území. Soubory údajů obsahují záznamy o minimální, maximální a průměrné denní teplotě, denním úhrnu srážek a kumulativní denní solární radiaci. Meteorologické údaje jsou importovány z digitálních záznamů a ukládají se do samostatných souborů v geografické databázi systému. Využívány jsou především při odvození vrstev aktuální solární radiace, teploty vzduchu a kůry stromů, výpočtu rizika napadení lesních porostů l. smrkovým, výpočtu indexu sucha a kumulativního transpiračního deficitu.

3.2.2 Struktura databáze

Geografické údaje jsou uloženy v databázi systému GRASS GIS (<https://grass.osgeo.org/>). GRASS GIS standardně organizuje svá data do tzv. „location“ (chápán jako pracovní složka pro zpracovávané území, fyzicky má podobu adresáře na počítačovém disku), které je možné dělit na mapsety pro management přístupových práv k jednotlivým prostorovým vrstvám a jejich přehledné uložení. Atributy jednotlivých prostorových objektů je možné ukládat i mimo „location“ do relačních databází (např. PostgreSQL). Propojením dílčích databází je vytvořena kompletní

geodatabáze, která, i když je závislá na konkrétním software řešení GRASS GIS, je díky otevřenému formátu a zdrojovému kódu využitelná i v jiných aplikacích.

Geografická databáze je uspořádána do struktury vyžadované jádrovými moduly. V prostředí systému GRASS GIS je možné využít hned několik software databázových řešení pro ukládání atributových dat. V současné verzi GRASS GIS je možné pro jednu vektorovou vrstvu uložit v databázi libovolný počet atributových tabulek (tzv. layers), které jsou s prostorovými objekty propojeny pomocí jedinečných identifikátorů ploch (primárních klíčů). Předchází se tak duplicitě ukládání prostorových vrstev a zjednodušuje se administrace databáze. Pro práci jen s atributovými daty, kdy uživatel nevyžaduje prostorovou informaci, lze využít libovolný nástroj pro správu databází (např. SQLite Studio apod.) nebo postavit nad databází samostatnou uživatelskou aplikaci. Prostorová data jsou spravována pomocí GRASS GIS modulů, které lze rovněž využít pro tvorbu uživatelských aplikací.

Aby bylo možné moduly spouštět automatizovaně, a tím automaticky vytvářet modely pro různá území a časová období, je potřebné, aby údaje byly ukládány do **geografické databáze se standardní strukturou**. Vrstvy jsou rozděleny do tematických skupin, které jsou ukládány do mapsetu systému GRASS. Používají standardní názvy vrstev, což urychluje zadávání vstupních parametrů při spouštění modulů.

Základní jednotkou pro prostorové modelování je pixel o velikosti 30 x 30 m. Je to základní velikost dat systému LANDSAT, které jsou klíčové pro program TANABBO II. Podrobnější prostorové rozlišení by bylo možné použít v případě využití komerčních satelitních scén (SPOT nebo jiné).

Hlavní skupiny tematických vrstev programu TANABBO II:

- DEM: digitální model reliéfu
 - dem: nadmořské výšky (v metrech)
 - slope: sklon (ve stupních)
 - aspect: orientace (ve stupních)
- FOREST: údaje o lesních porostech
 - bb_spotid_<yyyy>: identifikátor skupiny buněk nového ohniska žíru <yyyy>
 - bb_edst_<yyyy>: vzdálenosti rozšiřování ohnisek žíru <yyyy>
 - bb_eid_<yyyy>: identifikátor rozšiřování zdrojového ohniska žíru <yyyy>
 - bb_fdst_<yyyy>: vzdálenosti vzniku nových ohnisek žíru (přeletu) <yyyy>
 - bb_fid_<yyyy>: identifikátor přeletu ze zdrojového ohniska žíru <yyyy>
 - wndth_<yyyy>: plochy větrné kalamity v roce <yyyy>

- LANDSAT: údaje ze satelitů LANDSAT, vegetační indexy
 - snímky LANDSAT a odvozené vegetační indexy
 - <yyyy><mm><dd>_tm<i>: snímek Landsat TM, pásmo i, <yyyy> rok, <mm> měsíc, <dd> den
 - ndvi_<yyyy>: NDVI index pro rok <yyyy>
 - nsc2_<yyyy>: NSC2 index pro rok <yyyy>

SHP: vektorové údaje

- meteo_station: poloha meteorologických stanic
- bbtrap: poloha lapačů, každý lapač musí mít atribut <cat> typu integer a atribut <val> typu double
- další vektorové soubory importované ze shape-souborů (hranice lesních porostů, řeky, cesty, sídla)
- TOPO: údaje polohopisu území
 - topografické údaje potřebné pro vytvoření výstupních mapových kompozic v rastrové formě

Výsledky simulace meteorologických údajů, pravděpodobnost vzniku ohnisek žíru I. smrkového, prognóza vzniku ohnisek žíru a další výstupy výpočetních modulů systému jsou ukládány do samostatných skupin souborů. Výsledkem některých výpočtů, jako například potenciální solární radiace, jsou časové řady rastrových vrstev. Skupiny tak mohou obsahovat několik stovek rastrových vrstev, které se odlišují číslem dne, měsíce nebo roku.

Skupiny výstupních vrstev modelu TANABBO II:

- SOLAR: potenciální solární radiace a aktuální solární radiace po korekcích na základě údajů z meteorologické stanice, vypočítaná po jednotlivých dnech nástroji GRASS GIS
 - psr_d<xxx>: kumulativní potenciální solární radiace za den <xxx> (1-365)
 - psr_m<xx>: kumulativní potenciální solární radiace za měsíc <xx> (1-12)
 - psr_y: kumulativní potenciální solární radiace za rok
 - sr_d<xxx>: kumulativní aktuální solární radiace za den <xxx> (1-365)
 - sr_m<xx>: kumulativní aktuální solární radiace za měsíc <xx> (1-12)
 - sr_y: kumulativní aktuální solární radiace za rok

- TEMPERATURE_AIR: model teploty vzduchu pro model PHENIPS
 - at_max_d<xxx>: maximální teplota vzduchu pro den <xxx>
 - at_mean_d<xxx>: průměrná teplota vzduchu pro den <xxx>
- TEMPERATURE_BARK: model teploty kůry stromů pro model PHENIPS
 - bt_max_d<xxx>: maximální teplota kůry pro den <xxx>
 - bt_mean_d<xxx>: průměrná teplota kůry pro den <xxx>
 - bt_eff_d<xxx>: efektivní teplota kůry pro den <xxx>
- HYDRO: údaje o srážkách, index sucha, riziko vláhového deficitu
 - cdef_d<xxx>: kumulativní deficit pro den <xxx>
 - def_d<xxx>: deficit pro den <xxx>
 - di_d<xxx>: index sucha pro den <xxx>
 - pda: vstupní rastr hodnot point of decreased availability
 - pwp: vstupní rastr hodnot permanent wilting point
 - swc: vstupní rastr hodnot soil water content

Operační část systému TANABBO II pracuje s údaji zaznamenanými meteorologickými stanicemi. Tyto se ukládají do souborů v adresáři _DATA. Údaje se ukládají do textových souborů s předdefinovanou strukturou a názvy:

- Satelitní snímky
 - landsat_list.txt: záznam snímků Landsat
 - year_list.txt: záznam roků
- Interpolace teploty vzduchu
 - tgrad_std.txt: standardní teplotní gradient, každý řádek má tvar <číslo dne> <hodnota>
 - tmax.txt: maximální denní teploty vzduchu
 - tmean.txt: průměrné denní teploty vzduchu
- Meteorologické údaje
 - md_ms.txt: záznam meteorologických stanic, záznam má tvar <mid> <x> <y> <elev> <slope> <aspect>
 - md_tmin_<mid>.txt: minimální denní teplota (°C) na meteorologické stanici číslo <mid>, řádek má tvar <číslo dne> <hodnota>

- `md_tmax_<mid>.txt`: maximální denní teplota (°C) na meteorologické stanici číslo <mid>, řádek má tvar <číslo dne> <hodnota>
- `md_tmean_<mid>.txt`: průměrná denní teplota (°C) na meteorologické stanici číslo <mid>, řádek má tvar <číslo dne> <hodnota>
- `md_proc_<mid>.txt`: úhrn denních srážek (mm/m²) na meteorologické stanici číslo <mid>, řádek má tvar <číslo dne> <hodnota>
- `md_gsr_<mid>.txt`: globální solární radiace (MW/m²) na meteorologické stanici číslo <mid>, řádek má tvar <číslo dne> <hodnota>

Do podadresáře PROGNOSSES jsou ukládány konfigurační soubory pro výpočet prognóz rizika napadení lesních porostů l. smrkovým, vzniku a rozšiřování ohnisek žíru l. smrkového, ukládání log-souborů.

Při práci s moduly se v databázi systému vytvářejí pomocné tematické vrstvy. Před spuštěním výpočtů je vhodné nejdříve spustit moduly pro vyčištění databáze (*bbo.spot_dynamics_clean*, *bbo.phenips_clean*, *bbo.drought_clean*). Tento krok je důležitý hlavně v případech, kdy s moduly experimentujeme a v databázi zůstaly výsledky předcházejících výpočtů.

3.2.3 Import záznamů o ohniscích žíru l. smrkového

Program obsahuje několik modulů pro import a úpravu údajů. Pro automatizovaný výpočet indexů mortality stromů (IMS), rizika napadení lesních porostů l. smrkovým je nutné naimportovat a klasifikovat vrstvy ohnisek žíru l. smrkového. Modul *bbo.ie_bbspot* naimportuje údaje o ohniscích žíru do vrstev používaných systémem. Vstupní vrstvy jsou uloženy v mapsetu *PERMANENT*. Jejich název se skládá z prefixu „ohniska_“, za který je připojeno číslo roku. Vstupní vrstvy obsahují jen hodnoty 0 (nepoškozený les) a 1 (ohnisko žíru l. smrkového).

Modul načítá tyto vrstvy pro zadané roky a uloží je do mapsetu *FOREST*. Jsou uloženy pod názvem, který se skládá z prefixu „bb_spot_“ a čísla roku. Vrstvy obsahují hodnotu 1 jen tam, kde se vyskytují ohniska žíru l. smrkového. Ohniska žíru jsou načítána *kumulativně*, tzn., že stará ohniska jsou zachována ve všech následujících vrstvách.

Po importu údajů ze satelitních snímků je nutné provést seskupení a klasifikaci buněk ohnisek žíru l. smrkového moduly ze skupiny *Dynamika výskytu ohnisek (Spot Dynamics)*.

3.2.4 Výpočet vegetačních indexů

Vegetační indexy jsou vypočítány ze záznamů satelitů LANDSAT. Používají se jako vstupy pro procedury výpočtu rizika napadení lesních porostů l. smrkovým. Tyto procedury počítají pravděpodobnost napadení lesních porostů a prognózu vzniku ohnisek žíru l. smrkového podle roků. Proto jsou i vegetační indexy počítány jako časové řady vrstev rastrů.

Program TANABBO II umožňuje výpočet časových řad indexů NDVI (*bbo.ndvi*), VCI (*bbo.vci*) a NSC2 (*bbo.nsc2*) (HART, VEBLEN 2015; HAVAŠOVÁ et al. 2015; OCHTYRA et al. 2016). Uživatel zadá rozsah let, pro která se budou vegetační indexy počítat. Modul prohledá mapset LANDSAT. Pokud jsou pro daný rok k dispozici potřebné kanály ze satelitu LANDSAT, vypočítá příslušný index a výsledek uloží do mapsetu LANDSAT.

3.3 Prognostická část

Prognostická část systému je založená na konceptu dvou souvisejících procesů: vznik nových a rozšiřování existujících ohnisek žíru l. smrkového (COULSON et al. 1985; JAKUŠ et al. 2005; MEZEI et al. 2014a, b).

3.3.1 Dynamika výskytu ohnisek žíru l. smrkového

Moduly pro výpočet dynamiky poškození porostů l. smrkovým byly navrženy tak, aby bylo možné jejich výstupy použít pro validaci. Výpočet je rozdělen do více modulů, které klasifikují ohniska žíru l. smrkového, počítají vzdálenosti a vytvářejí výstupní sestavy. Protože je výpočet časově náročný, systém umožňuje postupný výpočet pro roky v zadaném rozsahu.

Dynamika výskytu ohnisek žíru l. smrkového je charakterizována parametry, které jsou odvozeny z časových řad poškození. Odvozené parametry mohou být použity jako vstupy do procedur odhadu rizika napadení lesních porostů l. smrkovým:

- Klasifikace ohnisek žíru l. smrkového podle vzniku (stará ohniska, ohniska vzniklá rozšířením starých, nová ohniska vzniklá přeletem).
- Vzdálenosti přeletu (modul *bbo.spot_dynamics_fdst*), vypočítá vzdálenosti přeletu od starých ohnisek žíru l. smrkového v předcházejícím roce k novým ohniskům v aktuálním roce.

- Vzdálenosti rozšiřování ohnisek žíru I. smrkového (modul *bbo.spot_dynamics_edst*), vypočítá vzdálenosti rozšiřování ohnisek z předcházejícího roku.
- Vzdálenosti ke starým ohniskům žíru I. smrkového (modul *bbo.spot_dynamics_odst*).
- Vzdálenosti k novým ohniskům žíru I. smrkového (modul *bbo.spot_dynamics_ndst*).
- Vzdálenosti ke všem ohniskům žíru I. smrkového (modul *bbo.spot_dynamics_adst*).
- Vzdálenosti k okrajům lesa (modul *bbo.spot_dynamics_ndst*).
- Sumář časové řady ohnisek žíru I. smrkového za zadané období (modul *bbo.spot_sersum*).
- Vývoj IMS (modul *bbo.spot_mi*). Modul analyzuje časové řady výskytu ohnisek žíru I. smrkového, které vznikly klasifikací podle způsobu jejich vzniku.
- Časová řada výměry ohnisek žíru I. smrkového (modul *bbo.spot_narea*).

Ohniska žíru I. smrkového, uložená v tematických vrstvách *bb_spot_yyyy*, jsou klasifikována podle způsobu jejich vzniku (Obr. 2):

1. stará ohniska;
2. ohniska vzniklá rozšířením starých;
3. nová ohniska vzniklá přeletem I. smrkového.

V prvním kroku je vždy nutné provést klasifikaci ohnisek žíru I. smrkového modulem *bbo.spot_dynamics_class*. Bez správné a úplné klasifikace ohnisek žíru nedoudu další výpočty správné.

Modul (*bbo.spot_dynamics_class*) postupně vyhledává tematické vrstvy ohnisek žíru I. smrkového pro roky v zadaném intervalu. Pokud algoritmus nalezne vrstvu ohnisek pro daný rok, každému ohnisku přiřadí jedinečný identifikátor a provede klasifikaci buněk ohnisek. V první vrstvě ohnisek časové řady nastaví pro všechna ohniska kód 3 (přelet).

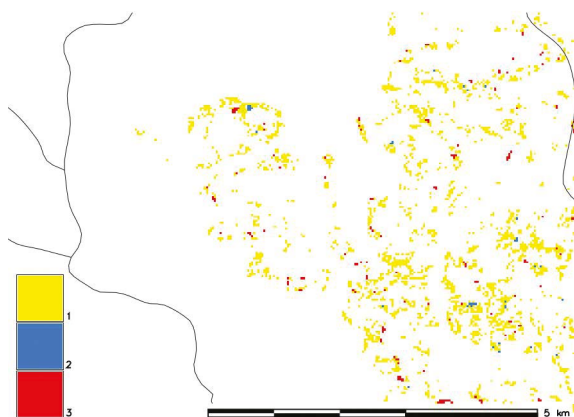
Výpočet je nutné spustit pro celou posloupnost tematických vrstev. První a poslední rok se zadávají tak, aby rozsah zadaných roků pokrýval celou posloupnost. Algoritmus automaticky nalezne první existující vrstvu ohnisek žíru I. smrkového a výpočet pokračuje pro všechny další vrstvy.

Po klasifikaci ohnisek žíru I. smrkového podle způsobu vzniku je možné spustit ostatní moduly pro odvození parametrů dynamiky poškozování porostů náletem I. smrkového.

Vzdálenosti k okrajům lesa jsou počítány z upravených vrstev pro zadané roky. Vstupem pro výpočet je maska lesa se zastoupením smrku více než 50 % a starším než 50 let (*s50mask*) a vrstvy poškození porostů náletem l. smrkového (*bb_spot_YYYY*). Modul *bbo.spot_dynamics_ndst* pro každý rok vypočítá aktuální rozlohu smrkového lesa a následně vypočítá vzdálenosti k okrajům lesa.

