



ACTA FACULTATIS FORESTALIS ZVOLEN

**51(3)
2009**

**Špeciálne číslo projektu
Centra excelentnosti
Adaptívne lesné ekosystémy**

**Special Issue of the Project
of the Centre of Excellence
Adaptive Forest Ecosystems**

TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE

Predseda redakčnej rady/Editor in Chief
Prof. Ing. Rudolf Kropil, CSc.

Vedecký redaktor/Managing editor
Doc. Ing. Dušan Gömöry, CSc.

Redakčná rada/Editorial board
Prof. Ing. Peter Garaj, CSc.
Doc. Ing. Juraj Gregor, CSc.
Prof. Ing. Iveta Hajdúchová, PhD.
Prof. Ing. Valéria Messingerová, CSc.
Prof. Ing. Ladislav Paule, PhD.
Prof. Ing. Milan Saniga, DrSc.
Doc. Dr. Ing. Jaroslav Šálka
Prof. Ing. Anton Žíhla, CSc.
Prof. Ing. Štefan Žíhla, CSc.

OBSAH – CONTENTS – INHALT

Kropil R., Pichler V., Šálka J., Saniga M.: Centrum excelentnosti „Adaptívne lesné ekosystémy“: metodické aspekty	9
Centre of excellence “Adaptive Forest Ecosystems” – methodical aspects.....	9
Škvarenina J., Vida T.: Metodologické aspekty hodnotenie sucha a rizika lesných požiarov v meniacich sa podmienkach klímy na Slovensku.....	17
Methodology aspects of drought and forest fire danger assessment in changing conditions of climate in the Slovak republic	17
Gömöryová E., Pichler V.: Cyklus vody, uhlíka a živín – metodologické aspekty štúdia dynamiky a priestorovej variability vybraných komponentov cyklu uhlíka v lesných pôdach	35
Water, carbon and nutrient cycles 0 methodological aspects of the study of temporal and spatial variability of the selected carbon cycle components in forest soils	35
Homolák M., Pichler V., Gregor J.: Cyklus vody, uhlíka a živín – kvantitatívne indikátorové experimenty v lesných pôdach	45
Water, carbon and nutrients cycles-quantitative clye tracer experiments in forest soil	45
Jakubis M., Jakubisová M.: Zmeny odtoku v malých povodiach Vysokých Tatier po disturbancii lesných ekosystémov vetrovou kalamitou.....	55
The changes of runoff small watersheds of High Tatras after disturbance of forest ecosystems by wind calamity	55
Kmeť J., Ditmarová L., Kurjak D.: Fyziologicko-biochemické parametre ako možné bioindikátory stresu zo sucha	67
Physiological and biochemical parameters as potential drought stress indicators....	67
Saniga M., Balanda M., Jaloviar P.: Výskum štruktúry, produkcie, nekromasy, rizológie a regeneračných procesov prírodných lesov Slovenska.....	77
The research of structure, necromass, rhizology and regeneration processes of natural in Slovakia	77

Gömöry D., Paule L., Ďurkovič J., Kučerová V.: Hodnotenie genetickej variability endemických druhov rodu <i>Sorbus</i>	89
Assessment of the genetic variation of endemic <i>Sorbus</i> taxa	89
Fabrika M., Střelcová K., Magová D.: Empirický model transpirácie buka v rastovom simulátore SIBYLA.....	99
Empirical model for transpiration of European beech in tree growth simulator.....	99
Merganič J., Fabrika M.: Tvorba klimaticko-stanovištných strát na báze korigovaných klimatických rastrov pre účely modelu hustoty prirodzeného zmladenia	113
Determination of climatic-site strata based on rectified climatic rasters for the purposes of natural regeneration density model.....	113
Fabrika M., Merganič J., Merganičová K.: Model hustoty prirodzeného zmladenia pre účely stromového rastového simulátora	125
Natural regeneration density model developed for the purposes of the individual-tree growth simulator	125
Žíhľavník A.: Možnosti regulácie ťažieb metódou matematických modelov v lesných užívateľských celkoch s nepravidelnými vekovými štruktúrami.....	139
The possibilities of cutting control by the method of mathematical models in forest user units with irregular age structures	139
Laurová M., Kačík F.: Vznik sacharidov a prchavých látok pri predhydrolyze topoľového dreva.....	153
Arising of saccharides and volatile compounds at poplar wood (<i>Populus tremula</i> L.) prehydrolysis.....	153
Messingerová V., Stanovský M., Ferenčík M., Slugeň J., Kováčik P., Kindernay D.: Metodika merania vybraných ergonomických charakteristík ťažbovo-dopravných technológií.....	163
Design of the methodology for measurement of selected ergonomic characteristics in wood harvesting proces	163

Slugeň J., Ferenčík M., Messingerová V., Stanovský M., Kindernay D., Kováčik P.: Metodika stanovenia poškodzovania porastovej pôdy harvesterovými technológiami	175
Methods of evaluating forest soil damage by cut-to-length technologies.....	175
Šálka J., Fodrek L., Dobšínská Z.: Stratégia transformácie verejnoprospešných funkcií lesa na trhové statky	191
Transformation strategy of forest recreational and environmental functions into market goods	191

CENTRUM EXCELENTNOSTI „ADAPTÍVNE LESNÉ EKOSYSTÉMY“: METODICKÉ ASPEKTY

Rudolf K R O P I L – Viliam P I C H L E R – Jaroslav Š Á L K A
– Milan S A N I G A

Kropil, R., Pichler, V., Šálka, J., Saniga, M.: Centre of excellence “Adaptive Forest Ecosystems” – methodical aspects. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 9–16, 2009.

Project centre of excellence “Adaptive Forest Ecosystems” was approved in operational program „Research and Development“ in priority line 2 “Support of Research and Development“ and action “2.1 Support of networks of excellent workplaces of research and development as pillar of regional development and support of supraregional cooperation.“ The project objective is to interconnect cooperation among leading forestry oriented organization (Faculty of Forestry of Technical University, Faculty of Wood Sciences and Technology, Forest Research Institute NFC and Institute of Forest Ecology SAS), support undergoing and future research of conditions and methods of forestry and long time enlargement of area of adaptive forest ecosystems in the territory of Slovakia. The project solves the activities in the frame of individual specific objectives as follows: 1. Establishment of adaptive stand structures and increase of stability of forest ecosystems: Activity 1.1 Dynamics of primeval and natural forest ecosystems. Activity 1.2 Stability and conservation of forest stands. Activity 1.3 Modelling growth processes of forest ecosystems. Activity 1.4 Ecologically suitable utilisation of forest ecosystems. Activity 1.5 Target wood quality. 2. Slowing matter-energetic flow through forest ecosystems. Activity 2.1 Global and regional changes. Activity 2.2. Water, carbon and nutrition cycles. Activity 2.3 Disturbance and meliorations of forest ecosystems. Activity 2.4 Biomass and chemical composition of wood. 3. Conservation of biodiversity and rational utilisation of forest ecosystems: Activity 3.1 Diversity of wooden plants and herb layer assemblage. Activity 3.2 Diversity of invertebrates. Activity 3.3 Diversity of vertebrates. Activity 3.4 Game management. 4. Provisioning of forest ecosystem function for increasing life quality: Activity 4.1 Market with forestry services. Activity 4.2 Evaluation of community functions of forest ecosystem and divisions. Activity 4.3 Integration of community function of forests to market mechanisms. Activity 4.4 Optimalization of intersector relations of forestry – innovation of forestry politics. Activity 4.5 Building and modernisation of information and communication technologies. In the paper, we characterize basic specific objectives, individual activities and introduce their methodical aspects. This paper is the introductory contribution to two issues of the journal *Acta Facultatis Forestalis*.

Key words: Centre of Excellence, forestry research, forest environment, biodiversity, forest ecosystems, technologies, forest policy

Projekt „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“ bol schválený v operačnom programe „Výskum a vývoj“ v prioritnej osi 2 „Podpora výskumu a vývoja“ a opatrení „2.1 Podpora sietí excelentných pracovísk výskumu a vývoja ako pilierov

rozvoja regiónu a podpora nadregionálnej spolupráce“. Jeho úlohou je prepojenie spolupráce popredných lesnícky orientovaných pracovísk, ktoré dlhodobo dosahujú medzinárodne uznávané výsledky, podporiť prebiehajúci a budúci výskum podmienok a metód pestovania a dlhodobého zväčšovanie rozlohy adaptívnych lesných ekosystémov na území Slovenska. Ide o pracoviská (Lesnícka fakulta TU, Drevárska fakulta TU, Lesnícky výskumný ústav NLC a Ústav ekológie lesa SAV), ktoré sú nositeľmi navrhovaných aktivít tohto projektu, ako aj predstaviteľov významných národných a európskych výskumných aktivít. Jedná sa najmä o projekty 6. rámcového programu EFORWOOD (Tools for Sustainability Impact Assessment of Forestry-Wood Chain, Integrovaný projekt), ktorého cieľom je integrácia nástrojov pre odhad vplyvu trvalej udržateľnosti v lesnícko-drevárskom reťazci, EVOLTREE (Evolution of Trees as Drivers of Terrestrial Biodiversity, Sieť excelencie), ktorá je zameraná na identifikáciu génov s adaptívnym významom a identifikáciu evolučných procesov v rámci populácií a spoločenstiev lesných drevín, ďalej „Spojené národné centrum výskumu pralesov temperátnej zóny pri LF TU vo Zvolene“, a „Spoločné laboratórium LF TU vo Zvolene a LVÚ pre analýzy DNA“ ako unikátne pracoviská. Schválený projekt „Centra excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“ v operačnom programe „Výskum a vývoj“ s rozpočtom takmer 1,3 mil. € má týmto spôsobom vytvoriť kritickú kapacitu na kreovanie zodpovedajúceho poznatkového rámca. V tomto čísle časopisu Lesníckej fakulty Technickej univerzity vo Zvolene Acta Facultatis Forestalis je predložená prvá časť vedeckých príspevkov zameraných na metodologické aspekty, parametre a modely procesov a technológií prebiehajúcich a aplikovaných v lesných ekosystémoch. Druhá časť bude publikovaná v prvom čísle AFF v roku 2010.

Výskum adaptívnych lesných ekosystémov má domácu a európsku dimenziu, pretože lesné ekosystémy boli dlhodobo pestované a obhospodarované spôsobom odrážajúcim relatívnu stálosť podmienok prostredia v celej temperátnej zóne Európy. Ich transformácia na adaptívne lesné ekosystémy sa bude logicky primárne opierať o postupy a nástroje vedného odboru „Pestovanie lesa“ založené na zvýšených podieloch komponentov dynamiky prírodných lesov. Realizácia projektu poskytne nadväzujúce impulzy pre komplexný rozvoj vidieckej krajiny a zvýšenie zamestnanosti v sociálne najcitlivejších regiónoch, predovšetkým integráciou verejnoprospešných funkcií lesov do trhového mechanizmu.

Takto definované hlavné zameranie projektu je priamou odozvou na potrebu podpory excelentného výskumu v oblasti starostlivosti o lesné ekosystémy, ktoré má strategický význam pre ďalší rozvoj hospodárstva a spoločnosti, nakoľko lesy pokrývajú viac ako 40 % územia SR. Okrem toho odráža záujem väčšiny európskych krajín v oblasti lesníctva, Európskej technologickej platformy, sektora založeného na lesoch a jej strategickej výskumnej agendy, a má tak preukázateľný potenciál stimulovať záujem zahraničných výskumných inštitúcií o spoluprácu s riešiteľskými organizáciami navrhovaného projektu doma.

Je to preto, že globálne a regionálne zmeny vyvolávajú nerovnováhu medzi súčasným stavom lesných ekosystémov, podmienkami prostredia a očakávaniami spoločnosti. V dôsledku toho sa zvyšuje fragmentácia lesných ekosystémov, dochádza k redukcii biodiverzity, ale predovšetkým sa v období niekoľkých posledných desiatok rokov zvyšuje frekvencia extrémnych poveternostných situácií. V nadväznosti na tieto procesy dochádza

k ekosystémovým disturbanciám veľkého rozsahu, zrýchľovaniu látkovo-energetických cyklov, strate biodiverzity, zhoršovaniu kvality života, k limitovanej dostupnosti prírodných zdrojov a celých území, napr. v dôsledku polomov a požiarov, a tým aj k vážnemu obmedzovaniu možnosti uspokojovania spoločenských potrieb. Tento vývoj sa cestou spätnej väzby ešte znásobuje, čím sa zreteľne odlišuje od prirodzenej dynamiky ekosystémov, ktorá zákonite zahŕňa narušenia a obnovu rovnováhy (HUSTON 1979, NAGEL, DIACI 2006).

Infraštruktúra dobudovaná v priebehu navrhovaného projektu, prepojenie najvýznamnejších pracovísk a ich spoločná účasť na medzinárodné kooperáciách, najmä formou participácie na európskych projektoch posilnia kapacity vedného odboru Pestovanie lesa a ďalších príbuzných odborov lesníckych vied. Výsledkom toho bude generovanie poznatkovej bázy nevyhnutnej pre výchovu porastov schopných prispôsobiť sa rýchlo sa meniacim podmienkam vďaka prirodzenej ekologickej plasticite druhov, flexibilnému druhovému zloženiu a porastovým štruktúram s vysokým potenciálom disipovať koncentrované toky látok a energie. Zároveň však budú poznatkovo riešené aj otázky technických, technologických a socio-ekonomických rámcov, ktoré takéto zameranie pestovania lesa ako praxe lesného hospodárstva podmieňujú, pretože predchádzajúce pokusy o takýto krok priniesli iba čiastkové výsledky. Príčinou toho bolo, že lesné hospodárstvo sa pokúšalo všetky požiadavky kladené spoločnosťou na lesné ekosystémy riešiť vlastnými silami, bez analýzy dopadov a dostatočného premietnutia potrieb trvalej udržateľnosti prostredníctvom medzisektorových vzťahov.

Komplexnosti uvedeného cieľového stavu zodpovedá voľba aktivít zameraných na jeho dosiahnutie. Tieto sa budú prekrývať so 6-timi z 12-tich priorít Dlhodobého zámeru štátnej vednej a technickej politiky do roku 2015, menovite:

1. Zdravie – kvalita života: pôjde o výskum zamedzenia kontaminácie potravných reťazcov v lesných ekosystémoch, ktorých súčasťou je človek, t. j. najmä zabránením kontaminácie lesných plodov a diviny redukciou využívania insekticídov v rámci ekologizácie produkcie potravín a požívatín prostredníctvom prírody blízkyh, stabilných a adaptívnych porastových a ekosystémových štruktúr.
3. Biotechnológie: výskum bude zameraný na procesy za účasti mikroorganizmov a ich enzýmov, najmä prostredníctvom fermentácie a katalýzy, a ich využitie na dosiahnutie požadovaných vlastností dreva z menej hodnotnej drevnej suroviny, pochádzajúcej z porastov na chudobnejších stanovištiach resp. zo stromov v nevýhodnom sociálnom postavení z hľadiska porastových štruktúr, pre chemický a celulózo-papierenský priemysel.
6. Energia a energetika: výskum sa bude dotýkať zvýšenia energetickej využiteľnosti biomasy ako obnoviteľného zdroja energie prostredníctvom štúdií procesov hydrolýzneho a pyrolýzneho spracovania zdrojov biomasy a optimalizácie týchto procesov.
10. Využívanie, ochrana a reprodukcia biologických zdrojov: Z hľadiska projektu ide o kľúčovú prioritu. Výskum bude zameraný na podmienky a cesty kreovania a rozširovania rozlohy adaptívnych lesných ekosystémov, vyznačujúcich sa vysokou ekologickou stabilitou, biodiverzitou a schopnosťou adaptácie na globálne zmeny na úrovni druhov a štruktúr, ktoré budú umožňovať racionálne využívanie prírodných zdrojov a funkčného potenciálu krajiny. Výskum sa bude dotýkať aj spôsobu využitia

verejnoprospešných funkcií lesov prostredníctvom ich integrácie do trhového mechanizmu, čím sa docieli zvýšenie podielu miestneho obyvateľstva na príjmoch z využívania zdrojov pochádzajúcich z lesného prostredia a v ňom sa obnovujúcich.

11. Ochrana životného prostredia: Výskum sa zameria na vytváranie kvalitného životného prostredia pre obyvateľstvo prostredníctvom spomaľovania látkových a energetických tokov prechádzajúcich cez lesné ekosystémy, na zvyšovanie ich retenčnej a transformačnej kapacity, ako aj na tlmenie frekvencie a rozsahu extrémnych udalostí ako sú povodne alebo požiare.
12. Využitie domácich surovinných zdrojov: Výskum kvality dreva ako jedného z produktov prírodných a zmenených lesných ekosystémov bude zameraný na komparáciu týchto ekosystémov z pohľadu vlastností produkovanej drevnej suroviny a odporúčaného následného využitia pre využitie v ďalších sektoroch národného hospodárstva s vyššou úrovňou finalizácie.

Koordináciu riešenia navrhovaného projektu vo väzbe na ciele výzvy, vybrané priority Dlhodobého zámeru štátnej vednej a technickej politiky do roku 2015, strategický cieľ projektu a zameranie, zabezpečuje hlavný riešiteľ projektu v spolupráci s koordinátormi špecifických cieľov a aktivít. Na úrovni riadenia projektu je riadenie zabezpečené prostredníctvom projektového manažéra. Prvou oblasťou je riadenie odborných aktivít spolu s asistentom projektového manažéra a koordinátormi jednotlivých špecifických cieľov žiadateľa a partnerov. Druhá oblasť spočíva v riadení administratívno-finančného charakteru v spolupráci s manažermi verejného obstarávania a finančnými manažermi žiadateľa a partnerov. Treťou oblasťou riadenia bude riadenie publicity a informovanosti v spolupráci s manažérom publicity. Štvrtá oblasť riadenia pozostáva s riadenia monitoringu projektu v spolupráci s manažérom monitoringu projektu.

Riešenie navrhovaného projektu predpokladá dosiahnutie štyroch špecifických cieľov:

1. Adaptívne štruktúry a stabilita lesných ekosystémov;
 2. Spomalenie látkovo-energetických cyklov;
 3. Ochrana biodiverzity a racionálne využívanie lesných ekosystémov;
 4. Zvyšovanie kvality života zabezpečovaním funkcií lesných ekosystémov.
- Pre splnenie uvedených špecifických cieľov boli vybrané a zoradené príslušné aktivity, ktoré vzájomne nadväzujú podľa tematickej a časovej osi.

Obsahové zameranie a spojenie odborných a infraštruktúrnych kapacít niekoľkých pracovísk v rámci špecifického cieľa č.1 svojím uceleným riešením zásadným spôsobom novelizuje množstvo a kvalitu informácií, s ktorými sa bude narábať v rámci návrhov a postupov starostlivosti o lesné ekosystémy, a zároveň zásadným spôsobom rozširuje spektrum dostupných nástrojov využiteľných za týmto účelom. Koordinátor špecifického cieľa v spolupráci s koordinátormi aktivít zabezpečí, aby počas riešenia došlo k zosieťovaniu zainteresovaných pracovísk a periodicky sa uskutočňovali výmeny získaných poznatkov medzi jednotlivými aktivitami. Technické aspekty tejto výmeny a integrácie aktivít na báze IKT budú pravidelne riešené prostredníctvom aktivity 4.5 špecifického cieľa č. 4.

V rámci aktivít 1.2 „Stabilita a ochrana porastov“ a 1.5 „Cieľová štruktúra dreva“ budú definované zásadné príčiny a mechanizmy oslabovania stability lesných porastov a možnosti a spôsoby ich ochrany, ako aj očakávané požiadavky drevárskeho priemyslu na vlastnosti dreva a štruktúru sortimentov. Koncentrácia a syntéza kvantitatívnych poznatkov

a parametrizovaných modelov z viacerých oblastí, reprezentovaných aktivitami 2.2, 3.1, 3.2 a 3.3 vytvorí unikátny poznatkový rámec, z hľadiska platformy pestovania lesa úzko previazaný s riešenou problematikou. Vstupy týchto aktivít reprezentujúcich všetky špecifické ciele budú zohľadnené ako nutné podmienky riešenia aktivity č. 1.1 – „Adaptívne štruktúry a stabilita lesných ekosystémov“.

V jej rámci budú nadobudnuté významné poznatky o závažných znakoch štruktúry a textúry vybraných pralesov Slovenska, získané prostredníctvom nových metodologických prístupov, ktoré budú použité pri precizovaní princípov a postulátov pestovných koncepcií založených na zásadach prírode blízkeho pestovania lesa pre lesy rôzneho zamerania pri rešpektovaní princípu nadradenosti verejnoprospešných funkcií. Tieto poznatky budú jedným zo vstupov pre aktivitu č. 1.3. Aktivita č. 1.3 „Modelovanie rastových procesov lesných ekosystémov“ dodá nové výsledky modelovania za pomoci rastového simulátora SIBYLA, ktorý bude doplnený o model prirodzeného zmladenia ako základu striedania generácií lesa. To umožní prognózovať rast lesných ekosystémov aj na obdobie dlhšie ako jeden produkčný cyklus lesa. Kreovanie prirodzených lesných ekosystémov spojené s použitím poznatkov o chovaní sa abiotických a biotických činiteľov, umožní zlepšenie ich ekologickej stability. Kvalitatívne nové informácie umožnia navrhovanie a overovanie nových ekologicky vhodných ťažbovo-dopravných technológií v rámci aktivity 1.4 „Ekologicky vhodné využívanie lesných ekosystémov“. V rámci aktivity 1.5 budú nakoniec vytvorené predpoklady pre ekonomicky lepšie zhodnotenie dreva z adaptívnych lesných ekosystémov.

Náplň a riešenie špecifického cieľa č. 2 vo väzbe na špecifický cieľ č. 1 podstatne prispeje k želanému spomaleniu látkovo-energetických tokov cez lesné ekosystémy prostredníctvom zlepšeného využitia kapacity zásobníkov biogeochemických cyklov prostredníctvom lesopestovných melioračných a biotechnologických nástrojov. Jeho výstupom bude portfólio postupov a nástrojov na kvantifikáciu a zväčšenie retenčnej, akumulačnej a transformačnej kapacity abiotických substrátov v lesných ekosystémoch, ich efektívne využívanie a reguláciu adaptívnymi porastovými štruktúrami. Pre ne bude väzba na špecifický cieľ 1 navrhnutý variabilný pomer komponentov pestovne a prírodne podmienenej dynamiky, ktorej potenciál vzrastá (BRANG 2005). V špecifickom celi č. 2 „Spomalenie látkovo-energetických cyklov bude aktivita 2.1 „Globálne a regionálne zmeny“ generovať poznatky o závislosti transpiračného prúdu od vlastností lesných porastov a podmienok prostredia v podmienkach globálnych zmien na základe nepretržitého zberu údajov o vlastnostiach atmosféry, dostupnosti pôdnej vody a transpirácie v rôznych typoch lesných porastov a porastových štruktúr, a ich prenosu do internetovej siete. Aktivita poskytne tiež scenáre budúceho vývoja klímy na obdobie životného cyklu lesných ekosystémov. Vzhľadom na tieto scenáre a vlastnosti adaptívnych lesných ekosystémov sa v aktivite 2.2 „Cyklus vody, uhlíka a živín“ využijú poznatky o priestorovej variabilite a distribúcií vlastností a transportných procesov v pórovitom prostredí systému pôda – rastlina-atmosféra na predikciu a racionálne využitie retenšnej retardačnej, akumulačnej a transformačnej funkcie substrátov – svahovín, pôdy, pokrývkového humusu a stromovej nekromasy. V prípadoch, keď bude funkčný potenciál a možnosti jeho zvýšenia pestovaním adaptívnych lesných ekosystémov zhodnotené ako nedostatočné, budú navrhované riešenia

v rámci lesníckych meliorácií, ktoré sú náplňou aktivity 2.3 „Disturbancie a meliorácie lesných ekosystémov“, resp. bude na spaľovanie látkových tokov utilizovaný aj potenciál doposiaľ málo využitelných zložiek stromovej biomasy, rýchlorastúcich drevín a drevín rastúcich na chudobnejších stanovištiach pomocou využitia biotechnológií.

Riešenie špecifického cieľa č. 3 „Ochrana biodiverzity a racionálne využívanie lesných ekosystémov“ vychádza z postavenia moderného pestovania lesa ako silného nástroja na dosahovanie želaného stavu a vývoja biologickej diverzity. Pestovné postupy a opatrenia orientované na prevenciu, mitigáciu a elimináciu negatívnych vplyvov a dopadov na biodiverzitu sú základom integrovanej ochrany lesných spoločenstiev v procese adaptácie na akcelerované zmeny prostredia. Výber konkrétnych pestovných postupov preto nutne musí brať o úvahy druhovú diverzitu organizmov komplexne, v ich vzájomných interakciách a v interakciách k prostrediu (DAJOZ 2000). Náplň a riešenie parciálneho cieľa 3 podstatne prispeje k želanému (= udržateľnému) manažmentu lesných ekosystémov a celkovému skvalitneniu starostlivosti o lesné ekosystémy podľa cieľa European Platform for Biodiversity Research Strategy – chrániť prírodu a usmerňovať prírodné procesy v prospech človeka a spoločnosti na základe výsledkov vedeckého výskumu (aktivita 3.2), a tým aj k naplneniu celkového strategického cieľa projektu. Portfólio originálnych poznatkov bude obsahovať množinu primárnych dát, postupov a nástrojov pre prírodu blízky manažment lesa zohľadňujúci ciele a záujmy lesného hospodárstva na jednej strane, pri racionálnom využívaní a ochrane biodiverzity na strane druhej. Umožní identifikáciu ekologických, demografických a ďalších mechanizmov významných pre utváranie genetickej, resp. druhovej diverzity drevín, bylinnej synúzie a makromycétov (aktivita 3.1), ako aj živočíchov (vybrané skupiny bezstavovcov a stavovcov, vrátane poľovnej zveri – aktivita 3.2, 3.3 a 3.4) v lesných ekosystémoch Západných Karpát. Orientácia na vzácne a ohrozené rastlinné spoločenstvá, zraniteľné, ohrozené a kriticky ohrozené druhy rastlín a živočíchov poskytne rámec pre hodnotenie vplyvu prírodných disturbančných faktorov a vplyvu obhospodarovania na populácie týchto druhov a súčasne vyústi do návrhu konkrétnych pestovných a ochranných postupov optimalizujúcich časovo-priestorové prežitie ich populácií. Zameranie výskumu na hospodársky významné hmyzie škodce a ich bioregulačný komplex v horských smrekových lesoch umožní predikciu vývoja ich populačnej hustoty v rozdielnych porastových štruktúrach, ako i návrh pestovných opatrení na zníženie rizika ich premnoženia. Poznatky o vplyve hospodársky významných druhov poľovnej zveri na lesné dreviny a porasty, ekologických nárokov zveri a jej etológie vyústia do návrhu celospoločensky prínosného manažmentu populácií zveri s väzbou na pestovanie a ochranu lesa.