Při výpočtu sumářů ohnisek žíru l. smrkového modul postupně prochází časovou posloupnost rastrů *bb_spot_<YYYY>*. Pokud v daném roce došlo ke vzniku nebo rozšíření ohniska, je uložen do příslušných buněk konkrétní letopočet. Výstupní rastr obsahuje roky, ve kterých došlo ke vzniku ohniska žíru l. smrkového v dané lokalitě.

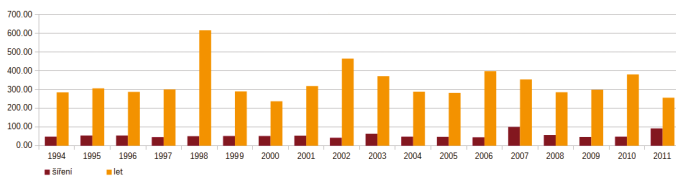
Sumární údaje o vzdálenostech rozšiřování ohnisek žíru l. smrkového a vzdálenostech přeletu lze exportovat do textové tabulky pro každý rok ze zadaného časového intervalu. Výslednou tabulku hodnot lze jednoduše přenést do tabulkového procesoru (MS Excel), databázového nebo statistického programu pro další zpracování (Obr. 3 a 4).



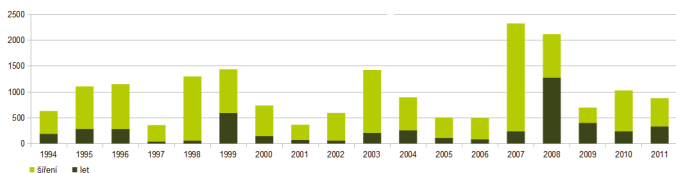
Obr. 2: Klasifikace ohnisek žíru l. smrkového na území Vojenských lesů a statků ČR, s.p., divize Horní Planá v letech 1994–2011 (příkladová studie, rozloha lesů 16 569 ha) (Jakuš et al. in prep.)

Při výpočtu vývoje IMS modulem *bbo.spot_mi* se pro každou vrstvu *bb_spot_<yyyy>* z mapsetu *FOREST* vypočítá IMS jako poměr výměry buněk ohnisek žíru l. smrkového v aktuálním a v předcházejícím roce. Modul poté analyzuje odvozenou časovou řadu IMS a hledá jeho lokální minima a lokální maxima. Na základě těchto extrémních hodnot časové řady odvodí očekávanou délku populačního cyklu l. smrkového.

V závěrečné fázi modul podle zjištěných parametrů populačního cyklu l. smrkového provede odhad IMS pro následující rok časové řady. Nejdříve odvodí, na který rok populačního cyklu l. smrkového bude připadat následující rok časové řady. Podle hodnot příslušného roku populačního cyklu v předcházejících obdobích vypočítá realistickou (průměr), optimistickou (průměr mínus směrodatná odchylka) a pesimistickou (průměr plus směrodatná odchylka) hodnotu IMS.



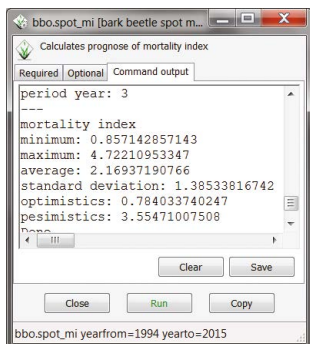
Obr. 3: Průměrné vzdálenosti přeletu a rozšiřování ohnisek žíru lýkožrouta smrkového na území Vojenských lesů a statků ČR, s.p., divize Horní Planá v letech 1994–2011 (příkladová studie, rozloha lesů 16 569 ha) (Jakuš et al. in prep.)



Obr. 4: Počet buněk přeletu a rozšiřování lýkožrouta smrkového na území Vojenských lesů a statků ČR, s.p., divize Horní Planá v letech 1994–2011 (příkladová studie, rozloha lesů 16 569 ha) (Jakuš et al. in prep.)

Výstup modulu obsahuje:

- Tabulku IMS: hodnota IMS v příslušném roce, logická hodnota, která udává, zda nastalo lokální minimum IMS, délka populačního cyklu pro minimální hodnoty IMS, logická hodnota, která udává, zdali nastalo lokální maximum IMS, délka populačního cyklu pro maximální hodnoty IMS.
- Následující rok časové řady (t.j. rok, pro který je prováděna prognóza), rok začátku posledního populačního cyklu, odhadovaná délka populačního cyklu, aktuální rok populačního cyklu, pro který se prognózuje.
- Údaje o IMS pro daný rok populačního cyklu: minimální a maximální hodnota v předcházejících cyklech, aritmetický průměr a směrodatná odchylka IMS, optimistický a pesimistický odhad hodnoty IMS.
- Výstupní tabulky je možné přenést do tabulkového procesoru nebo statistického programu pro potřeby podrobnější analýzy (Obr. 5 a 6).



```

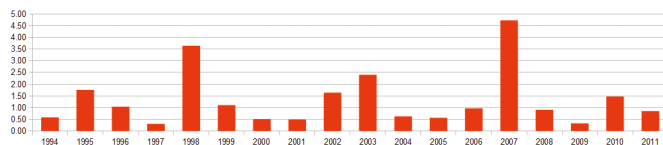
2010 0.328618576143 True 4 False 0
2011 1.47632711621 False 0 True 3
2012 0.857142857143 False 0 False 0
2013 0.604308390023 True 3 False 0
2014 0.928705440901 False 0 False 0
2015 2.13333333333 False 0 True 4
***
prognosis year: 2015
period beginning: 2012
period length: 4
period year: 3
---
mortality index
minimum: 0.857142857143
maximum: 4.72210953347
average: 2.16937190766
standard deviation: 1.38533816742
optimistics: 0.784033740247
pesimistics: 3.55471007508

```

Obr. 5: Výstup modulu pro prognózu indexu mortality smrku

Modul *bbo.spot_narea* slouží pro výpočet a analýzu vývoje rozlohy ohnisek žíru I. smrkového v zadaném období. Vstupem pro modul jsou vrstvy ohnisek klasifikované podle způsobu jejich vzniku. Ve výstupní tabulce je uveden:

- rok,
- výměra ohnisek žíru v hektarech,
- logická hodnota, označující lokální minimum časové řady rozlohy ohnisek žíru,
- odhadovaná délka periody cyklu z lokálního minima,
- logická hodnota, označující lokální maximum časové řady rozlohy ohnisek žíru,
- odhadovaná délka periody cyklu z lokálního maxima.



Obr. 6: Vývoj indexu mortality smrku na modelovém území Vojenských lesů a statků ČR, s.p., divize Horní Planá v letech 1994–2011 (příkladová studie, rozloha lesů 16 569 ha) (Jakuš et al. in prep.)

Za tabulkou rozlohy ohnisek časové řady následuje odhad rozlohy ohnisek žíru I. smrkového pro první rok následující za časovou řadou: následující rok, rok začátku cyklu, délka cyklu, pořadové číslo následujícího roku cyklu.

V poslední tabulce jsou uvedeny popisné statistické ukazatele rozlohy ohnisek žíru I. smrkového, odhadované pro následující rok cyklu: minimální rozloha, maximální rozloha, průměrná rozloha, směrodatná odchylka rozloh, optimistický a pesimistický odhad rozloh ohnisek žíru v následujícím roce.

3.3.2 Prognózy a validace ohnisek žíru l. smrkového

Původní moduly prognózování vzniku ohnisek žíru l. smrkového v programu TANABBO počítaly pravděpodobnost rozšiřování starých ohnisek a pravděpodobnost vzniku nových ohnisek přeletem z tematických vrstev podle původních prací autorů (JAKUŠ et al. 2003; JAKUŠ et al. 2005; KISSIYAR et al. 2005).

Kvůli rozšíření možností tvorby modelů a testování jejich validity byly procedury inovovány. Výpočet modulů je řízen prostřednictvím konfiguračního souboru. Vstupní a výstupní parametry pro moduly nejsou zadávány ručně, ale jsou zapsány v konfiguračním souboru. Každý konfigurační soubor obsahuje pravidla pro výpočet jednoho scénáře vývoje l. smrkového v zájmovém území. Počet konfiguračních souborů není omezen. Takto je možné připravovat a vzájemně porovnávat různé prognózy vývoje ohnisek žíru l. smrkového.

Výpočet pravděpodobnosti rozšiřování ohnisek žíru l. smrkového, vzniku nových ohnisek přeletem, pravděpodobnosti napadení lesních porostů l. smrkovým, prognóza vzniku ohnisek se navíc provádí pro zadanou časovou posloupnost. To umožňuje vypočítat a testovat různé druhy modelů šíření l. smrkového. Výsledky výpočtů jsou zapisovány do určeného mapsetu, který je zadáván pro každý model. Odvozené parametry modelů jsou zapisovány do textových souborů.

Konfigurační soubory prognóz jsou uloženy v adresáři `_data/prognoses`. Konfigurační soubor je textovým souborem, který obsahuje parametry pro výpočet prognóz. Prostřednictvím konfiguračních souborů může uživatel vytvořit a testovat více modelů šíření l. smrkového.

Konfigurační soubor je rozdělen do několika sekcí, které obsahují vstupní parametry pro spuštění jednotlivých modulů. Pokud je první znak řádku „#“, celý řádek je považován za komentář. Soubor může obsahovat komentáře i prázdné řádky. Parametry musí být zapsány v uvedeném pořadí.

Na výpočet prognóz se mohou používat statické i dynamické tematické vrstvy. Dynamické tematické vrstvy jsou zapsány jako posloupnost vrstev, které obsahují rok. Do názvu tematické vrstvy časové posloupnosti se doplňuje znak „%Y“, který je v průběhu výpočtů nahrazen příslušným rokem.

Konfigurační soubor obsahuje:

- název výstupního mapsetu,
- rozsah let pro výpočet (od, do)
 - prefix pro výstupní soubory. Názvy výstupních souborů se vytvoří tak, že k prefixu scénáře se připojí název výstupního souboru:
 - `_pinit_%Y`: pravděpodobnost vzniku nového ohniska žíru l. smrkového,

- `_log_init`: log-soubor pro výpočet pravděpodobnosti vzniku nového ohniska žíru l. smrkového,
- `_psproad_%Y`: pravděpodobnost rozšíření starého ohniska žíru l. smrkového,
- `_log_sproad`: log-soubor pro výpočet pravděpodobnosti rozšíření starého ohniska žíru l. smrkového,
- `_pattack_%Y`: pravděpodobnost napadení lesního porostu l. smrkovým,
- prognóza vzniku ohnisek žíru l. smrkového (ohniska `_spot_%Y`, identifikátory ohnisek `_spotid_%Y`, vzdálenosti rozšíření ohnisek `_edst_%Y`, identifikátory ohnisek vzniklých rozšířením starých `_eid_%Y`, vzdálenosti přeletu `_fdst_%Y`, identifikátory ohnisek vzniklých přeletem `_fid_%Y`),
- pesimistická prognóza vzniku ohnisek žíru l. smrkového (ohniska `_pspot_%Y`, identifikátory ohnisek `_pspotid_%Y`, vzdálenosti rozšíření ohnisek `_pedst_%Y`, identifikátory ohnisek vzniklých rozšířením starých `_peid_%Y`, vzdálenosti přeletu `_pfdst_%Y`, identifikátory ohnisek vzniklých přeletem `_pfid_%Y`),
- optimistická prognóza vzniku ohnisek žíru l. smrkového (ohniska `_ospot_%Y`, identifikátory ohnisek `_ospotid_%Y`, vzdálenosti rozšíření ohnisek `_oedst_%Y`, identifikátory ohnisek vzniklých rozšířením starých `_oeid_%Y`, vzdálenosti přeletu `_ofdst_%Y`, identifikátory ohnisek vzniklých přeletem `_ofid_%Y`),
- parametry procedury pro výpočet pravděpodobnosti vzniku nových ohnisek žíru l. smrkového:
 - číslo metody pro výpočet pravděpodobnosti vzniku nových ohnisek,
 - počet vstupních vrstev,
 - seznam vstupních vrstev, každá je zapsaná na samostatném řádku,
 - počet vzorků pro výpočet (0: maximální počet),
 - parametry procedury pro výpočet pravděpodobnosti rozšiřování starých ohnisek žíru l. smrkového:
 - číslo metody pro výpočet pravděpodobnosti rozšiřování ohnisek,
 - počet vstupních vrstev,
 - seznam vstupních vrstev, každá je zapsaná na samostatném řádku,
- parametry procedury pro výpočet pravděpodobnosti vzniku ohnisek žíru l. smrkového:
 - prefix výstupních vrstev,

- parametry procedury prognózy vzniku ohnisek žíru l. smrkového:
 - číslo metody pro prognózu vzniku ohnisek (1: podle pravděpodobnosti napadení, 2: náhodně do zadané vzdálenosti, 3: náhodné rozšiřování, 4: pravděpodobnost napadení do zadané vzdálenosti),
 - maximální vzdálenost výpočtu ohnisek (metody č. 2, 4).

3.3.3 Riziko vzniku a rozšiřování ohnisek žíru l. smrkového

Do programu TANABBO II byly implementovány dvě metody pro výpočet pravděpodobnosti napadení lesních porostů l. smrkovým: lineární regrese metodou nejmenších čtverců a lineární regrese s rezistencí. Metoda lineární regrese s rezistencí byla navržena v původní metodice (JAKUŠ et al. 2005). Metody byly implementovány takovým způsobem, aby se daly použít v modulu pro výpočet pravděpodobnosti vzniku nových ohnisek žíru l. smrkového (*bbo.spot_init*), jakož i v modulu pro výpočet pravděpodobnosti rozšiřování ohnisek (*bbo.spot_sproad*).

Hlavní rozdíl ve výpočtu spočívá ve výběru buněk pro odvození parametrů regresních vztahů. Výpočet pravděpodobnosti vzniku nových ohnisek žíru l. smrkového odvozuje parametry rovnic jen pro buňky vstupních rastrů, které odpovídají novým ohniskům. Obdobně je počítána pravděpodobnost rozšiřování ohnisek žíru jen na základě vstupních hodnot, které odpovídají buňkám v lokalitách postižených rozšiřováním ohnisek v minulém období.

Výpočet rizika vzniku a rozšiřování ohnisek žíru l. smrkového musí být kalibrován pro území, ve kterém je používán. Parametry může uživatel vybrat z připravených modelů vytvořených na základě testování na modelových územích, nebo může vytvořit a otestovat své vlastní modely. Nástroje programu TANABBO II dovolují opakovaná testování modelů, jejich kalibraci a optimální parametrizaci podle skutečné situace v zájmovém území.

3.3.3.1 Metoda lineární regrese

Pravděpodobnost napadení lesních porostů l. smrkovým je počítána vícenásobnou lineární regresí. Nezávisle proměnné jsou volitelné, může jimi být například věk porostů, zásoba na hektar, zakmenění, vzdálenost k okrajům lesa, vegetační index NSC2, potenciální roční solární radiace. Závislou proměnnou je výskyt ohnisek žíru l. smrkového, která vznikla přeletem nebo rozšířením starých ohnisek.

Vícenásobná lineární regrese (MLR) je počítána v bodech náhodně vygenerovaných vzorků. Počet vzorků je odvozený podle aktuálního počtu buněk nových ohnisek, nebo je vygenerován počet vzorků zadaných uživatelem. Pro ohniska žíru l. smrkového z posledního roku je vygenerován stejný počet vzorků jako pro oblasti lesa, které nebyly napadeny v předchozích letech. Pro vzorky z ohnisek žíru l. smrkového je pro funkci pravděpodobnosti vzniku ohnisek předepsána hodnota 1, pro vzorky z lesa nenapadeného l. smrkovým hodnota 0.

Vzhledem k tomu, že rozloha lesa nenapadeného l. smrkovým není obvykle stejná jako rozloha ohnisek žíru z posledního roku, nedají se tyto oblasti použít pro odvození koeficientů MLR. Pokud by některá z nich byla podstatně větší než ta druhá, pak by pravděpodobnostní funkce odvozená MLR byla konstantní. Proto se na její odvození používají hodnoty odvozené z náhodně vygenerovaných vzorků. Maximální počet vzorků je zadán uživatelem, nebo je automaticky odvozen ze vstupních vrstev.