Špecifický cieľ č. 4 „Funkcie lesných ekosystémov a kvalita života“ rieši problematiku, ktorej deficit v minulosti zapríčiňoval zlyhávanie prechodu na prechod na pestovanie a racionálne využívanie adaptívnych lesných ekosystémov, pretože neboli zabezpečené socio-ekonomické rámce na trvalú udržateľnosť tohto konceptu. V aktivite 4.1 ide o existenciu trhu s lesníckymi službami, ktorá je nevyhnutným predpokladom pre realizáciu a vyžívanie funkcií lesných ekosystémov spoločnosťou, pričom špecifiká lesného hospodárstva predstavujú iba jeden zo súboru vnútorných faktorov, ktoré ovplyvňujú dopyt a ponuku na tomto trhu.

Úlohou aktivity 4.2 je posúdiť prvotné účinky, vplyvy, vlastnosti a stavy lesných ekosystémov podľa ich užitočnosti a funkcie pri uspokojovaní potrieb človeka a spoločnosti, charakterizujúcich kvalitu života. (HANEMANN, 2007). Funkcie lesa sú vyjadrením spoločenskej objednávky, ktoré lesné hospodárstvo plní na daných miestach v rôznom čase, v rôznych spoločenských podmienkach. S ohľadom na súčasné i predpovedané regionálne a globálne zmeny treba aktualizovať poznatkovú bázu informácií o užitočnosti lesných ekosystémov, analyzovať úroveň modelov, ich aktuálnej štrukturalizácie, ekonomické hodnotenie funkcií lesných ekosystémov a potrebu ich inovácie. Toto umožní ďalšie zdokonalenie už existujúcich modelov a algoritmov jednotlivých čiastkových funkcií alebo ich skupín vo väzbe na komunikujúce ekosystémy. Vygenerované informácie o valuácii pozitívnych externalít lesných ekosystémov, ktoré sú významnou funkciou pre kvalitu života jednotlivca a spoločnosti, pomôžu odstrániť zlyhanie trhu, ktoré doposiaľ neumožňuje ich spoločensky efektívnu produkciu bez zásahu štátu. To bude náplňou riešenia problematiky v aktivite 4.3 „Integrácia verejnoprospešných funkcií lesov do trhového mechanizmu“, ktorá vyústi do návrhov efektívnych a účinných foriem optimalizácie poskytovania verejnoprospešných funkcií lesov. Trvalú udržateľnosť navrhnutých schém poznatkovo podporí výskum posilňovanie medzisektorovej spolupráce a jej kapacít ako dôležitého predpokladu a podmienky zvyšovania konkurencieschopnosti a ekonomickej životaschopnosti lesníctva. Aktivita bude zohľadňovať činnosti a opatrenia realizované inými sektormi, či záujmovými skupinami, ktoré ovplyvňujú schopnosť a možnosti lesníctva zabezpečovať svoje základné funkcie a ciele. Pretože špecifický cieľ č. 4 najsilnejšie závisí od previazania informačných tokov, je prirodzenou osou pre umiestnenie aktivity 4.5, riešajúcej problematiku IKT v rámci navrhovaného projektu. Jej cieľom je jednak vytvorenie jednotnej platformy na zdieľanie dát, informácií a modelovanie, a jednak vytvorenie nástroja využiteľného pre výskum v rámci nadväzujúcich projektov.

Takto nadobudnutá infraštruktúra v súhre s unikátnym systémom prírodných laboratórií v podobe prírodných a prirodzených lesov reprezentujúcich temperátnu zónu napomôže rozvoju ďalších medzinárodných vedeckých a odborných kooperácií za účasti technických a technologických kapacít regiónu.

Literatúra

- BRANG, P., 2005: Virgin Forests as a Knowledge Source for Central European Silviculture: Reality or Myth? Forest Snow and Landscape Research, 79 (1/2): 19–31.
- DAJOZ, R., 2000: Insects and Forests. The role and Diversity of Insects in the Forest Environment. Lavoisier Publishing, TEC & DOC, Londress, Paris, New York, 668 pp.
- HANEMANN, M., 2007: The Concept of Value in Economics. University of California, Berkeley, Barcelona, 66 pp.
- HUSTON, M., 1979: General Hypothesis of Species Diversity. Am. Nat., 113, p. 81–101.
- Nagel, T. A., DIACI, J., 2006 – Intermediate Wind Disturbance in an Old-growth Beech-fir Forest in Southeastern Slovenia – Can. J. For. Res. 36: 629–638.

Adresa autorov:

Prof. Ing. Rudolf Kropil, CSc.
Doc. Dr. Ing. Viliam Pichler
Doc. Dr. Ing. Jaroslav Šálka
Prof. Ing. Milan Saniga, DrSc.
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
Slovakia

METODOLOGICKÉ ASPEKTY HODNOTENIA SUCHA A RIZIKA LESNÝCH POŽIAROV V MENIACICH SA PODMIENKACH KLÍMY NA SLOVENSKU

Jaroslav Š K V A R E N I N A – Tomáš V I D A

Škvareniena, J., Vida, T.: Methodology aspects of drought and forest fire danger assessment in changing conditions of climate in the Slovak republic. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51 (3): 17–33, 2009.

The paper is focused on drought and forest fires issues in the conditions of starting climate change in Slovakia. Its aim is to analyze drought identification possibilities in the forests on the basis of drought indexes and ecosystem water balance calculation. Increase of bioclimatic drought danger is a precondition for increase of forest fires danger incidence. Paper is deal with questions of meteorological fire indices calculation for forests and their suitability for moderate climate conditions of Western Carpathians. Methodology and basic outcomes are presented as a results of first year activities of the Centre excellence project “Adaptive forest ecosystems” – Activity 2.1 Global and regional changes.

Key words: drought, meteorological fire indices, evapotranspiration, forest ecosystems, climate change

1. ÚVOD A CIELE

Zmena klímy a s ňou vyvolané meniace sa podmienky krajiny, sa spája s mnohými rizikami ako pre ľudskú spoločnosť tak aj pre iné živé systémy. Les ako najkomplexnejší živý systém na Zemi má mnohé mechanizmy na prispôsobovanie sa takýmto zmenám, no jednak ich súčasná intenzita, ako aj významný vplyv človeka na lesné ekosystémy znižujú účinnosť týchto mechanizmov. Dôsledkom týchto zmien je očakávaná zmena vodnej bilancie krajiny (BUDYKO 1980, EEA 2004, MINĐÁŠ *et al.* 1996) ktorá bude mať za následok pravdepodobne posun vegetačných stupňov (ROŽNOVSKÝ a JANOUŠ 2001, ŠKVARENINA *et al.* 2004a).

Klimatická zmena podľa doterajšieho vedeckého nazerania na problematiku prinesie so sebou nárast extrémnosti počasia (IPCC 2007, LAPIN *et al.* 2000, 2008). Podľa citovaného Medzivládneho panelu pre klimatickú zmenu (IPCC) by sa v dôsledku nastupujúcich klimatických zmien mohla zvýšiť frekvencia a rozsah extrémnych prejavov počasia ako sú silné búrky, horúčavy, suchá, požiare alebo záplavy. Podľa viacerých klimatických modelov, by mal súčasný vývoj, ktorý je poznamenaný narastajúcou frekvenciou a dopadom týchto javov vo svete, naďalej pretrvávať. V podmienkach temperátnej klimatickej

zóny, teda aj lesných ekosystémov Slovenska, sa ako významné extrémne prejavy počasia a klímy považujú sucho a s ním spojené riziko vzniku lesných a krajinných požiarov (STŘELCOVÁ *et al.* 2009).

Stúpajúca frekvencia a intenzita klimatických extrémov je zrejmá zo stúpajúcich škôd spôsobovaných národnému hospodárstvu (HOLÉCY *et al.* 2004). V prípade lesných ekosystémov sú dopady zmeny klímy tým závažnejšie, že napríklad na rozdiel od poľnohospodárstva, zmierňovacie a adaptačné opatrenia nie je možné vyvíjať a aplikovať rýchlosťou primeranou rýchlosti klimatických zmien. Adaptácia na zmeny v režime klimatických extrémov vo forme períód sucha, vetrových kalamít, mimoriadnych horúčav či mrazov je komplikovaná nejasnou prognózovateľnosťou týchto javov, ako aj vysokou variabilitou ich dopadov na les.

V rámci aktivity „Globálne a regionálne zmeny“ projektu centra excelencie Lesníckej fakulty Technickej univerzity „Adaptívne lesné ekosystémy“ sa budeme vo výskumnej práci orientovať predovšetkým na:

- Hodnotenie klimatickej zmeny a extrémov počasia pomocou charakteristík stavu atmosféry (v rôznych vegetačných stupňoch Slovenska) a v rámci nami prezentovanej aktivity predovšetkým na aspekty bioklimatického sucha a následne vyvolaného rizika vzniku podmienok pre výskyt lesných a krajinných požiarov.
- Zostaveniu metódy kontinuálneho hodnotenia výskytu a intenzity stresu suchom a indexu požiarov v lesnom prostredí a porovnaní takéhoto hodnotenia s doteraz používanými metódami.

2. ROZBOR PROBLEMATIKY

Meteorologický a bioklimatologický slovník definujú sucho z viacerých hľadísk. V princípe však ako stav nedostatku vody v pôde, rastlinách a atmosfére (KREČMER 1980). Predstavuje zložitý komplex činiteľov, ktorých pôsobením vzniká nedostatok vlahy. V krajine inak s dostatkom vody, sa chápe ako mimoriadny jav, prípadne sa považuje až za živelnú pohromu. Sucho v lesníctve predstavuje významný poveternostný stresový faktor lesných ekosystémov. Možno povedať, že až najvýznamnejší, nakoľko okrem priamych škôd prísuškami rastlín vyvoláva celý rad ďalších synergicky podmienených efektov (nadmerná transpirácia, úpal kôry, úhyn zmladenia a obnovy, predčasný opad asimilačných orgánov, predčasný nástup jesenných fenofáz rastlín, nedostatočný vývoj budúcoročných vegetatívnych a generatívnych púčikov, poškodzovanie a narušovanie jemných koreňových systémov, blokovanie mykorízy, obmedzenie mikrobiálnej činnosti pôdy a jej zakysľovanie, nadmerná eutrofizácia vôd, premnoženie biotických škodcov, lesné požiare a pod. (DITMAROVÁ *et al.* 2006, HAYES *et al.* 1999, HEIM 2002, HOLÉCY *et al.* 2004, PAGANOVÁ 2007, STŘELCOVÁ *et al.* 2004).

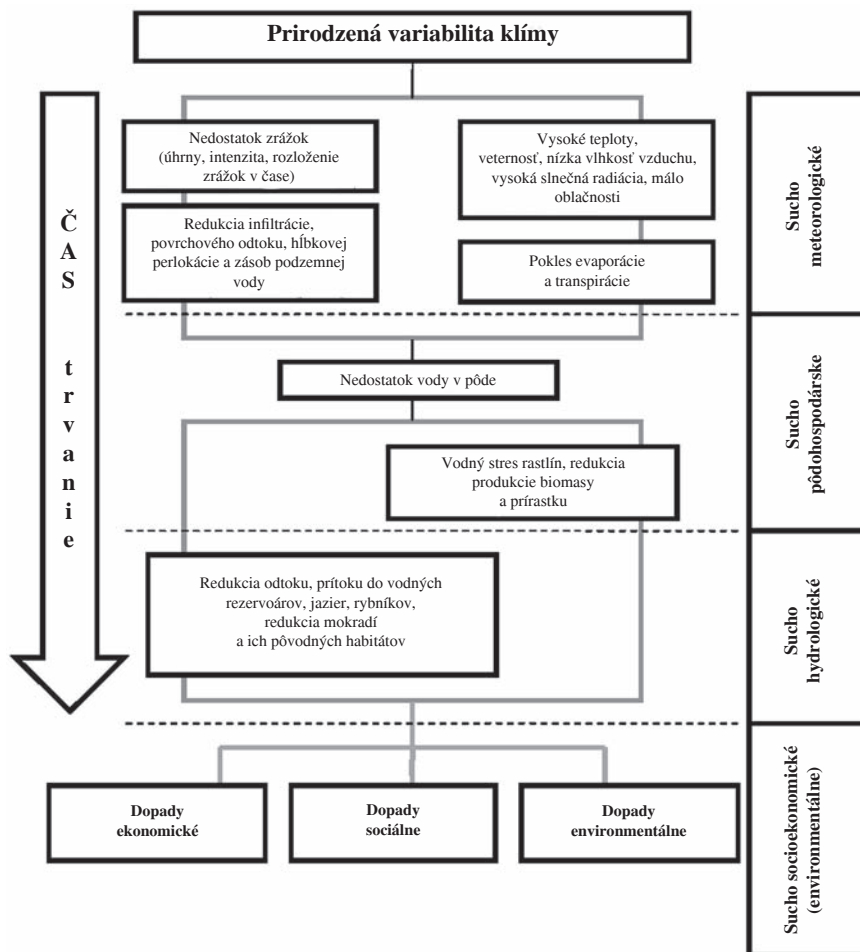
Sucho je normálna, rekurentná črta klímy mierneho klimatického pásma. Sucho sa môže vyskytovať skoro všade, hoci jeho prejavy môžu byť odlišné od oblasti k oblasti (HAYES *et al.* 1999). Definovanie sucha je zložitá, závisí od regionálnych rozdielov, a od potrieb jednotlivých disciplín. Sucho je prechodná odchýlka a nie je totožné s pojmom aridita, ktorý je obmedzený na oblasti s nízkymi zrážkami a predstavuje trvalú črtu klímy.

Sucho predstavuje neočakávateľné prírodné riziko. Sucho vyjadruje relatívne krátkodobú zápornú odchýlku vodnej bilancie od normálu a výrazne ovplyvňuje celý rad aktivít ľudskej spoločnosti (HAYES *et al.* 1999, HEIM 2002, DUBROVSKÝ *et al.* 2005, ŠIŠKA a SAMUHEL 2007, ŠIŠKA *et al.* 2005). Väčšina autorov rozlišuje sucho meteorologické, poľnohospodárske, hydrologické a socioekonomické (obrázok 1). Primárnou príčinou sucha na Slovensku je bez výnimky deficit zrážok v určitom časovom intervale, ako napr. v priebehu vegetačného obdobia, alebo jeho časti. Spolupôsobenie ostatných meteorologických faktorov napr.: vysoká teplota, intenzívne prúdenie vzduchu, nízka relatívna vlhkosť vzduchu, môžu tiež významne prispieť k prehĺbeniu tohto javu.

Nadmorská výška a reliéf terénu ako silne diferencujúce faktory klímy zohrávajú v orograficky členitom území Slovenska mimoriadne významnú úlohu. So stúpajúcou nadmorskou výškou sa podstatne mení radiačná, termická i vodná bilancia krajiny. Na prvoradý význam klímy z hľadiska prirodzenej vegetácie upozorňuje už ZLATNÍK (1976). Opisuje vegetačné stupne (vs), ako základné jednotky pre nepriame vyjadrenie výškovej klímy (vertikálnej stupňovitosti) pomocou vegetácie (biocenózy). Ich rozmanitosť je podmienená klimatickými rozdielmi vplyvom nadmorskej výšky, expozície a reliéfu, ktoré vyplývajú z konfigurácie terénu. Pôsobením týchto činiteľov vznikli biogeocenózy zoskupené do 9 vegetačných stupňov. Na území Slovenska sa vyskytujú podľa ZLATNÍKA (1976) vegetačné stupne nazvané podľa zastúpenia, čiže dominancie významných stromových alebo krovitých edifikátorov, nie teda podľa ich optima výskytu vo vegetačných stupňoch. Sú to vegetačné stupne (vs): 1. dubový, 2. bukovo-dubový, 3. dubovo-bukový, 4. bukový, 5. jedľovo-bukový, 6. smrekovo-bukovo-jedľový, 7. smrekový, 8. kosodrevinový, 9. alpínsky (nelesný vs).

Vegetačné stupne nižších polôh, 1. vs dubový, 2. vs bukovo-dubový a 3. vs dubovo-bukový sú vo vegetačnom období (marec–september) pomerne suché. Deficit zrážok dosahuje 100 až 300 mm vo vegetačnom období. Až 4. vs bukový je charakteristický vyrovnanou klimatickou vodnou bilanciou. Vo vyšších vegetačných stupňoch, (5. vs jedľovo-bukový a 6. vs smrekovo-bukovo-jedľový), humidita klímy narastá. Humidita klímy patrí k základným ekologickým podmienkam horských lesov. Vodná bilancia dosahuje najvyšších hodnôt v 8. vs kosodrevinovom a 9. vs alpínskom, kde množstvo zrážok výrazne prevyšuje evaporačné nároky atmosféry. V ročnej bilancii dosahuje nadbytok vody zo zrážok cca 1000 mm (ŠKVARENINA *et al.* 2004b).

Aridita klímy a výskyt sucha následne a logicky vyúsťujú do vzniku podmienok a rizika výskytu lesných a krajinných požiarov. Riziko vzniku požiarov (Fire danger) sa charakterizuje ako kombinácia viacerých prvkov, ktorých spolupôsobením vzniká požiar. Tieto prvky sú buď konštantné ako napríklad Fire risk – požiarne riziko, čo predstavuje pravdepodobnosť vzniku požiaru na základe počtu potenciálnych dostupných zápalných zdrojov, alebo Fire hazard – požiarne potenciál čo predstavuje charakter dostupného paliva, predovšetkým jeho množstvo, rozmery, priestorovú distribúciu. Najdôležitejším premenlivým prvkom, ktorý má rozhodujúci vplyv pre požiarne riziko je počasie určujúce vhodnosť podmienok pre vznik a šírenie požiaru.



Obrázok 1: Definovanie chápania sucha pre rôzne sektory činností a jeho časová postupnosť (spracované podľa viacerých autorov: HAYES *et al.* 1999, HEIM 2002, ŠKVARENINA *et al.* 2004b)

Figure 1: Definition of understanding drought for different sector activities and time sequence of drought (according to HAYES *et al.* 1999, HEIM 2002, ŠKVARENINA *et al.* 2004b)

Dôsledky zmeny klímy na riziko vzniku požiarov sa vo svete hodnotia na základe vývoja požiarovosti v krajine, predovšetkým pomocou počtu požiarov a plochy, ktorá pri nich zhorí. Hodnoteniu trendu vývoja požiarov sa venuje množstvo prác. Práca autorského kolektívu pod vedením RIAÑO (2007) naznačuje, že podľa štatistického vyhodnotenia satelitných údajov nedošlo v rokoch 1981–2000 vo svete k štatisticky významnému nárastu v ploche požiarov. Dodáva ale, že je možné pozorovať trend nárastu požiarov na severnej pologuli v stredných zemepisných šírkach a subtropických oblastiach severnej Ameriky, Afriky a juhovýchodnej Ázii. Naopak plocha lesných požiarov poklesla v tropickej juhovýchodnej

Ázii a strednej Amerike. Taktiež sa zvýšilo množstvo zhorenej plochy počas leta v stredných zemepisných šírkach severnej pologule a oblasti sibírskej tajgy (SHVIDENKO a NILSSON 2002). Z iného zdroja (NCDC 2007) sa dozvedáme, že čo sa týka požiarov na Aljaške, ich počet stúpal od roku 1965 po 90. roky 20. storočia a následne je badateľný pokles v ich počte. Opačná situácia je ale so zhorenou plochou, ktorá na konci sledovaného obdobia výrazne narástla. Podobný vývoj môžeme sledovať aj v rámci celého územia Spojených štátov s tým rozdielom, že početnosť požiarov mala svoje maximum v 80. rokoch minulého storočia. Podobne na nárast plochy poukazujú aj výskumy z Ruska (GOLDAMMER 2003), centrálnej Ázie (GOLDAMMER *et al.* 2004), práce zo západu Severnej Ameriky (GEDALOF *et al.* 2005, WESTERLING *et al.* 2006) a tiež západu Kanady (GILLET *et al.* 2004, FLANNIGAN *et al.* 2005). Podobne je tomu aj v Stredomorí (PAUSAS 2004). Aj na základe rozsiahlej štúdie FAO (2007) je zrejmé, že v poslednom období narastá počet požiarov v mnohých častiach sveta, čo je spôsobené predovšetkým narastajúcim rizikom ich vzniku.

Pre režim požiarov sú v rámci Európy dôležité dva limitujúce faktory. V podmienkach suchej Stredomorskej oblasti je limitujúcim faktorom množstvo paliva na rozdiel od vlhkej oblasti strednej a severnej Európy, kde je hlavným limitujúcim faktorom suché počasie (PÄÄTALO 1998). Územie Slovenska sa nachádza na rozhraní týchto území pričom limitujúcim faktorom je v súčasnosti viac suché počasie ako nedostatok množstva paliva. Tento stav sa ale môže v budúcnosti hlavne na juhu krajiny meniť v závislosti od klimatickej zmeny. Zmena režimu požiarov sa očakáva ako v stredozemnej oblasti (PIÑOL *et al.* 1998), tak aj v oblasti lesov mierneho pásma (BADECK 2004) a boreálnych lesov (STOCK *et al.* 1998). Na základe scenára CCCM o zmene klímy pre územie Slovenska môžeme aj na našom území očakávať zmenu požiarneho režimu v budúcnosti v dôsledku očakávanej zmeny vodnej bilancie krajiny. Jej negatívne hodnoty počas hlavného vegetačného obdobia by sa mali objaviť aj vo vyšších nadmorských výškach v porovnaní s dnešnou situáciou, čo bude mať za následok rozšírenie oblastí náchylnejších na vznik lesných požiarov (BALAJKA *et al.* 2005). Na výrazné zmeny v správaní sa krajiny Slovenska ohľadom rizika lesných požiarov môžeme predpokladať v oblastiach južne od tzv. Zlatníkovej klimatickej deliacej čiary, nakoľko už dnes predstavuje výraznú deliacu líniu pre hodnotenie výskytu klimatického sucha na Slovensku (ŠKVARENINA *et al.* 2008).

Pre hodnotenie klimatickej zmeny na základe jej prepojenia s požiarovým režimom je podstatná kvalitná databáza požiarov. V tomto bode na Slovensku narážame na významný problém. Hoci sa na úrovni okresov už aj v minulosti zaznamenávali údaje o lesných požiaroch, často chýbali podrobnejšie údaje ako zhorená plocha, presnejšia lokalizácia (porast), druh porastu atď. Navyše tieto údaje nie sú digitalizované a pri ich získavaní človek potrebuje značné množstvo času. Od roku 1999 sa situácia na Slovensku zmenila a Požiarnotechnický a expertízny ústav MV SR každoročne vytvára celonárodnú databázu požiarov. V dôsledku veľkej medzioročnej variability v počte požiarov ako aj v dôsledku skutočnosti, že až 95–97 % požiarov na Slovensku vzniká vplyvom človeka, je ale dnes nemožné jednoznačne hodnotiť trend ich vývoja. Z tohto dôvodu budeme v rámci aktivity „Globálne a regionálne zmeny“ projektu Adaptívne lesné ekosystémy hodnotiť požiarne riziko len z pohľadu charakteru počasia a teda meteorologických podmienok vhodných pre vznik požiaru.

3. METODIKA

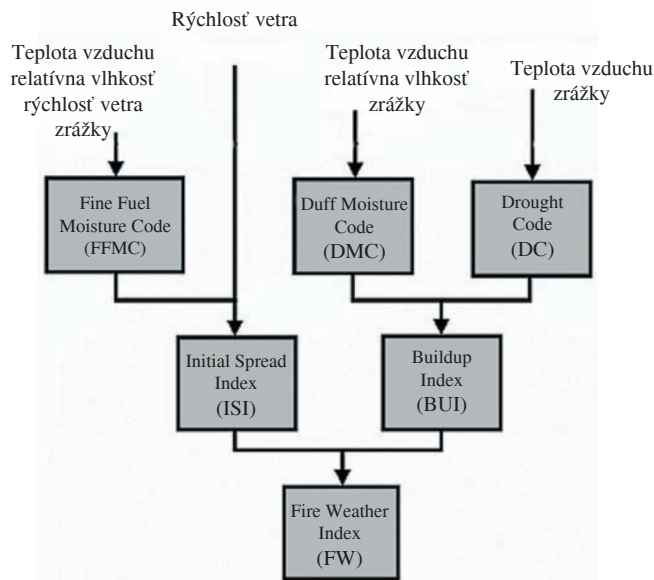
Kľúčovou úlohou pri hodnotení sucha v temperátnej klimatickej zóne je okrem hodnotenia režimu atmosférických zrážok aj hodnotenie výparu a vodnej bilancie. Evapotranspirácia predstavuje výpar vody z pôdy pokrytej vegetáciou. Predstavuje komplikovaný biofyzikálny dej, ktorý v podstate pozostáva z fyzikálneho výparu (evaporácie) a fyziologického výparu z rastlinných orgánov (transpirácie). Experimentálne bolo dokázané, že v optimálnych podmienkach rastu rastlín aktuálna evapotranspirácia (E) dosahuje hodnoty potenciálnej evapotranspirácie (E_o) (t.j. maximálne možnej evapotranspirácie v daných klimatických podmienkach pri dostatočnej vlhkosti pôdy).

Ako konštatujú viaceré práce napríklad BUDYKO a ZUBENOKOVÁ (1961), ŠPÁNIK, ŠIŠKA *et al.* (2004), TOMLAIN (2004), ŠIŠKA a TAKÁČ (2008) nižšie uvedené indexy pomerne presne umožňujú kvantifikovať sucho ako deficit vody v koreňovej zóne z hľadiska optimálneho rastu rastlín.

- *relatívna evapotranspirácia* (E/E_o),
- *evapotranspiračný deficit* ($E_o - E$),
- *a Budykov index sucha* (E/P), (kde P je zrážkový úhrn).

Dôležitou informáciou pre pôdohospodára je časové rozloženie sucha počas roka, vegetačného obdobia. Pre tento účel sme na Katedre prírodného prostredia TU rozpracovali metódu *modifikovaných klimadiagramov vodnej bilancie* (ŠKVARENINA *et al.* 2004b), ktorá pomerne presne (s mesačným krokom) dokáže identifikovať výskyt bioklimatického sucha počas roka.

Na metodické aspekty hodnotenia sucha nadväzuje aj hodnotenie rizika požiarov. Na zmeny v charaktere počasia na Slovensku v prepojení na požiare poukazujú niektoré práce ako napríklad: HRVOL *et al.* 2009, ŠKVARENINA *et al.* 2004a, VIDA *et al.* 2008b. Hodnotia sa pomocou jednotlivých meteorologických prvkov, alebo ich kombináciou, ale najkomplexnejší a vo svete najpoužívanější spôsob je pomocou požiarnych indexov. Na stanovenie požiarneho rizika sa využívajú len meteorologické charakteristiky ako napríklad: zrážky, relatívna vlhkosť vzduchu, teplota vzduchu a. i. Tieto „meteorologické indexy“ hodnotia len vlhkosťné charakteristiky paliva (prostredia) ktoré majú nesporne rozhodujúci význam pri vzniku a šírení požiaru. Štruktúra týchto indexov môže byť jednoduchá, pozostávajúca z jedného vzorca popisujúceho iba vzťahy medzi meteorologickými charakteristikami, ktoré v daných podmienkach vyúsťia do vysokej náchylnosti ku vzniku požiaru (Angstrom Index, Nesterov index), ale môže byť aj značne zložitá ako je to napríklad pri Kanadskom požiarom indexe Canadian Forest Fire Weather Index (CFFWI). Hoci vstupnými veličinami pre CFFWI sú len 4 meteorologické prvky (úhrn zrážok, rýchlosť vetra, relatívna vlhkosť vzduchu a teplota vzduchu), tieto vstupujú do výpočtu tohto systému na rôznych úrovniach, z ktorých každá je tvorená sofistikovanými matematicko-fyzikálnymi vzťahmi popisujúcimi zložitý vplyv lesného prostredia na zmenu vlhkosti jednotlivých kategórií paliva (VAN WAGNER 1987).



Obrázok 2: Štruktúra kanadského požiarneho indexu CFFWI.
Figure 2: Structure of the Canadian forest fire weather index

CFFWI je jeden z podsystémov, ktoré zahŕňa Systém hodnotenia požiarneho nebezpečenstva kanadských lesov (Canadian Forest Fire Danger Rating System) a jeho 6 zložiek posudzuje vplyv teploty vzduchu, relatívnej vlhkosti, zrážok a rýchlosti vetra na správanie sa požiaru. Prvé tri zložky – Fine Fuel Moisture Code (FFMC), Duff Moisture Code (DMC) a Drought Code (DC) – predstavujú indexy vlhkosti troch palivových tried surovej formy humusu a to horizontov O1 – opadanka do hĺbky 1,2 cm, Of – fermentačná vrstva humusu do hĺbky 7 cm a Oh – humifikačná vrstva humusu do hĺbky 17 cm. Zvyšné tri zložky – Initial Spread Index (ISI), Buildup Index (BUI) a Fire Weather Index (FWI) – predstavujú potenciálne správanie požiaru a to predovšetkým rýchlosť šírenia požiaru, množstvo dostupného paliva pre požiar a jeho intenzitu. So stúpajúcim požiarnym nebezpečenstvom postupne narastajú hodnoty výsledného FWI.

Výskyt požiarov a aj zhorená plocha územia tesne korelujú s týmto indexom predovšetkým v Kanade, kde bol tento index štandardizovaný pre palivový typ borovicových lesov (KILL *et al.* 1977, STOCKS *et al.* 1989). No po kalibrácii a adaptácii sa tento index úspešne využíva aj v iných častiach sveta napríklad v oblasti Stredozemného mora (BOVIO a CAMIA 2000) alebo Nového Zélandu (PEARCE 1996).

Z tých jednoduchších spomeňme Angström Index vyvinutý vo Švédsku meteorológom Angströmom, avšak používaný v celej Škandinávii, Nemecku a iných európskych krajinách temperátnej a boreálnej klimatickej oblasti (LEVIN a SAARONI 1999, HOLÉCY *et al.* 2003, ŠKVARENINA *et al.* 2004a, TIMÁR *et al.* 2008). Index kalkuluje s vlhkosťami

a teplotnými parametrami, pričom vlhkosť vzduchu má vo výpočte dominantné postavenie, čo sa prejavuje rýchlymi fluktuáciami hodnôt indexu. Veľká citlivosť môže viesť aj k nadhodnocovaniu reálneho rizika vzniku lesných požiarov, na čo upozorňujú ŠKVARENINA *et al.* (2004a) a aj VIDA *et al.* (2008a).

Nesterov index je ďalší z jednoduchých indexov hodnotiacich požiarne nebezpečenstvo vyvinutý v podmienkach Ruska Nesterovom (1949 in BUCHHOLZ a WEIDEMANN 2000). Tento kumulatívny index po jemnej úprave sa bežne používa ako v krajine svojho vzniku tak aj v iných Európskych krajinách. Hlavnými poveternostnými prvkami vstupujúcimi do kalkulácie sú teplota vzduchu a rosného bodu, limitujúcou podmienkou kumulovanej výslednej hodnoty indexu sú atmosférické zrážky.

Baumgartner Index (BI) spracoval a na experimentálnom materiály overil vedecký tím popredného európskeho bioklimatológa prof. Baumgartnera na Lesníckej fakulte Mníchovskej univerzity. Principiálne kalkulácia tohto kumulatívneho indexu vychádza zo stanovenia klimatickej vodnej bilancie (potenciálna evapotranspirácia, atmosférické zrážky).

Pre výpočet rizika vzniku požiarov použijeme nasledovné požiarne indexy:

- **Canadian Forest Fire Weather Index,**
- **Nesterov index,**
- **Angstrom index,**
- **Baumgartner index.**

Podrobnosti kalkulácii všetkých vyššie uvedených indexov podrobne podávajú práce ŠKVARENINA *et al.* 2004a, VAN WAGNER 1987.

4. PREDBEŽNÉ VÝSLEDKY A DISKUSIA

4.1 Dlhodobé priemerné hodnoty relatívnej evapotranspirácie a indexu sucha

Tabuľka.1 udáva priemerné ročné hodnoty indexu sucha (E_0/P), potenciálnej evapotranspirácie (E_0), zrážok (P), aktuálnej evapotranspirácie (E) a relatívnej evapotranspirácie (E/E_0) za obdobie 1951–2005 na vybraných staniách Slovenska.

V priemere najmenšie ročné hodnoty E/E_0 za spracované obdobie 1951–2005 boli zaznamenané na Podunajskej nížine (1. vs dubový), t.j. v oblasti s vysokými úhrnmi potenciálnej evapotranspirácie (nad 700 mm) a s ročnými zrážkami menšími ako 550 mm. V horských oblastiach Slovenska, ktoré sa vyznačujú dostatočne vysokými úhrnmi zrážok počas celého roka, sa aktuálna evapotranspirácia len málo líši od potenciálnej evapotranspirácie (menej ako 4 %). Rastom zrážok aktuálna evapotranspirácia sa s nadmorskou výškou zväčšuje až po určitú hranicu (cca po 3. vs dubovo-bukový), potom ako výsledok poklesu celkovej bilancie žiarenia (zväčšovanie oblačnosti, relatívnej vlhkosti vzduchu, počtu dní so snehovou pokrývkou, poklesom teploty povrchu pôdy a vzduchu) úhrny aktuálnej evapotranspirácie sa s výškou zmenšujú. Priemerné ročné hodnoty potenciálnej

evapotranspirácie sa menia od 750 mm v južnej časti Podunajskej nížiny (1. vs dubový) do 350 mm a menej v najvyšších horských polohách (smrekový, kosodrevinový až alpínsky stupeň).

Tabuľka 1. Nadmorská výška staníc, priemerné hodnoty zrážok (P) v mm, potenciálnej evapotranspirácie (E_0) a aktuálnej evapotranspirácie (E) v mm, relatívnej evapotranspirácie (E/ E_0) v % a indexu sucha (E_0 /P), pre vybrané meteorologické stanice zaradené do príslušných vegetačných stupňov, pre časové obdobie rokov 1951–2005

Table 1 Average annual values of precipitation (P), potential (E_0), actual, evapotranspiration (E), drought index (E_0 /P), in mm and relative evapotranspiration (E/ E_0) in % at chosen localities of Slovakia for the period 1951–2005

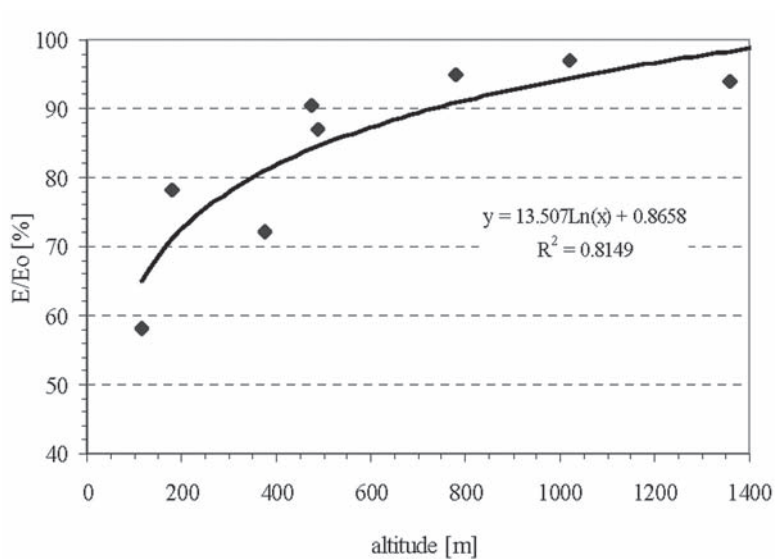
Meteorologická stanica	H (m n.m.)	P	E_0	E	E/ E_0	E_0 /P	Vegetačný stupeň
Hurbanovo	115	537	748	432	58	1,44	1. dubový
Myjava	375	671	627	450	72	0,96	2. bukovo-dubový
Kamenica n. C.	178	722	644	501	78	0,92	3. dubovo-bukový
Plaveč	488	693	522	451	87	0,78	4. bukový
Červený Kláštor	474	755	507	457	90	0,69	5. jedľovo-bukový
Oravská Lesná	780	1114	456	432	95	0,42	6. smrekovo-bukovo-jedľový
Tatranská Javorina	1020	1253	422	412	97	0,35	7. smrekový
Štrbské Pleso	1360	995	435	407	94	0,45	7. smrekový, 8. kosodrevinový

Obrázok 3 a obrázok 4 prinášajú regresnú závislosť ročných hodnôt relatívnej evapotranspirácie E/ E_0 a indexu sucha E_0 /P od nadmorskej výšky za obdobie 1951–2005.

Relatívna evapotranspirácia E/ E_0 je výborný ukazovateľ vlhového zabezpečenia rastlín. Dosahuje v najnižších oblastiach hodnoty okolo 60 %. Smerom k vyšším vegetačným stupňom hodnota tohto pomeru rastie pričom vo 4. vs už dosahuje 90 % a viac. V horských polohách však tento ukazovateľ čiastočne stráca na presnosti. Od 5. vs je rozlišovacia schopnosť E/ E_0 už len minimálna (1–5 %) a to v dôsledku vyrovnávania sa hodnôt potenciálnej a skutočnej evapotranspirácie. Obrázok 3 podáva vzťah relatívnej evapotranspirácie od rastúcej nadmorskej výšky.

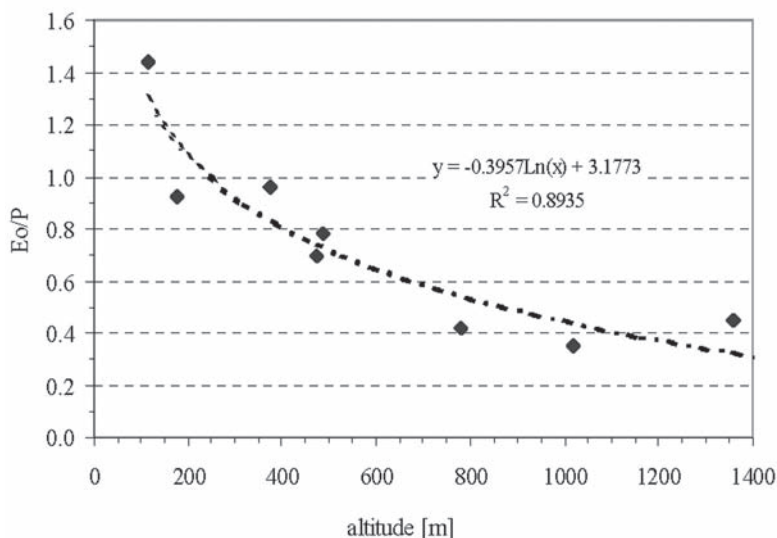
Index sucha E_0 /P vyjadruje vzťah medzi energetickými možnosťami a zrážkovými vstupmi v uvažovanom vegetačnom stupni. Tento index bol použitý pre hodnotenie bioklimatologických regiónov v celoplanetárnom merítku (BUDYKO 1955, 1971, LARCHER 1984, BAUMGARTNER a LIEBSCHER 1990). Index E_0 /P nad očakávanie dokázal veľmi citlivo reagovať na výškové zmeny bioklimatologických podmienok aj na relatívne malom území Slovenska (obrázok 4). BUDYKO (1980) uvádza, že ak je E_0 /P > 1 územie začína mať arídny charakter (lesostep, step). Ak je hodnota indexu v intervale $0,3 < E_0$ /P < 1 charakterizuje sa bióm ako lesný. Pri hodnote E_0 /P < 0,3 má ekosystém charakter tajgy (tundry), v našom ponímaní aj horského lesa temperátnej zóny. Vidíme, že uvedené rozdelenie plne platí aj na Slovensku.

BOCHENEK *et al.* (2005) zhodnotili index sucha vo vegetačnom období (apríl–september) pre územie Poľska. Zistili hodnoty od 1,6 (v centrálnej časti krajiny) do hodnoty 1,0 pre oblasti kde letné zrážky boli vyššie ako potenciálna evapotranspirácia, t.j. horské polohy v južných regiónoch Poľska.



Obrázok 3: Logaritmická regresná závislosť ročných hodnôt relatívnej evapotranspirácie (E/Eo) od nadmorskej výšky (altitude [m]) na území Slovenska za obdobie rokov 1951–2005

Figure 3: Logarithmic regression dependence of relative evapotranspiration annual values (E/Eo) on altitude [m a.s.l.] on the territory of Slovakia for the period 1951–2005

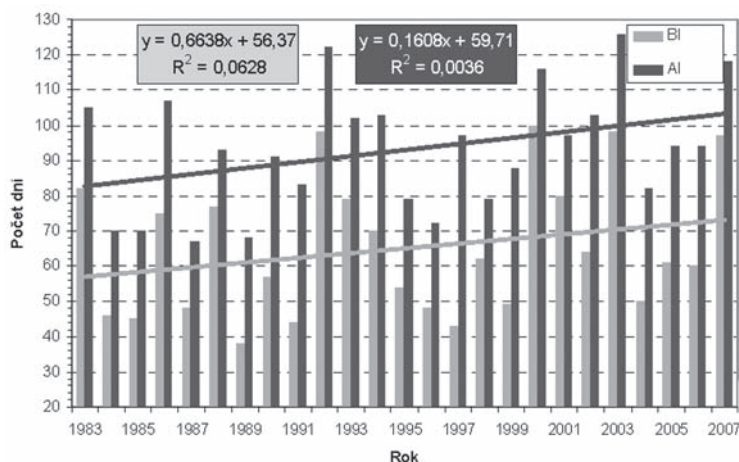


Obrázok 4: Logaritmická regresná závislosť ročných hodnôt indexu sucha (Eo/P) od nadmorskej výšky (altitude [m]) na území Slovenska za obdobie rokov 1951–2005

Figure 4: Logarithmic regression dependence of drought index annual values (Eo/P) on altitude [m a.s.l.] on the territory of Slovakia for the period 1951–2005

4.2 Dlhodobý vývoj požiarneho rizika

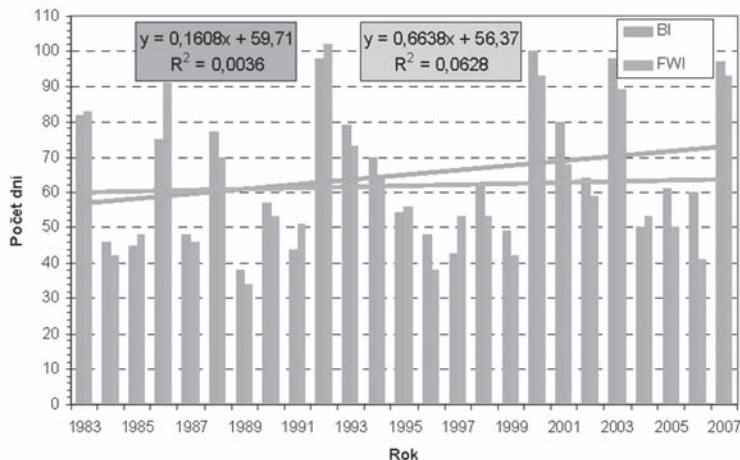
Pri hodnotení požiarneho rizika na základe meniaceho sa charakteru počasia hodnoteného požiarňami indexmi môžeme sledovať v modelovom území počas rokov 1983–2007 nárast počtu dní, v ktorých boli dosiahnuté hodnoty požiarneho rizika 3 (stredné riziko), 4 (vysoké riziko) alebo 5 (veľmi vysoké riziko) (Obr. 5 a 6). Tento stúpajúci trend je zreteľný pre všetky použité indexy – Baumgartner (BI) a Angström (AI) aj Kanadský (FWI) index – no priebeh tohto trendu sa u jednotlivých indexov líši. Pri porovnaní AI a BI môžeme sledovať už vyššie spomínané nadhodnocovanie požiarneho rizika Angströmovým indexom. Toto je spôsobené pravdepodobne lokalitou jeho vzniku (Škandinávia), ktorá má odlišnú (vlhšiu a chladnejšiu) klímu ako naše územie. Na rozdiel od tohto indexu, Baumgartner index ako aj CFFWI vznikali v podmienkach Slovensku klimaticky podobných. Z tohto dôvodu môžeme od nich očakávať presnejšie predpovedanie reálneho meteorologického rizika vzniku požiarov.



Obrázok 5: Dlhodobý vývoj počtu dní s hodnotou Baumgartnerovho (BI) a Angströmovho (AI) indexu 3, 4 alebo 5 v požiarnej sezóne (apríl–september) rokov 1983–2007 pre meteorologickú stanicu Bratislava-Koliba

Figure 5: Long-term development of days reached 3, 4 or 5 values of Baumgartner (BI) and Angström (AI) index at Bratislava-Koliba meteorological station for the fire season (April–September) of the years 1983–2007

Ako môžeme ďalej vyčítať z grafov, trend Kanadského indexu má oveľa miernejšiu stúpajúcu tendenciu. Tento fakt je spôsobený konštrukciou jednotlivých indexov. Zatiaľ čo BI a AI vo svojich rovniciach posudzujú len jednoduchý vzájomný vzťah jednotlivých vstupných prvkov pre miesto merania (meteorologickú stanicu, ktorá predstavuje voľnú plochu), z pohľadu vodnej bilancie resp. vzdušnej vlhkosti, Kanadský index v rámci svojej zložitej štruktúry komplexne hodnotí lesné prostredie a jeho vplyv na vlhkosť paliva v rámci schopnosti modifikovať mikroklimu v porovnaní s voľnou plochou. Z toho môžeme usudzovať, že zapojené porasty sú schopné istým spôsobom regulovať meniace sa klimatické podmienky a zmierňovať ich dopad na požiarné riziko. Tieto tvrdenia však bude potrebné podrobnejšie preskúmať na väčšom súbore dát v rámci rôznych lesných vegetačných stupňov.



Obrázok 6: Dlhodobý vývoj počtu dní s hodnotou Baumgartnerovho (BI) a Kanadského (FWI) indexu 3, 4 alebo 5 v požiarinej sezóne (apríl–september) rokov 1983–2007 pre meteorologickú stanicu Bratislava-Koliba

Figure 6: Long-term development of days reached 3, 4 or 5 values of Baumgartner (BI) and Canadian (FWI) index at Bratislava-Koliba meteorological station for the fire season (April–September) of the years 1983–2007

5. ZÁVER

V spojitosti s očakávanými zmenami klímy, rastie na území Slovenska riziko častejšieho výskytu sucha. Tento nebezpečný fenomén klímy je významným predpokladom vzniku reálneho rizika rastu lesných a krajinných požiarov. V práci sa podrobne analyzujú teoretické východiská sucha v podmienkach Slovenska. Analyzujú sa jednotlivé vhodné kalkulácie indexov sucha a vodnej bilancie ekosystému, ich rozloženie v podmienkach výškovo a klimaticky vertikálne rozčlenených vegetačných stupňov Slovenska. Ukazuje sa potreba účinného boja so suchom predovšetkým v nižších vegetačných stupňoch v južných častiach Slovenska. Na hodnotenie sucha nadväzuje kalkulácia meteorologických požiar-nych indexov. Analyzuje sa vhodnosť využitia viacerých požiar-nych indexov.

Podakovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne les-né ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financované-ho z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- BALAJKA, J., LAPIN, M., MINĐÁŠ, J., ŠTASTNÝ, P., THALMEINEROVÁ, D., 2005: Štvrtá národná správa SR o zmene klímy a Správa o dosiahnutom pokroku pri plnení Kjótskeho protokolu. Ministerstvo životného prostredia SR, Slovenský hydrometeorologický ústav, Bratislava, 114 pp.
- BADECK, F.W., LASCH, P., HAUF, Y., ROCK, J., SUCKOW, F., THONICKE, K., 2004: Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko, *Der Wald* 59(2), 90–93.
- BAUMGARTNER, A., LIEBSCHER, H.J., 1990: Lehrbuch der Hydrologie Band 1: Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, Gebrüder Bornträger, Berlin, 673 pp.
- BOCHENEK, Z., DĄBROWSKA-ZIELIŃSKA, K., CIOLKOSZ, A., DRUPKA, S., BOKEN, V.K., 2005: Monitoring Agricultural Drought in Poland. In: Boken, V.K., Cracknell, A.P., and Heathcote, R.L. (eds) *Monitoring and Predicting Agricultural Drought: A Global Study*, Oxford University Press, New York, 171–180.
- BOVIO, G., CAMIA, A., 2000: Computation of Meteorological Fire Danger Indices for southern Europe. Contract N.14526-1998-11 SF1P1 ISP IT. Final Report.
- BUDYKO, M.I., (Ed.) 1955: *Atlas Tephogo Balansa* (Atlas of the heat balance) (in Russian), Gidrometeoizdat, Leningrad, 41 pp.
- BUDYKO, M. I., 1980: *Klimat v proshlom i budushchem* (Climate in the Past and in the Future) (in Russian). Gidrometeoizdat, Leningrad, 352 pp.
- BUDYKO, M. I., ZUBENOK, L. I., 1961: The determination of evaporation from the land surface (in Russian). *Izv. Akad. Nauk SSSR Ser. Geogr.* 6, 3–17.
- BUCHHOLZ, G., WEIDEMANN, D., 2000: The Use of Simple Fire Danger Rating Systems as a Tool for Early Warning in Forestry. *International Forest Fire News* 23, 32–37.
- DITMAROVÁ, L., KMEŤ, J., STŘELCOVÁ, K., GÓMÖRY, D., 2006: Effects of drought on selected physiological parameters of young beech trees under stress conditions. *Ekológia (Bratislava)* 25, 1–11.
- DUBROVSKY, M., TRNKA, M., SVOBODA, M., GATES, M., ŠILHÁTE, D., ZALUD, Z., SEMERADOVA, D., 2005: Drought Conditions in the Czech Republic in Present and Changed Climate. In: *Proceedings of the European Geophysical Union*, Vienna, 25–29.
- EEA, 2004: Impacts of Europe's changing climate report No. 2/2004. Dostupné z http://www.eea.europa.eu/publications/climate_report_2_2004
- FAO 2007: Fire management – global assessment 2006. FAO Forestry paper 151. Dostupné z <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/A0969E/A0969E00.pdf>
- FLANNIGAN, M.D., LOGAN, K.A., AMIRO, B.D., SKINNER, W.R. STOCKS, B.J., 2005: Future area burned in Canada, *Climatic Change* 72, 1–16.
- GOLDAMMER, J.G., 2003: The Wildland Fire Season 2002 in the Russian Federation An Assessment by the Global Fire Monitoring Center (GPMC). *International Forest Fire News* 28, 2–14.
- GOLDAMMER, J.G., DAVIDENKO, E.P., KONDRASHOV, L.G., EZHOV, N.I., 2004: Recent Trends of Forest Fires in Central Asia and Opportunities for Regional Cooperation in Forest Fire Management. *International Forest Fire News* 31, 91–101.
- GILLET, N. P., WEAVER, A. J., ZWEIRS, F.W. FLANNIGAN, M.D., 2004: Detecting the effect of climate change on Canadian forest fires; *Geophysical Research Letters* 31(18), 18211, doi:10.1029/2004GL020876.
- GEDALOF, Z., PETERSON, D.L., MANTUA, N.J., 2005: Atmospheric, climatic and ecological controls on extreme wildfire years in the northwestern United States, *Ecological Applications* 15, 154–174.
- HAYES, M.J., SVOBODA, M.D., WILHITE, D.A., VANYARKO, O.V., 1999: Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *American Meteorological Society* 80, 429–438.
- HEIM, R.R., 2002: A review of Twentieth-Century drought indices used in the United States. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 83, 1149–1165.
- HOLÉCY, J., ŠKVARENINA, J., TUČEK, J., MINĐÁŠ, J., 2003: Fire Risk Insurance Model for Forest Stands Growing in the Area of Slovak Paradise. In: *Forest Fire in the Wildland-Urban Interface and Rural Areas in Europe. An integral planning and management challenge*, Institute of Mediterranean Forest Ecosystems and Forest Products Technology, Athens, Greece, 161–172.
- HOLÉCY J., TUČEK, J., ŠKVARENINA, J., MINĐÁŠ, J., 2004: Matematický model poistenia lesov Slovenska proti požiarom. In: *Lesní požáry: sborník referátů ze semináře s mezinárodní účastí*. Praha, Česká zemědělská univerzita, 28–34.