Vstupní rastry nezávislých proměnných obsahují hodnoty různých velikostí. Například hodnoty sumární roční solární radiace jsou mnohonásobně větší než údaje o zakmenění nebo věku porostů. Při odvození koeficientů MLR to způsobí, že koeficient odpovídající vrstvě s velmi vysokými hodnotami je nulový. Z uvedeného důvodu se pro lineární regresi nepoužívají absolutní, ale relativní hodnoty nezávislých proměnných. Před výpočtem MLR se rozsah všech vstupních rastrů propočítá na hodnoty od 0 do 1.

Z údajů odpovídajících náhodně vygenerovaným vzorkům jsou vypočítány koeficienty MLR. Ty jsou použity pro výpočet vrstvy pravděpodobnosti vzniku ohnisek žíru l. smrkového. Funkce MLR nezaručují, že vypočítané hodnoty budou z rozsahu od 0 do 1. Výsledný rastr obsahuje záporné hodnoty i hodnoty větší než 1. Hodnoty jsou proto propočítány na rozsah od 0 do 1.

3.3.3.2 Metoda potenciální rezistence

Metoda byla navržena v původní metodice podle JAKUŠ et al. (2005) pro výpočet pravděpodobnosti rozšiřování starých ohnisek žíru l. smrkového. Implementace byla vytvořena tak, aby bylo možné metodu použít i pro výpočet pravděpodobnosti vzniku nových ohnisek přeletem l. smrkového na novou lokalitu. MLR je vypočítán potenciál šíření l. smrkového, který vyjadřuje závislost velikosti ohniska žíru na lokálních podmínkách. Ohniska žíru l. smrkového jsou seskupena do prostorově souvislých skupin. Skupinu tvoří všechny buňky rastru, které spolu souvisí. Skupiny jsou očíslovány jednoznačnými identifikátory a pro každou skupinu je vypočítána její rozloha.

Nezávisle proměnné lze volit, například zásobu na hektar, sklon reliéfu, vegetační index NDVI, potenciální solární radiaci. Před výpočtem koeficientů vícenásobné lineární regrese je rozsah vstupních rastrů vrstev propočítán v rozsahu od 0 do 1. Při odvození parametrů MLR nejsou ohniska žíru l. smrkového vzorkována. Jsou používány hodnoty všech buněk, které odpovídají ohniskům. Odvozené koeficienty jsou používány pro výpočet potenciálu šíření l. smrkového pro celé území pokryté smrkovými porosty.

Odvozený potenciál šíření l. smrkového je propočítán pro rozsah hodnot od 0 do 1. Jeho obrácená hodnota vyjadřuje potenciální rezistenci smrkových porostů vůči šíření l. smrkového.

Potenciální rezistence lesního porostu vůči šíření l. smrkového slouží jako nákladový povrch pro analýzu oceněných vzdáleností. Potenciální rezistence je použita pro výpočet kumulativních nákladů ve směru od ohnisek žíru l. smrkového. Obrácená hodnota kumulativních nákladů šíření l. smrkového je propočítána na rozsah hodnot od 0 do 1. Vyjadřuje riziko napadení smrkových porostů l. smrkovým.

3.3.3.3 Pravděpodobnost napadení

Výsledné celkové riziko napadení smrkových porostů l. smrkovým je vypočítáno jako maximum pravděpodobnosti rozšiřování ohnisek žíru a pravděpodobnosti vzniku nových ohnisek (modul *bbo.spot_attack*):

pravděpodobnost napadení = Max (pravděpodobnost rozšíření, pravděpodobnost přeletu)

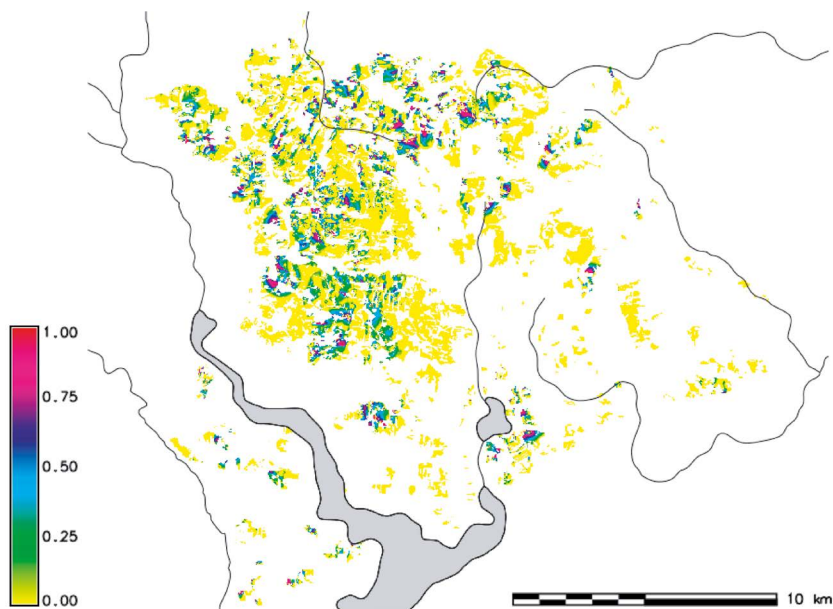
Pravděpodobnost napadení stromů l. smrkovým je vypočítána pro všechny buňky odpovídající smrkovým lesním porostům. Na místech už napadených nebo zničených l. smrkovým se nastaví na hodnotu 0 (Obr. 7).

3.3.3.4 Pravděpodobnost napadení porostů po větrné kalamitě

Po výskytu větrné kalamity se pravděpodobnost napadení porostů modifikuje tak, že v první řadě jsou napadeny kalamitní plochy (*bbo.spot_attack_afterwnd*). Dosaženo je to tím, že kalamitním plochám je přiřazena nejvyšší pravděpodobnost.

Vstupem do modulu je vrstva všech zaznamenaných ohnisek žíru l. smrkového, maska smrkového lesa, pravděpodobnost napadení lesních porostů l. smrkovým vypočítaná v předcházejícím kroku (*bbo.spot_attack*) a vrstva aktuálních ploch větrné kalamity.

Modul slouží pro modelování šíření l. smrkového na polomech. Modelování vychází z práce ERIKSSON et al. (2005). Modely jsou parametrizovány a korigovány hlavně na základě údajů o populaci l. smrkového po větrných kalamitách, které proběhly na území střední Evropy i v jiných regionech.



Obr. 7: Pravděpodobnost napadení smrkových porostů lýkožroutem smrkovým

3.3.4 Prognóza poškození porostů l. smrkovým

Program TANABBO II umožňuje vypočítat prognózy zpětně pro účely validace modelů nebo vypočítat prognózu pro roky následující po časové řadě (*bbo.prog_next_year*). Výstupem je rastrová vrstva, která obsahuje předpokládané poškození porostů l. smrkovým.

Modul *bbo.prog_next_year* počítá **realistickou (neutrální, nezměněnou), pesimistickou a optimistickou prognózu** vzniku ohnisek žíru l. smrkového pro následující rok. Výpočet je proveden podle parametrů uložených v konfiguračním

souboru prognóz daného modelu. Prognóza vzniku nových ohnisek žíru je provedena na základě odvozených pravděpodobností napadení porostů l. smrkovým a mortality stromů. Prognóza je vypočítána pro první rok následující po časové řadě ohnisek žíru.

Důležitým vstupním parametrem procedury pro prognózu vzniku ohnisek žíru l. smrkového je IMS. IMS je vypočítán z časové řady ohnisek žíru. Analýzou časové řady program odvodí začátek a délku cyklu vývoje l. smrkového. Provede odhad roku cyklu pro rok prognózy a IMS (kapitola 3.3.1. „Dynamika výskytu ohnisek žíru l. smrkového“). Pro realistický trend vypočítá IMS jako avg IMS pro daný rok cyklu. Pesimistický odhad vypočítá hodnotu IMS jako $\text{avg} + \text{std}$. Optimistický odhad vypočítá hodnotu IMS jako $\text{avg} - \text{std}$.

Procedura dále vypočítá **realistický, optimistický a pesimistický** odhad rozšíření ohnisek žíru l. smrkového pro následující rok. Rozloha ohnisek žíru v následujícím roce je vypočítána jako součin aktuální rozlohy ohnisek žíru a zadané mortality stromů. Pokud je mortalita stromů 0.5, pak rozloha nových ohnisek žíru bude polovina z rozlohy aktuálních ohnisek.

Modul (*bbo.vld_spot*) vypočítá zpětnou prognózu vzniku ohnisek žíru l. smrkového pro zadaný model a rozsah let časové posloupnosti. Zpětná prognóza poškozování porostů l. smrkovým je provedena na základě odvození pravděpodobnosti napadení lesních porostů l. smrkovým. Očekávaná rozloha porostů poškozených l. smrkovým v roce zpětné prognózy je odvozena z časové řady. Modul poté vypočítá prognózu poškození porostů metodou uvedenou v konfiguračním souboru tak, aby rozloha odvozených ohnisek žíru odpovídala skutečné rozloze poškození.

Místa náletu l. smrkového ve smrkových porostech můžeme odhadnout více způsoby:

- metoda největší pravděpodobnosti,
- náhodné generování ohnisek žíru,
- metoda růstu ohnisek žíru,
- metoda největší pravděpodobnosti s omezením vzdálenosti.

Základní metoda vychází z pravděpodobnosti náletu l. smrkového na lesní porosty a odhadu IMS. Pravděpodobnost náletu je vypočítána některou z metod popsanych v kapitole 3.3.3 Riziko vzniku a rozšiřování ohnisek žíru l. smrkového. Z vrstvy pravděpodobnosti napadení porostů jsou vybrány buňky s nejvyšší pravděpodobností tak, aby jejich sumární rozloha odpovídala vypočítané rozloze nových ohnisek žíru. Protože pravděpodobnost napadení smrkových porostů v oblasti ohnisek žíru byla nastavená na hodnotu 0, nová ohniska se nebudou překrývat s původními.

Pro potřeby validace modelů šíření l. smrkového byla implementována metoda náhodného generování buněk, které reprezentují ohniska žíru l. smrkového. Vstupem do procedury je maska smrkového lesa, vrstva starého poškození a ohnisek žíru l. smrkového. Program nejdříve vypočítá vrstvu nepoškozeného smrkového lesa. Do této vrstvy náhodně vygeneruje buňky ohnisek žíru tak, aby jejich celková rozloha odpovídala prognózované hodnotě. Napadení lesa l. smrkovým je generováno maximálně do vzdálenosti zadané od starých ohnisek žíru. Pokud nechceme vzdálenost omezit, zadáme vzdálenost větší než je velikost zájmového území.

Metoda růstu ohnisek žíru l. smrkového postupně zvětšuje původní ohniska žíru do jejich bezprostředního okolí. Nejdříve jsou vybírány buňky z bezprostředního okolí starých ohnisek žíru, pak se vzdálenost postupně zvětšuje. Generování ohnisek žíru je zastaveno, když je dosažena požadovaná rozloha nových ohnisek žíru, která odpovídá IMS.

Metoda maximální pravděpodobnosti je procedurou, která vypočítá vzdálenostní zóny od starých ohnisek žíru l. smrkového a proleje je s maskou lesa. V těchto vzdálenostních zónách vyhledá buňky s největší pravděpodobností náletu l. smrkového, aby jejich celková rozloha odpovídala prognózované rozloze.

Pro hodnocení správnosti prognózy poškození porostů l. smrkovým se porovnávají vrstvy zaznamenaných skutečných ohnisek žíru s tematickou vrstvou prognózovaných ohnisek. Výsledkem jsou kontingenční tabulky pro roky časové posloupnosti. Překryv ohnisek žíru je počítán modulem *bbo.vld_crosstab*. Výstupní soubor obsahuje pro každý rok časové posloupnosti kontingenční tabulky shody vrstvy skutečného poškození porostů (ohnisek žíru) a vrstvy prognózovaného poškození.

3.3.5 Management l. smrkového

Modul *bbo_mngmt_scenario1* vypočítá tři scénáře vývoje poškození porostů l. smrkovým v zájmovém území: optimistický, normální a pesimistický (ONP scénář). Vstupem do modulu je vrstva poškození porostů z aktuálního roku, která vznikla klasifikací v modulu Dynamika výskytu ohnisek žíru l. smrkového, vrstva masky smrkových porostů a vrstva pravděpodobnosti napadení lesních porostů. IMS je zadáván manuálně pro optimistickou, normální a pesimistickou variantu vývoje. Hodnoty IMS mohou být odhadnuty analýzou vývoje časové řady ohnisek žíru pomocí modulu Index mortality. To umožňuje experimentovat s různými hodnotami IMS a vytvořit alternativní prognózy vývoje l. smrkového. Výstupem modulu jsou tři rastrové vrstvy s prognózami rozšíření a vzniku nových ohnisek žíru. Vzhledem

k tomu, že účinnost jednotlivých metod ochrany lesa je předmětem diskuzí a neexistuje dostatek vědeckých analýz vlivu jednotlivých metod na populaci l. smrkového nebo na mortalitu smrku, systém poskytne doporučené hodnoty jednotlivých parametrů a zároveň i možnost použít hodnoty zadané uživatelem v rámci možných rozpětí. Doporučené hodnoty budou vycházet z vědecké literatury nebo z analýzy dat.

U metod ochrany lesa souvisejících s asanací bude nutné uvažovat kromě účinnosti metody i s procentem zpracování kalamity. Při odhadu IMS mohou být zohledněny následující typy managementu:

- Preventivní odstranění vývrátů a zlomů z porostu. Včas odstraněné vývraty a zlomy neumožní další vývoj l. smrkového.
- Včasná těžba a včasná kvalitní asanace kůrovcových stromů. Včas odstraněné vývraty a zlomy neumožní další vývoj l. smrkového.
- Sanitární těžba (bez asanace, s mechanickou asanací, s chemickou asanací). Vliv sanitární těžby na populaci l. smrkového bude určován časem těžby, časem odvozu, časem a způsobem asanace. Těžba, odvoz a kvalitní asanace v měsících květen až červen bude mít potenciálně 100% účinnost na l. smrkového. Těžba, odvoz a asanace v měsících červenec až srpen bude mít sníženou potenciální účinnost. Těžba, odvoz a asanace v měsících září až duben bude mít minimální účinnost. Včasný odvoz a odkorňovací frézy budou mít 100% účinnost. V případě chemické asanace bude uvedené rozpětí účinnosti v závislosti na době asanace.
- Stromové lapáky. Jako stromové lapáky je možné použít i vývraty a zlomy. Pro účinnost lapáků je **důležitá doba jejich asanace nebo odvozu**.
- Feromonové lapače. Rozpětí účinnosti se určuje podle typu instalace a počtu lapačů: bariéry feromonových lapačů (JAKUŠ 1998), hromadný odchyt (WESLIEN 1992) a jiné typy instalací.
- Anti-atraktanty. Účinnost se určuje na základě SCHIEBE et al. (2011).
- Otrávené lapáky v podobě trojnožek. Účinnost se určuje na základě LUBOJACKÝ, HOLUŠA (2011, 2013, 2014).

3.4 Operační část

Operační prognózy rizika napadení porostů l. smrkovým jsou založeny na kombinaci údajů ze submodulu fenologie l. smrkového (začátek rojení, napadení stromů), případně kontrolních dat z monitorovacích feromonových lapačů a modulu pro výpočet indexu sucha (IS) a kumulativního transpiračního deficitu (KTD).

3.4.1 Fenologický model

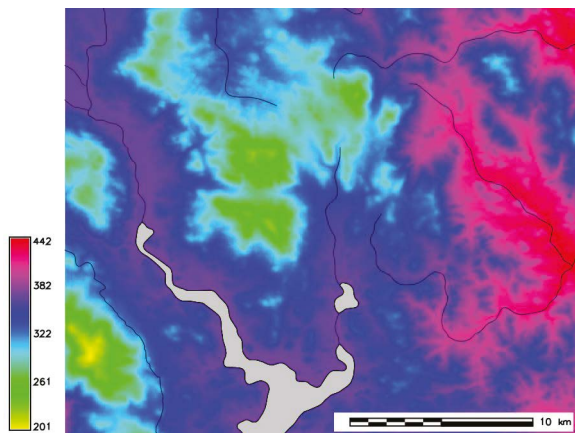
Do programu TANABBO II je v samostatném modulu implementován modifikovaný model PHENIPS (BAIER et al. 2007), ve kterém je stadium vývoje l. smrkového určováno na základě údajů z meteostanic (průměrná denní teplota, maximální denní teplota a denní suma solární radiace) přepočítaných pomocí vrstvy nadmořských výšek. Model poskytuje prostorovou informaci o stadiu vývoje l. smrkového v den *n*, den začátku rojení, den začátku kolonizace stromů a počet generací l. smrkového v daném roce.