- HRVOL, J., VIDA, T., ŠKVARENINA, J., NEJEDLÍK, P., 2009: Fire danger trend of the period 1983-2007 in the Bratislava wildland-urban interface area. In: PRIBULOVÁ, A., BIČÁROVÁ, S. (eds.) Sustainable development and bioclimate, Stara Lesná 2009, 197–198.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II, and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press. Dostupná z www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-syr.htm.
- KILL, A.D., MIYAGAWA, R.S., QUINTILLO, D., 1977: Calibration and performance of the Canadian Fire Weather Index in Alberta. Can. For. Serv. North. For. Res. Stn. Alta. Inf. Rep. NOR-X-173, Edmonton. 45 pp.
- KREČMER, V., (ed.) 1980: Bioklimatologický slovník terminologický a explikativní. Academia, Praha, 242 pp.
- LAPIN, M., MELO, M., DAMBORSKÁ, I., GERA, M., FAŠKO, P., 2000: Nové scenáre klimatickej zmeny pre Slovensko na báze výstupov prepojených modelov všeobecnej cirkulácie atmosféry. Národný klimatický program SR 5(8), 5–24.
- LAPIN, M., DAMBORSKÁ, I., DRINKA, R., FAŠKO, P., GAÁL, L., MELO, M., 2008: Úvod k scenárom extrémnych poveternostných situácií a vybrané výsledky spracovania. Národný klimatický program SR 12, 9–30.
- LARCHER, W., 1984: Ökologie der Pflanzen auf physiologischer Grundlage. (In German) Uni-Taschenbücher 232, UTB für Wissenschaftler. Ulmer, Stuttgart, 4th revised edition. 403 pp.
- LEVIN, N., SAARONI, H., 1999: FireWeather in Israel – Synoptic Climatological Analysis, GeoJournal 47, 523–538.
- MINDÁŠ, J., LAPIN, M., ŠKVARENINA, J., 1996: Klimatické zmeny a lesy Slovenska. Národný klimatický program SR 3(5), 1–96.
- NCDC, 2007: Climate of 2006 Wildfire Season Summary. National Climatic Data Centre, U.S. Department of Commerce. Dostupné z <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2006/fire06.html>
- PAGANOVÁ, V., 2000: Water stress impact on growth of Wild pear progenies. Folia Oecologica 27, 35–48.
- PAUSAS, J.G., 2004: Changes in Fire and Climate in the Eastern Iberian Peninsula (Mediterranean Basin), Climatic Change 63, 337–350.
- PÄÄTALO, M.L., 1998: Factors influencing occurrence and impacts of fires in northern European forests, Silva Fennica 32(2), 185–202.
- PEARCE, G. 1996: An initial assessment of fire danger in New Zealand's climatic regions. New Zealand For. Res. Inst. National Rural Fire Authority. For. And Rural Fire Res. Program, Fire Technology Transfer Note 10, 28 pp.
- PIÑOL, J., TERRADAS, J., LLORET, F., 1998: Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain, Climatic Change 38, 345–357.
- RIANO, D., MORENO RUIZ, J.A., ISIDORO, D., USTIN, S.L., 2007: Global spatial patterns and temporal trends of burned area between 1981 and 2000 using NOAA-NASA Pathfinder, Global Change Biology 13(1), 40–50.
- ROŽANOVSKÝ, J., JANOUŠ, D., (ed) 2001: Sucho, hodnocení a predikce. Pracovní seminář, ČHMU, Brno.
- SHVIDENKO, A., NILSSON, S., 2002: Dynamic of Russian forest forest and the carbon balance budget in 1961–1998: an assessment based on long-term forest inventory data. Clim Change 55, 5–37.
- STOCKS, B.J., FOSBERG, M.A., LYNHAM, T.J., MEARN, L., WOTTON, B.M., YANG, Q., JIN, J. Z., LAWRENCE, K., HARTLEY, G.R., MASON, J.A., MCKENNEY, D.W., 1998: Climate change and forest fire potential in Russian and Canadian boreal forests, Climatic Change 38(1), 1–13.
- STOCKS, B.J., LAWSON, B.D., ALEXANDER, M.E., VAN WAGNER, C.E., McALPINE, R.S., LYNHAM, T.J., DUBE, D.E., 1989: The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. The Forestry Chronicle 65(6), 450–457.
- STRĚLCOVÁ, K., MÁTYÁS, C., KLEIDON, A., LAPIN, M., MATEJKA, F., BLAŽENEC, M., ŠKVARENINA, J., HOLECY, J., (eds) 2009: Bioclimatology and natural hazards, Springer Science+Business Media B.V., 298 pp.
- ŠIŠKA, B., TAKÁČ, J., IGÁZ, D., 2005: Climate change impacts on winter wheat yield on Danubian lowland in Slovakia republic. *Savremena poljoprivreda* 54(1-2), 324–328.
- ŠIŠKA, B., SAMUHEL, P., 2007: Modeling Climate Change Impact on Maize (Zea Mays L.) Yields in Conditions of the Danubian Lowland. *Meteorological Journal* 10, 81–84.
- ŠIŠKA, B., TAKÁČ, J., 2008: Klimatická zmena a poľnohospodárstvo Slovenskej republiky. Štúdia Slovenskej bioklimatologickej spoločnosti pri SAV, ročník XXI, číslo XXIV, Vydavateľstvo Technickej univerzity vo Zvolene, 69 pp.
- ŠPÁNIK, F., ŠIŠKA, B., et al., 2004. Biometeorológia, VES SPU Nitra, 227 pp.

- TIMÁR, G., KERN, A., MOLNÁR, G., NÉMETH, Á., KONKOLY-BIHARI, Z., SZALAI, S., BOGNÁR, P., VIRÁGH, P., 2008: Leaf loss and wildfires in the central Hungarian forests during the July 2007 heat wave in MODIS satellite images. *Geophysical Research Abstracts* 10, EGU2008-A-01394.
- TOMLAIN, J., 2004: Contribution to humid conditions of Slovakia. *Acta Meteorologica Universitatis Comenianae* 33, 21–30.
- ŠKVARENINA, J., MINĐÁŠ, J., HOLÉCY, J., TUČEK, J., 2004a: An analysis of the meteorological conditions during two largest forest fire events in the Slovak Paradise National Park, *Meteorological Journal* 7(4), 167–171.
- ŠKVARENINA, J., KRIŽOVÁ, E., TOMLAIN, J., 2004b: Impact of the climate change on the water balance of altitudinal vegetation stages in Slovakia. *Ekológia* 23(2), 13–19.
- ŠKVARENINA, J., TOMLAIN, J., HRVOL, J., ŠKVARENINOVÁ, J., HLAVATÁ, H., 2008: Výskyt suchých a vlhkých období vo vegetačných stupňoch západných Karpát a Slovensku: analýza časového radu 1951–2005 a prognóza očakávaných zmien klímy. *Národný klimatický program SR* 7(12), 123–142.
- STŘELCOVÁ K, MATEJKA F, KUČERA J 2004: Beech stand transpiration assessment – two methodical approaches. *Ekológia (Bratislava)* 23(2), 147–162.
- VAN WAGNER, C. E., 1987: Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Can. For. Serv, Ottawa, Ont. For. Tech. Rep.* 35, 37 pp.
- VIDA, T., ŠKVARENINA, J., TUČEK, J., MAILINGOVÁ, A., FLEISCHER, P. 2008a: Analýza meteorologických podmienok a sucha pri vzniku lesných požiarov na kalamitných plochách TANAP-u v roku 2005. In: Šír, M., Tesař, M., Lichner, L. (ed.): *Hydrologie malého povodí 2008*, Praha, Česká republika, 335–340.
- VIDA, T., ŠKVARENINA, J., HOLÉCY, J., 2008b: Meteorologické podmienky, vývoj, frekvencia a príčiny vzniku krajinných požiarov na území Národného parku Slovenský raj v období 1976–2005, In: Rožnovský, J., Litschmann, T. (ed): *Bioklimatologické aspekty hodnocení procesů v krajině*, Mikulov, Česká republika, 13 pp.
- WESTERLING, A.L., HIDALGO, H.G., CAYAN, D.R., SWETNAM, T.W., 2006: WARMING AND EARLIER SPRING INCREASE WESTERN U.S. FOREST WILDFIRE ACTIVITY; *SCIENCE* 313(5789), 940–943.
- ZLATNÍK, A 1976: *Lesnícka fytoecológia*. SZN, Praha, 495 pp.
-

Adresa autorov:

Prof. Ing. Jaroslav Škvarenina CSc.
 Lesnícka fakulta
 Katedra prírodného prostredia
 Technická univerzita vo Zvolene
 T. G. Masaryka 24
 960 53 Zvolen

Ing. Tomáš Vida
 Fakulta ekológie a environmentalistiky
 Katedra environmentálneho inžinierstva
 Technická univerzita vo Zvolene
 T. G. Masaryka 24
 960 53 Zvolen
 e-mail: jarosk@vsld.tuzvo.sk
 vida.tomas@gmail.com

Metodologické aspekty hodnotenia sucha a rizika požiarov v meniacich sa podmienkach klímy na Slovensku.

Abstrakt

Článok sa zaoberá problematikou sucha, lesných a krajinných požiarov na Slovensku v spojitosti s nastupujúcimi zmenami klímy. Analyzuje možnosti identifikácie sucha v lesnej krajine na základe kalkulácie indexov sucha a vodnej bilancie ekosystému. Práve nárast rizika bioklimatického sucha podmieňuje zvýšené riziko výskytu lesných požiarov. Venuje sa otázkam výpočtu meteorologických indexov požiarov v lesnom prostredí. Analyzuje vhodnosť ich použitia pre podmienky temperátnej klímy Západných Karpát. Článok vznikol v rámci aktivity 2.1 Globálne a regionálne zmeny, projektu centra excelencie Lesníckej fakulty Technickej univerzity „Adaptívne lesné ekosystémy“

Kľúčové slová: sucho, meteorologické požiarne indexy, evapotranspirácia, lesné ekosystémy, zmena klímy

CYKLUS VODY, UHLÍKA A ŽIVÍN – METODOLOGICKÉ ASPEKTY ŠTÚDIA DYNAMIKY A PRIESTOROVEJ VARIABILITY VYBRANÝCH KOMPONENTOV CYKLU UHLÍKA V LESNÝCH PÔDACH

Erika GÖMÖRYOVÁ – Viliam PICHLER

Gömöryová, E., Pichler, V.: Water, carbon and nutrient cycles – methodological aspects of the study of temporal and spatial variability of the selected carbon cycle components in forest soils. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 35–44, 2009.

As a consequence of potential global warming and weather extremes, changes in the decomposition of organic material and carbon sequestration are expected. Prediction of changes in the soil organic carbon pools in forest soils is still not precise due to their high spatial, temporal changes in labile carbon fractions and diverging opinion about the mechanisms of carbon stabilization. In the framework of the activity 2.2, we will concentrate on the determination and description of the soil carbon pools, activity, biomass and composition of soil microbial populations as well as factors influencing them. Primeval or close to nature forests are ideal areas for the study of soil organic carbon pools because of a conservation of the natural biogeochemical cycles. Therefore just in such areas we suppose the study of the determination of the spatial and temporal variability of soil carbon pools, especially on cambisols, the most widespread forest soils in Slovakia. The attention will be paid to the function of dead woods in the carbon cycle. In this contribution we discuss the possibilities of the utilization of different kinds of methods used for the study of carbon cycle components.

Key words: forest soils, organic carbon, microbial respiration, soil microorganisms

1. ÚVOD

V súvislosti s očakávanými klimatickými zmenami, ktoré predpokladajú nárast koncentrácie atmosférického CO₂ a postupné otepľovanie atmosféry, vzrastá záujem o problematiku výdaja CO₂ terestriálnymi zložkami a sekvestrácie uhlíka (C) v pôdach. Napriek veľkému množstvu informácií o vplyve rôznych faktorov na jednotlivé zložky cyklu C (BUCHMANN 2000, FRANZLUEBBERS *et al.* 2001, GARCIA-PAUSAS *et al.* 2008), modelovanie a predikcia ich zmien nie sú celkom presné, a to kvôli vysokej priestorovej variabilite (STOYAN *et al.* 2000, DON *et al.* 2007), dynamike labilných frakcií C (VANHALA 2002, CLEVELAND *et al.* 2004) a často nejednotných názorov na mechanizmy jeho stabilizácie. Obsah organického C v lesných pôdach (SOC) v porovnaní s pôdami poľnohospodárskymi je omnoho premenlivejší, a to v dôsledku prítomnosti drevín. Ich vplyv sa odráža najmä v redistribúcii živín v oblasti rizosféry, syntéze a inpute rôznych látok na povrch pôdy a do

jeho najvrchnejších horizontov. V dôsledku rozdielov v chemickom zložení nadzemnej i podzemnej biomasy a jej odumretých častí (asimilačný aparát, konáriky, kôra, korene), rozdielov vo výluhoch a exudátoch, môže dôjsť k výrazným rozdielom vo vlastnostiach pôd, a to už aj na veľmi malých vzdialenostiach. Poznatky o vplyve stromov na obsah SOC v kombinácii s informáciami o priestorovom rozmiestnení stromov môžu vylepšiť naše vedomosti o priestorovej distribúcii uhlíka v lesných pôdach.

Rýchlosť dekompozície organickej hmoty spravidla narastá so zvyšujúcou sa teplotou. Na druhej strane niektorí autori (DALIAS *et al.* 2001) poukazujú na fakt, že vplyvom vyššej teploty môžu byť produkované zlúčeniny, ktoré sú odolnejšie voči rozkladu. Do akej miery sa bude organický materiál mineralizovať a humifikovať závisí aj od úhrnu zrážok a jeho rozdelenia v čase a priestore. V podmienkach strednej Európy sa očakáva nielen nárast priemerných teplôt, ale aj zmeny vo frekvencii a intenzite klimatických extrémov (extrémne nízke a vysoké teploty, prívalové dažde, a pod.). Diskutabilnou je otázka, do akej miery sa extrémny počasie odrazia na dekompozícii organickej hmoty (OM) v lesných pôdach.

Pôdna respirácia je výsledkom mikrobiálnej respirácie a výdaja CO₂ koreňmi rastlín, ktorý môže predstavovať 20–50 % z celkového CO₂ uvoľneného z pôdy. V literatúre sa uvádza, že pôdna respirácia predstavuje až okolo 25 % z globálneho výdaja CO₂ (BOWMAN *et al.* 1998). Jej presná kvantifikácia je však veľmi problematická, pretože patrí medzi najvariabilnejšie pôdne parametre (variačný koeficient sa môže pohybovať od 30 až do 150 % v závislosti od podmienok prostredia, STOYAN *et al.* 2000). Predpokladá sa, že i malé zmeny v pôdnej respirácii by sa mohli výrazne odraziť na koncentrácii atmosférického CO₂ (RUSTAD *et al.* 2000). Aj napriek jej globálnemu významu ako i pozornosti, ktorá jej bola venovaná v odborných kruhoch v posledných desaťročiach, stále pretrvávajú nedostatok informácií o jej absolútnych hodnotách v rozdielnych ekosystémoch, ako i faktoroch, ktoré ju ovplyvňujú.

Pôdna respirácia a vymývanie rozpustného organického uhlíka (DOC) predstavujú hlavné straty uhlíka z pôdy. V pôdach bohatých na živiny sa rozpustná organická hmota (DOM) veľmi rýchlo rozkladá mikroorganizmami. V chudobných alebo hydromorfných pôdach môže byť značné množstvo DOC akumulované vo forme monomorfných organických povlakov. I keď podiel rozpustného organického uhlíka na toku C v priebehu roka je pomerne malý, javí sa ako citlivý indikátor zmien zásob uhlíka. Zloženie DOM a pôdneho roztoku je v značnej miere ovplyvnené stanovištnými faktormi (vegetácia, spôsob obhospodarovania, klíma). Pomerne málo informácií máme o veľkosti a variabilite DOC v lesných pôdach. Výsledky niektorých prác naznačujú, že heterogénna infiltrácia vody a prúdenie vody cez makropórové priestory môžu zohrávať významnú úlohu v transporte DOC do hlbších horizontov lesných pôd.

Vo väčšine pôd obsah organického uhlíka klesá od pôdneho povrchu smerom do hĺbky, avšak aj hlbšie horizonty môžu disponovať vysokou kapacitou pre uskladnenie značného množstva SOC (DON *et al.* 2007). Niektoré štúdie naznačujú, že biomasa a aktivita pôdnych mikroorganizmov môže mať iný trend pozdĺž pôdneho profilu ako ich potenciálne zdroje výživy. Dôsledkom toho je skutočnosť, že relevantná časť organických látok nie je vystavená dekompozícii. Predpokladá sa, že mikrobiálne populácie, podieľajúce sa

na dekompozícii, sú limitované aj inými faktormi, nielen množstvom SOC. Pozdĺž celého pôdneho profilu možno pozorovať rozdiely medzi alokáciou uhlíka a abundanciou dekompozítorov. Výsledky z novších experimentov naznačujú, že rozklad labilných frakcií C baktériami je limitovaný transportom pôdnej vody na krátke vzdialenosti a v hlbších horizontoch pôdy je závislý od miery lokálnej difúzie alebo konvekcie. Premena fenolických substrátov, napr. lignínu hubami sa obmedzuje na vrchné horizonty pôd, nakoľko pre enzymatické reakcie je nevyhnutný dostatok kyslíka. Špecializácia dekompozítorov na rozdielne substráty a mikrohabitaty vedie k relatívne dlhšiemu pretrvávaniu všetkých druhov organických substrátov v nepreferovaných pôdnych priestoroch, kde dekompozícia je slabá, alebo kde dochádza často k prerušeniu rozkladu (EKSCHMITT *et al.* 2008). Výskum takýchto biologicky nepreferovaných oblastí za účelom odhadu potenciálne dlhodobej stabilizácie C v pôde sa javí ako veľmi aktuálny. Existujú tiež hypotézy o tom, že premena SOM hubami bude viesť k vytváraniu odolnejšej frakcie C a naopak labilnejšej pri procesoch sprostredkovaných baktériami v dôsledku rozdielneho chemického zloženia ich biomasy. Najvýznamnejšími zložkami buniek húb sú chitín a melanín, zatiaľ čo hlavnou zložkou bakteriálnych membrán sú fosfolipidy. Polyméry sú rezistentnejšie voči rozkladu, naopak fosfolipidy sú energeticky bohaté, ľahko rozložiteľné substráty, prístupné širokému spektru pôdnych mikroorganizmov. Niektoré štúdie naznačujú, že voľba takého spôsobu manažmentu pôd, ktorý uprednostňuje huby, by mohla viesť k zvýšenej sekvestracii C v pôde (BAILEY *et al.* 2002).

V rámci aktivity „Cyklus vody, uhlíka a živín“ projektu „Adaptívne lesné ekosystémy“ sa zameriame predovšetkým na určenie a charakterizovanie vybraných komponentov cyklu uhlíka v lesných pôdach, na faktory, ktoré ich ovplyvňujú a možné mechanizmy jeho stabilizácie. Cieľom bude určenie veľkosti a priestorovej variability jednotlivých komponentov cyklu uhlíka v lesných pôdach, a to tak v horizontálnom, ako aj vertikálnom smere; identifikovať súvislosti medzi lokálnymi stanovištnými faktormi, spôsobom manažmentu plôch a jednotlivými komponentmi cyklu uhlíka; zhodnotiť trendy v zmenách mikrobiálnej aktivity a zloženia mikrobiálnych spoločenstiev pozdĺž pôdneho profilu s ohľadom na potenciálne zdroje výživy a identifikovať tie pôdne a environmentálne podmienky, za ktorých môže byť uhlík potenciálne sekvestrovaný v lesných pôdach. Prínosom by malo byť aj získanie vstupných údajov, ktoré by sa následne mohli využiť pri modelovaní toku pôdneho uhlíka na úrovni krajiny alebo regiónu, ako i empirických údajov pre verifikáciu, kalibráciu a hodnotenie modelov uhlíka.

2. MATERIÁL A METODIKA

Štúdium plánujeme uskutočniť vo vybraných prírodných lesných ekosystémoch na území Slovenska, prípadne aj mimo neho. V súčasnosti areál prirodzených, človekom neovplyvnených biogeocenóz je pomerne úzky. Práve tieto areály však poskytujú ideálne možnosti pre štúdium vlastností pôd a rôznych procesov, ktoré v nej prebiehajú, nakoľko je tu predpoklad zachovania prirodzeného kolobehu látok, hoci ani tu sa nedá úplne vylúčiť antropogénny vplyv. Najmä v prírodných lesných ekosystémoch sa nachádzajú na pôdnom povrchu padnuté stromy (tzv. mŕtve drevo), ktoré vďaka atmosférickým a živej zložke

pôdy postupne podliehajú rozkladu. Ich dekompozíciou dochádza k vytváraniu lokálne zvýšenej koncentrácie organickej hmoty a k vylúhovaniu živín. Pre zistenie zmien v distribúcii uhlíka v pôde v dôsledku prítomnosti mŕtveho dreva plánujeme odber vzoriek aj v pôdnom profile priamo pod rozkladajúcim sa drevom. Pre zistenie vplyvu obhospodarovania lesných porastov na časť kolobehu uhlíka, uskutočníme odbery aj na lokalitách s rôznym manažmentom plôch.

Keďže územie Slovenska sa vyznačuje veľmi pestrou pôdnou prikrývkou, v rámci danej aktivity sa zameriame predovšetkým na naše najrozšírenejšie lesné pôdy – kambizeme, prípadne na ďalšie pôdne typy – podzoly a rendziny.

Pre splnenie plánovaných cieľov bude potrebné vykonávať práce terénne a laboratórne.

Terénne práce budú spočívať:

- a) vo vykopaní pôdných sond a odberoch vzoriek pozdĺž celého pôdneho profilu, až po materský substrát, pre určenie trendov zmien v množstvách jednotlivých zdrojov uhlíka a zloženia mikrobiálnych spoločenstiev,
- b) v intenzívnych odberoch pôdných vzoriek z najvrchnejších pôdných horizontov pre hodnotenie priestorovej variability jednotlivých frakcií organickej hmoty v horizontálnom smere,
- c) v meraní pôdnej respirácie. Na meranie plánujeme zakúpiť a využiť automatizovaný systém merania toku CO_2 z pôdneho povrchu od firmy LI-COR, Inc. NE, USA,
- d) v sledovaní dynamiky labilných komponentov cyklu uhlíka (C_{mik}, DOC, atď.) a rýchlosti dekompozície organického materiálu; vzorky sa budú odberať v určitých časových intervaloch počas vegetačného obdobia z najvrchnejších horizontov pôd. Na zisťovanie dynamiky DOC budú nainštalované lyzimetre pod pokrývkový humus a A-horizont pôd.

Laboratórne práce budú zamerané na nasledovné analýzy:

- a) stanovenie celkového a rozpustného organického uhlíka a dusíka pomocou CNS analyzátora VarioMacro. V prípade vzoriek s obsahom karbonátov stanovíme obsah organického uhlíka vo vzorkách titračne podľa ĽURINA, prípadne na CNS analyzátore po rozklade karbonátov v pôdnej vzorke,
- b) mikrobiálna biomasa sa stanoví podľa ISLAMA a WEILA (1998); pri tejto metóde časť vzorky vystavíme mikrovlnnému žiareniu (dochádza pri tom k usmrteniu mikroorganizmov), zatiaľ čo druhá časť ostane neožiarená; v extrakte z ožiarenej a neožiarenej vzorky určíme obsahy uhlíka a na základe ich rozdielu vypočítame mikrobiálnu biomasu,
- c) bazálna respirácia – výdaj CO_2 len pôdnymi mikroorganizmami v laboratórnych podmienkach; stanovíme ju titračne (absorbciou CO_2 do roztoku 0,05 M NaOH a následne zistením jeho množstva po 24 hod. titračne pomocou 0,05 HCl na fenolftaleín),
- d) selektívna inhibícia húb a baktérií – stanoví sa modifikovanou metódou autorov ANDERSON a DOMSCH (1975) za použitia antibiotík streptomycín a cykloheximid,
- e) zastúpenie funkčných skupín:
 - 1. určí sa pomocou systému BIOLOG (GARLAND 1995) – hodnotenie funkčnej diversity pôdných mikroorganizmov použitím ECO MicroPlates (BIOLOG Inc., Hayward

- CA), aktivita na jednotlivých substrátoch sa určí na základe absorbancie na prístroji Sunrise Microplate Reader (Tecan, Salzburg, Rakúsko),
2. hodnotenie katabolickej diverzity podľa DEGENSA A HARRISA (1997) metódou, ktorá využíva rozdiely v odozve mikrobiálnych spoločenstiev na pridané organické substráty,
- f) ostatné fyzikálne a fyzikálno-chemické pôdne charakteristiky – reakcia pôdy, zrnitosť, objemová hmotnosť, skeletnosť pôd, výmenná sorpčná kapacita, a pod.

3. DISKUSIA

Jedným z najväčších problémov pri štúdiu kolobehu uhlíka je vysoká priestorová variabilita hodnôt jednotlivých parametrov, najmä tých, ktoré sa vyznačujú aj určitou dynamikou v priebehu roka (respirácia mikroorganizmov a koreňov rastlín, mikrobiálna biomasa, rozpustný organický uhlík, atď.). Keďže najbohatšie na organický uhlík a živú zložku pôdy sú najvrchnejšie pôdne horizonty, spravidla s týmito sa uvažuje aj pri modelovaní a predikcii zmien v cykle uhlíka. Niektoré práce však poukazujú na skutočnosť, že aj v hlbších pôdnych horizontoch môže prebiehať čulá mikrobiálna aktivita, ba dokonca práce talianskych pôdoznalcov dokazujú, že významným obsahom organickej hmoty a mikrobiálnej biomasy sa vyznačuje nielen jemnozem (frakcia menšia ako 2 mm), ale aj skelet, s ktorým sa pri laboratórnych analýzach neuvažuje, a to dokonca aj skelet z väčších hĺbok (AGNELLI *et al.* 2001, CERTINI *et al.* 2004). Niektoré pôdne typy vytvorené v našich podmienkach sú mimoriadne bohaté na obsah organickej hmoty aj vo väčších hĺbkach. Ako príklad môžeme uviesť výsledky analýz pôdneho profilu kambizeme andozemnej z lokality Vtáčnik, kde ešte aj v hĺbke 70–75 cm bol obsah organického uhlíka vyše 5 % (tab. 1). Pri odberoch pôdnych vzoriek v rámci aktivity 2.2. sa preto plánujeme zamerať aj na hlbšie pôdne horizonty za účelom podchytenia variability, kvantity a kvalitatívneho zloženia pôdnej organickej hmoty v celom pôdnom profile.

Výber metód stanovenia hodnôt parametrov cyklu C môže značnou mierou ovplyvňovať kvalitu výsledných hodnôt. Viaceré práce poukazujú na rozdiely v presnosti stanovenia množstva organického uhlíka rôznymi analytickými metódami, pričom presnosť stanovenia kolíše pri strate žíhaním v rozpätí od 1,2–15,8 %, pri oxidačnej metóde WALKLEY & BLACKA 1,6–4,2 %, a pri suchom spaľovaní 1,3–7,1 % (GOIDTS *et al.* 2009). Na pracovisku KPP TU vo Zvolene sme porovnávali výsledky stanovenia obsahu organického uhlíka dvomi spôsobmi: Ľurinovou metódou (oxidimetrické stanovenie) a CNS analyzátorom VarioMacro na 30 vzorkách z lokality Vtáčnik (nepublikované). Išlo o pôdne vzorky s hodnotami pH – H₂O = 3,3–4,7, takže vo vzorkách nie je predpoklad výskytu karbonátov. Ukázalo sa, že stanovenie CNS analyzátorom dávalo vo všetkých prípadoch o niečo vyššie výsledky ako titračné stanovenie, a to najmä pri vyššom obsahu uhlíka v danej vzorke (nad 15 %). Predpokladáme, že rozdiely neboli spôsobené heterogénnosťou vzorky, ale v dôsledku rôznych mechanizmov zisťovania C. Diskutabilné je, ktorá z týchto dvoch metód poskytuje presnejšie údaje. V rámci projektu plánujeme použiť CNS analyzátor, pretože pri jednej analýze získame informáciu tak o obsahu uhlíka, ako aj dusíka, a teda aj o pomere C/N, čo je významný ukazovateľ kvality organického materiálu.

Zároveň však vo vybraných vzorkách stanovíme množstvo organického uhlíka aj titračne, predovšetkým v prípade vzoriek s vyšším obsahom C a vzoriek obsahujúcich karbonáty. Naďalej budeme využívať možnosť porovnávania metód stanovenia C za účelom jeho precíznej kvantifikácie.