V modulu PHENIPS je výpočet prováděn vždy jen pro nepřestupný rok. Vývoj l. smrkového je počítán od 92. (01.04.) do 304. dne (30.10.) v roce. Období výpočtu je dáno proměnnými *phenipsFromDay* a *phenipsToDay*, které jsou definovány v knihovně *biolib*.

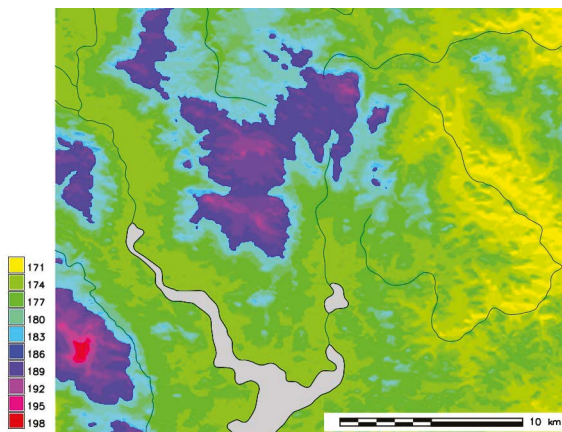
Základní modul modelu PHENIPS (*bbo.phenips_dd*) vypočítá stupňo-dny teploty vzduchu, které jsou nutné pro výpočet vývojových stadií l. smrkového v zájmovém území. Výpočet musí být proveden před spuštěním dalších modulů PHENIPS. Před spuštěním výpočtu stupňo-dnů je nutné vypočítat maximální teplotu vzduchu (vrstvy *at_max_d<xxx>* v mapsetu *TEMPERATURE_AIR*). Výstupem modulu jsou rastrové vrstvy kumulativních hodnot stupňo-dnů pro teplotu vzduchu *at_dd_d<xxx>* v mapsetu *PHENIPS* (Obr. 8).

V dalším kroku modul *bbo.phenips_swarming* vypočítá období ukončení rojení první generace l. smrkového. Výstupní vrstva *_swarming01* obsahuje číslo dne, ve kterém bylo ukončeno rojení první generace l. smrkového v dané buňce rastrové vrstvy.

Období napadení stromů první generací l. smrkového je vypočítáno modulem *bbo.phenips_infestation*. Číslo dne ukončení napadení stromů je uloženo do rastrové vrstvy *_infestation01*. Rastrová vrstva *_infestation_span01* obsahuje délku období napadení stromů první generací l. smrkového (Obr. 9).



Obr. 8: Kumulativní hodnoty stupňo-dnů na území Horní Planá (168. den)



Obr. 9: Den ukončení vývoje první generace lýkožrouta smrkového na území Horní Planá

Období vývoje I. smrkového pod kůrou stromů počítá modul *bbo.phenips_development*. Jako pomocný údaj pro výpočet vývoje I. smrkového vypočítá kumulativní hodnoty stupňo-dnů teploty kůry a uloží je do rastrů vrstev *bt_dd_d<xxx>* v mapsetu *PHENIPS*. Do rastrové vrstvy *_development_span01* je uložena délka období vývoje druhé generace I. smrkového.

Vývoj dalších generací I. smrkového v průběhu letní sezóny počítá modul *bbo.phenips_nextgen*. Před spuštěním modulu je nutné vypočítat vývoj první generace I. smrkového spuštěním modulů *bbo.phenips_dd*, *bbo.phenips_swarming*, *bbo.phenips_infestation*, *bbo.phenips_development*. Modul postupně vypočítá vývoj dalších generací I. smrkového a uloží je do vrstev označených pořadovým číslem příslušné generace. Výstupem modulu jsou:

- doplněné rastrové vrstvy kumulativních hodnot stupňo-dnů teploty vzduchu *at_dd_d<xxx>*,
- doplněné rastrové vrstvy kumulativních hodnot stupňo-dnů teploty kůry *bt_dd_d<xxx>*,
- rastrové vrstvy *_swarming<gg>*, které obsahují číslo dne ukončení rojení dalších generací I. smrkového,
- rastrové vrstvy *_swarming_span<gg>*, které obsahují délku období rojení dalších generací I. smrkového,
- rastrové vrstvy *_infestation<gg>*, které obsahují číslo dne ukončení náletu dalších generací I. smrkového,
- rastrové vrstvy *_infestation_span<gg>*, které obsahují délku období náletu na stromy dalšími generacemi I. smrkového,
- rastrové vrstvy *_development<gg>*, které obsahují číslo dne ukončení vývoje dalších generací I. smrkového,
- rastrové vrstvy *_development_span<gg>*, které obsahují délku období vývoje dalších generací I. smrkového.

Pro praktickou péči o lesy je důležitá informace o stupni vývoje I. smrkového v průběhu roku. Modul *bbo.phenips_stage* pro každý den v roce odvodí *rastr stage_d<xxx>*, do kterého uloží kód vývojového stadia I. smrkového:

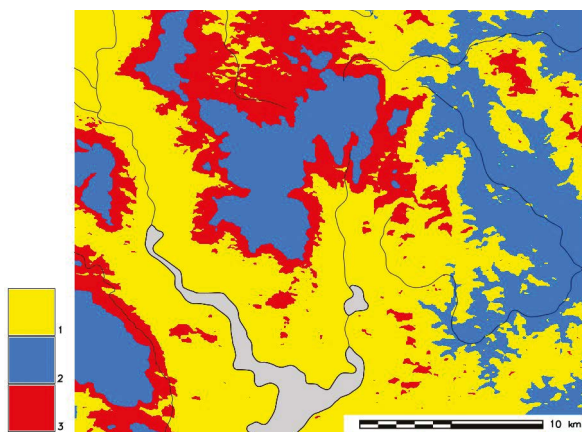
1. rojení (swarming),
2. napadení stromů (infestation),
3. vývoj pod kůrou stromů (development) (Obr. 10).

Celý výpočet modelu PHENIPS lze spustit prostřednictvím modulu *bbo.phenips_run*. Modul postupně spustí všechny moduly nutné pro výpočet vývoje l. smrkového podle modelu PHENIPS:

- výpočet stupňo-dnů,
- rojení,
- napadení stromů,
- vývoj pod kůrou stromů,
- další generace l. smrkového,
- vrstvy vývojového stadia l. smrkového.

Prahové hodnoty pro výpočet modelu PHENIPS jsou uloženy v proměnných v knihovně *bboPhenipsLib*. Lze je jednoduše modifikovat, a tím přizpůsobit výpočet vývoje l. smrkového lokálním podmínkám:

- prahová hodnota maximální teploty vzduchu pro výpočet stupňo-dnů, *phenipsDDThreshold* (8.3),
- hraniční teplota vzduchu pro let l. smrkového, *phenipsFlightThreshold* (16.5),
- prahová hodnota stupňo-dnů ukončení rojení, *phenipsSwarmingDDThreshold* (60.0),



Obr. 10: Prognóza stupně vývoje lýkožrouta smrkového (185. den)

- prahová hodnota stupňo-dnů ukončení napadení stromů, *phenipsInfestationDThreshold* (140.0),
- prahová hodnota stupňo-dnů pro ukončení vývoje l. smrkového, *phenipsDevelopmentSumThreshold* (557).

3.4.2 Meteorologické parametry

Riziko napadení lesních porostů l. smrkovým silně ovlivňuje průběh teploty, množství srážek a jejich rozložení a solární radiace. Součástí komplexního modelu šíření l. smrkového jsou proto i modely vybraných meteorologických veličin a jejich parametrizace podle hodnot naměřených meteorologickými stanicemi umístěnými v zájmovém území.

Součástí modelu TANABBO II jsou modely potenciální a skutečné solární radiace, teploty vzduchu a kůry stromů, výpočet indexu sucha a kumulativního transpiračního deficitu.

Meteorologické parametry jsou základními vstupními údaji pro model PHENIPS. Pro jejich odvození je nutné mít rastrovou vrstvu nadmořských výšek, sklonu a orientace reliéfu. Ve vektorovém souboru *meteo station*, uloženém v mapsetu *SHP*, je uložena poloha meteorologické stanice. Modul ji používá pro odvození nadmořské výšky meteorologické stanice z vrstvy nadmořských výšek a odvození hodnoty skutečné solární radiace z vrstev *sr_d<xxx>* v mapsetu *SOLAR*.

3.4.2.1 Potenciální a skutečná solární radiace

Hodnota potenciální solární radiace za jeden den je základním vstupem pro odvození dalších meteorologických parametrů. Je počítána modulem *bbo.solar_day*. Vstupem do modulu je rastrová vrstva nadmořských výšek (*dem*), rastrová vrstva sklonu reliéfu ve stupních (*slope*) a rastrová vrstva orientace reliéfu vůči světovým stranám (*aspect*). Dále je nutné zadat zeměpisnou šířku (*latitude*) a zeměpisnou délku (*longitude*) ve stupních pro oblasti, pro které bude solární radiace počítána, číslo prvního (*day from*) a posledního dne (*day to*) výpočtu a krok výpočtu (*calculation step*) v hodinách. Volitelně lze nastavit znak vyčištění mapsetu pro spuštění výpočtů (*clean mapset*). Pokud je nastavený, modul nejdříve vymaže rastrové vrstvy potenciální solární radiace pro každý den v roce.

Výstupní soubory jsou ukládány pod názvem *psr_d<xxx>*, kde *xxx* je trojčíferné číslo dne. Všechny výstupní a pomocné vrstvy jsou ukládány do mapsetu *SOLAR*,

který si modul automaticky nastaví. Modul nejdříve vytvoří pomocné rastrové vrstvy, které obsahují zeměpisnou šířku (*tmp_latitude*) a zeměpisnou délku (*tmp_longitude*) každé buňky. Poté je pomocí modulu *r.solar* vypočítán pro každý den rastr potenciální solární radiace se zadaným krokem.

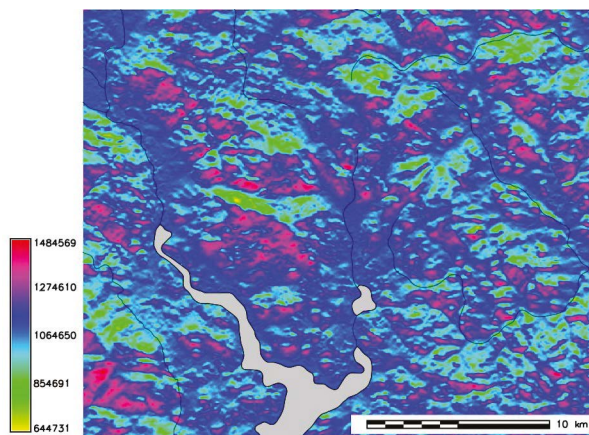
Výpočet potenciální solární radiace je časově velmi náročný, může trvat i několik hodin. Délka výpočtu závisí na velikosti vstupního rastru a kroku výpočtu.

Po výpočtu denní potenciální solární radiace můžeme přistoupit k výpočtu sumární měsíční a roční potenciální solární radiace.

Měsíční sumář potenciální solární radiace je počítán modulem *bbo.solar_month*. Modul nemá žádné vstupní parametry. Výpočet je prováděn v mapsetu SOLAR, který je před výpočtem nastaven automaticky. Modul předpokládá, že rastrové vrstvy *psr_d<xxx>* obsahují potenciální denní radiaci. Vypočítá sumární potenciální radiaci pro každý měsíc a uloží je do vrstev pod názvem *psr_m<xx>*, kde *xx* je dvojciferné číslo měsíce.

Modul *bbo.solar_year* vypočítá sumární potenciální solární radiaci za celý rok. Nemá žádné vstupní parametry. Modul předpokládá, že sumární měsíční potenciální solární radiace byla vypočítána do vrstev *psr_m<xx>*, kde *xx* je číslo měsíce 01 až 12. Výstupní rastrová vrstva je uložena pod názvem *psr_y* do mapsetu SOLAR.

Potenciální solární radiace je propočítána na skutečnou radiaci zavedením korekce podle měření meteorologické stanice (Obr. 11). Současná verze modelu pracuje



Obr. 11: Roční solární radiace na území Horní Planá

s údaji z jedné meteorologické stanice. Meteorologická stanice se musí nacházet v zájmovém území.

Skutečná denní solární radiace je vypočítána modulem *bbo.solar_cday* na základě údajů z meteorologické stanice. Vstupem do modulu je první a poslední den v roce, pro které je nutné provést korekce. Modul dále potřebuje vypočítané hodnoty potenciální solární radiace v souborech *psr_d<xxx>* v mapsetu *SOLAR*.

Hodnoty solární radiace naměřené na meteorologické stanici musí být uloženy v souboru *md_gsr_<i>.txt* v adresáři *_DATA*, kde *<i>* je číslo meteorologické stanice. Soubor obsahuje jen dva sloupce. V prvním je uloženo číslo dne v roce a ve druhém zjištěná hodnota globální solární radiace.

Pro každý den je vypočítán konverzní koeficient

$$k = \text{radiation}_{\text{measured}} / \text{radiation}_{\text{potential}}$$

kterým se pronásobí rastr potenciální solární radiace pro daný den.

Pokud pro nějaký den nejsou k dispozici údaje o globální solární radiaci z meteorologické stanice, korekce nejsou provedeny a do příslušné rastrové vrstvy jsou zkopírovány údaje z vrstvy potenciální solární radiace.

Výpočty jsou prováděny v mapsetu *SOLAR*, který je nastaven automaticky před začátkem výpočtů. Výstupní rastrové vrstvy mají název *sr_d<xxx>*, kde *<xxx>* je trojčíferné číslo dne.

Po výpočtu skutečné denní solární radiace je vypočítána skutečná měsíční (modul *bbo.solar_cmonth*, vrstvy *sr_m<xx>*) a skutečná roční solární radiace (modul *bbo.solar_cyear*, rastrová vrstva *sr_y*).

3.4.2.2 Teplota vzduchu

Prostorovou interpolaci průměrné a maximální teploty vzduchu v zájmovém území počítá modul *bbo.temperature_air*. Pro výpočet je používán digitální model nadmořských výšek, hodnoty teploty vzduchu naměřené na meteorologické stanici, údaje o skutečné solární radiaci a teplotní gradient.

Vstupem pro modul je číslo prvního a posledního dne v roce, pro které se provádí výpočet. Výstupem modulu jsou rastrové vrstvy průměrné (*at_mean_d<xxx>*, Obr. 12) a maximální (*at_max_d<xxx>*) teploty vzduchu.

Teplotní gradient popisuje změnu teploty vzduchu se změnou nadmořské výšky. Udává, o kolik stupňů Celsia se změní teplota vzduchu při změně o 1m nadmořské

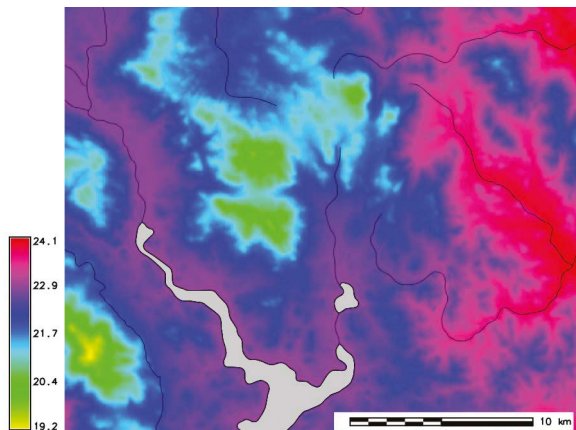
výšky ($^{\circ}\text{C}/\text{m}$). Teplotní gradient je proměnlivý v čase, mění se podle ročního období. Je dán časovou řadou hodnot, která je uložena v souboru *tgrad_std.txt*. Soubor obsahuje dva sloupce. V prvním sloupci je uloženo číslo dne v roce, v druhém sloupci hodnota teplotního gradientu. Chybějící hodnoty teplotního gradientu jsou doplněny lineární interpolací ze známých hodnot ve dvou nejbližších dnech.

Průměrná teplota vzduchu $tavg(d)$; pro den d ; nadmořská výška v buňce $elev$; nadmořská výška meteorologické stanice $elev_{meteo}$; teplotní gradient $c(d)$ pro daný den; průměrná teplota vzduchu naměřená na meteorologické stanici $tavg_{meteo}(d)$:

$$tavg(d) = c(d) * (elev - elev_{meteo}) + tavg_{meteo}(d)$$

Maximální denní teplota vzduchu je počítána analogickým způsobem (korekční činitel, který opravuje změnu maximální teploty o koeficient vypočítaný z hodnot skutečné solární radiace v buňce $sr(d)$ a meteorologické stanici $sr_{meteo}(d)$):

$$tmax(d) = c(d) * sr(d) * sr_{meteo}(d) * (elev - elev_{meteo}) + tmax_{meteo}(d)$$



Obr. 12: Průměrná denní teplota vzduchu pro území Horní Planá (168. den)

3.4.2.3 Teplota kůry stromů

Modul *bbo.temperature_bark* vypočítá aproximaci teploty kůry v zájmovém území. Teplota kůry je jedním z hlavních vstupů pro model vývoje l. smrkového PHENIPS. Pro výpočet jsou používány vztahy podle práce BAIER et al. (2007). Vstupem je číslo prvního a posledního dne období, pro které se má provést výpočet. Výstupem jsou rastrové vrstvy průměrné teploty kůry stromů (*bt_mean_d<xxx>*), maximální teploty kůry stromů (*bt_max_d<xxx>*) a efektivní teploty kůry stromů (*bt_max_d<xxx>*, *bt_eff_d<xxx>*) pro jednotlivé dny zadaného období.

Pro potřeby statistického zpracování údajů a validace modelů program dovoluje exportovat údaje o odchytu l. smrkového do lapačů ve formě tabulky. Polohy lapačů musí být uloženy v bodové vektorové vrstvě *bbtrap* v mapsetu *SHP*. Číslo lapače je uloženo ve sloupci *CAT*. Aby export správně fungoval, tematická vrstva lapačů musí obsahovat sloupec *VAL* typu „double precision“. Kromě vektorové vrstvy lapačů v databázi musí být vypočítány rastrové vrstvy meteorologických parametrů. Modul *bb.export_meteo_trap* vygeneruje textovou tabulku, která pro zadaný lapač obsahuje časovou řadu průměrných a maximálních teplot vzduchu, průměrných, maximálních a efektivních teplot kůry stromů a hodnoty stupňo-dnů.

3.4.3 Riziko sucha

Index sucha a kumulativní transpirační deficit jsou ukazatelé stresu suchem, které považujeme za potencionální predispoziční a/nebo spouštěcí faktory pro nálet l. smrkového. V našem pojetí jsou založeny na údajích poměrně snadno dostupných pro libovolný lesní porost nebo část krajiny (BALÁŽ et al. 2009). Lze za ně považovat základní meteorologické charakteristiky, které je možné v přijatelné kvalitě interpolovat na základě údajů ze stávající sítě meteorologických stanic, a hrubý popis půdy na úrovni půdního typu a případně i hloubky půdy.

Schéma vodní bilance lesního porostu, které jsme použili pro hodnocení výskytu a intenzity sucha je proto charakterizováno následujícím vzorcem:

$$VP_n = VP_{n-1} + Z_{n-1} - AT_{n-1}$$

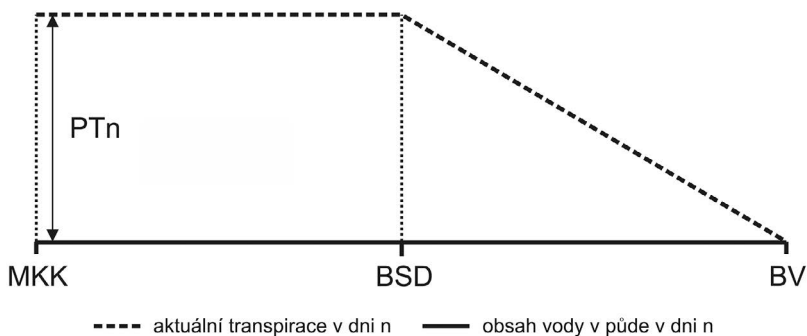
kde:

- VP_n je obsah vody v půdě v den n (mm)
- VP_{n-1} je obsah vody v půdě předcházející den (mm)
- Z_{n-1} je úhrn srážek pod hodnoceným porostem předcházející den (mm.d⁻¹)
- AT_{n-1} je aktuální transpirace porostu předcházející den (mm.d⁻¹)

Hloubka půdy (kořenové zóny) je pro potřeby porovnání jednotlivých porostů stanovena na 50 cm. Pro účely modelu vodní bilance tato vrstva půdy reprezentuje určitý zásobník vody, ve kterém se zásoba vody pohybuje mezi dvěma půdními hydrolimity: bodem vadnutí (BV) a maximální kapilární kapacitou (MKK). Pro zjednodušení není počítáno s povrchovým a podpovrchovým přítokem a odtokem vody a za jediný zdroj vody jsou považovány podkorunové srážky. Množství vody, které přesáhlo maximální limit (MKK) nebylo zahrnuto do kalkulace a bylo považováno za vodu, která po nasycení půdy otekla pryč. Za jedinou ztrátu vody z tohoto půdního profilu byla považována aktuální transpirace lesního porostu (AT), přičemž při poklesu zásoby vody v půdě na dolní limit (BV) se voda pro porost stala nedostupnou a transpirace se zastavila.

Podkorunové srážky byly počítány ze srážek zjištěných na volné ploše. Základem pro tento výpočet byl odhad intercepce na úrovni 5 mm.

Aktuální transpirace porostu (AT_n) byla pro každý den určena na základě potenciální transpirace porostu (PT_n) a aktuálního obsahu vody v půdě (PV_n). Hodnota (AT) byla stanovena na základě vztahu znázorněného na Obr. 13. Tento vztah vychází z jednoduchého předpokladu, že vlhkost půdy mezi maximální kapilární kapacitou a určitým bodem, v našem případě reprezentovaným půdním hydrolitem „bod snížené dostupnosti“ (BSD) umožňuje stromům naplno využít jejich aktuální transpirační potřeby“, a proto se při hodnotě zásoby vody v půdě mezi hydrolimity

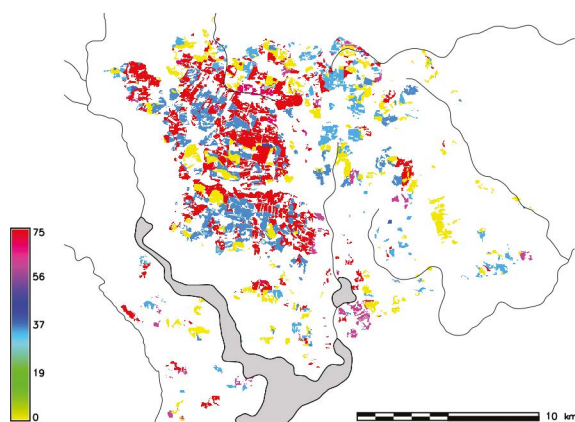


Obr. 13: Schéma vztahu pro stanovení hodnoty aktuální transpirace (přerušovaná čára) na základě aktuálního obsahu vody v půdě (os x). MKK = maximální kapilární kapacita, BSD = bod snížené dostupnosti, BV = bod vadnutí, PT_n = potenciální transpirace v den n

MKK a BSD aktuální transpirace porostu rovná potenciální transpiraci porostu. Při poklesu vlhkosti půdy pod tento bod (BSD) klesá schopnost stromů uspokojit jejich aktuální transpirační potřeby a schopnost stromu naplnit své potenciální transpirační požadavky se začne lineárně snižovat až k nule při vlhkosti půdy rovnající se nebo nižší než BV. Takovým způsobem jsme stanovili aktuální transpiraci porostu pro každý den samostatně na základě potenciální transpirace a aktuální vlhkosti půdy v daném dni.

Potenciální transpiraci (PT) porostu/dřeviny je možné stanovit různými způsoby (TURC 1961; ALLEN et al. 1998).

Při hodnocení výskytu a intenzity sucha v lesních porostech jsme vycházeli z definice sucha, která předpokládá, že dřevina nebo lesní porost zažívá sucho tehdy, když je aktuální zásoba disponibilní vody nižší než jejich aktuální transpirační potřeby. Sucho jsme hodnotili pomocí dvou charakteristik, jejichž výpočet je založen na vodní bilanci lesního porostu. První z nich je „index sucha“ (IS), vyjadřující aktuální míru zabezpečení vláhových potřeb dřeviny nebo porostu, a druhou je „kumulativní transpirační deficit“ (KTD), zohledňující i dobu nedostatku vody (Obr. 14).



Obr. 14: Kumulativní transpirační deficit (151. den)

Index sucha je vyjádřením relativní evapotranspirace, představující poměr aktuální a potenciální evapotranspirace. Relativní evapotranspirace je dobrým a poměrně často využívaným ukazatelem vláhového zabezpečení rostlin, využitelným pro charakterizování vlhkostních poměrů (např. POYATOS et al. 2005; AHRENDTS et al. 2010; VILHAR, ŠIMONČIČ 2012). Index sucha je vypočítán následovně:

$$IS_n = 1 - AT_n / PT_n$$

kde:

- IS_n je index sucha ve dni n
- AT_n je denní úhrn aktuální transpirace porostu/dřeviny v den n (mm)
- PT_n je denní úhrn potenciální transpirace porostu/dřeviny v den n (mm)

V případě, že je v půdě dostatek vody a aktuální transpirace je rovna potenciální, nebo je potenciální transpirace teoreticky nulová, z pohledu hodnocené dřeviny nebo lesního porostu není žádné sucho a index má nulovou hodnotu. Jelikož náš postup neuvažuje s vodou obsaženou v kmeni jako se zdrojem pro transpiraci, v případě, že v půdě není žádná dostupná voda, aktuální transpirace se zastaví úplně. V takovém případě je z hlediska potřeb dřeviny nebo lesního porostu úplně sucho a index dosáhne hodnoty 1. Hodnota takového indexu sucha větší než 0 vyjadřuje aktuální přítomnost deficitu vody v půdě z pohledu aktuálních transpiračních potřeb dřeviny nebo lesního porostu. Kolísání hodnoty IS vyjadřuje relativní míru omezení možnosti dřeviny nebo lesního porostu uspokojit své aktuální transpirační potřeby. Z pohledu možného stresového působení sucha na rostlinu však nezohledňuje případnou kumulaci a intenzitu deficitu vody z předchozího období. Reakce rostlin na sucho je však závislá i na délce trvání, resp. kumulaci deficitu vody (NII-NEMETS 2010). Pro vyjádření tohoto aspektu je vhodná druhá použitá charakteristika sucha – kumulativní transpirační deficit (KTD), který je založen na rozdílu mezi potenciální a aktuální transpirací. Je počítán následovně:

$$KTD_n = PT_n - AT_n + KTD_{n-1}$$

kde:

- KTD_n je kumulativní transpirační deficit v den n (mm)
- PT_n je potenciální transpirace porostu/dřeviny v den n (mm)
- AT_n je aktuální transpirace porostu v den n (mm)
- KTD_{n-1} je kumulativní transpirační deficit porostu v předcházejícím dni (mm)

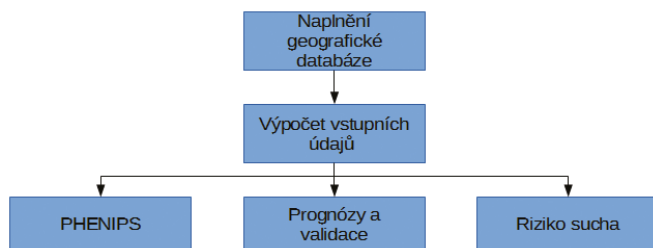
Další výhodou KTD proti IS je to, že vyjadřuje i absolutní velikost deficitu vody, a tedy zohledňuje rozdílný dopad nedostatku vody na dřevinu v podmínkách vyso-

ké nebo nízké potenciální transpirace. Pro případ smrkových porostů jsme při průběžné kumulaci KTD uplatnili předpoklad, že na regeneraci dřeviny po předchozím období deficitu sucha postačují 3 dny s dostatkem vody pro pokrytí aktuálních transpiračních potřeb (kdy $IS=0$). Proto při výpočtu KTD při poklesu hodnoty IS na nulu po tři po sobě následující dny dojde k vynulování hodnoty KTD a kumulativní efekt dlouhodobějšího výskytu vodního deficitu je vždy počítán znovu.

3.5 Praktické použití programu TANABBO II*

Do software TANABBO II byly implementovány všechny nástroje pro vytvoření a validaci prostorových modelů šíření l. smrkového v prostředí GRASS GIS. Postup vytvoření modelu šíření l. smrkového pro konkrétní území se obvykle skládá z pěti hlavních kroků (Obr. 15):

- 1) Vytvoření a naplnění geografické databáze
- 2) Výpočet vstupních údajů
- 3) Výpočet prognóz a jejich validace
- 4) Model vývoje l. smrkového PHENIPS
- 5) Výpočet rizika sucha



Obr. 15: Schéma výpočtu

* Tato kapitola nedubluje prostý manuál uvedený na stránkách www.tanabbo.org, kde je systém popsán velmi přehledně a srozumitelně.

3.5.1 Vytvoření a naplnění geografické databáze

Pro každé zájmové území je nutné vytvořit samostatnou geografickou databázi systému GRASS GIS, ve které budou uloženy všechny vstupní údaje a výsledky modelování šíření l. smrkového. Úvodní okno systému GRASS GIS obsahuje nástroje pro vytvoření nové nebo otevření existující databáze, odstranění celé databáze a také nástroje pro správu mapsetů (Obr. 16).

Nová geografická databáze systému GRASS GIS je založena v úvodním okně po spuštění programu GRASS GIS použitím tlačítka *New*. Po jeho volbě je spuštěn průvodce jejím vytvořením a v několika dialogových oknech jsou postupně nastavovány její parametry.

V prvním dialogovém okně nejdříve nastavíme adresář, ve kterém bude nová geografická databáze vytvořena (*GIS Data Directory*). Prostorové modely šíření l. smrkového pracují s časovými řadami po letech nebo i po dnech, proto je nutné ji vytvořit na disku s dostatečnou kapacitou pro ukládání velkých objemů dat. Její velikost závisí i na velikosti zájmového území a rozlišení rastrů. Obvykle je nutné počítat s kapacitou minimálně 20-25 GB. Geografická databáze je vytvořena jako adresář se zadaným názvem (*Project Location*).

V dalším dialogovém okně je zadáváno kartografické zobrazení tematických vrstev v geografické databázi. Pro území České republiky a Slovenska je nejčastěji pou-

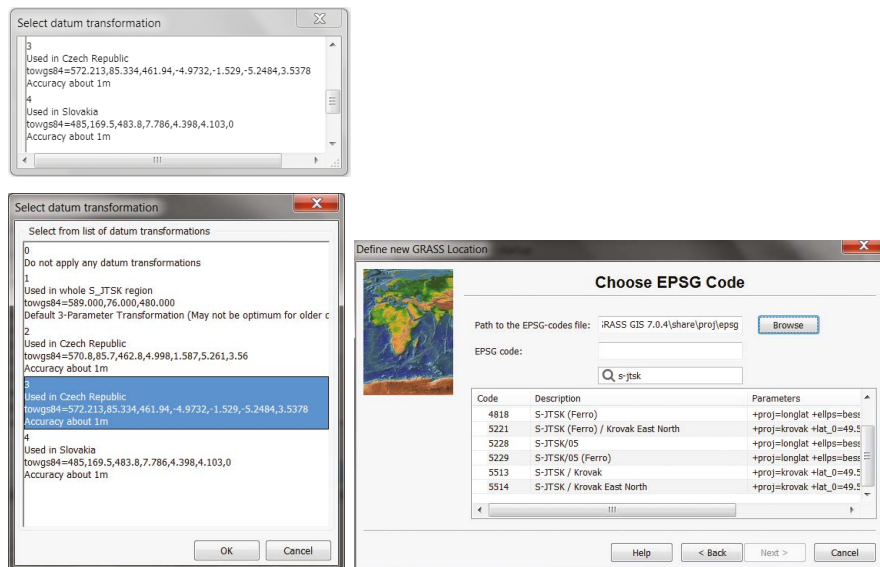


Obr. 16: Úvodní okno systému GRASS GIS

žíván Souřadnicový systém jednotné trigonometrické katastrální sítě (S-JTSK), jejímž základem je Křovákovo zobrazení. Pro většinu aplikací proto nastavíme kartografické zobrazení s EPSG kódem 5514. Pokud jsou používány mapy a tematické vrstvy v jiném kartografickém zobrazení (např. UTM), je potřeba vyhledat jeho kód nebo naimportovat jeho parametry z existujících tematických vrstev.

Pro kartografické transformace mezi různými souřadnicovými systémy je nutné nastavit jejich parametry. Systém GRASS GIS obsahuje několik předdefinovaných transformací. Nejvhodnější je vybírána podle používaného kartografického zobrazení a polohy zájmového území (Obr. 17).