Tab. 1 Obsah organického uhlíka, mikrobiálnej biomasy a extrahovateľného uhlíka v pôdnom profile kambizeme andozemnej (lokalita Vtáčnik, 1197 m n. m., bukový porast)

Table 1 The content of soil organic carbon, microbial biomass and dissolved organic carbon in the soil profile of Andic Cambisol (locality Vtáčnik, 1197 m a.s.l., beech stand)

Hĺbka (cm)	Organický uhlík (%)	Mikrobiálna biomasa (lg C.g ⁻¹)	Extrahovateľný uhlík (lg C.g ⁻¹)
0–5	14,09	1218	109
10–15	12,43	982	101
20–25	12,36	535	86
30–35	11,66	557	64
40–45	10,36	419	72
50–55	9,37	432	50
60–65	9,2	113	96
70–75	6,4	167	82

Jedným z najvariabilnejších pôdnych parametrov je pôdna respirácia. Spočiatku sa na jej stanovenie využívali laboratórne metódy za kontrolovateľných podmienok (teplota, vlhkosť), neskôr sa ukázala potreba kontinuálneho merania respirácie a merania na neporušených pôdnych vzorkách. Preto sa postupne začali využívať metódy merania „*in situ*“. V súčasnosti existuje niekoľko spôsobov merania toku CO₂ z pôdy v terénnych podmienkach, počnúc relatívne jednoduchými metódami ako statická – s natrónovým vápnom, metódy s použitím komerčne vyrábaných otvorených alebo uzavretých dynamických komôr, až po mikrometeorologické techniky založených na „eddy kovariancii“ a gradientoch koncentrácie. V posledných rokoch sa objavili viaceré práce, ktoré porovnávajú pôdnu respiráciu zisťovanú dvomi alebo viacerými metódami, avšak ucelená štúdia porovnávajúca všetky metódy ešte dosiaľ nebola zverejnená vzhľadom na problémy vznikajúce pri porovnávaní údajov z rôznych miest. Je však zrejmé, že každá metóda má svoje „pre“ aj „proti“. Výhodou komorových systémov je ich ľahká obsluha, rýchle získavanie údajov, možnosť simultánne merať koncentráciu niekoľkých plynov. Na druhej strane, pokiaľ sú komory dlhodobo umiestnené na jednom mieste, dochádza k ovplyvneniu pôdneho prostredia. Nie u všetkých komôr sú vyriešené problémy s tlakovými pomermi vo vnútri komôr, merania v zime sú problematické, atď. Gradientová metóda má výhodu v tom, že je možné merať koncentráciu CO₂ v rôznych pôdnych horizontoch aj v zimnom období, avšak výsledky výrazne ovplyvňuje pórovitosť a vlhkosť pôdy (difúzia CO₂ vo vode). Problematické je aj kontinuálne meranie. Pokiaľ ide o namerané hodnoty, HEALY *et al.* (1996) uvádzajú, že komorové systémy podhodnocujú údaje. Opačné skúsenosti majú GOULDEN *et al.* (1996). Pri štúdiu pôdnej respirácie sme sa rozhodli využiť automatizovaný systém merania toku CO₂

z pôdy LI-8100 (firma LI-COR, Inc. USA), ktorý pri porovnávacích štúdiách vykazoval najbližšie hodnoty k hodnotám referenčným. Keďže pôdy v lesných ekosystémoch sa vyznačujú značnou variabilitou pôdných vlastností, zvolili sme nie stacionárny typ prístroja pre dlhodobé merania (long-term chamber), ale prenosný typ (survey chamber), ktorý nám umožní vykonávať opakované merania na viacerých miestach a podchytiť tak variabilitu pôdnej respirácie v lesných ekosystémoch.

Huby a baktérie sú hlavné dve skupiny mikroorganizmov, ktoré zohrávajú významnú úlohu pri dekompozícii organického materiálu. Na diferenciáciu húb od baktérií existuje niekoľko spôsobov – mikroskopické metódy, stanovenie špecifických látok vyskytujúcich sa v bunkových štruktúrach (napr. ergosterolu pri hubách alebo fosfolipidov pri baktériách), či selektívna inhibícia. Pri metódach selektívnej inhibície, ktorú plánujeme využiť pri analýze našich vzoriek, sa k pôdnym vzorkám pridávajú selektívne biocídy (napr. streptomycín ako bakteriocíd a cycloheximid ako fungicíd). Táto metóda spomedzi ostatných má výhodu v tom, že odpadajú problémy so separáciou živých a odumretých mikroorganizmov, nie je náročná na prístrojové či materiálové vybavenie, a je rýchla a jednoduchá. Určitou nevýhodou je fakt, že nie vždy je možné podchytiť malé zmeny v štruktúre spoločenstiev (JOERGENSEN *et al.* WICHERN 2008).

Pre identifikáciu metabolického potenciálu spoločenstva sme sa rozhodli použiť metódu BIOLOG (GARLAND 1995). Pri tejto metóde sa na identifikáciu využívajú jednoduché na uhlík bohaté substráty (napr. L-arginín, L-asparagín, D-xylóza, D-laktóza, a ďalšie), ktoré sú spolu s farbivom (tetrazólium) umiestnené v jamkách na mikroplatniach. Podľa schopnosti rozkladať konkrétny substrát je následne možné identifikovať fyziologický potenciál spoločenstva. Je pravda, že metódou je podchytená len časť substrátov, ktoré sú mikroorganizmom prístupné v prírodných ekosystémoch. Na druhej strane sú medzi nimi aj také substráty, ktoré sú obsiahnuté v odumretej rastlinnej hmote. Metóda BIOLOG má svojich odporcov, ktorí namietajú, že týmto spôsobom sa podchytiť len tie mikroorganizmy, ktoré sú schopné kultivácie (PRESTON-MAFHAM *et al.* 2002). Napriek tomu je metóda BIOLOG stále bežne a často používanou metódou pre stanovenie CLPP (Community level physiological profiling). Podľa viacerých autorov molekulárne techniky prinášajú omnoho viac informácií o diverzite mikroorganizmov v pôde. Molekulárne metódy (príjajme najmenšom tie, ktoré sa momentálne využívajú v mikrobiológii) však dávajú dobrý obraz len o neutrálnej genetickej variabilite. Štúdium sekvencií DNA (napr. ITS sekvencie rDNA, ktoré sú najčastejším nástrojom v molekulárnej mikrobiológii) je veľmi užitočné pre taxonomické účely a evolučné štúdie, ale nie sú veľmi vhodné pri štúdiu adaptácie organizmov, kde umožňujú študovať len medzidruhový výber. U mikroorganizmov, ktoré sa vyznačujú extrémne krátkou generačnou dobou (v porovnaní s vyššími organizmami), vysokou frekvenciou mutácií a horizontálnym prenosom génov je však široký priestor aj pre vnútrodrohovú selekciu medzi jednotlivými bakteriálnymi kmeňmi či bunkovými líniami s rozdielnym genotypom. Taxonomické zloženie mikrobiálnych spoločenstiev sa teda nemusí nutne podstatne meniť so zmenou prostredia, na rozdiel od funkčnej variability. Pre účely našej štúdie teda molekulárne metodiky nemusia plniť svoj účel a za racionálnejšie riešenie považujeme použitie metód, ktoré priamo odrážajú funkčnú variabilitu mikrobiálnych spoločenstiev.

Okrem spomenutej metódy BIOLOG, navrhujeme pre analýzu fyziologického profilu pôdných mikrobiálnych spoločenstiev použiť aj modifikovanú metódu DEGENSA a HARRISA (1997) podľa CAMPBELL *et al.* (2003), kde na rozdiel od predchádzajúcej metódy pracujeme s „celou“ pôdou, pričom sa nevyžaduje žiadna extrakcia či kultivácia. Po pridaní rôznych na uhlík bohatých substrátov k pôdnej vzorke nasleduje meranie po 4–6 hod. na kolorimetri, takže je to metóda veľmi rýchla a efektívna na rýchlu detekciu spotreby uhlíkatých substrátov.

Predpokladáme, že navrhovaná metodika a použitie uvedených metód v rámci aktivity „Cyklus vody, uhlíka a živín“ významnou mierou prispeje k detailnejším kvalitatívnym i kvantitatívnym informáciám, ktoré sú nevyhnutné pre prognózy vývoja koncentrácie CO₂ v atmosfére a sekvestracii uhlíka v pôde, ako i pre precízny návrh opatrení z hľadiska trvalo-udržateľného rozvoja krajiny.

Pod'akovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- AGNELLI A., UGOLINI F.C., CORTI G., PIETRAMELLARA G., 2001: Microbial biomass-C and basal respiration of fine earth and highly altered rock fragments of two forest soils. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 613–620.
- ANDERSON J.P.E., DOMSCH K.H., 1975: Measurement of bacterial and fungal contribution to respiration of selected agricultural and forest soils. *Canadian Journal of Microbiology* 21: 314–322.
- BAILEY V.L., SMITH J.L., BOLTON H. JR., 2002: Fungal-to-bacterial ratios in soils investigated for enhanced C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry* 34: 997–1007.
- BOWMANN A.F., GERMON J.C., 1998: Special issue – Soils and climate change – Introduction. *Biology and Fertility of Soils* 27: 219.
- BUCHMANN N., 2000: Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry* 32: 1625–1635.
- CAMPBELL C.D., CHAPMAN S.J., CAMERON C.M., DAVIDSON M.S., POTTS J.M., 2003: A rapid microtiter plate method to measure carbon dioxide evolved from carbon substrate amendments so as to determine the physiological profiles of soil microbial communities by using whole soil. *Applied and Environmental Microbiology* 69: 3593–3599.
- CERTINI G., CAMPBELL C.D., EDWARDS A.C., 2004: Rock fragments in soil support a different microbial community from the fine earth. *Soil Biology and Biochemistry* 36: 1119–1128.
- CLEVELAND C.C., TOWNSEND A.R., CONTANCE B.C., 2004: Soil microbial dynamics in Costa Rica: seasonal and biogeochemical constraints. *Biotropica* 36: 184–195.
- DALIAS P., ANDERSON J.M., BOTTNER P., COÛTEAUX M.M., 2001: Long-term effects of temperature on carbon mineralisation processes. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1049–1057.
- DEGENS B.P., HARRIS J.A., 1997: Development of a physiological approach to measuring the catabolic diversity of soil microbial communities. *Soil Biology and Biochemistry* 29: 1309–1320.
- DON A., SCHUMACHER J., SCHERER-LORENZEN M., SCHOLTEN T., SCHULZE E.-D., 2007: Spatial and vertical variation of soil carbon at two grassland sites – Implications for measuring soil carbon stocks. *Geoderma* 141: 272–282.
- EKSCHMITT K., KANDELER E., POLL CH., BRUNE A., BUSCOT F., FRIEDRICH M., GLEIXNER G., HARTMANN A., KÄSTNER M., MARHAN S., MILTNER A., SCHEU S., WOLTERS V., 2008: Soil-carbon preservation through habitat constraints and biological imitations on decomposer activity. *J. Plant Nutrition and Soil Science* 171: 27–35.

- FRANZLUEBBERS A.J., HANEY R.L., HONEYCUTT C.W., ARSHAD M.A., SCHOMBERG H.H., HONS F.M., 2001: Climatic influences on active fractions of soil organic matter. *Soil Biology and Biochemistry* 33: 1103–1111.
- GARCIA-PAUSAS J., CASALS P., CAMARERO L., HUGUET C., THOMPSON R., SEBASTIA M.-T., ROMANYA J., 2008: Factors regulating carbon mineralization in the surface and subsurface soils of Pyrenean mountain grasslands. *Soil Biology and Biochemistry* 40: 2803–2810.
- GARLAND J.L., 1995: Analytical approaches to the characterization of samples of microbial communities using patterns of potential C source utilization. *Soil Biology and Biochemistry* 28: 213–221.
- GOIDTS E., VAN WESEMAEL B., CRUCIFIX M., 2009: Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales. *European Journal of Soil Science* 60: 723–739.
- GOULDEN M.L., MUNGER J.W., FAN S.M., DAUBE B.C., WOFSEY S.C., 1996: Measurements of carbon sequestration by long-term eddy covariance: Methods and critical evaluation of accuracy. *Global Change Biology* 2:169.
- HEALY R.W., STRIEGEL R.J., HUTCHINSON G.L., LIVINGSTON G.P., 1996: Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil atmosphere gas exchange: Identification of physical processes. *SSSAJ* 60: 740–747.
- ISLAM K.R., WEIL R.R., 1998: Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biology and Fertility of Soils* 27: 408–416.
- JOERGENSEN R.G., WICHERN F., 2008: Quantitative assessment of the fungal contribution to microbial tissue in soil. *Soil Biology and Biochemistry* doi: 10.1016/j.soilbio.2008.08.017.
- PRESTON-MAFHAM J., BODDY L., RANDERSON P.F., 2002: Analysis of microbial community functional diversity using sole-carbon-source utilization profiles – a critique. *FEMS Microbiology Ecology* 42: 1–14.
- RUSTAD L.E., HUNTINGTON T.G., BOONE R.D., 2000: Controls on soil respiration: Implication for climate change. *Biogeochemistry* 48: 1–6.
- STOYAN H., DE-POLLI H., BÖHM S., ROBERTSON G.P., PAUL E.A., 2000: Spatial heterogeneity of soil respiration and related properties at the plant scale. *Plant and Soil* 222: 203–214.
-

Adresa autorov:

Ing. Erika Gömöryová, CSc.
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
e-mail: egomory@vsld.tuzvo.sk

doc. Dr. Viliam Pichler
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
e-mail: pichler@vsld.tuzvo.sk

Cyklus vody, uhlíka a živín – metodologické aspekty štúdia dynamiky a priestorovej variability vybraných komponentov cyklu uhlíka v lesných pôdach

Abstrakt

V súvislosti s očakávanými klimatickými zmenami sa predpokladajú aj zmeny v rýchlosti dekompozície organickej hmoty a sekvestracii uhlíka. Doterajšie prognózy vývoja jednotlivých komponentov cyklu uhlíka v lesných pôdach sú diskutabilné vzhľadom na ich vysokú priestorovú variabilitu, značnú dynamiku labilných frakcií a nie celkom objasnené mechanizmy stabilizácie uhlíka v pôdach. V rámci aktivity 2.2. sa zameriame na štúdium variability celkového organického uhlíka, ako aj aktivity, biomasy a zloženia mikrobiálnych spoločenstiev, ktoré zohrávajú kľúčovú úlohu v cykle uhlíka. Ideálnym priestorom pre štúdium sú prírodné či prírode blízke lesné ekosystémy, nakoľko v nich je predpoklad zachovania prirodzeného kolobehu látok. Práve v takýchto ekosystémoch navrhujeme štúdium jednotlivých komponentov, pričom sa zameriame najmä na kambizeme, ktoré predstavujú najrozšírenejšie lesné pôdy na Slovensku. Pozornosť budeme venovať aj úlohe tzv. mŕtveho dreva v cykle uhlíka. V príspevku diskutujeme o možnostiach využitia rôznych metód pri štúdiu vybraných komponentov kolobehu uhlíka.

Kľúčové slová: lesné pôdy, organický uhlík, respirácia mikroorganizmov, pôdne mikroorganizmy

CYKLUS VODY, UHLÍKA A ŽIVÍN – KVANTITATÍVNE INDIKÁTOROVÉ EXPERIMENTY V LESNÝCH PÔDACH

Marián H O M O L Á K – Viliam P I C H L E R – Juraj G R E G O R

Homolák, M., Pichler, V., Gregor, J.: Water, carbon and nutrients cycles-quantitative clye tracer experiments in forest soil. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 45–54, 2009.

This paper is a contribution to the problematic, how to simplify and accelerate the determination of hydraulic conductivity in forest soil, because there are not fast methods for it and for routine use. To determine the hydraulic conductivity in soil is a difficult task, because there is especially in forest a considerable spatial variability of hydraulic characteristic of soils, which is caused by soil surface, vegetation and soil heterogeneity. In order to enable a faster measurement of hydraulic conductivity, we proposed a new method on the base of stochastic-convective model and we carried out corresponding field experiments in order to be able to establish the dependences of hydraulic conductivity $K(\theta)$.

Key words: forest soil, prediction of hydraulic conductivity, stochastic-convective model, indicator experiment, resident concentration

1. ÚVOD

Hydraulická vodivosť pôd $K(\theta)$ je dôležitý hydrofyzikálny parameter potrebný pre aplikácie v oblasti pôdnej hydrológie, ekopedológie a environmentalistiky (BENETIN 1970, NOVÁK 1995). Tento parameter je kľúčovým elementom pri výpočtoch a modelovaní vsakovania zrážkovej vody, pri predpovediach pohybu vody a rozpustených látok v pôde (IBRAIM, ANDERSON 2002), pri skúmaní správania sa účinných látok aplikovaných na povrch pôdy a produktov ich rozpadu (VRYZAS, PAPADOPOULOU – MOURKIDOU 2006; KAHL *et al.* 2006), analýze mobility ťažkých kovov a iných kontaminujúcich látok v pôde (FLURY 2006; AFUYNI *et al.* 2006) a pri posudzovaní vnútrópodnej erózie a stability svahov (KEIM *et al.* 2006).

Priestorová variabilita obsahu vody v pôdach je podmienená časovo-priestorovou variabilitou zrážok a heterogenitou reliéfu, vegetačného krytu a pôd. To znamená, že hydraulické vlastnosti pôdy sa menia nepravidelne a vzhľadom na platnosť Hagen-Poiseuilleovho zákona aj nelineárne. Stanovenie strednej hodnoty hydraulických vlastností nepostačuje k presnému kvantifikovaniu prúdenia vody v zóne aerácie. Jednou z možností ako zrýchliť a zjednodušiť stanovenie hydraulickej vodivosti v pôdach je využitie indikátorových experimentov, s cieľom nie len kvalifikovať ale aj kvantifikovať prúdenie vody v pôdnej matici a na tomto základe vypočítať $K(\theta)$ pre pôdu ako celok.

2. PROBLEMATIKA

Indikátorové metódy sa v hydropedológii využívajú na sledovanie prúdenia vody a prenosu nereaktívnych a reaktívnych rozpustných látok v pôde. Merania prebiehajú buď priamo v teréne, alebo v neporušenej vzorke pôdy v laboratóriu. Nameraná koncentrácia rozpustnej látky závisí od použitej meracej látky. V hydrológii povodí sa uplatňujú pri výskume rôznych čiastkových procesov odtoku – od sledovania rýchlosti prúdenia vody v pôdnom profile v nenasýtenej aj nasýtenej zóne, kvantitatívneho hodnotenia dopĺňovania zásob podzemných vôd, výskumu vzťahov medzi povrchovým tokom a okolitým územím, až po separáciu zložiek odtoku.

Základom indikátorových metód je označenie nejakého materiálu alebo predmetu tak, aby ho bolo možné identifikovať alebo detegovať v ľubovoľnom čase (AKERMAN 1972). Ako indikátory sa používajú látky, ktorých pohyb alebo zmeny koncentrácie možno ľahko sledovať. Sú to najčastejšie chemické látky, farbivá, nuklidy, ale aj baktérie, bakteriofágy, riasy a pod. Medzi niektoré základné vlastnosti indikátora, aby bol vhodný na sledovanie pohybu vody, patria (PLATA 1972; MOSER, RAUERT 1980; JESTER *et al.* 1987; LICHNER 1985, 1992):

- mal by byť dobre rozpustný v pôde,
- mal by mať veľký súčiniteľ riedenia, aby sa s malým množstvom indikátora dalo označiť veľké množstvo vody,
- mal by mať rovnakú pohyblivosť ako voda,
- nemal by chemicky reagovať s vodou a materiálmi prostredia,
- mal by mať zanedbateľnú adsorpciu na častice prostredia.

Pri sledovaní prúdenia vody a prenosu rozpustných látok v pôde pomocou farebného indikátora je potrebné merať koncentráciu indikátora v rôznych hĺbkach pôdy. Možno na to využiť metódy spojené s odberom vzoriek pôdy alebo pôdnej vody, vlákno optické snímače, ako aj fotografickú techniku spojenú s digitalizáciou dvojrozmerného rozdelenia koncentrácie (LICHNER, HOLKO 2001).

V posledných rokoch sa indikátorové experimenty začali využívať pri skúmaní transportu vody a rozpustených látok v pôde, kedy sa na povrch pôdy aplikuje nereaktívny indikátor, či už v suchej (práškovej) forme, alebo vo forme vodného roztoku. Po uplynutí určitého časového intervalu sa odкрývajú pôdne profily, na ktorých sú dobre viditeľné transportné cesty roztoku indikátora. Tento typ experimentov nás priviedol na myšlienku využitia rezidenčnej koncentrácie indikátora k predikcii hydraulickej vodivosti pôdy ako funkcie vlhkosti pôdy. Je možné ho využiť ako alternatívu veľmi prácneho a málo reprezentatívneho merania priebehu hydraulickej vodivosti pôd na neporušených vzorkách, a tiež odvodenia hydraulickej vodivosti z retenčných kriviek pôdy ako významnej transportnej charakteristiky (VAN GENUCHTEN 1980; KLUTE 1986; MUALEM 1986). Zároveň je tak možné odhadnúť hydraulickú vodivosť celého objemu pôdy skutočne sa podieľajúceho na transporte vody, na rozdiel od merania v neporušených vzorkách pôd, ktoré nedosahujú reprezentatívny elementárny objem (BEAR 1972; KUTÍLEK 1978) a hodnôt $K(\theta)$ odvodených z retenčných kriviek, ktoré udávajú hodnoty hydraulickej vodivosti len pre určitú hĺbku. Navyše nedochádza k poškodeniu pôdy a meranie sa robí na neporušenej

pôde na rozdiel od meraní, pri ktorých je vstupnou veličinou výtoková koncentrácia indikátora.

Nenasýtená hydraulická vodivosť a jej variabilita

Nenasýtená hydraulická vodivosť je nelineárna funkcia obsahu vody $K(\theta)$ alebo vlhkostného potenciálu $K(h_w)$. Hrubozrnnejšie pôdy majú pri vysokej objemovej vlhkosti väčšiu hydraulickú vodivosť než pôdy s prevahou ílu, nakoľko obsahujú viac hrubších pórov, ktoré rýchlejšie vedú vodu. Ak sa však najhrubšie póry odvodnia, spôsobí to dramatický pokles hydraulickej vodivosti, zatiaľ čo v ílovitých pôdach odvodňovanie pórov, a tým aj pokles hydraulickej vodivosti postupuje pomalšie (JURY, HORTON 2004). Prúdenie vo vodou nenasytenej pôde opisuje Richardsova rovnica:

$$\frac{\partial \theta}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

Hydraulická vodivosť závisí od geometrie pôdných pórov. Textúra a štruktúra pôdy sú základnými určujúcimi činiteľmi geometrie pórovitého prostredia a ďalej sa premietajú do vlastností ako tortuozita τ a kontinuita pôdných pórov. V pôdach s vyšším obsahom ílu, zloženie pôdneho roztoku, obsah koloidov a iných častíc, napr. baktérií, môže významne ovplyvniť hydraulickú vodivosť v dôsledku interakcií medzi pôdnym roztokom a pôdnou maticou (KLUTE, DIRKSEN 1986).

Stochasticko-konvektívny model

V období 90-tych rokov minulého storočia sa pre stanovenie hydraulickej vodivosti začal využívať stochasticko-konvektívny model využívajúci koncentráciu indikátora ako vstupnú veličinu. Model pre výpočet hydraulickej vodivosti na základe funkcie rozdelenia hustoty pravdepodobnosti navrhla O'LINGER *et al.* (1997), ktorá nadviazala na práce SCOTTERA a ROSSA (1994). Cieľom je stanoviť funkčný vzťah medzi hydraulickou vodivosťou pôdy $K(\theta)$ a funkciou rozdelenia hustoty pravdepodobnosti prechodového času nereaktívneho roztoku pri nejakej referenčnej hĺbke z . Súčasná verzia modelu vyžaduje nasledujúce predpoklady:

- ustálený tok vody (J_w) a obsah vody (θ) v transportnom objeme (nemusí byť konštantný);
- výskyt gravitačného prúdenia (blízko pôdneho povrchu, pri vysokej rýchlosti prúdenia, alebo v prípade hlbkej hladiny podzemnej vody);

$$J_w \approx -K(\theta_s) \quad (2)$$

- minimálne bočné miešanie (stochasticko-konvektívne prúdenie).

3. METODIKA

Aplikátor indikátora

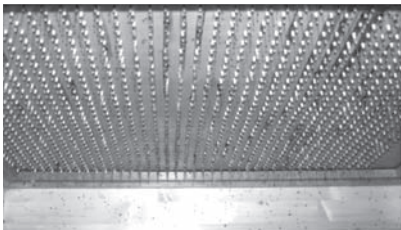
Cieľom terénneho experimentu je získať profily rezidenčnej koncentrácie indikátora po jeho aplikácii na povrch lesnej pôdy. Najprv sa vyberú vhodné plochy, pôdy ktorých budú na začiatku nasycované čistou vodou. Po dosiahnutí ustáleného toku bude na povrch aplikovaný roztok indikátora a po skončení aplikácie, vyhlbení pôdných sond a odfotografovaní pôdných profilov sa posúdi priestorová distribúcia rezidenčnej koncentrácie indikátora.

Pri plánovaných experimentoch sa použije aplikátor indikátora vlastnej konštrukcie. Simulované budú podmienky reálne v lesnom prostredí, kde sa zrážky vyskytujú vo forme kvapiek dopadajúcich priamo na povrch pôdy, alebo odkvapkávajúc z povrchu vegetačného krytu. Preto hlavnou konštrukčnou požiadavkou bolo, aby aplikátor indikátora distribuoval vodu po kvapkách a nie formou hmly. Tiež bolo potrebné brať do úvahy ľahkú manipuláciu, skladnosť a mobilitu indikátorového aplikátora, aby ho bolo možné ľahko a relatívne v krátkom čase premiestňovať medzi experimentálnymi plochami. Z tohto dôvodu bol aplikátor indikátora navrhnutý tak, aby bol modulárny a transportovateľný po častiach.

Hlavnou nosnou časťou indikátorového aplikátora je drevený rám s vnútornými rozmermi 1,3 m × 1,3 m. V rohoch rámu sú hranoly s rozmermi 0,1 m × 0,1 m s vyfrézovanými otvormi 0,05 m × 0,05 m, do ktorých sa vkladajú teleskopické nohy slúžiace na nastavenie ľubovoľnej výšky a pri meraní vo svahu tiež na znivelizovanie indikátorového aplikátora za pomoci nainštalovanej vodováhy. Do tohto rámu je vložená doska s rozmermi 1,2 m × 1,2 m, v ktorej sú na ploche 1 m² umiestnené injekčné ihly v spone 0,025 m × 0,025 m, spolu 1600 ihiel (obr. 1). Na okraji dosky je pevne pripevnené vibračné zariadenie, ktoré zabezpečuje náhodné rozdelenie kvapiek tekutiny.

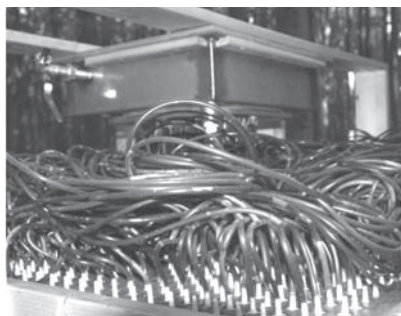
Ihly sú spárované pomocou spojok v tvare T, pričom ku každému páru ihliel je voda privádzaná samostatnou hadičkou. Na prívod tekutiny ku hadičkám, ako aj spojenie ihliel, sú použité PVC hadičky. Kvapalina je do systému hadičiek privádzaná z 1000 l zásobníka, ktorý je pripojený na pretlakovú, vzduchotesne uzatvorenú nádobu vyrobenú z 3 mm hrubého antikorového plechu. V tejto nádobe sa vyrovnáva tlak tak, aby do každej z 800 hadičiek voda vstupovala v rovnakom množstve.