V posledním kroku je nastaven rozsah regionu a rozlišení rastru. Rozsah regionu je dán minimální západní (*West*) a maximální východní (*East*) souřadnicí x a minimální jižní (*South*) a maximální severní (*North*) souřadnicí y. GRASS GIS podporuje rastry s obdélníkovým tvarem buněk, takže velikost buňky ve směru osy x (rozlišení východ-západ; *E-W resolution*) může být jiná, než velikost buňky ve směru osy y (rozlišení sever-jih; *N-S resolution*). Počet řádků a sloupců rastru je vypočítán automaticky. Celkové rozlišení rastru je nejlépe nastavit podle vrstev s nejvyšším rozlišením (nejmenší velikostí buněk).



Obr. 17: Výběr kartografické transformace

Po vytvoření geografické databáze je nutné vytvořit mapsety, do kterých budou ukládány geografické údaje. Mapset představuje logickou skupinu rastrových a vektorových vrstev. Program TANABBO II pracuje s několika mapsety, které lze do projektu přidávat postupně, nebo je vytvořit všechny najednou již při zakládání geografické databáze. Podrobnější popis mapsetů a jejich vrstev je uveden v kapitole 3.2.2 Struktura databáze:

- *dem*: vrstvy digitálního modelu reliéfu (nadmořské výšky, sklony, orientace, křivosti).
- *forest*: údaje o lesních porostech (maska smrkových porostů, věk porostů, zakmenění, ohniska žíru l. smrkového a další).
- *landsat*: časové řady satelitních snímků LANDSAT.
- *shp*: vektorové vrstvy polohopisu (zastavěná území, cesty, řeky, vodní nádrže, železniční tratě, hranice chráněných území, poloha meteorologických stanic, poloha feromonových lapačů apod.).
- *solar*: potenciální a aktuální solární radiace.
- *temperature_air*: model teploty vzduchu pro model PHENIPS.
- *temperature_bark*: model teploty kůry stromů pro model PHENIPS.
- *hydro*: dešťové srážky, index sucha, riziko vláhového deficitu.
- *bb_prognosis*: výsledky prostorové prognózy šíření l. smrkového.
- *bb_infestation*: výsledky simulace vývoje l. smrkového modelem PHENIPS.

Kromě mapsetů je nutné v adresáři projektu GRASS GIS vytvořit manuálně podadresář *_DATA*, který slouží pro ukládání konfiguračních souborů a souborů s údaji z meteorologických stanic.

Do vytvořených mapsetů jsou naimportovány dostupné tematické vrstvy. Systém GRASS GIS podporuje import různých formátů rastrových, obrazových a vektorových souborů. Konverzní moduly se nacházejí v menu *File / Import raster data*, resp. *File / Import vector data*. Soubory systému ArcGIS společnosti ESRI (*.shp) jsou naimportovány modulem *v.in.ogr*. Rastrové soubory v textovém nebo binárním formátu ArcInfo jsou naimportovány modulem *r.in.ogr*.

Odvozené tematické vrstvy lze vyexportovat pomocí modulu programu GRASS GIS do vhodného výměnného formátu. Rastrové vrstvy můžeme vyexportovat některým z modulů *r.out.gdal*, *r.out.ascii*, *r.out.bin*. Na export vektorových vrstev se používá modul *v.out.ogr*. Výsledky některých výpočtů jsou prezentovány ve formě tabulek, které se zapisují do textových souborů (*.txt).

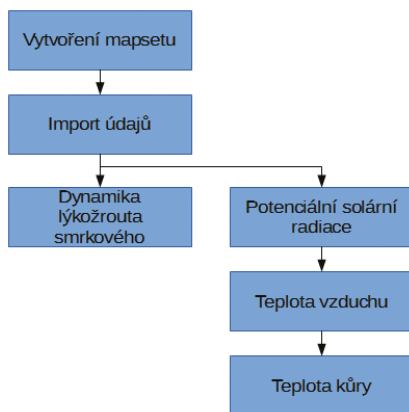
3.5.2 Výpočet vstupních vrstev

Model TANABBO II počítá s různými vstupními údaji, které popisují stav a charakteristiky lesních porostů, půdy, ovzduší a dalších složek přírodního prostředí. Některé ze vstupních vrstev je nutné vypočítat ze vstupních podkladů. V programu TANABBO byly implementovány procedury pro výpočet dynamiky časových řad vzniku ohnisek žíru l. smrkového, vegetačních indexů, solární radiace, teploty vzduchu a teploty kůry stromů. Příprava vstupních vrstev se skládá z několika kroků, které jsou zobrazeny na Obr. 18.

3.5.2.1 Dynamika výskytu ohnisek žíru l. smrkového

Základním vstupním údajem pro model TANABBO II jsou rastrové vrstvy ohnisek žíru l. smrkového, které zachycují místa a velikost ohnisek žíru v jednotlivých letech. Pro potřeby další analýzy je nutné buňky ohnisek žíru klasifikovat podle způsobu jejich vzniku (stará ohniska žíru, ohniska vzniklá rozšířením starých, nová ohniska vzniklá přeletem) a vypočítat vzdálenosti rozšiřování ohnisek žíru a vzdálenosti přeletu l. smrkového.

Poté lze spustit samotný modul pro výpočet dynamiky l. smrkového. Vstupem do modulu je jen rozsah let, pro které se má výpočet provést. Výpočet je značně časově náročný, proto jej lze spouštět postupně jen pro zadané roky. Současně to umožňuje postupně doplňovat další časovou řadu a výpočet provést pro nové vrstvy. Výsledkům výpočtu jsou klasifikovány vrstvy ohnisek žíru podle způsobu vzniku.



Obr. 18: Postup naplnění geografické databáze

Po klasifikaci ohnisek žíru l. smrkového podle způsobu jejich vzniku můžeme přejít k výpočtům vzdáleností. Program TANABBO obsahuje moduly pro výpočet vzdáleností přeletu l. smrkového (*bbo.spot_dynamics_fdst*), vzdálenosti rozšiřování ohnisek žíru (*bbo.spot_dynamics_edst*), vzdálenosti ke starým ohniskům (*bbo.spot_dynamics_odst*), vzdálenosti k novým ohniskům (*bbo.spot_dynamics_ndst*) a vzdálenosti ke všem ohniskům (*bbo.spot_dynamics_adst*). Vstupem do každého modulu je rozsah let, pro který je nutné výpočty provést. Moduly vyhledají vstupní vrstvy a provedou výpočet.

Po klasifikaci ohnisek žíru l. smrkového je vhodné vypočítat i vzdálenosti k okrajům lesa (*bbo.s50_edst*). Při výpočtu jsou zohledněna vzniklá ohniska žíru, která jsou odčítána od masky lesa. Modul tedy počítá vzdálenosti od okrajů lesa včetně okrajů ohnisek žíru.

Následně je provedena sumarizace časové řady ohnisek žíru l. smrkového za sledované období (modul *bbo.spot_sersum*). Do výstupního rastru jsou zapsány roky, ve kterých došlo k rozšíření nebo vzniku nového ohniska žíru v daném místě. Také lze modulem *bbo.spot_narea* vypočítat posloupnost rozlohy ohnisek žíru.

Nakonec je modulem *bbo.spot_mi* vypočítán vývoj IMS na modelovaném území. IMS je vypočítán jako poměr výměry ohnisek žíru v předcházejícím a aktuálním roce. Vyjadřuje nárůst, resp. pokles celkové výměry ohnisek žíru v zájmovém území. Modul také provede odhad délky populačního cyklu l. smrkového a na základě těchto údajů vytvoří normální, optimistickou a pesimistickou prognózu IMS pro následující rok (Obr. 5).

3.5.2.2 Solární radiace

Potenciální solární radiace je počítána pomocí modulů programu GRASS GIS. Jelikož je nutné provést výpočet pro každý den v roce, byly vytvořeny procedury, které tento proces automatizují. Výpočet je časově náročný, proto jej lze spouštět pro zadaný rozsah dní v roce.

Vstupem do modulu je vrstva nadmořských výšek, sklonu a orientace reliéfu (Obr. 19). Vrstvy sklonu a orientace lze odvodit z vrstvy nadmořských výšek modulem *r.slope.aspect* programu GRASS GIS. Dalším vstupem je zeměpisná šířka a zeměpisná délka středu modelového území.

Po výpočtu denní potenciální solární radiace je vypočítána sumární měsíční a roční potenciální solární radiace moduly *bbo.solar_month* a *bbo.solar_year*.

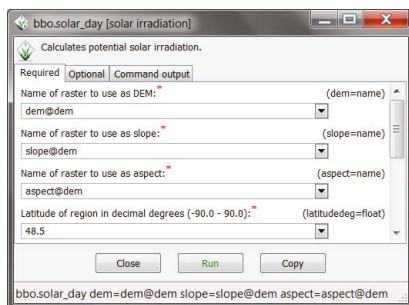
Na základě údajů z meteorologické stanice jsou poté provedeny korekce potenciální solární radiace. Korekce jsou prováděny po jednotlivých dnech v roce. Program

prohledá vstupní soubor meteorologických údajů. Pokud nalezne naměřené hodnoty pro daný den, provede příslušné korekce. Pokud pro daný den nejsou meteorologické údaje k dispozici, je vytvořena kopie vrstvy potenciální solární radiace. Nejdříve je nutné provést denní korekce modulem *bbo.solar.cday*. Následně je možné odvodit sumární měsíční (*bbo.solar.cmonth*) a roční radiaci (*bbo.solar.cyear*) s korekcemi.

3.5.2.3 Teplota vzduchu a kůry stromů

Vrstvy skutečné solární radiace nadmořských výšek a údaje o teplotě z meteorologické stanice jsou vstupy pro výpočet teploty vzduchu a teploty kůry stromů. Modul *bbo.temperature_air* vytvoří prognózu prostorového rozložení teploty vzduchu pro každý den v roce. Průměrná a maximální teplota je vypočítána na základě teplotního gradientu, změny nadmořské výšky a korekce podle solární radiace.

Vypočítané průměrné a maximální denní teploty vzduchu jsou podkladem pro výpočet teploty kůry stromů podle známých vztahů modulem *bbo.temperature_bark*.



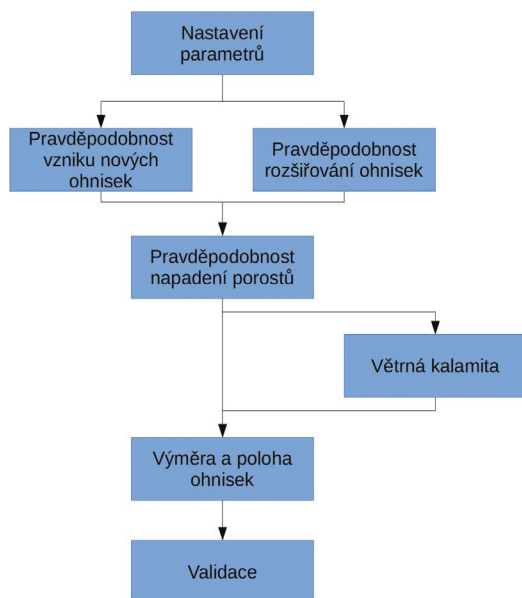
Obr. 19: Modul pro výpočet potenciální solární radiace

3.5.3 Výpočet prognóz a jejich validace

Prognózy šíření l. smrkového jsou řazeny prostřednictvím parametrů, které jsou uloženy v konfiguračním souboru. Takto lze vytvořit, testovat a porovnávat různé přístupy k modelování šíření l. smrkového. Rovněž je zjednodušeno jejich opakované spouštění a přenesení na jiný počítač. Postup výpočtu prognóz a jejich validace je na Obr. 20.

Před spuštěním samotného výpočtu prognóz šíření l. smrkového je proto nutné vytvořit konfigurační soubor a uložit do něho parametry výpočtu (kap. 3.3.2 Prognózy a validace ohnisek žíru l. smrkového). Je nutné nastavit zejména:

- rozsah let pro výpočet,
- prefixy výstupních souborů,
- parametry procedur pro výpočet pravděpodobnosti vzniku nových ohnisek žíru l. smrkového, pravděpodobnosti rozšiřování ohnisek žíru, pravděpodobnost napadení lesních porostů l. smrkovým a prognózu polohy ohnisek žíru.



Obr. 20: Výpočet prognózy šíření ohnisek lykožrouta smrkového

Vstupem do modulů pro výpočet prognóz šíření l. smrkového je název konfiguračního souboru s parametry prvního a posledního roku výpočtu. Procedury načítají nutné parametry z konfiguračního souboru a provedou nutné výpočty.

Pořadí spouštění modulů je následující:

- jako první je spuštěna procedura pro výpočet pravděpodobnosti vzniku nových ohnisek žíru přeletem (*bbo.spot_init*) a pravděpodobnosti rozšiřování ohnisek žíru (*bbo.spot_spread*),
- v dalším kroku je vypočítána pravděpodobnost napadení lesních porostů l. smrkovým modulem *bbo.spot_attack*, která kombinuje pravděpodobnost vzniku nových ohnisek žíru a pravděpodobnost rozšiřování ohnisek žíru,
- nakonec je vypočítána pesimistická, normální a optimistická prognóza vzniku ohnisek žíru l. smrkového pro následující rok (*bbo.prog_next_year*).

Pro účely validace modelů šíření l. smrkového byly vytvořeny procedury, které počítají prognózy zpětně podle parametrů uložených v konfiguračním souboru. Výpočet je spuštěn modulem *bbo.vld_spot*. Výsledky prognóz jsou poté porovnávány se skutečným stavem ohnisek žíru v uplynulém období. Pro každý rok je provedeno překrytí a porovnání prognóz a skutečného rozšíření ohnisek žíru l. smrkového modulem *bbo.vld_crosstab*.

Porovnání výsledků prognóz se skutečným stavem nebo porovnání prognóz vzniku ohnisek žíru l. smrkového, které byly odvozeny různými modely, lze provést i manuálně (modul *bbo.spot_valid*).

Pokud se v modelovém území vyskytla větrná kalamita, je nutné modifikovat pravděpodobnost napadení lesních porostů l. smrkovým. Výpočet je proveden modulem *bbo.spot_attack_aftrwnd*. Jeho vstupem je vrstva větrné kalamity. Po úpravě pravděpodobnosti napadení lesních porostů l. smrkovým je nutné ještě vypočítat i prognózu vzniku ohnisek žíru po ovlivnění lesa větrnou kalamitou.

System dovoluje pro výpočet prognóz použít i uživatelem zadané hodnoty IMS, čímž vlastně vytvoří tzv. ONP scénář. Flexibilní výpočet podle uživatelem zadaných hodnot ONP IMS je proveden modulem *bbo.mngmt_scenario1*.

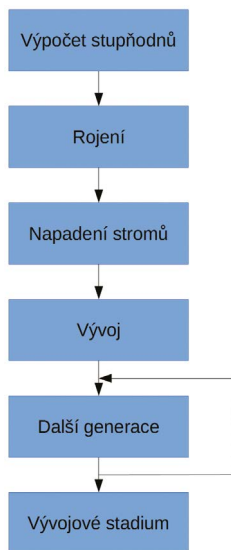
3.5.4 Model vývoje I. smrkového PHENIPS

Model PHENIPS slouží pro prognózu vývoje populací I. smrkového v průběhu jednoho roku. Všechny výpočty probíhají na denní bázi. Rastrové vrstvy jsou také uloženy pro jednotlivé dny v roce.

Základním vstupním údajem pro model PHENIPS jsou meteorologické údaje, především solární radiace, průměrná a maximální denní teplota. Před spuštěním modelu PHENIPS je proto nutné připravit uvedené rastrové vrstvy (3.4.2). Celkový postup modelování stupně vývoje I. smrkového je zobrazený na Obr. 21.

Moduly PHENIPS automaticky detekují den posledního spuštěného výpočtu na základě uložených rastrů a pokračují ve výpočtu pro následující den.

Model PHENIPS lze spustit dvěma způsoby: postupným (po jednotlivých dnech), nebo dávkovým (zpracuje celý rok). Inkrementální zpracování bylo implementováno pro potřeby on-line prognóz v průběhu roku, kdy je předpokládán denní přenos meteorologických údajů a výpočet prognóz vývojového stadia I. smrkového na základě aktuálních údajů. Dávkový výpočet je určen hlavně pro validaci modelu a dlouhodobé prognózy za měnících se klimatických podmínek.



Obr. 21: Modelování vývoje lýkožrouta smrkového

Dávkovou prognózu lze spustit modulem *bbo.phenips_run*. Modul zabezpečí automatické spuštění všech modulů potřebných pro výpočet pro období celého roku.

Při postupném zpracování jsou moduly manuálně spouštěny v pořadí, jak jsou uvedeny v menu systému. Systém vyhledá poslední den, pro který byl proveden výpočet, a pokračuje ve výpočtech pro další dny, pro které jsou k dispozici údaje z meteorologických stanic.

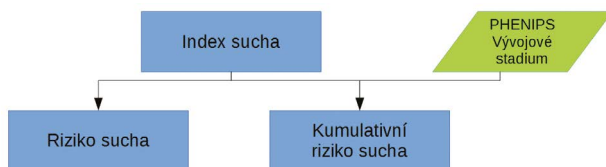
Pořadí spouštění modulů při postupném výpočtu:

- *bbo.phenips_dd*: vypočítá hodnoty stupňo-dnů teploty vzduchu a teploty kůry stromů,
- *bbo.phenips_swarming*: vypočítá den ukončení a délku období rojení první generace l. smrkového,
- *bbo.phenips_infestation*: vypočítá den ukončení a délku období napadení stromů první generací l. smrkového,
- *bbo.phenips_development*: vypočítá den ukončení a délku období vývoje l. smrkového pod kůrou stromů,
- *bbo.phenips_nextgen*: počítá období rojení, napadení stromů a vývoje pod kůrou stromů následujících generací l. smrkového, automaticky zjišťuje ukončení vývoje předcházející generace a začátek vývoje další,
- *bbo.phenips_stage*: sumarizuje vývoj l. smrkového v modelovém území, pro každou buňku rastru odvodí stupeň vývoje l. smrkového v daném dni (výstupem je posloupnost rastrů pro dny v roce).

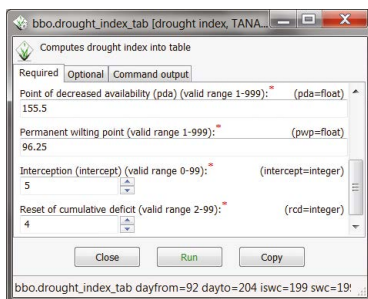
3.5.5 Výpočet rizika sucha

Mezi hlavní faktory, způsobující fyziologický stres, oslabení a následné napadení smrkových porostů l. smrkovým, patří sucho. V modelu TANABBO II je stres smrkových porostů, vyvolaný nedostatkem vláhy, vyjádřen prostřednictvím indexu sucha a kumulativního transpiračního deficitu (kap. 3.4.3 Riziko sucha). Součástí programu TANABBO II je knihovna pro výpočet indexu sucha, deficitu srážek a kumulativního transpiračního deficitu (Obr. 22).

Modul *bbo.drought_index_tab* slouží k ověření správnosti výpočtů pro konkrétní lokalitu (Obr. 23). Podle zadaných vstupních parametrů vypočítá hodnoty indexu sucha a kumulativního transpiračního deficitu pro zadané období v roce a údaje vypíše ve formě tabulky.



Obr. 22: Postup výpočtu rizika sucha

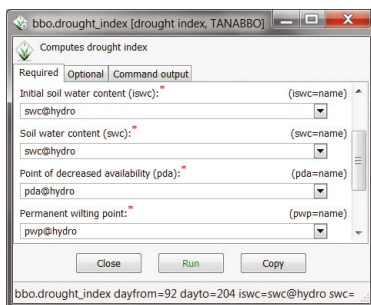


Obr. 23: Výpočet indexu sucha do tabulky

Vstupem pro výpočet jsou údaje o denní globální solární radiaci (*md_gsr_di.txt*), denních srážkách (*md_prec_di.txt*) a průměrné denní teplotě vzduchu (*md_tmean_di.txt*). Další parametry jsou zadávány interaktivně přes vstupní dialog modulu: období výpočtu, počáteční obsah vody v půdě, maximální kapilární kapacita půdy (MKK), bod snížené dostupnosti (BSD), bod vadnutí (BV), intercepce, počet dní pro restart kumulativního deficitu, prostorové rozložení deficitu srážek (*def_d<xxx>*), kumulativního transpiračního deficitu (*cdef_d<xxx>*) a indexu sucha (*di_d<xxx>*). Model pro výpočet ukazatelů sucha je aplikován na každou buňku rastru, která pokrývá modelové území. Pro každý den zadaného období v roce jsou vytvořeny samostatné rastry.

Vstupem do modulu *bbo.drought_index* (Obr. 24) jsou stejné parametry jako v případě tabulárního výpočtu. Aby bylo možné zohlednit lokální podmínky v různých oblastech modelovaného území, počáteční obsah vody v půdě, maximální kapilární kapacita půdy (MKK), bod snížené dostupnosti (BSD) a bod vadnutí (BV) jsou zadávány ve formě rastrů. Tím je možné pro každou buňku rastru nastavit samostatné vstupní hodnoty.

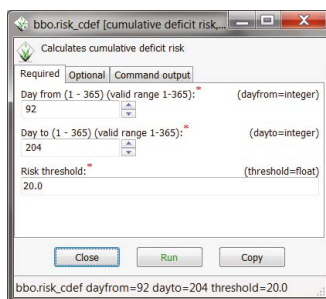
Při komplexnějším hodnocení rizika napadení smrkových porostů I. smrkovým je kromě stresu smrkových porostů, způsobeného nedostatkem srážek, vhodné vzít do úvahy i aktuální vývojové stadium I. smrkového. Po vytvoření prognózy vývojových stadií I. smrkového v území modelem PHENIPS (3.4.4) a prognóze ukazatelů sucha, jsou výsledky těchto dvou prognóz spojeny do integrovaných ukazatelů.



Obr. 24: Výpočet prostorového rozložení ukazatelů sucha

Prvním je ukazatel rizika sucha (modul *bbo.risk_di*), který vyhledá všechny buňky, v nichž nastalo rojení l. smrkového, a vyhodnotí současně, zda hodnota indexu sucha překročila zadaný limit. Výstupní rastr obsahuje hodnotu 2 v těch buňkách, kde je index sucha vyšší nebo roven zadané hodnotě, a zároveň je l. smrkový ve stadiu rojení. Do buněk, ve kterých je index sucha vyšší nebo roven zadané hodnotě nebo je l. smrkový ve stadiu rojení, je uložena hodnota 1. v ostatních buňkách rastru nejsou hodnoty definovány.

Druhým integrovaným ukazatelem je kumulativní riziko sucha, které je vypočítáno modulem *bbo.risk_cdef* (Obr. 25). Program nalezne buňky, ve kterých nastalo rojení l. smrkového a ve kterých zároveň hodnota kumulativního transpiračního deficitu překročila zadaný limit. Do těchto buněk je uložena hodnota 2. Do buněk, ve kterých je kumulativní transpirační deficit vyšší nebo roven zadanému limitu nebo je l. smrkový ve stadiu rojení, je uložena hodnota 1. V ostatních buňkách výstupního rastru nejsou hodnoty definovány.



Obr. 25: Výpočet rizika kumulativního transpiračního deficitu

4 NOVOST POSTUPŮ

Systém pro tvorbu předpovědí ohrožení smrkových porostů lýkožroutem smrkovým vychází z experimentálního systému TANABBO (KISSIYAR et al. 2005; JAKUŠ et al. 2005), jehož vhodnost pro krátkodobé prognózy napadení smrkových porostů l. smrkovým již byla testována na vybraných studijních územích. Navzdory tomu, že kontrolní a prognostická činnost v oblasti ochrany lesa je velmi dobře propracována, systém TANABBO II je inovativním přístupem k integraci většího množství dat a využitím různých technik prostorových analýz a modelování, čímž může výrazně přispět k vývoji prognostických nástrojů pro lesní hospodářství (zejména analytickou identifikací ohrožených porostů). Vyvíjený systém jde značně nad rámec upřesnění dosavadních postupů. Aktuální situace vývoje populace l. smrkového, prognostika letové aktivity l. smrkového a potenciální přístup těchto informací na internetu bude mimořádným přínosem do prognostiky v ochraně lesa.

V minulosti bylo v USA vyvinuto vícero databázových nebo na GIS založených modelů pro prognózy vývoje populací podkorního hmyzu (THATCHER et al. 1981). Správa národního parku Bavorský les vyvinula simulátor poškození porostů l. smrkovým při různých způsobech péče o chráněná území (FAHSE, HEURICH 2003). V evropských podmínkách je vyvíjen systém iLAND (<http://iland.boku.ac.at>), který obsahuje i modul pro prognózy napadení smrků l. smrkovým. Tento systém je vyvíjen především pro úroveň stromů na studijních plochách a související odvození a není zaměřen na využívání dat dálkového průzkumu země.

Model TANABBO II je inovativní, neboť se jedná o jeden z prvních systémů včasného varování před napadením l. smrkovým, využívající dálkového průzkumu země (DPZ) a GIS nejen v České republice, ale obecně pro podmínky smrkových ekosystémů.

5 POPIS UPLATNĚNÍ

Výstupy systému TANABBO II umožní časovou a prostorovou optimalizaci kritických opatření ochrany lesa (doba, do kdy je potřeba instalovat feromonové lapáče a lapáky; doba, do kdy je možné vykonat kvalitní asanaci dřevní hmoty apod.). Metodika je proto určena pro využití vlastníky lesů, lesními hospodáři, subjekty provádějícími lesnické činnosti, státní správou lesů, lesnickými výzkumnými ústavy a univerzitami při ochraně lesa před l. smrkovým. Výstupy modelu mohou pomoci lesnickému provozu identifikovat území se zvýšeným rizikem napadení l. smrkovým, poskytují systém pro operační ohodnocení aktuálního rizika gradace l. smrkového, informaci o předpokládaném začátku jeho letové aktivity a systém pro prostorovou detekci probíhajících gradací.

Je zřejmé, že systém není úplně jednoduchý a především připravava vhodných vstupních dat vyžaduje určitou zručnost při práci s databázemi. Proto potencionální uživatelé mohou požádat o spolupráci autory metodiky. Po zvládnutí základního na-programování, je uživateli umožněno interaktivně zasahovat do parametrů systému tak, aby byly při simulacích zohledněny specifické poznatky o principech a dynamice napadení porostů v jednotlivých územích.

6 EKONOMICKÉ ASPEKTY UPLATNĚNÍ

V souvislosti s užitím systému TANABBO II lze předpokládat snížení nákladů na obranná opatření v důsledku efektivního použití lapáčů a lapáků na vhodných místech v porostu, v ideálním období před předpokládaným rojením prognózovaným v rámci systému a ve vhodném množství (především úspora ze snížení celkové vynaložených lidských zdrojů, množství použitých obranných opatření).

Pro celé území ČR lze počítat se zvýšením přímých tržeb v důsledku aplikace adaptivních opatření. Objem kůrovcového dříví činí na území ČR přibližně 1,5 mil. m³. Při úspoře pouhých 5 %, tj. 75 tis. m³, dojde ke zvýšení zisku z 1 m³ v důsledku lepšího zpeněžení smrkového dříví v III. třídě jakosti (1900 Kč) oproti V. třídě jakosti (1000 Kč) o 900 Kč, což představuje cca 70 mil. Kč za rok. Vzhledem k tomu, že náklady na těžbu 1 m³ dříví (250 Kč/ m³), soustřeďování (250 Kč/ m³) a odvoz

(250 Kč/ m³) ve srovnání s úsporami vzniklými lepším zpeněžením kůrovcového vs. zdravého dříví (900 Kč) činí zisk 17 %. Snížení nákladů na obranná opatření použitá v nevhodných porostech, v nevhodné době a v nevhodném množství (především úspora ze snížení celkově vynaložených lidských zdrojů, množství použitých lapáků a lapačů). V případě úspory použitých stromových lapáků o pouhých 5 % (tj. 30 tis. lapáků z celkem 600 tis. lapáků připravených za rok na území ČR) ušetříme ročně 36 mil. Kč (1200 Kč za přípravu a asanaci jednoho lapáku) a úspory feromonových lapačů na lýkožrouty o pouhých 10 % (tj. 10 tis. lapačů ze 100 tis. lapačů používaných ročně na území ČR), získáváme úsporu 1000 Kč (lapač, instalace, odparník, obsluha) za rok, tj. celkem 10 mil. Kč. V rámci preventivních a adaptačních opatření může dojít ke snížení nahodilých těžeb před urychleným rozpadem smrkových porostů. Výchovní zásah v porostech do 40 let věku představuje náklady ve výši přibližně 50 tis. Kč na ha (cena práce: těžba 500 Kč/m³, soustředování 250 Kč/m³ a odvoz 250 Kč/m³; vytěží se cca 50m³ na ha; zpeněžení dříví cca 800 Kč/m³) a výnosy 40 tis. Kč. V případě úspory dvou tis. ha výchovných zásahů v oblastech postižených rozpadem smrkových porostů ušetříme ročně cca 20 mil. Kč.

7 DEDIKACE

Metodika byla zpracována v rámci řešení výzkumného projektu NAZV QJ1220317 „Integrované hodnocení dopadů hmyzích škůdců a houbových patogenů na smrkové porosty ČR jako východisko pro jejich operativní management“ a projektu NAZV č. QJ1330233 „Příprava legislativních, hospodářsko-úpravnických, mysliveckých a pěstitelsko-ochrannářských rámců jako nástrojů adaptace lesního hospodářství na změny přírodních a společenských podmínek“.

8 LITERATURA

8.1 Použitá literatura

- AHREND S. A., BURGESS N. D., MILLEDGE S. A. H., et al. 2010: Predictable waves of sequential forest degradation and biodiversity loss spreading from an African city. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107, 14556–14561.
- ALLEN R. G., PEREIRA L. S., RAES D., SMITH M. 1998: Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper, No. 56, FAO, Rome.
- ANNILA E. 1969: „Influence of the temperature upon the development and voltinism of *Ips typographus* L. (Coleoptera, Scolytidae).“ *Annales Zoologici Fennici*, 6, 161–207.
- BAIER P., PENNERSTORFER J., SCHOPF A. 2007: PHENIPS – a comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. *Forest Ecology and Management*, 249, 171–186.
- COULSON R. N., AMMAN G. D., DAHLSTEN D. L., DEMARS C. J. JR., STEPHEN F. M. 1985: Forest-bark beetle interactions: bark beetle population dynamics. In: Waters, W. E., Stark, R. W., Wood, D. L. (eds). *Integrated pest management in pine-bark beetle ecosystems*. John Wiley & Sons, New York, 61–80.
- ERIKSSON M., POUTTU A., ROININEN H. 2005: The influence of windthrow area and timber characteristics on colonization of wind-felled spruces by *Ips typographus* (L.). *Forest Ecology Management*, 216, 105–116.
- FAHSE L., HEURICH M. 2003: Bark beetles, spruces and computers. *Research for the Environment*. 4th edition. 12–19.
- GILBERT M., NAGELEISEN L. M., FRANKLIN A., GRÉGOIRE J. C. 2005: Post-storm surveys reveal large-scale spatial patterns and influences of site factors, forest structure and diversity in endemic bark-beetle populations. *Landscape Ecology*, 20(1), 35–49. E-ISSN 1572-9761.
- GRODZKI W., STARZYK J. R., KOSIBOWITZ M. 2006: Wiatrolomy i owady kambiofagiczne a problemy ochrony drzewostanów świerkowych w Tatrzańskim Parku Narodowym. In: Mirek Z., Godzik B. (eds.). *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek. Tom II. Nauki biologiczne*. 1. wyd. Zakopane: Tatrzański Park Narodowy, 103–112. ISBN 83-85832-95-5.