Pretlaková nádoba je zabezpečená v prípade potreby poistným ventilom (obr. 2). Zo spomenutého 1000 l zásobníka je kvapalina do systému hadičiek čerpaná dávkovacím čerpadlom DME 150-4 B PP/E/C-F-31QQF od firmy Grundfos (obr. 3). Pri manuálnom nastavení množstva prečerpávanej kvapaliny dokáže toto čerpadlo pracovať v rozsahoch od 200 ml/h⁻¹ až 150 l/h⁻¹, pri tlaku 4 bary a maximálnej sacej výške 4 m. Presnosť dávkovania kvapaliny je ±1%. Rýchlosť nasatia požadovaného množstva kvapaliny sa podľa údajov výrobcu pohybuje v rozmedzí niekoľkých desiatín sekundy až do približne 1,2 s, podľa zvoleného programu.



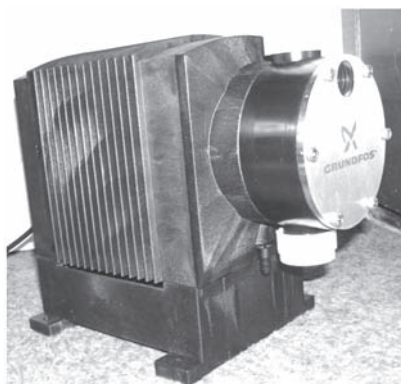
Obr. 1: Detailný pohľad na distribúciu kvapiek roztoku indikátora

Fig. 1: Distribution of tracer solute



Obr. 2: Pretlaková nádoba a nasýtený systém hadičiek aplikátora indikátora

Fig. 2: Liquid distribution tank and saturated system of plastic tubes



Obr. 3: Dávkovacie čerpadlo Grundfos DME 150-4 B PP/E/C-F-31QQF

Fig. 3: Dosing pump Grundfos DME 150.4 BPP/E/C-F-31QQF

Analýza obrazu

Pôdne profily budú odфотографované zo statívu digitálnym fotoaparátom s vysokým rozlíšením vo formáte RAW. Pôdne profily budú počas fotoграфovania zatienené za účelom dosiahnutia najhomogénnejšieho osvetlenia. Proces analýzy obrazu bude vykonaný v programe skompilovanom v prostredí R (CAPULIAK *et al.* 2008), ktorý je modifikáciou postupu podľa FORREROVEJ (1997). Sivý rám vložený do pôdneho profilu slúži na farebnú korekciu a geometrickú korekciu snímky.

Určenie vzťahov a výpočet hodnôt hydraulickej vodivosti pôdy

Hydraulickú vodivosť a vlhkosť pôdy stanovíme podľa O'LINGEROVEJ (1998), prostredníctvom vzťahov známych z literatúry (SCOTTER, ROSS 1994) a ich ďalšou úpravou a algebrickou manipuláciou. Výsledné rovnice budú získané výpočtom v prostredí *MATHEMATICA*[®] 6 (Wolfram Research, Inc.), po definovaní príslušných podmienok. Kľúčovou informáciou pre tento výpočet sú parametre lognormálneho rozdelenia, vyrovnaného na profil stanovenej rezidenčnej koncentrácie indikátora.

4. DISKUSIA

Z hľadiska cieľov práce zohrávala kľúčovú úlohu konštrukcia vhodného zavlahovacieho zariadenia, ktoré by zabezpečilo rovnomerné zavlaženie povrchu pôdy, a teda aj pôdneho profilu pre zabezpečenie rovnakých podmienok toku vody vo všetkých póroch. Nami navrhnuté a zostavené zariadenie sa vyznačuje niekoľkými spoločnými črtami a odlišnosťami v porovnaní so zariadeniami používanými doma a v zahraničí. Pre závlahu malých experimentálnych plôch sú v zásade používané dva druhy simulátorov. Do prvej skupiny patria simulátory formujúce dážď vo forme kvapiek (EKERN 1950, BARNES, COSTEL 1957, ADAMS *et al.* 1957, MUTCHLER, MOLDENHAUER 1963, CHOW, HARBAUGH 1965, PETERSON, BUBENZER 1986), do druhej simulátory formujúce kvapky prostredníctvom sprejových hlavíc vo forme jemnej hmly. Z uvedených typov simulátorov sme sa pre naše potreby rozhodli použiť simulátor formujúci kvapky. Za hlavný nedostatok simulátorov so sprejovými hlaviciami vytvárajúcimi hmlu považujeme ťažko predvídateľnú priestorovú distribúciu kvapôčok hmly z dôvodu bočného unášania vetrom a z toho vyplývajúceho nerovnomerného rozmiestnenia indikátora po povrchu pôdy. Za účelom redukcie tohto javu sa začalo používať ohraničenie plochy rôznymi rámami, čo GHODRATI *et al.* (1990) považujú za jednu z hlavných požiadaviek kladených na simulátory, hlavne pri experimentoch, pri ktorých sa vyžaduje zaplavenie povrchu pôdy. Pri týchto typoch simulátorov sú sprejové hlavice spravidla upevnené na vrchu rámu, či už v statickej polohe, alebo pohyblivé. Pri aplikácii sa ale indikátor v tomto prípade vyzráža na stenách rámu a vzniká tu preferované prúdenie vedľa stien rámu. Pri zaplavovaní pôdy tiež môže dochádzať k vzniku preferovaného prúdenia vedľa stien simulátora, najmä ak sú tieto vtlačené do pôdy, čo navyše rozrušuje povrch experimentálnej plochy. Náhodnosť rozloženia indikátora po povrchu pôdy sa znižuje z dôvodu pevného umiestnenia hlavíc a pri pohyblivých hlaviciach tiež z dôvodu stabilných dráh pohybu.

Kvapkové simulátory tieto nedostatky nemajú a spolu s novšími technológiami predstavujú flexibilnejší prostriedok pre aplikovanie indikátora. V minulosti sa za hlavné nedostatky kvapkových simulátorov považovali ťažkosti s rovnomerným aplikovaním indikátora a s aplikovaním indikátora pri požadovanej intenzite zavlaženia. Rovnomernosť aplikácie indikátora sa riešila inštalovaním rôznych oscilačných a krúžiacich zariadení na dosku s rôznymi formovačmi kvapiek, pričom ale tieto zariadenia po určitom časovom intervale vrátili dosku do pôvodnej polohy a celý cyklus za zopakoval tak, že doska sa pohybovala po tej istej dráhe. Regulovanie intenzity závlahy sa v mnohých prípadoch

riešilo prerušením aplikácie indikátora na určitý časový interval (BUBENZER, MEYER 1965, AMERMAN *et al.* 1970, FOSTER *et al.* 1982), alebo redukovaním počtu formovačov kvapiek (SWANSON 1965). Tento spôsob aplikácie nevyhovuje v prípadoch, keď je požadované rovnomerné časové rozloženie aplikácie a udržanie ustáleného gravitačného prúdenia z dôvodu vzniku drenáže.

Pri konštrukcii zariadenia sme sa zamerali na neporušenie povrchu skúmanej plochy, zabezpečenie efektívneho náhodného rozloženia dopadajúcich kvapiek, a tiež na možnosť meniť intenzitu zavlažovania v reálnom čase bez prerušenia aplikácie vody, resp. indikátora. Za účelom splnenia týchto cieľov sme aplikátor umiestnili na teleskopické nohy s väčším rozstupom ako je samotná efektívna plocha aplikátora, čím nedochádza k nežiaducemu ovplyvneniu plochy. Môže však dochádzať ku kompácii povrchu pôdy kvapôčkami. O zlepšenie náhodnosti rozloženia dopadajúcich kvapiek sme sa pokúsili namontovaním vibrujúceho zariadenia uloženého v gumových blokoch. Pri tomto spôsobe je možnosť predpovedania návratu dosky a dopadu kvapiek na rovnaké miesto len veľmi malá. Dávkovanie indikátora počas experimentu zabezpečovalo presné dávkovacie čerpadlo, ktoré umožňuje zmenu intenzity aplikovania v priebehu niekoľkých sekúnd, rádovo v jednotkách $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$. PETERSON a BUBENZER (1986) pre simulátory so sprejovými hlaviciami uvádzajú ako spodnú hranicu požadovaného výkonu čerpadla $3\,785\, \text{l} \cdot \text{h}^{-1}$, pričom len polovica uvedeného množstva vody je potrebná na priebeh experimentu a zvyšok vody je odvádzaný bočným okruhom späť do zásobnej nádoby. Použitie takéhoto čerpadla je potrebné pre získanie dostatočného tlaku na vytvorenie jemnej hmly a rovnomerné zavlaženie plochy. Navyše transport takého množstva vody pre 24 h experiment v lesnom prostredí je veľmi náročný tak po technickej, ako aj finančnej stránke. Pri navrhnutom simulátore vystačí spomínané polovičné množstvo vody (t.j. cca $1\,890$) pre vykonanie dvoch celých 24 h experimentov. Kalibrovaná nádoba okrem toho umožňuje priebežnú kontrolu aplikovaného množstva indikátora.

5. ZÁVER

Navrhnutá metóda rozširuje sortiment používaných metód na meranie hydraulickej vodivosti lesných pôd *in situ*. Keďže doteraz používané metódy sú veľmi prácne a zdĺhavé, cieľom bolo skrátiť čas potrebný na meranie a stanovenie hydraulickej vodivosti v reálnom čase, pričom by na stanovenie postačovalo len jedno meranie.

Z týchto dôvodov sme navrhli stanovenie hydraulickej vodivosti pôdy na základe informácie obsiahnutej v profile rozdelenia hustoty rezidenčnej koncentrácie, ak sú splnené predpoklady lognormálneho-stochastického prúdenia. Navrhnuté stanovenie je po zvládnutí technického riešenia menej prácne a nedochádza pri ňom k poškodeniu skúmanej plochy pred začiatkom merania. Za týmto účelom sme navrhli odvodenie sústavy rovníc pre výpočet hydraulickej vodivosti z profilu rozdelenia rezidenčnej koncentrácie.

Pre vykonanie terénnych experimentov sme navrhli a skonštruovali indikátorový aplikátor tak, aby spĺňal požiadavky použitia v našich podmienkach, t. j. najmä na plošne rovnomerný a náhodný prísun kvapôčok vody a indikátora na skúmanú plochu a nastaviiteľný rozsah aplikovanej kvapaliny.

Navrhnutá metóda umožňuje zistiť priemernú hydraulickú vodivosť naprieč viacerými vrstvami pôdneho profilu, a nie len pre určitú hĺbku, ako je to napr. v prípade retenčných kriviek. Pri tejto metóde odpadá náročnosť získavania reprezentatívnych a neporušených vzoriek pôdy a prácnosť laboratórnych meraní. Výsledky získané navrhnutou metódou sú k dispozícii v priebehu 24 h od začiatku experimentu, pričom experiment je možné uskutočňovať sériovo. V budúcnosti bude v priebehu meraní potrebné zistiť a odstrániť niektoré prípadné nedostatky, aby metóda poskytovala rýchle a spoľahlivé výsledky.

Podakovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- ADAMS, J. E., KIRKHAM D., NIELSEN P. P., 1957: A portable rainfall simulator infiltrometer and physical measurements of soil in place. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21, 473–477.
- AFYUNI, M., YEGANEH, M., ABBASPOUR, K., KHOSHGOFTAR, A. H., SCHULIN, R., 2006: Transport of cadmium, zinc, copper and nitrate in a heavily sewage sludge amended calcareous soil. In: Roulier, S., and R. Schulin (ed.) 2006. Preferential flow and transport processes in soil. Abstracts. Swiss Federal Institute of Technology, Zürich (ETHZ), p. 36.
- AKERMAN, K., 1972: Rádioindikátorová metóda v praxi. Alfa, Bratislava, pp. 404.
- AMERMAN, C. R., HILLEL, D. I., PETERSON, A. E. 1970: A variable intensity sprinkling infiltrometer. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 34, 830–832.
- BARNES, O. F., COSTEL, G., 1957: A mobile infiltrometer. *Agron. J.* 49, 105–107.
- BEAR, J., 1972: Dynamics of fluids in porous media. Elsevier, New York.
- BENETIN, J., 1970: Dynamika pôdnej vody. Bratislava, Vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, pp. 272.
- BUBENZER, G. D., MEYER, L. D., 1965: Simulation of rainfall and soils for laboratory research. *Trans. ASAE* 8, 73, 75.
- CAPULIAK, J., HOMOLÁK, M., ASCHENBRENNER, Š., AHMED, Y. A. R., KRÁLOVIČ, R., 2008: Influence of litter on initial water transport in soil under forest stand. In: Šír, M., Tesař, M., Lichner, L.: *Hydrologie malého povodí* 2008, 57–64.
- CHOW, V. T., HARBAUGH, T. E., 1965: Raindrop production for laboratory watershed experimentation. *J. Geophys. Res.* 70, 6111–6119.
- EKERN, P. C., 1950: Raindrop impact as the force initiating soil erosion. *Soil Sci. Soc. Proc.* 15, 7–11.
- FLURY, M., 2006: Preferential flow in the vadoze zone and implication for contaminant transport. In: Roulier, S., and R. Schulin (ed.) 2006. Preferential flow and transport processes in soil. Abstracts. Swiss Federal Institute of Technology, Zürich (ETHZ), p. 31.
- FORRER, I. E., 1997: Solute transport in an unsaturated field soil: Visualization and Quantification of flow patterns use image analysis, Dissertation, ETH, No. 12476, pp. 128.
- FOSTER, G. R., NEIBLING, W. H., NATTERMAN, R. A., 1982: A programmable rainfall simulator. ASAE Paper no. 82-2570. ASAE winter meetings. Chicago. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph. MI.
- GHODRATI, M., ERNST, F. F., JURY, W. A., 1990: Effective design for small flood-irrigated field plots. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 54, 927–930.
- IBRAIM, I., ANDERSON, M. G., 2002: A new approach to soil characterisation for hydrology–stability analysis models. *Geomorphology* 49, 269–279.
- JESTER, W. A., BRICENO, M., JARRETT, A. R., SAKUMA, S. H., YU, C., 1987: Evaluation of lanthanum and praseodymium chelates of DTPA, CDTA, EDTA and NTA as groundwater tracers. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 110, 215–220.

- JURY, W. A., HORTON, R., 2004: Soil physics, 6th edition. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, pp. 370.
- KAHL, G., INGWERSEN, J., NUTNIYOM, P., TOTRAKOOL, S., PANSOMBAT, K., THAVORNUTIKARN, P., STRECK, T., 2006: Lateral transport of pesticides in a sloped soil under litchi in Northern Thailand. *In: Roulier, S., and R. Schulin (ed.) 2006. Preferential flow and transport processes in soil. Abstracts. Swiss Federeal Institute of Technology, Zürich (ETHZ), pp. 73.*
- KEIM, R.F., SKAUGSET, A.E., WEILER, M., 2006: Storage of water on vegetation under simulated rainfall of varying intensity. *Advances in Water Resources* 29, 974–986.
- KLUTE, A., 1986: Water Retention-Laboratory Methods. *In: Methods of Soil Analysis, Part 1-Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, edited by A. Klute. ASA, Inc./SSSA, Madison, 635–662.*
- KLUTE, A., DIRKSEN, C., 1986: Hydraulic Conductivity and Diffusivity-Laboratory Methods. *In: Methods of Soil Analysis, Part 1-Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, edited by A. Klute. ASA, Inc./SSSA, Madison, 687–734.*
- KUTÍLEK, M., 1978: Vodohospodářská pedologie. SNTL-Alfa, Praha-Bratislava, 296 s.
- LICHNER, L., 1985: Modified gamma method of soil moisture velocity measurement. *In: Proc. Xth IMEKO World Congress Praha, vol. 10, 92–99.*
- LICHNER, L., 1992: Laboratory and field measurements of solute transport in soils by means of nuclear tracer technique. *Vodohosp. čas.* 40 (6), 548–561.
- LICHNER, L., HOLKO, L., 2001: Indikátorové metódy v hydropedológii a hydrológii povodí. Bratislava, VEDA, pp. 102.
- MOSER, H., RAUERT, W., 1980: Isotopenmethoden in der Hydrologie. Borntraeger, Berlin, pp. 400.
- MUALEM, Y., 1986: Hydraulic conductivity of unsaturated soils – Prediction and formulas. *In: Methods of Soil Analysis, Part 1-Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, edited by A. Klute. ASA, Inc./SSSA, Madison, 799–824.*
- MUTCHLER, C. K., MOLDENHAUER, W. C., 1963: Applicator for laboratory rainfall simulator. *Trans. ASAE* 6, 220–222.
- NOVÁK, V., 1995: Vyparovanie vody v prírode. Bratislava, VEDA, pp. 260.
- O'LINGER, J., 1998: Measurement and modeling of hydraulic conductivity with solute transport experiments. Dissertation thesis, pp. 95.
- O'LINGER, J., PICHLER, V., JURY, W. A., 1997: Measurement of Saturated and Unsaturated Hydraulic Conductivity through Solute Transport Experiments. *Agronomy Abstracts* 61, p. 145.
- PETERSON, A. E., BUBENZER, G. D., 1986: Intake rate: Sprinkler Infiltrometer. *In: Methods of Soil Analysis, Part 1-Physical and Mineralogical Methods, 2nd Edition, edited by A. Klute. ASA, Inc./SSSA, Madison, 845–870.*
- PLATA, A., 1972: Isotopos en hidrologia. Madrid, Alhambra, pp. 328.
- SCOTTER, D. R., ROSS, P. J., 1994: Upper limit of solute dispersion. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58, 659–663.
- SWANSON, N. P., 1965: Rotating boom rainfall simulator. *Trans. ASAE* 8, 71–72.
- VAN GENUCHTEN, M. Th., 1980: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil. Sci. Soc. Am. J.*, 44, 892–898.
- VRYZAS, Z., PAPADOPOULOU-MOURKIDOU, E., 2006: Four year suction cup data concerning the preferential flow of bromide, brilliant blue and corn applied herbicides with their metabolites, in clayey vadose zone: a field scale experiment in North-East Greece. *In: Roulier, S., and R. Schulin (ed.) 2006. Preferential flow and transport processes in soil. Abstracts. Swiss Federeal Institute of Technology, Zürich (ETHZ), pp. 37.*

Adresa autorov:

Ing. Marián Homolák, PhD.

Doc. Dr. Ing. Viliam Pichler

Doc. Ing. Juraj Gregor, CSc.

Katedra prírodného prostredia

Lesnícka fakulta

Technická univerzita vo Zvolene

T. G. Masaryka 24

960 53 Zvolen

e-mail: homolak@vsld.tuzvo.sk

pichler@vsld.tuzvo.sk

gregor@vsld.tuzvo.sk

Cyklus vody, uhlíka a živín – kvantitatívne indikátorové experimenty v lesných pôdach

Abstrakt

Predkladaná práca je príspevkom k zjednodušeniu a urýchleniu stanovenia hydraulickej vodivosti lesných pôd, keďže v súčasnosti nie sú k dispozícii rýchle metódy jej zisťovania umožňujúce rutinné využívanie. Zisťovanie hydraulickej vodivosti lesnej pôdy sťažuje aj priestorová variabilita hydraulických vlastností, ktorá je podmienená časovo-priestorovou variabilitou zrážok a heterogenitou reliéfu, vegetačného krytu a pôd. Za účelom zrýchlenia zisťovania hydraulickej vodivosti lesnej pôdy sme navrhli metódu na báze stochasticko-konvektívneho modelu a vykonali terénne experimenty, ktoré viedli k stanoveniu závislosti hydraulickej vodivosti od vlhkosti pôdy $K(\theta)$.

Kľúčové slová: lesné pôdy, predpoveď hydraulickej vodivosti, stochasticko-konvektívny model, indikátorový experiment, rezidenčná koncentrácia

ZMENY ODTOKU V MALÝCH POVODIACH VYSOKÝCH TATIER PO DISTURBANCII LESNÝCH EKOSYSTÉMOV VETROVOU KALAMITOU

Matúš J A K U B I S – Mariana J A K U B I S O V Á

Jakubis, M., Jakubisová, M.: The changes of runoff in small watersheds of High Tatras after disturbance of forest ecosystems by wind calamity. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 55–65, 2009.

The paper deals with the simulation of changes of culmination discharges in two small watersheds of High Tatras before and after disturbance of forest ecosystems by wind calamity (19. 11. 2004). The research was realized in torrent watershed Hlboký potok (watershed area $S_p = 4,881 \text{ km}^2$, forest coverage before calamity $S_{p_{les}} = 74,80\%$, forest coverage after calamity $S_{p_{les_k}} = 48,39\%$) and Skalnatý potok (watershed area $S_p = 9,365 \text{ km}^2$, forest coverage before calamity $S_{p_{les}} = 51,71\%$, forest coverage after calamity $S_{p_{les_k}} = 40,72\%$). The calculations were realized by SCS CN – method for precipitations amount with different time of duration and different time of duration of the discharges. In both of analyzed small torrent watersheds are the culmination discharges higher after disturbance of forest ecosystems by wind calamity.

Key words: runoff calculation, culmination discharge, mountain watershed, forest cover, windthrow

1. ÚVOD A PROBLEMATIKA

Rozsiahla a zložitá problematika vplyvu lesa na odtok je medzi odborníkmi vo svete a aj u nás diskutovaná už viac ako sto rokov, no napriek tomu ju z viacerých dôvodov nie je možné uzavrieť ako vyriešenú. Túto skutočnosť potvrdzuje množstvo prác domácich a zahraničných autorov, niektoré s globálnym významom, ktoré z dôvodu stanoveného rozsahu príspevku nie je možné uvádzať detailnejšie. V SR je v určitých kruhoch a aj v časti laickej verejnosti vznik povodňových situácií často pripisovaný nesprávnemu hospodáreniu v lesoch. Je to veľmi diskutabilný názor, ktorý si vyžaduje širokú vedeckú a odbornú diskusiu medzi expertmi z viacerých súvisiacich vedných disciplín. V práci sme sa zamerali na časť problematiky, ktorá sa týka vplyvu lesného ekosystému na odtok v malom povodí a porovnali sme vypočítané kulminačné prietoky v bystrinách pred vetrovou kalamitou a po nej.

Horné – najvyššie položené časti povodí môžeme charakterizovať ako malé povodia. V malých povodiach na tvorbu a priebeh odtoku veľmi významne vplyvajú intenzívne zrážky s krátkou dobou trvania a spôsob využívania (obhospodarovania) jednotlivých

častí povodia. Dôležitú úlohu vo vytváraní kulminačných prietokov zohráva relatívne krátka doba koncentrácie odtoku. Takéto povodia sú charakteristické tým, že v nich môžu vznikáť rýchle a nebezpečné lokálne povodne vrátane sprievodných, extrémne deštruktívnych erózných procesov. Tieto situácie vznikajú predovšetkým po extrémnych prívalových zrážkach a môžu byť umocňované po rôznych prírodných katastrofách (vetrové kalamity, požiare, lavíny). Takouto katastrofou, ktorá postihla viac povodí Vysokých Tatier, bola aj vetrová kalamita dňa 19. 11. 2004. Táto kalamita znížila hydrickú účinnosť lesných ekosystémov v postihnutých povodiach.

Malé horské povodia sú dôležité z hľadiska disponibilných zdrojov kvalitnej (v mnohých prípadoch pitnej) vody. Vzhľadom na veľkú rozmanitosť a extrémnosť prírodných podmienok, v ktorých sa malé horské povodia vyskytujú, sú medzi renomovanými svetovými odborníkmi charakterizované ako „najčerneršie z čiernych skriniek hydrologického cyklu“ (BANDYOPADHYAY *et. al.* 1997).

V transformácii zrážok na odtok zohráva významnú úlohu lesný ekosystém, ktorý je schopný – za určitých podmienok – premieňať rýchly a škodlivý povrchový odtok na podpovrchový. Okrem toho je lesný ekosystém schopný infiltráciou do pôdy prijímať veľké množstvá vody. ŠÁLY (*ex* VALTÝNI 2002) uvádza, že 1 m hrubá vrstva hlinitej pôdy je schopná na ploche 1 m² prijať až 300 litrov vody, čo predstavuje výšku vodného stĺpca 300 mm. V dlhodobějších hydrologických bilanciách môže lesný ekosystém znižovať vo vodných tokoch prietokové maximá a naopak, v prípade dlhšie trvajúcich suchých období bez zrážok pozitívne ovplyvňovať minimá, čo má veľký význam z ekologického a environmentálneho hľadiska. V prípade extrémnych prívalových intenzívnych zrážok však lesný ekosystém nie je schopný zadržať všetky spadnuté zrážky. MAJERČÁKOVÁ, ŠKODA (1998) uvádzajú, že hydrická funkcia lesa, chápaná ako intercepčná kapacita, infiltračná kapacita pôdy a horninového prostredia i schopnosť lesa spomaľovať odtok z malého povodia, sa môže pozitívne prejavovať len v zrážkovo-odtokovom procese pri zrážkach nepresahujúcich 20 až 24 mm za 24 hodín a že význam hydrickej funkcie lesného ekosystému narastá v rámci sezónnych alebo ročných hydrologických bilancií. VALTÝNI (2002) uvádza, že skutočná retenčná kapacita lesných porastov je pomerne veľká (30 až 70 mm), ale nie až natoľko, aby bola schopná zabrániť vzniku povodne, ak sa vyskytnú extrémne zrážky v čase nasýtenia lesných porastov predchádzajúcimi zrážkami. Stanovenie samotného vplyvu lesných ekosystémov na tvorbu a priebeh odtoku je náročné vzhľadom na veľkú variabilitu ich hydrickej účinnosti. V tomto ohľade je potrebné zohľadniť druhy drevín, druh lesného porastu (ihličnatý, listnatý, zmiešaný), zdravotný stav, vek, rozmiestnenie v povodí, výškovú variabilitu, hustotu porastu, formu humusu a jeho hrúbku, hustotu lesnej cestnej siete atď. Jednou z dôležitých úloh je zhodnotenie a objektívne stanovenie hydrickej účinnosti porastov kosodreviny. Vplyv lesných ekosystémov na tvorbu a priebeh odtoku nie je možné stanoviť izolovane od iných faktorov (najmä pedologických, geologických, geomorfologických, klimatických atď.). Vplyv lesnatosti povodia na odtok je zohľadnený vo vzorcoch, ktoré sa na výpočet odtoku $Q_{\max}$ používali v minulosti (napr. Lauterburg, Čerkašin) a aj v tých, ktoré sa na tento účel používajú v súčasnosti (vzorec intenzitného typu, Dub, metóda SCS-CN). Lesnatosť povodia je zohľadnená aj v zrážkovo-odtokových modeloch (napr. WASIM – ETH, RISHU, AGNPS atď.). Problematikou

vplyvu lesa, resp. lesných ekosystémov na tvorbu a priebeh odtoku sa podrobne zaoberali v ťažiskových prácach ZELENÝ *et al.* (1980), KREČMER, KŘEČEK (1981), PRENNER (1986), VALTYŇI (1986, 2002), KREČMER *et al.* (1998), JAŘABÁČ, CHLEBEK (2000), JONES (2000), BURT, SWANK (2002), LAMMERANNER *et al.* (2009) a mnohí iní.

2. MATERIÁL

2.1 Geografické a hydrologické začlenenie povodí

Analyzované povodia sa nachádzajú v geomorfologickom celku Tatry, podcelku Východné Tatry, časti Vysoké Tatry. Obe bystriny sa nachádzajú v povodí rieky Poprad.

2.2 Základné charakteristiky povodí

Základné charakteristiky povodí sú podrobne obsiahnuté v tab. 2.1. Hydrologické charakteristiky povodí sú spracované v tab. 2.2.

Tab. 2.1 Charakteristiky povodí Hlboký potok a Skalnatý potok

Tab. 2.1 Characteristics of the watersheds Hlboký potok and Skalnatý potok

Názov	Označenie	Hlboký potok	Skalnatý potok
Plocha povodia	S_{pov}	4,881 km ²	9,365 km ²
Dĺžka rozvodnice	O	10,626 km	14,471 km
Dĺžka hlavného toku	L	3,418 km	6,320 km
Dĺžka ľavostr. prítokov	L_l	28,516 km	6,008 km
Dĺžka pravostr. prítokov	L_p	1,745 km	2,715 km
Celková dĺžka tokov	L_c	5,163 km	15,043 km
Hustota vod. tokov v povodí	r	1,06 km/km ²	1,61 km/km ²
Súčiniteľ tvaru povodia	φ	0,25	0,22
Dĺžka údolnice	L_u	4,428 km	6,525 km
Stredná šírka povodia	B_p	1,102 km	1,44 km
Miera asymetrie povodia	a	0,16	0,35
Absolútny spád toku	ΔH_t	580 m	1610 m
Priemerný sklon toku	I_t	16,97 ‰	25,47 ‰
Absolútny spád povodia	ΔH_p	1370 m	1744 m
Priem. nadm. výška pov.	H_{upov}	1304 m	1506 m
Stredný sklon svahov pov.	I_{spov}	29,90 ‰	37,70 ‰
Priemerný sklon údolnice	I_u	28,02 ‰	26,21 ‰
Plocha lesa	S_{LES}	3,651 km ²	4,843 km ²

Tab. 2.1 Pokračovanie

Tab. 2.1 Continued

Názov	Označenie	Hlboký potok	Skalnatý potok
Plocha lesa po kalamite	S_{LK}	2,362 km ²	3,813 km ²
Plocha kalamity	S_{KAL}	1,289 km ²	1,03 km ²
Lesnatosť povodia pred kal.	1 %	74,80 %	51,71 %
Lesnatosť povodia po kal.	1_k %	48,39 %	40,72 %
Zastavaná plocha	S_{ZAST}	0,061 km ²	0,02 km ²
Kosodrevina	S_{KOS}	0,811 km ²	1,628 km ²
Plocha bez vegetácie	S_{BV}	0,358 km ²	1,593 km ²
Skaly	S_{SK}	0 km ²	1,281 km ²
Max. nadm. výška pov.	H_{max}	2230 m	2634 m
Min. nadm. výška pov.	H_{min}	860 m	890 m
Max. nadm. výška toku	H_{MAXT}	1440 m	2500 m

Tab. 2.2 Hydrologické charakteristiky povodí

Tab. 2.2 Hydrologic characteristics of the watersheds

Hydrologické charakteristiky	Názov toku	
	Hlboký potok	Skalnatý potok
1	2	3
Z (mm)	943	1065
O (mm)	565	713
E (mm)	378	352
T (°C)	3,7	2,8

Vysvetlivky k tab. 2.2: Z – priemerný ročný zrážkový úhrn (mm), O – priemerná ročná odtoková výška (mm), E – priemerný ročný klimatický výpar (mm), T – priemerná ročná teplota (°C).

3. METODIKA

Na modelové výpočty kulminačných prietokov Q_{max} sme použili metódu SCS-CN (Soil Conservation Service – Curve Number), ktorú pre viaceré malé povodia SR overil s dobrými výsledkami VALTÝNI (2002). Túto metódu doporučujú na výpočet kulminačných povodňových prietokov v malých povodiach viacerí zahraniční autori (CHOW *et al.* 1988, MAIDMENT 1993, MISHRA, SINGH 2003, RAMAKRISHNAN *et al.* 2009 a iní). Charakteristiky povodia boli stanovené pomocou GIS. Výsledné hodnoty Q_{max} boli navzájom porovnané. V teréne sme niveláciou odmerali geometrické a stanovili hydraulické charakteristiky prietokových profilov oboch bystrín. Vypočítali sme, aké sú prirodzené prietokové kapacity pokusných prietokových (uzavierajúcich) profilov a zároveň aké kulminačné

prietoky môžu prietokovými profilmi pretiecť bez vyliatia sa vody z koryta. Kulminačný prietok $Q_{\max}$ sme vypočítali vzťahom:

$$Q_{\max} = \frac{2 \cdot O_{OP}}{t_{pp}} \quad (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3.1)$$

Vo vzťahu (3.1) znamená: $Q_{\max}$ – maximálny (kulminačný) prietok ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$),
 O_{OP} – celkový objem povrchového odtoku (m^3),
 t_{pp} – čas trvania povodňového prietoku (s).

Celkový objem povrchového odtoku vypočítame:

$$O_{OP} = H_{OP} \cdot S_p \cdot k \quad (\text{m}^3) \quad (3.2)$$

Vo vzťahu (3.2) znamená: H_{OP} – výška povrchového odtoku (mm),
 S_p – plocha povodia (km^2),
 k – rozmerový koeficient ($k = 1000$).

Výšku povrchového odtoku vypočítame:

$$H_{OP} = \frac{(H_z - 0,2 \cdot A)^2}{H_z + 0,8 A} \quad (\text{mm}) \quad (3.3)$$

Vo vzťahu (3.3) znamená: H_z – výška uvažovanej zrážky (mm),
 A – potenciálna retencia konkrétnej časti povodia (mm).

Potenciálnu retenciu konkrétnej časti povodia vypočítame vzťahom:

$$A = 25,4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (\text{mm}) \quad (3.4)$$

Vo vzťahu (3.4) znamená: CN – číslo (hodnota) CN krivky; čísla (hodnoty) CN (curve number) pre rôzne spôsoby využívania povodia, ktoré v ťažiskových prácach podrobne uvádzajú CHOW *et al.* (1988), MAIDMENT (1993) a iní. Hodnoty CN pre lesné ekosystémy s rôznou hustotou, vekom, rúbaniská, porasty poškodené vetrovou kalamitou, približovacie linky, mladé porasty (nárasty) podrobne definovali CIEPIEŁOWSKI *et al.* (2002).

Čas trvania povodňového prietoku t_{pp} do vzťahu (1) stanovíme nasledujúcim postupom:

$$t_{pp} = 3 \cdot t_p \quad (\text{s}) \quad (3.5)$$

Vo vzťahu (3.5) znamená: t_p – celkový čas trvania koncentrácie odtoku (s), ktorý vypočítame vzťahom:

$$t_p = \frac{t_z}{2} + 0,6 t_{ks} \quad (\text{s}) \quad (3.6)$$

Vo vzťahu (3.6) znamená: t_z – čas trvania kritickej zrážky (s),
 t_{ks} – prepočítaný čas koncentrácie odtoku (s), ktorý vypočítame vzťahom:

$$t_{ks} = 3600 \cdot t_{kh} = 60 \cdot t_{k \min} \quad (\text{s}) \quad (3.7)$$

Výpočet času koncentrácie odtoku v hodinách t_{kh} je možné uskutočniť vzťahom:

$$t_{kh} = \left(0,868 \cdot \frac{L^3}{\Delta H_t} \right)^{0,385} \quad (h) \quad (3.8)$$

Vo vzťahu (3.8) znamená: L – dĺžka hlavného toku (km),

ΔH_t – absolútny spád hlavného toku (m).

Výpočet času koncentrácie odtoku v minútach t_{kmin} je možné uskutočniť vzťahom:

$$t_{kmin} = 0,0195 \cdot L^{0,77} \cdot i_t^{-0,385} \quad (min) \quad (3.9)$$

Vo vzťahu (3.9) znamená: L – dĺžka hlavného toku (m),

i_t – priemerný pozdĺžny sklon hlavného toku (m/m).

Vo výpočtoch sme vychádzali z hodnoty maximálnych denných úhrnov zrážok v predmetnej oblasti Vysokých Tatier dosiahnutých alebo prekročených priemerne raz za sto rokov. Hodnotu maximálneho denného úhrnu zrážok dosiahnutých alebo prekročených priemerne raz za sto rokov sme stanovili výpočtom z údajov, ktoré publikoval HEINIGE *et al.* (1995) pre najbližšie odvodené údaje – Tatranskú Lomnicu (832 m n. m.) kde $H_Z = H_{100 id} = 91,9$ mm a Lomnický Štít (2635 m n. m.) kde $H_Z = H_{100 id} = 133,6$ mm. Spomínané zrážkové úhrny v analyzovaných povodiach predstavujú: v povodí Hlboký potok ($H_{\text{pov}} = 1304$ m n. m.) $H_Z = H_{100 id} = 102,8$ mm, v povodí Skalný potok ($H_{\text{pov}} = 1304$ m n. m.) $H_Z = H_{100 id} = 107,4$ mm. Vo výpočtoch sme uvažovali s triedou predchádzajúceho zavláženia povodia (antecedent moisture class) – AMC II. (pozri CHOW *et al.* 1988), čo predstavuje priemernú nasýtenosť povodia predchádzajúcimi zrážkami.

4. VÝSLEDKY

Výsledky sú z dôvodu lepšej prehľadnosti uvedené v tabuľkovej forme. V tab. 4.1 sa nachádzajú hodnoty kulminačných prietokov $Q_{\max}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) pre obe analyzované bystriny pre odvodené 100-ročné denné zrážkové úhrny, rôzne doby trvania zrážok a rôzne doby trvania prietokov. Výsledky potvrdzujú, že v oboch povodiach sú v uzavierajúcich prietokových profiloch vypočítané kulminačné prietoky $Q_{\max}$ ($m^3 \cdot s^{-1}$) vyššie po disturban- cii lesných ekosystémov vetrovou kalamitou. Hodnoty kulminačných prietokov sa menia na základe trvania zrážok a trvania prietokov. Rozdiely kulminačných prietokov v uzavie- rajúcom prietokovom profile bystriny Hlboký potok predstavujú v relatívnom vyjadrení viac ako 52 %. Rozdiely kulminačných prietokov v uzavierajúcom prietokovom profi- le bystriny Skalný potok predstavujú v relatívnom vyjadrení viac ako 16 %. Podstatne väčšie rozdiely v kulminačných prietokoch v uzavierajúcom prietokovom profile Hlboký potok sú spôsobené tým, že v tomto povodí postihla vetrová kalamita až 35,3 % plochy lesov; v povodí Skalný potok postihla vetrová kalamita menej – 21,3 % plochy lesov.

Tab. 4.1 Kulminačné prietoky $Q_{\max}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pre 100-ročné 24-hodinové zrážkový úhrny

Tab. 4.1 Culmination discharges $Q_{\max}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) for 100-yearly 24-hours precipitation amounts

Trvanie zrážky (h)	Názov toku							
	Hlboký potok $H_z = 102,8$ mm				Skalnatý potok $H_z = 107,4$ mm			
	Trvanie prietoku t_{pp} (s)	$Q_{\max}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		Rozdiel ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Trvanie prietoku t_{pp} (s)	$Q_{\max}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		Rozdiel ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)
		Pred kalamitou	Po kalamite			Pred kalamitou	Po kalamite	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	7590	21,28	32,53	11,25	8406	52,12	60,65	8,53
3	18390	8,78	13,42	4,64	19206	22,81	26,55	3,74
6	34590	4,67	7,14	2,47	35406	12,38	14,40	2,02
12	66990	2,41	3,69	1,28	67806	6,46	7,52	1,06
18	99390	1,63	2,48	0,85	106218	4,13	4,80	0,67
24	131790	1,23	1,87	0,61	132606	3,30	3,84	0,54

V oboch povodiach sa prejavili aj rozdiely vo výškach povrchového odtoku H_{OP} (mm) a v hodnotách objemu povrchového odtoku O_{OP} (m^3). Hodnoty H_{OP} (mm) O_{OP} (m^3) pre obe povodia sú uvedené v tab. 4.2.

Tab. 4.2 Vypočítané hydrologické charakteristiky povodí

Tab. 4.2 Calculated hydrologic characteristics of the watersheds

Hydrologické charakteristiky	Názov toku	
	Hlboký potok	Skalnatý potok
1	2	3
Q_{100} ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) pred kalamitou	12,26	21,35
$q_{\max}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) pred kalamitou	2,51	2,28
$Q_{\max}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$) po kalamite	14,34	22,67
$q_{\max}$ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \text{ km}^{-2}$) po kalamite	2,94	2,42
H_{OP} (mm) pred kalamitou	16,55	23,39
H_{OP} (mm) po kalamite	25,29	27,22
O_{OP} (mm) pred kalamitou	80 769	219 076
O_{OP} (mm) po kalamite	123 435	254 920

Tab. 4.3 Geometrické charakteristiky pokusných prietokových profilov

Tab. 4.3 Geometric characteristics of experimental flow profiles

Por. č.	Názov toku	B (m)	H (m)	S_{pp} (m ²)	O_1 (m)	O_2 (m)	O (m)	R (m)
1	2	4	5	6	7	8	9	10
1	Hlboký potok	2,9	0,65	1,9	2,2	1,5	3,7	0,514
2	Skalnatý potok	7,0	0,8	5,2	5,4	2,0	7,4	0,703

Vysvetlivky k tab. 4.3:

B – šírka koryta v brehoch (m); H – hĺbka koryta (m); S_{pp} – plocha prietokového profilu v (m²); O_1 – čiastkový omočený obvod – dno (m), O_2 – čiastkový omočený obvod – svahy (m), O – celkový omočený obvod (m); R – hydraulický rádius (m).

Tab. 4.4 Hydraulické charakteristiky pokusných prietokových profilov

Tab. 4.4 Hydraulic characteristics of experimental flow profiles

Por. č.	Názov toku	d_e (m)	n_1 (–)	n_2 (–)	n (–)	y (–)	c (m ^{0.5} .s ⁻¹)	i (%)	v (m.s ⁻¹)	Q_k (m ³ .s ⁻¹)
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Hlboký potok	0,056	0,030	0,035	0,0320	0,280	25,93	2,44	2,90	5,52
2	Skalnatý potok	0,123	0,0332	0,0332	0,0332	0,280	27,29	2,48	3,60	18,73

Vysvetlivky k tab. 4.4:

d_e – rozmer efektívneho zrna (m); n_1 , n_2 – čiastkové stupne drsnosti; n – celkový stupeň drsnosti; y – premenlivý mocniteľ; c – rýchlostný súčiniteľ Pavlovského (m^{0.5}. s⁻¹); i – pozdĺžny sklon PP (%); v – priemerná profilová rýchlosť (m.s⁻¹); Q_k – prietok plným prietokovým profilom – bankfull discharge (m³.s⁻¹). Stupne drsnosti n_1 (dno) a n_2 (svahy) sme určili z tabuliek (STURM 2001) podľa podmienok PP.

Skutočná prietoková kapacita pokusného (uzavierajúceho) prietokového profilu Hlboký potok predstavuje $Q_k = 5,52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Skutočná prietoková kapacita pokusného (uzavierajúceho) prietokového profilu Skalnatý potok predstavuje $Q_k = 18,73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Kulminačné prietoky, ktoré bezpečne pretečú pokusnými (uzavierajúcimi) prietokovými profilmi sú v tab. 4.1 vyznačené **hrubo**.

Zvýšenie ohrozenia povodňami v blízkosti uzavierajúcich prietokových profilov (UPP) oboch povodí nie je zvlášť významné. Predpokladáme, že dôvody sú nasledovné:

Analyzované povodia sú orientované v smere sever – juh s pomerom šírky ku dĺžke 1 : 4,02 (Hlboký potok) a 1 : 4,53 (Skalnatý potok), ide o tzv. predĺžené povodia. Relatívne vysoký pomer šírky ku dĺžke povodí znamená lepšiu kvalitu odtoku (t. j. vyrovnannejšie prietoky) v súvislosti s dlhšou kritickou dobou dobiehania (poznámka: lepšou kvalitou odtoku rozumej menšiu rozkolísanosť prietokov).

Vetrová kalamita postihla dolné časti povodí. Ak modelovo uvažujeme, že 100-ročný denný zrážkový úhrn by zasiahol celé plochy povodí rovnomerne, a že odtok sa začína

vytvárať už v najvyšších častiach povodí, tak kalamitou znížená hydrická kvalita lesného ekosystému v dolnej časti povodí kulminačné prietoky v UPP mimoriadne významne neovplyvní.

Kulminačné prietoky boli vypočítané k UPP, ktoré sme určili nad Cestou slobody (predovšetkým z hľadiska potenciálneho povodňového ohrozenia cesty, husto zastavaných a obývaných lokalít a z hľadiska prijateľného prístupu k týmto profilom). Ide o vodné toky najnižšieho rádu (v klesajúcej stupnici). Postupným spájaním sa tokov najnižšieho rádu (za predpokladu významných zrážkových udalostí vo viacerých povodiach súčasne) sa môže zvýšenie kulminačných prietokov prejavíť na toku vyššieho rádu. Vetrová kalamita zasiahla časti povodí bystrín Vysokých Tatier **aj pod uvažovanými UPP** (pod Cestou slobody). To znamená, že vplyv vetrovej kalamity na zvýšenie hodnôt kulminačných prietokov sa môže významnejšie prejavíť najmä v nižších úsekoch sledovaných tokov, alebo v tokoch vyššieho rádu (v nižšie položených UPP).

Vo výpočtoch sme uvažovali s triedou predchádzajúceho zavlaženia (nasýtenia) povodia (antecedent moisture class) – **AMC II.** (pozri CHOW *et al.* 1988), t.j. s priemernou nasýtenosťou povodí predchádzajúcimi zrážkami. V prípade vyššieho nasýtenia povodia predchádzajúcimi zrážkami budú vyššie aj vypočítané kulminačné prietoky a väčšia ohrozenosť okolia tokov povodňami.

4. ZÁVER

V súvislosti s riešenou problematikou existujú široké možnosti ďalšieho výskumu. Máme na mysli predovšetkým objektívne stanovenie hodnôt CN pre kvalitatívne rôzne lesné ekosystémy, vrátane plôch postihnutých vetrovou kalamitou, požiarimi a eróziou. Dôležitou úlohou v budúcnosti bude presnejšia špecifikácia hodnôt CN pre lesné porasty (ihličnaté, listnaté, zmiešané), kosodrevinu a pod. na základe ich potenciálnej a reálnej hydrickej účinnosti. Tieto údaje môžu slúžiť nielen ako presnejšie vstupné charakteristiky do rôznych výpočtov, ale predovšetkým ako dôležité vstupné údaje do zrážkovodtokových modelov.

Podakovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy”, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- BANDYOPADHYAY, J., RODDA, J. C., KATTELMANN, R., KUNDZEWICZ, Z. W., KRAEMER, D. 1997 : Highland waters – a resource of global significance. In: MESSERLI, B., IVES, J. D. (EDS.): Mountains of the World – A Global Priority. New York, London: The Parthenon Publishing Group, pp. 131–155.
- BURT, T., SWANK, W. 2002: Forest or floods? *Geography Review*, (15), No. 5, pp. 37–41.
- CIEPIEŁOWSKI, A., WOJCIK, J., BANASIK, K. 2002: Adaptation of the unit hydrograph method to the conditions in Polish forest. In: *Proceeding of the 5th International Conference on Hydro-Science & Engineering*, Warsaw: University of Technology, Faculty of Environmental Engineering, pp. 10.

- GREŠKOVÁ, A. 2001: Identifikácia rizikových oblastí a rizikových faktorov vzniku povodní v malých povodiach. *Geografický časopis*, 53, (3), s. 247–268.
- CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., MAYS, L. W. 1988: *Applied Hydrology*. Boston, Massachusetts: McGraw-Hill, Inc., pp. 572.
- JAŘABÁČ, M., CHLEBEK, A. 2000: Pro účinnější protipovodňovou ochranu pod lesnatými povodími bystrin. *Zprávy lesnického výzkumu*, sv. 45, 1/2000 s. 23–27.
- JONES, J. A. 2000: Hydrologic processes and peak discharge response to forest removal, regrowth, and roads in 10 small experimental basins, western Cascades, Oregon. *Water Resources Research*, Vol. 36, No 9, pp. 2621–2642.
- KREČMER, V., KŘEČEK, J. 1981: Lesnatost jako hydrologická charakteristika povodí. *Lesnictví*, 27 (LIV), č. 5, s. 461–470.
- KREČMER, V., KŘEŠL, J., RYNDÁ, I., ŠVIHLA, V. 1998: Vztah lesů v horských a podhorských regionech ke vzniku povodní. *Živa* (1), s. 9–12.
- LAMMERANNER, W., MEIXNER, H., FLORINETH, F. 2009: The influence of woody plants on the seepage of flood protection levees: Experiences from a test site. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 11, EGU2009-13759, 1 p.
- MAIDMENT, D. R. (ed.) 1993: *Handbook of Hydrology*. New York: McGraw-Hill, Inc., 1423 s.
- MAJERČÁKOVÁ, O., ŠKODA, P. 1998: Prívalové dažde na severovýchodnom Slovensku. *Vodohospodársky spravodajca*, XLI, (10), s. 18–19.
- MISHRA, S. K., SINGH, V. P. 2003: *Soil conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology*. New York : Springer, 536 p.
- PRENNER, G. 1986: Einfluss der Waldausstattung auf die Hochwasserspitze. *Allgemeine Forstzeitung*. (97), No 7, pp. 204–206.
- RAMAKRISHNAN, D., BANDYOPADHYAY, A., KUSUMA, K. N. 2009: SCS-CN and GIS-based approach for identifying potential water harvesting sites in the Kali Watershed. Mahi River Basin, India. *Journal of Earth System Science*, 118, No. 4, pp. 355–368.
- STURM, T. W. 2001: *Open channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill, 493 p.
- VALTÝNI, J. 1986: Vodohospodársky a vodoochranný význam lesa. Zvolen: Lesnícky výskumný ústav, Lesnícke štúdie č. 38, 68 s.
- VALTÝNI, J. 2002: Lesy a povodne. *Technická univerzita vo Zvolene, Vedecké štúdie 5/2001/A*, 46 s.
- ZELENÝ, V., JAŘABÁČ, M., CHLEBEK, A. 1980: Nástin výsledků 25-letého lesnicko-vodohospodářského výzkumu v Beskydech. *Lesnictví* (26), č. 8, s. 677–697.

Adresa autorov:

Prof. Ing. Matúš Jakubis, PhD.
Katedra lesníckych stavieb a meliorácií
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
Slovenská republika
e-mail: jakubis@vsld.tuzvo.sk

Ing. Mariana Jakubisová
Katedra prírodného prostredia
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
Slovenská republika

Zmeny odtoku v malých povodiach Vysokých Tatier po disturbancii lesných ekosystémov vetrovou kalamitou

Abstrakt

Práca sa zaoberá modelovaním zmien kulminačných prietokov v dvoch malých povodiach Vysokých Tatier pred a po disturbancii lesných ekosystémov vetrovou kalamitou (19. 11. 2004). Výskum bol uskutočnený v povodiach bystrín Hlboký potok (plocha povodia $S_p = 4,881 \text{ km}^2$, lesnatosť povodia pred kalamitou $S_{p_{les}} = 74,80 \%$, lesnatosť povodia po kalamite $S_{p_{lesk}} = 48,39 \%$) a Skalnatý potok (plocha povodia $S_p = 9,365 \text{ km}^2$, lesnatosť povodia pred kalamitou $S_{p_{les}} = 51,71 \%$, lesnatosť povodia po kalamite $S_{p_{lesk}} = 40,72 \%$). Výpočty boli uskutočnené SCS-CN metódou pre zrážkové úhrny s rozdielnou dobou trvania a rozdielnou dobou trvania prietokov. V oboch analyzovaných bystrinných povodiach sú vypočítané kulminačné prietoky vyššie po disturbancii lesných ekosystémov vetrovou kalamitou.

Kľúčové slová: výpočet odtoku, kulminačný prietok, horské povodie, lesnatosť povodia, vetrová kalmita

FYZIOLOGICKO-BIOCHEMICKÉ PARAMETRE AKO MOŽNÉ BIOINDIKÁTORY STRESU ZO SUCHA

Jaroslav K M E Ľ – Ľubica D I T M A R O V Á – Daniel K U R J A K

Kmet', J., Ditmarová, Ľ., Kurjak, D.: Physiological and biochemical parameters as potential drought stress indicators. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 67–76, 2009.

Drought and/or water deficit in plants results in disturbed water balance and asymmetry of water intake and water requirements of a plant during the ontogeny. At semi-arid conditions, water deficit is a frequent phenomenon, which plants have to balance depending on their resistance and/or tolerance of drought. Water stress can also be induced by various ecological interactions. Stress signals can be transmitted by below-ground as well as above-ground organs, whose position in space and time is quite stable. The sole existence of a stress signal does not yet mean that plants suffer from drought. The problem is complex and requires explicit definition of terms such as drought, water deficit, water stress, which are frequently used in a confusing way in physiology. The question is whether the primary impulse for adaptation changes in plants associated with drought is the decreased water potential or stress accompanying water deficit in plants. Evidence for drought signals in plant tissues is also an important question.

Drought stress induces numerous physiological and biochemical reactions of plants. A wide spectrum of methodological approaches is employed in the study of drought tolerance in plants. The presented study deals in detail with practical application of the measurement of parameters of chlorophyll a fluorescence, gasometry, assessment of photosynthetic pigment concentration, measurement of water potential of assimilatory organs, and assessment of free proline content. The working hypothesis in defining the research objectives was that water deficit essentially limits physiological activity of plants. The selected physiological and biochemical markers will mainly be used in the studies of the reaction of spruce trees on different levels of water supply, which allows us characterizing some symptoms and consequences of drought.

Key words: drought, physiology, stress biomarkers, Norway spruce

1. ÚVOD

Fyziológia smreka obyčajného (*Picea abies* L. Karst) je v horských polohách ovplyvnená a limitovaná mnohými, spravidla interaktívne pôsobiacimi prírodnými aj antropogénnymi ekologickými faktormi. Výsledkom tohto pôsobenia je viacnásobný stres (*multiple stress*), ktorý môže viesť k oslabeniu, ochoreniu a odumieraniu jednotlivých stromov a k postupnému rozpadu porastov. Samotné zloženie komplexu stresových faktorov, ako aj ich pôsobenie je pritom premenlivé v priestore a čase. V podmienkach horského smrekového lesa kľúčovú úlohu v súčasnosti zohrávajú klimatické a meteorologické faktory, vysoké koncentrácie prízemného ozónu a nadmerné dávky žiarenia, vo vzájomnej

kombinácii stupňujúce oxidačný stres. Koncom zimy a počas skorej jari je typický výskyt vodného stresu z tzv. zimného vysychania. Znečistenie atmosféry pôsobí v súčasnosti v horských podmienkach prevažne nepriamo – cez mokrú a skrytú depozíciu. Input kyselín spôsobuje acidifikačný stres v rizosfére, čo môže spolu s poškodením povrchu ihlíc a vyplavovaním živín viesť k prehĺbeniu nutričného stresu (KMEŤ *a kol.* 2004).