- HART S. J., VEBLEN T. T. 2015: Detection of spruce beetle-induced tree mortality using high- and medium-resolution remotely sensed imagery. *Remote Sensing of Environment*, 168, 134–145.
- HILCZANSKI J., JANISZEWSKI W., NEGRON J., MUNSON A. S. 2006: Stand characteristics and *Ips typographus* (L.) (Col., Cuculionidae, Scolytinae) infestation during outbreak in northern Poland. *Folia Forestalia Polonica, Series A*, 48, 53–64. ISSN 0071-6677.
- HLÁSNY T., TURČÁNI M. 2009: Insect pests as climate change driven disturbances in forest ecosystems. In: Střelcová K., Mátyás C., Kleidon A., Lapin M., Matejka F., Blaženec M., Škvarenina J. & Holécý J. (Eds.): *Bioclimatology and Natural Hazards*. Springer, Netherlands: 165–178.
- HLÁSNY T., BARCZA Z., FABRIKA M., BALÁZS B., CHURKINA G., PAJTÍK J. et al. 2011a: Climate change impacts on growth and carbon balance of forests in Central Europe. *Climate Research*, 47: 219–236.
- JÖNSSON A. M., HARDING S., BÄRRING L., RAVN H. P. 2007: Impact of climate change on the population dynamics of *Ips typographus* in southern Sweden. *Agricultural and Forest Meteorology*, 146, 70–81.
- JURC M., PERKO M., DŽEROSKI S., DEMŠAR D., HRAŠOVEC B. 2006: Spruce bark beetles (*Ips typographus*, *Pityogenes chalcographus*, Col.: Scolytidae) in the Dinaric mountain forest of Slovenia: monitoring and modeling. *Ecological Modeling*, 194 (1–3), Special Issue, 219–226. ISSN 0304-3800.
- KAUSRUD K., ØKLAND B., SKARPAAS O., GRÉGOIRE J. C., ERBILGIN N., STENSETH N. C. 2011: Population dynamics in changing environments: the case of an eruptive forest pest species. *Biological Reviews*, 87, 34–51.
- KAUTZ M., DWORSCHAK K., GRUPPE A., SCHOPF R. 2011: Quantifying spatio-temporal dispersion of bark beetle infestations in epidemic and non-epidemic conditions. *Forest Ecology and Management*, 262, 598–608.
- KISSIYAR O., BLAŽENEC M., JAKUŠ R., WILLEKENS A., JEŽIK M., BALAZŠ P., VAN VALCKENBORG J., CELER S., FLEISCHER P. 2005: TANABBO model - a remote sensing based early warning system for forest decline and bark beetle outbreaks in Tatra Mts.-overview. In: Grodzki W. (Ed.) *GIS and databases in the forest protection in Central Europe*. Forest Research Institute, Krakow, Poland, 15–34.
- KOMONEN A., SCHRODER L. M., WESLIEN J. 2011: *Ips typographus* population development after a severe storm in a nature reserve in northern Sweden. *Journal of Applied Entomology*, 135(1-2), 132–141. E-ISSN 1439-0418.

- KÖSTER K., VOOLMA K., JÖGISTE K., METSLAID M., LAARMANN D. 2009: Assessment of tree mortality after windthrow using photo-derived data. *Annales Botanici Fennici*, 46 (4), 291–298.
- LANGE H., OKLAND B., KROKENE P. 2006: Thresholds in the life cycle of the spruce bark beetle under climate change. *Interjournal for Complex Systems*, 1648, 1–10.
- LAUSCH A., FAHSE L., HEURICH M. 2011: Factors affecting the spatiotemporal dispersion of *Ips typographus* (L.) in Bavarian Forest National Park: a long-term quantitative landscape-level analysis. *Forest Ecology and Management*, 261, 233–245.
- MEDDENS A. J. H., HICKE J. A., VIERLING L. A., AND HUDAK A. T. 2013: Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 132, 49–58, doi:10.1016/j.rse.2013.01.002.
- MEZEI Z.A., BERECZKY Z., KATONA É., GINDELE R., BALOGH E., FIATAL S., BALOGH L., CZURIGA I., ÁDÁNY R., ÉDES I., et al. 2015: Factor XIII B Subunit Polymorphisms and the Risk of Coronary Artery Disease. *International Journal of Molecular Sciences*, 16, 1143–1159. doi: 10.3390/ijms16011143.
- NIINEMETS U. 2010: Mild versus severe stress and BVOCs: thresholds, priming and consequences, *Trends in Plant Science*, 15, 145–153.
- OCHTYRA A., ZAGAJEWSKI B., KOZŁOWSKA A., MARCINKOWSKA-OCHTYRA A., JAROCINSKA A. 2016: Assessment of the condition of forests in the Tatra National Park using decision tree method and multispectral Landsat TM satellite images. *Sylwan*, 160, 256–264.
- PLAŠIL P., CUDLÍN P. 2005: Population dynamics of eight-toothed spruce bark beetle (*Ips typographus* [L.]) in the area of National Nature Reserve Praděd in 1998–2001. *Journal of Forest Science*, 51 (8), 359–370.
- POYATOS R., LLORENS P., GALLART F. 2005: Transpiration of montane *Pinus sylvestris* L. and *Quercus pubescens* Willd. forest stands measured with sap flow sensors in NE Spain. *Hydrology and Earth System Sciences* 9, 493–505.
- ROUAULT G., CANDAU J., LIEUTIER F., NAGELEISEN L., MARTIN J., WARZEE N. 2006: Effects of drought and heat on forest insect populations in relation to the 2003 drought in Western Europe. *Annals of Forest Science*, 63, 613–624.
- SCHIEBE C., BLAŽENEC M., JAKUŠ R., UNELIUS C. R., SCHLYTER F. 2011: Semiochemical diversity diverts bark beetle attacks from Norway spruce edges, *Journal of Applied Entomology*, 135 (10), 726–737.

- SCHROEDER L. M., LINDELÖW A. 2002: Attacks on living spruce trees by bark beetle *Ips typographus* (Col. Scolytidae) following a storm felling: a comparison between stands with and without removal of wind-felled trees. *Agriculture and Forest Entomology*, 4, 47–56.
- SCHWENKE W. 1974: Die forstschädlinge Europas, Zweiter Band: Käfer. Verlag Paul Parey, 85–128.
- SEIDL R., FERNANDES P. M., FONSECA T., GILLET F., JÖNSSON A. M., MERGANIČOVÁ K., NETHERER S., ARPACI A., BONTEMPS J. D., BUGMANN H., GONZÁLES-OLABARRIA J. R., LASCH P., MEREDIEU C., MOREIRA F., SCHELHAAS M. J., MOHREN F. 2011. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecological Modelling*, 222 (4), 903–924. E-ISSN 1872–7026.
- THATCHER R.C., SEARCY J.L, COSTER J.E., HERTEL G.D. (Editors) 1981: The southern pine beetle. Technical Bulletin, Science and Education Administration, United States Department of Agriculture, Forest Service No. 1631 <http://www.barkbeetles.org/spb/spbbook/Index.html> (5 Dec 2016).
- TURC L. 1961: Estimation of irrigation water requirements, potential evapotranspiration: a simple climatic formula evolved up to date. *Annals of Agronomy*, 12, 13–49.
- VILHAR U., SIMONČIČ P. 2012: Water status and drought stress after gap formation in managed and semi-natural silver fir-beech forests. *European Journal of Forest Research*, 131, 1381–1397.
- WERMELINGER B. 2004: Ecology and management of the spruce bark beetle *Ips typographus* – a review of recent research. *Forest Ecology and Management*, 202, 67–82.
- WESLIEN J. 1992: The arthropod complex associated with *Ips typographus* (L) (Coleoptera, Scolytidae), species composition, phenology, and impact on bark beetle productivity. *Entomologica Fennica*, 3, 205–213.
- WESLIEN J., ANNILA E., BAKKE A., BEJER B., EIDMANN H. H., NARVESTAD K., NIKULA A., RAVN H. P. 1989: Estimating risk for spruce bark beetle (*Ips typographus* (L.)) damage using pheromone-baited traps and trees. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 4, 87–98.
- WULDER M. A., SKAKUN R. S., FRANKLIN S. E., WHITE J. C. 2005: Enhancing forest inventories with mountain pine beetle infestation. *Forestry Chronicle*, 81, (1), 149–159.

8.2 Publikace, které předcházely metodice

- BALÁŽ P., STŘELCOVÁ, M. BLAŽENEC M., POKORNÝ, KLIMÁNKOVÁ 2009: assessment of water deficiency in forest ecosystems: can a simple model of forest water balance produce reliable results? In: Střelcová K., Mátyás C., Kleidon A., Lapin M., Matejka F., Blaženec M., Škvarenina J., Holécý J. (Eds.) Bioclimatology and Natural Hazards. Springer, 207–216.
- HAVAŠOVÁ, M., BUCHA, T., FERENČÍK, J., JAKUŠ, R. 2015: Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. *Annals of Forest Research*, 58, 295–310.
- HLÁSNÝ T., HOLUŠA J., ŠTĚPÁNEK P., TURČÁNI M., POLČÁK N. 2011b: Expected impacts of climate change on forests: Czech Republic as a case study. *Journal of Forest Sciences*, 57, 422–43.
- HLÁSNÝ T., ZAJÍČKOVÁ L., TURČÁNI M., HOLUŠA J., SITKOVÁ Z. 2011c: Geographical variability of spruce bark beetle development under climate change in the Czech Republi. *Journal of Forest Sciences* 57, 2011 (6), 242–249.
- JAKUŠ R. 1998: a method for the protection of spruce stands against *Ips typographus* by the use of barriers of pheromone traps in north-eastern Slovakia. *Anzeiger für Schadlingskunde Pflanzenschutz Umweltschutz* 71, 152–158.
- JAKUŠ R., GRODZKI W., JEŽÍK M., JACHYM M. 2003: Definition of spatial patterns of bark beetle *Ips typographus* (L.) outbreak spreading in Tatra Mountains (Central Europe), using GIS. In: McManus M. & Liebhold A. (eds.): Ecology, survey and management of forest insects. Proceedings of the conference. USDA Forest Service, Warren, 25–32.
- JAKUŠ R., JEŽÍK M., KISSIYAR O., BLAŽENEC M. 2005: Prognosis of bark beetle attack in TANABBO model. In: Grodzki W. (ed.): GIS and databases in the forest protection in Central Europe. Centre of Excellence PROFEST at the Forest Research Institute, Warsaw, Poland, 35–44.
- JAKUŠ R., KOREŇ M., BARKA I., MEZEI P., BLAŽENEC M., HOLUŠA J. (in prep): The use of LANDSAT based time series for bark beetle outbreak diagnostics: TANABBO decision support system.
- KISSIYAR O., BLAŽENEC M., JAKUŠ R., WILLEKENS A., JEŽÍK M., BALÁŽ P., VALCKENBORG J. V., CELER S., FLEISCHER P. 2005: TANABBO model – a remote sensing based early warning system for forest decline and bark beetle outbreaks in Tatra Mts. - overview. In: Grodzki W. (ed.): GIS and databases in the forest protection in Central Europe. Centre of Excellence PROFEST at the Forest Research Institute, Warsaw, Poland, 15–34.

- KNÍŽEK, M., LIŠKA, J., MODLINGER, R. 2016: Zpravodaj ochrany lesa: Výskyt lesních škodlivých činitelů v roce 2015 a jejich očekávaný stav v roce 2016. Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, 2016, 70.
- KOREŇ M. (ed.) 2016: Model šírenia podkorného hmyzu TANABBO. Príručka užívateľa. Verzia 1.20. Dostupné na www.tanabbo.org
- LUBOJACKY J., HOLUŠA J. 2011: Comparison of spruce bark beetle (*Ips typographus*) catches between treated trap logs and pheromone traps. Usporedba ulova smrekinog pisara (*Ips typographus*) na kemijski tretiranim lovnim trupčicama i feromonskim klopama. Šumarski list 135, 233–242.
- LUBOJACKY J., HOLUŠA J. 2013: Comparison of lure-baited insecticide-treated tripod trap logs and lure-baited traps for control of *Ips duplicatus* (Coleoptera: Curculionidae). Journal of Pest Science, 86, 483–489. DOI 10.1007/s10340-013-0492-z.
- LUBOJACKÝ J., HOLUŠA J. 2014: Attraction of *Ips typographus* (Coleoptera: Curculionidae) beetles by lure-baited insecticide-treated tripod trap logs and trap trees. International Journal of Pest Management, 60 (3), 153–159. DOI: 10.1080/09670874.2014.944610
- MEZEI P., GRODZKI W., BLAŽENEC M., JAKUŠ R. 2014a: Factors influencing the wind-bark beetles' disturbance system in the course of an *Ips typographus* outbreak in the Tatra Mountains. Forest Ecology and Management, 312, 67–77.
- MEZEI P., GRODZKI W., BLAŽENEC M., ŠKVARENINA J., BRANDÝSOVÁ V., JAKUŠ R. 2014b: Host and site factors affecting tree mortality caused by the spruce bark beetle (*Ips typographus*) in mountainous conditions. Forest Ecology and Management, 331, 196–207.

TANABBO II - MODEL OF RISK ASSESSMENT INFESTATION OF FOREST BY BARK BEETLE *IPS TYPOGRAPHUS* (L.) [COLEOPTERA: CURCULIONIDAE]

Summary

Reliable prognosis of bark beetle attack could help foresters to optimize pest management. It could also give information to support the decision related to no-management approaches in protected areas. TANABBO model has been recently reformulated into model TANABBO II, representing a system providing maps and statistical evaluation of the risk of stands infested by bark beetle. User will be able interactively work with the parameters of system so that the specific knowledge of the principles and dynamics assault stands in each territory could be implemented.

The model is based on the use of environmental data and data from forest management plans. Operational part of model is rating system for assessing the predisposition of forest to bark beetle attack. It was developed on the basis of the known causal relationships between outbreaks and environmentally-related parameters. The relevant criteria were identified by means of thorough review of respective literature (PHENIPS model) and incorporated in a science-based model. Prognosis of damage spread by bark beetles is based on the synthesis of many factors that affect the risk of forest pest attack. Basis for work on prognosis of bark beetle attack (prognostic part) is a map of available spruce area and results from time series analysis of attack in study area in previous year. Time series analyses are performed on LANDSAT TM images. Prognosis of bark beetle attack probability is based on combination of probability of bark beetle spot initialization and probability of spreading of bark beetle spots.

Program TANABBO II is available on the www.tanabbo.org. Registered users have access to current and previous versions of the program. In the Download section there are instructions for installing the program, links to source code and user manual.

10 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Schéma programu TANABBO II (KOREŇ 2016)	10
Obr. 2: Klasifikace ohnisek žíru lýkožrouta smrkového na území Vojenských lesů a statků ČR, s.p., divize Horní Planá v letech 1994-2011 (příkladová studie, rozloha lesů 16 569 ha) (JAKUŠ et al. in prep.)	19
Obr. 3: Průměrné vzdálenosti přeletu a rozšiřování ohnisek žíru lýkožrouta smrkového na území Vojenských lesů a statků ČR, s.p., divize Horní Planá v letech 1994-2011 (příkladová studie, rozloha lesů 16 569 ha) (JAKUŠ et al. in prep.)	20
Obr. 4: Počet buněk přeletu a rozšiřování lýkožrouta smrkového na území Vojenských lesů a statků ČR, s.p., divize Horní Planá v letech 1994-2011 (příkladová studie, rozloha lesů 16 569 ha) (JAKUŠ et al. in prep.)	20
Obr. 5: Výstup modulu pro prognózu indexu mortality smrku	21
Obr. 6: Vývoj indexu mortality smrku na modelovém území Vojenských lesů a statků ČR, s.p., divize Horní Planá v letech 1994-2011 (příkladová studie, rozloha lesů 16 569 ha) (JAKUŠ et al. in prep.)	22
Obr. 7: Pravděpodobnost napadení smrkových porostů lýkožroutem smrkovým	28
Obr. 8: Kumulativní hodnoty stupňo-dnů na území Horní Planá (168. den)	33
Obr. 9: Den ukončení vývoje první generace lýkožrouta smrkového na území Horní Planá	33
Obr. 10: Prognóza stupně vývoje lýkožrouta smrkového (185. den)	35
Obr. 11: Roční solární radiace na území Horní Planá	37
Obr. 12: Průměrná denní roční teplota vzduchu pro území Horní Planá (168. den)	39

Obr. 13: Schéma vztahu pro stanovení hodnoty aktuální transpirace (přerušovaná čára) na základě aktuálního obsahu vody v půdě (os_x). MKK = maximální kapilární kapacita, BSD = bod snížené dostupnosti, BV = bod vadnutí, P_{Tn} = potenciální transpirace v den n	41
Obr. 14: Kumulativní transpirační deficit (151. den)	42
Obr. 15: Schéma výpočtu	44
Obr. 16: Úvodní okno systému GRASS GIS	45
Obr. 17: Výběr kartografické transformace	46
Obr. 18: Postup naplnění geografické databáze	48
Obr. 19: Modul pro výpočet potenciální solární radiace	50
Obr. 20: Výpočet prognózy šíření ohnisek lykožrouta smrkového	51
Obr. 21: Modelování vývoje lykožrouta smrkového	53
Obr. 22: Postup výpočtu rizika sucha	55
Obr. 23: Výpočet indexu sucha do tabulky	55
Obr. 24: Výpočet prostorového rozložení ukazatelů sucha	56
Obr. 25: Výpočet rizika kumulativního transpiračního deficitu	57



Výzkumný ústav
lesního hospodářství
a myslivosti, v. v. i.

www.vulhm.cz

LESNICKÝ PRŮVODCE 1/2017