Je známe, že v oblasti Oravy, Kysúc, Tatier a Spiša sa v posledných rokoch zintenzívňuje hromadné odumieranie drevín, najmä smreka. Podobne postihnuté porasty sa nachádzajú aj v pohraničných oblastiach Poľska, ale aj v Českej republike, Nemecku a Taliansku. Sekundárne škodlivé činitele sa stávajú prvoradými a hospodársky závažnými v dôsledku toho, že pôsobia na fyziologicky oslabené stromy. Ich vplyv v slovenských lesoch sa napriek enormnému úsiliu vynaloženému na ich elimináciu neustále zvyšuje. Je tomu tak preto, lebo príčiny zhoršeného zdravotného stavu lesov nie sú zatiaľ presne známe. Len vo všeobecnosti sa predpokladá nepriaznivý vplyv komplexu faktorov, ako sú globálne zmeny klímy spojené so vzrastom priemerných teplôt ovzdušia a deficitom disponibilnej pôdnej vody, dlhodobé pôsobenie imisií pochádzajúcich z lokálnych ale i vzdialených zahraničných zdrojov, nízka stabilita rovnovekých, priestorovo málo diferencovaných monokultúr smreka, gradácia premnožovania biotických škodlivých činiteľov, najmä drevokazných húb, podkôrneho hmyzu a pod.

Stres suchom alebo náhlým ožiareníím na porastovej stene je považovaný za jeden z hlavných iniciátorov ďalšieho rozpadu smrekových porastov. Pre identifikáciu porastov, prípadne aj jednotlivých stromov stresovaných suchom alebo náhlým ožiareníím na porastovej stene potrebujeme poznať vzťah medzi relevantnými faktormi prostredia a úrovňou negatívneho pôsobenia extrémnych hodnôt týchto faktorov na dreviny. Napriek tomu, že máme určité poznatky o pôsobení sucha na smrek a aj ostatné dreviny na úrovni fyziológie stromu, chýba nám popísanie prejavov drevín identifikovateľných a merateľných dostupnými a širšie aplikovateľnými metódami. Vzhľadom na zložitosť vzťahov medzi množstvom vody v rastline a v okolitom prostredí nie je možné stanoviť jednoduché kritérium, podľa ktorého by bolo možné hodnotiť, akému veľkému stresu zo sucha je strom vystavený.

Priamou príčinou chradnutia lesných drevín je nesporne ich fyziologická nedostatnosť, fyziologická porucha. Toto konštatovanie bezprostredne navodzuje otázku, čo je príčinou fyziologických porúch. Ucelené poznanie fyziológie chradnúcich stromov doteraz chýba. Je to zrejme dôsledok vedeckej zložitosti tejto oblasti a tiež atomizácie špecializácií, ku ktorej vývoj vedy došiel (KRÍSTEK 1996).

Stresové situácie možno posudzovať na rôznych úrovniach biologických systémov, pomocou hodnotenia makroskopických znakov, fyziologických alebo fyziologicko-biochemických parametrov. Bioindikácia stresového stavu u rastlín je zložitý proces, ktorý si vyžaduje komplexný pohľad. Využitie fyziologicko-biochemických parametrov na determinovanie skorých štádií stresu a charakterizovanie reakcie rastliny na environmentálny stres, sa stáva veľmi frekventovaným postupom.

V rámci aktivity „Globálne a regionálne zmeny“ projektu Adaptívne lesné ekosystémy sa zameriame predovšetkým na identifikáciu stresovej záťaže a testovanie fyziologických reakcií a ich odozvy na stresové vplyvy (najmä sucho) a štúdium fyziologických

procesov drevín ako indikátorov rastu, produkcie a zdravotného stavu s využitím najmodernejších metód detekcie poškodenia a stresu zo sucha.

Pri definovaní cieľov výskumu vychádzame z pracovnej hypotézy, že vodný deficit zásadným spôsobom limituje fyziologickú aktivitu rastlín, preto štúdium reakcie vybraných druhov lesných drevín (najmä smreka) na rôzne úrovne zásobenia vodou prostredníctvom vhodne zvolených fyziologických markérov nám umožní charakterizovať niektoré symptómy a následky pôsobenia sucha. Zároveň vznikne možnosť otestovať spoľahlivosť vybraných markérov stresu s možnosťou začleniť ich do procesu skvalitnenia metód monitoringu výskytu a intenzity sucha a jeho dopadov na lesné ekosystémy.

2. MATERIÁL A METÓDY

Fluorescencia chlorofylu *a* ako bioindikátor stresu

Analýza fluorescence chlorofylu *a* je jednou z metód, ktorá poskytuje informácie o schopnosti rastlín tolerovať environmentálny stres a tiež o rozsahu poškodenia fotosyntetického aparátu (MAXWELL, JOHNSON 2000). V našom prípade, sezónnu dynamiku parametrov rýchlej fázy fluorescence chlorofylu *a* budeme merať fluorimetrom PEA (Plant Efficiency Analyser, Hansatech Ltd., Kings Lynn, UK). Po polhodinovej adaptácii na tmu je vzorka asimilačných orgánov ožiarená saturačným impulzom o intenzite $2100 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (stanovené predbežnými pokusnými meraniami). V priebehu rýchlej fázy sú sledované tieto parametre: F_0 – minimálna fluorescencia, F_m – maximálna fluorescencia. Z týchto sú odvodené: F_v – variabilná fluorescencia je rozdielom $F_m - F_0$, F_v/F_m – maximálna fotochemická efektívnosť fotosystému II, T_m – čas v ms, kedy bola dosiahnutá maximálna fluorescencia, Area – plocha nad fluorescenčnou indukčnou krivkou.

Na rozdiel od iných optických meraní, fluorescencia nemá štandardné jednotky merania. Fluorescenčný signál je kvantifikovaný termínmi relatívnej odpovede/reakcie detektora fluorescence. V PEA je reakcia detektora zobrazená ako signál medzi 0 a 4 095 bitmi. Zobrazená hodnota bitov môže byť považovaná za zvolenú jednotku fluorescence. Citlivý merací obvod získava charakteristiky kinetiky emisie počas indukcie fluorescence.

Meranie výmeny plynov (gazometria) v asimilačných orgánoch

K štúdiu fotosyntetickej aktivity rastlín sa vo veľkej miere využívajú gazometrické metódy. Tieto metódy sú rýchle, nedeštruktívne a umožňujú hodnotenie fyziologického stavu rastlín v terénnych i laboratórnych podmienkach (RAVEN 2004). Parametre listovej výmeny plynov sú veľmi vhodné ako bioindikátory stavu fotosyntetického aparátu. Indikujú nielen zmeny fotosyntetickej výkonnosti, ale taktiež umožňujú lokalizáciu primárnych miest poškodenia (GUIDI *a kol.* 1997). Sú založené na stanovení výmeny oxidu uhličitého a vodnej pary medzi asimilačným aparátom a okolitou atmosférou.

Na gazometrické merania bude použitý prenosný fotosyntetický systém CIRAS-1 (PP Systems, UK) s automatickou asimilačnou komorou na ihličnaté dreviny – PLC 5 (PP Systems, UK). Pri meraniach sa bude postupovať podľa metodiky MAREK *a kol.* (1992).

Merania budú prebiehať priamo v teréne. Fotosyntetická kapacita rastliny (A_{max} – $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) je maximálna čistá rýchlosť fotosyntézy rastliny v danom štádiu vývinu a aktivity, pri prirodzenom obsahu CO_2 v atmosfére a optimálnych podmienkach vzhľadom k ďalším vonkajším faktorom. Tento parameter sa meria pri štandardných podmienkach a možno ho používať pre charakteristiku fyziologických typov rastlín, rastlinných druhov a ekotypov (LARCHER 2003). Merania A_{max} prebiehajú v stabilizovaných klimatických podmienkach (podmienky umožňuje udržiavať automatická asimilačná komora prístroja), pričom nastavené hodnoty sú: intenzita fotosynteticky aktívneho žiarenia – FAR $1200 \pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, vlhkosť vzduchu – $10 \pm 2 \text{ mb}$, teplota asimilačného orgánu – TL $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$, koncentrácia CO_2 $350 \pm 10 \mu\text{mol mol}^{-1}$.

Stanovenie obsahu pigmentov v asimilačných orgánoch

Pre stanovenie koncentrácie asimilačných pigmentov (chlorofyly a , b , $a + b$, karotény + xantofyly) bude použitý 80%-tný vodný roztok acetónu (extrakčné činidlo) po degradácii vzoriek asimilačných orgánov homogenizáciou pri 35 000 n/min. Hodnoty absorbancie roztoku budú merané spektrofotometricky (spektrofotometer Cintra 6.5, GBS, Austrália).

Pri výpočte koncentrácie pigmentov budú použité modifikované matematické vzťahy podľa LICHTENTHALERA (1987). Obsah pigmentov bude vyjadrený v mg.g^{-1} (v miligramoch pigmentu na gram sušiny danej vzorky).

Meranie vodného potenciálu listov

Z fyzikálno-chemického hľadiska vodný potenciál (Π_w , MPa) je výsledkom osmotických síl (Π_s) rozpustných substancií a turgescencie (Π_p) pletiva vo voľnom stave vo vzťahu k čistej vode ($\Pi_w = 0$):

$$\Pi_w = \Pi_s + \Pi_p$$

Vyjadruje voľnú energiu vody v systéme. Voda sa pohybuje z oblasti s vyšším vodným potenciálom do oblasti s nižším vodným potenciálom. Vodný potenciál sa najčastejšie meria psychometricky alebo hygrometricky – meraním teploty rosného bodu. V druhom prípade predpokladáme, že teplotný senzor (termocouple) psychometra / hygrometra je od prostredia teplotne izolovaný tak, že latentné teplo z vody, vytranspirovanej vzorkou, je jediným mechanizmom, transferujúcim teplo z alebo do spoja termocoupla, pričom teplota mokrého spoja je automaticky konvergovaná na teplotu rosného bodu. Ak je teplota spoja nad teplotou rosného bodu, latentné teplo evaporácie bude spoj ochladzovať až na teplotu rosného bodu. Táto metóda umožňuje okrem iného eliminovať pôsobenie iných mechanizmov transferu tepla nastavením tzv. Peltierovho koeficientu chladenia. Merania sú pomerne presné, pretože meraný výstup v mikrovoltoch je kontinuálny v prípade, že koeficient chladenia je presne nastavený ($0,7 \mu\text{V}/1 \text{ }^\circ\text{C}$) (BRESTIČ, OLŠOVSKÁ 2001).

V rámci experimentov so suchom bude použitá psychometrická metóda merania vodného potenciálu listov (prístroj PSY-PRO, Wescor, USA). Pri tejto metóde sa zatvorí

asimilačný orgán do psychometrickej komory. Voda sa zo vzorky vyparuje, až kým nedosiahne tlak pár v komore vodný potenciál rovný vodnému potenciálu uzavretého pletiva. Vodný potenciál sa určí zmeraním tlaku vodných pár a následným odčítaním hodnôt z kalibračnej krivky.

Stanovenie obsahu voľného prolínu v asimilačných orgánoch

Obsah voľného prolínu v listoch bude stanovovaný spektrofotometricky (BATES *a kol.* 1973) zo vzoriek odoberaných priebežne, počas trvania experimentov so suchom a vyjadrený v mikromóloch na gram čerstvej hmotnosti listov ($\mu\text{mol.g}^{-1}$).

Priame terénne merania na vybraných vzorníkoch smreka sa uskutočnia na dvoch výskumných plochách (Iviny – starší porast, Hriňová – mladší porast). Na každej ploche bude vybraných 12 jedincov smreka, z ktorých 6 bude v priebehu vegetačného obdobia zavlažovaných v oblasti koreňového systému, pomocou hadíc zo zásobných nádob.

V období jún až október v jednomesačných intervaloch budú odoberané vzorky kónárov z jednotlivých vzorníkov pomocou zberača horolezeckým spôsobom. V ihliciach následne budú zisťované príslušné fyziologicko-biochemické parametre ako bioindikátory stresu zo sucha.

3. DISKUSIA

Práce viacerých autorov poukazujú na priame prepojenie pôsobenia sucha a fyziologických procesov rastlín (KARLSSON *a kol.* 1997, SCHREIBER a BILGER 1997, MANES *a kol.* 2001, WALLIN *a kol.* 2002, BLÖDNER *a kol.* 2005).

Z hľadiska identifikácie reakcií rastlín na vodný stres osobitné miesto zaujímajú charakteristiky vychádzajúce zo stavu vody v rastline (napr. vodný potenciál buniek, či ich vodný sýtosťový deficit). Najmä vodný potenciál (Π_w) je považovaný za adekvátne vyjadrenie vodného stavu rastlín, pretože v časovom slede citlivo reaguje na zníženie prístupnosti vody v rastlinách, čím je ho možné vzťahovať k dynamike priebehu mnohých fyziologických procesov, v podmienkach rôznych ekologických limitov.

Π_w charakterizuje celkovú voľnú energiu v bunke, pletive alebo v rastline z hľadiska jej dostupnosti pre priebeh fyziologických a biochemických procesov. Jeho hodnoty závisia od toho, v akom množstve a na aké komponenty bunky je voda viazaná a teda zneprístupnená pre priebeh spomenutých procesov. Je výsledkom vzájomného pôsobenia osmotického, tlakového a matricového potenciálu v jednotlivých častiach rastlín. Vodný potenciál modifikuje celkovú vodnú bilanciu rastlín tým, že zodpovedá za premiestňovanie vody v bunkách, medzi bunkami ako aj v celej rastline.

Pri bežných mezofilných druhoch rastlín hodnoty Π_w do $-0,5$ MPa indikujú mierny stres, $-0,5$ až $-1,5$ MPa stres stredne silný. Pri hodnotách pod $-1,5$ MPa ide o stres veľmi silný, pri ktorom už klesá turgorový tlak listov na nulu a listy začínajú vädnúť. Najcitlivejšia reakcia na nedostatok vody býva pri predlžovacom raste buniek postihnutých orgánov (PROCHÁZKA *a kol.* 1998).

Pri poklese vodného potenciálu buniek na hodnoty $-0,2$ až $-0,8$ MPa dochádza k rýchlym zmenám aktivity enzýmov. Aktivita niektorých sa znižuje (napr. nitrátreduktázy), iných naopak stúpa (β -amylázy, ribonukleázy). V približne rovnakom rozmedzí dochádza aj k veľkému (takmer štyridsaťnásobnému) nárastu koncentrácie kyseliny abscisovej, predovšetkým v listoch, kde má za následok zatváranie prieduchov (OMASA, TAKAYAMA 2003). Pri poklese Π_w od $-1,0$ do $-2,0$ MPa dochádza k vážnym metabolickým zmenám. Rýchlosť fotosyntézy klesá na nulu a spomaľujú sa transportné procesy. To umožňuje rastlinám pri veľkom vodnom deficite mobilizovať rezervy organických látok v starších orgánoch a presunúť ich do mladších, predovšetkým do generatívnych orgánov pre dokončenie reprodukčného procesu. Ak trvá tento stav dlhšie, dochádza k zmenám, ktoré sú nevratné a orgán alebo celá rastlina odumiera (PROCHÁZKA *a kol.* 1998).

Z fyziologického hľadiska sú vo všeobecnosti najcitlivejšie na pokles vodného potenciálu rast a pochody tvorby bunkovej steny a tiež syntéza proteínov. Pri výraznejšom poklese dostupnej vody dochádza u mnohých druhov k tvorbe aminokyseliny prolín, keď jeho koncentrácie často stúpnu až stonásobne. Predpokladá sa, že prolín je schopný chrániť i primárne fotosyntetické reakcie pred poškodením vyvolaným stresom a to tým spôsobom, že zvýšená akumulácia prolínu ochraňuje kyslík vyvíjajúci komplex (OEC) PSII (PAPAGEORGIOU a MURATA 1995). Celková rýchlosť transportu elektrónov elektrón-transportným reťazcom je prolínom udržiavaná a je redukovaná s poklesom koncentrácie prolínu. Poukazuje to na skutočnosť, že prolín je schopný eliminovať reaktívne formy O_2 (ALIA *a kol.* 2001). Odozva prolínu na stres zo sucha sa môže rôzniť v závislosti od druhu rastliny, intenzity a trvania stresu (JIANG, HUANG 2001). Nárast obsahu prolínu v súvislosti s pôsobením rôznych stresorov dokumentovali mnohí autori. TESCHE (1980) uvádza, že smrek reaguje zvýšenou tvorbou prolínu i na podnety ako zvýšená koncentrácia CO_2 a mraz. Zaznamenal takmer trojnásobné koncentrácie pri komplexnom pôsobení škodlivých faktorov, oproti pôsobeniu jednotlivému. WOHLFHART *a kol.* (1998) sledovali koncentrácie prolínu v ihliciach smreka a jedle rastúcich na rôzne postihnutých plochách územia Nemecka. U najviac poškodených porastov zaznamenali niekoľkonásobne vyšší obsah prolínu v porovnaní s referenčnými plochami. BODE *a kol.* (1985) sledovali 20 ročné smrekové porasty na dvoch navzájom blízkych lokalitách s rôznym poškodením. Zaznamenali výrazne zvýšenú akumuláciu prolínu u jedincov zaradených podľa straty a zafarbenia ihlíc medzi poškodené.

Zmeny koncentrácie pigmentov sú často využívané pri hodnotení vplyvu environmentálnych stresov na rast rastlín. Ako dokazujú niektoré štúdie, koncentrácia chlorofylov pôsobením sucha klesá, čo je dôsledkom ich spomalenej syntézy alebo urýchlenej degradácie (MAJUMDAR *a kol.* 1991). Intenzita reakcie je však odlišná v priamej závislosti od intenzity pôsobenia sucha. Ako uvádzajú KURJAK *a kol.* (2008) na základe štúdia reakcie sadeníc smreka na stres zo sucha, k významnému poklesu koncentrácie chlorofylov došlo až v štádiu veľmi intenzívnej dehydratácie. K podobným záverom dospeli napr. MANES *a kol.* (2001), DUAN *a kol.* (2005), YANBAO *a kol.* (2006). Kronfus *a kol.* (1998) zaznamenali počas 38 dní obmedzeného zalievania sadeníc smreka významný pokles obsahu β aj β -karoténu, nezmenili sa však koncentrácie chlorofylov. Výsledky niektorých prác (DUAN *a kol.* 2005, YANBAO *a kol.* 2006) demonštrujú odlišné fyziologické stratégie u populácií

z rôznych klimatických regiónov. Zároveň však dokazujú možnosť využitia metódy analýzy pigmentov pri testovaní odolnosti genotypov voči stresu zo sucha.

V diskusiách o vhodnosti metódy merania fluorescence chlorofylu *a* na detekciu sucha panuje určitá nejednotnosť. Viacerí autori uvádzajú, že nie je pre sledovanie odozvy na suchu vhodná tak, ako je tomu pri iných stresujúcich faktoroch. Títo autori pozorovali štatisticky nevýznamné rozdiely v reakcii parametra Fv/Fm na suchu (LU, ZHANG 1998, SUBRAHMANYAM *a kol.* 2006 a i.) CORNIC a MASSACCI (1996) uvádzajú, že parameter Fv/Fm vykazuje zmeny až v čase, keď je už silno obmedzený príjem CO₂ listami.

Na druhej strane, viacerí autori s úspechom využili fluorescenčné parametre pri detekcii sucha a skríningu odolnejších druhov resp. genotypov. PERCIVAL a SHERIFFS (2002) uvádzajú, že fluorescencia chlorofylu *a* je rýchlym a presným spôsobom detekcie a kvantifikácie tolerance rastlín voči stresu zo sucha. Autori testovali reakciu pomeru Fv/Fm na dehydratáciu u tridsiatich druhov drevín. Pri všetkých druhoch sa potvrdili znížené priemerné hodnoty, pričom u väčšiny zaznamenali signifikantné zmeny. Za prvý viditeľný znak stresu zo sucha počas vlastného pokusu označujú autori vädnutie listov, pričom vo všetkých prípadoch zmena vo fluorescencii chlorofylu *a* predchádzala vizuálne prejavy stresu.

PUKACKI a KAMINSKA-ROZEK (2005) pozorovali, že silný stres zo sucha signifikantne ovplyvnil primárne procesy fotochémiu u ihlič smreka obyčajného. Preukazné zmeny parametra Fv/Fm pozorovali už 18. deň pokusu a na 42. deň bol pokles hodnôt u silno stresovaných jedincov až 44 %. Po 21 dňoch regenerácie dosiahli fotosyntetické procesy úroveň blízku tej, ktorá bola pozorovaná na kontrolných jedincoch. Z toho autori vyvodzujú záver, že fotosyntetický aparát sadeníc smreka je pomerne odolný voči vodnému stresu. U mierne stresovaných jedincov žiadne zmeny parametra Fv/Fm nepozorovali. ŽIVČÁK (2006) uvádza, že parameter Fv/Fm je relatívne rezistentný na vodný deficit a o to zaujímavú a do budúcnosti perspektívnu preto považujeme možnosť využitia niektorých citlivejších parametrov fluorescence chlorofylu *a*.

Zmena konduktivity prieduchov (g_s), ako odpoveď na suchu, má za následok podstatné zvýšenie efektívnosti využitia vody. Medzi stomatálnou konduktanciou a čistou fotosyntézou (P_N) je veľmi úzky vzťah (TESKEY *a kol.* 1986). Uvedené parametre reagovali na pôsobenie sucha veľmi citlivo.

EASTMAN a CAMM (1995) pozorovali fotosyntetickú reakciu hybridných jedincov smreka (*Picea glauca* × *Picea engelmannii*) počas stresu zo sucha. Pri ožiarení o intenzite 500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ sledovali postupný pokles prieduchovej vodivosti (hodnota cca 35–55 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ pri vodnom potenciáli > -0,5 MPa) aj fotosyntetickej asimilácie CO₂ (počiatočná hodnota 2,5 až 3,5 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$). Hodnoty oboch parametrov poklesli na minimum po dosiahnutí vodného potenciálu okolo -1,5 MPa. Ako uvádzajú MEDRANO *a kol.* (2002) g_s nie je kontrolovaná len dostupnosťou vody v pôde a často reaguje na suchu ešte pred zaznamenaním zmien relatívneho obsahu vody a vodného potenciálu asimilačných orgánov. Považujú preto stomatálnu vodivosť za parameter vhodne a komplexne odrážajúci stres zo sucha u rastlín. Druhy s vysokou g_s v optimálnych podmienkach vykazujú vyššiu citlivosť tohto parametra voči zmenám prostredia (EWERS *a kol.* 2001).

Pokles P_N tiež tesne koreluje s redukciou RuBPC aktivity, pozorovanou pri vodnom deficite (BERTAMINI *a kol.* 2006). Silná závislosť medzi P_N a g_s poukazuje na fakt, že P_N je limitovaná predovšetkým činnosťou prieduchov, ktoré tiež regulujú transpiráciu a relatívny obsah vody v asimilačných orgánoch (FARQUHAR, SHARKEY 1982).

Predpokladáme, že navrhovaná metodika a použitie uvedených metód v rámci aktivity „Globálne a regionálne zmeny“ významnou mierou prispeje k detailnejšiemu poznaniu reakcií drevín (predovšetkým smreka obyčajného) na nedostatok vody, čo umožní vysloviť aj určité prognózy budúceho vývoja, ako i vytvoriť precízny návrh opatrení pre eliminovanie škôd z hľadiska trvaloudržateľného rozvoja krajiny.

Podakovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- ALIA, R., MOHANTY, P., MATYSIK, J., 2001: Effects of proline on the production of singlet oxygen. *Amino Acids* 21(2): 195–200.
- BATES L.S., WALDREN S.P., TEARE I.D. 1973: Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil* 39: 205–207.
- BERTAMINI, M., ZULINI, L., MUTCHUELIAN, C., NEDUNCHEZHIAN, N., 2006: Effect of water deficit on photosynthetic and other physiological responses in grapevine (*Vitis vinifera* L. cv. Riesling) plants. *Photosynthetica* 44(1): 151–154.
- BLÖDNER C., SKROPPA T., JOHNSEN O., POLLE A., 2005: Freezing tolerance in two Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) progenies is physiologically correlated with drought tolerance. *Journal of Plant Physiology* 162(5): 549–558.
- BODE J., KÜHN H.P., WILD A., 1985: Die akkumulation von prolin in nadeln geschädigter fichten (*Picea abies* [L.] Karst.). *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 104(6): 353–360.
- BRESTIČ M., OLŠOVSKÁ K., 2001: Vodný stres rastlín: príčiny, dôsledky a perspektívy. SPU Nitra, 146 p.
- CORNIC, G., MASSACI, A., 1996: Leaf Photosynthesis Under Drought Stress. In Barker, R. (Ed.): *Photosynthesis and the Environment*. Kluwer Academic Publishers, Netherlands: 347–366.
- DUAN B., LU Y., YIN C., JUNTILLA O., LI C., 2005: Physiological responses to drought and shade in two contrasting *Picea asperata* populations. *Physiologia Plantarum* 124 (4): 476–484.
- EASTMAN, P.A.K., CAMM, E.L., 1995: Regulation of photosynthesis in interior spruce during water stress: changes in gas exchange and chlorophyll fluorescence. *Tree Physiology* 15: 229–235.
- EWERS, B.E., OREN, R., PHILLIPS, N., STROMGREN, M., LINDER, S., 2001: Mean canopy stomatal conductance responses to water and nutrient availabilities in *Picea abies* and *Pinus taeda*. *Tree Physiology* 21: 841–850.
- FARQUHAR, G.D., SHARKEY, T.D., 1982: Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Reviews in Plant Physiology* 33: 317–345.
- GUIDI, L., NALI, C., CIOMPI, S., LORENZINI, G., SOLDATINI, G.S., 1997: The use of chlorophyll fluorescence and leaf gas exchange as methods for studying the different responses to ozone of two bean cultivars. *Journal of Experimental Botany* 48(306): 173–179.
- JIANG Y., HUANG B., 2001: Osmotic adjustment and root growth associated with drought preconditioning-enhanced heat tolerance in Kentucky bluegrass. *Crop Science* 41: 1168–1173.
- KARLSSON P.E., MEDIN E.L., WALLIN G., SELLDÉN G., SKÄRBY L., 1997: Effects of ozone and drought stress on the physiology and growth of two clones of Norway spruce, *Picea abies*. *New Phytol* 136: 265–275.
- KMEŤ, J., KULLA, L., JAKUŠ, R., 2004: Analýza fyziologickej odozvy smreka na rôzne ekologické podmienky. *Beskydy, MZLU v Brně*, 17: 111–118.

- KRONFUS G., POLLE A., TAUSZ M., HAVRANEK W.M., WEISNER G., 1998: Effects of ozone and mild drought stress on gas exchange, antioxidants and chloroplast pigments in current-year needles of young Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.). *Trees* 12: 482–489.
- KŘÍSTEK, J., 1996: Chřadnutí lesů. Lesnická práce 5: 166–167.
- KURJAK D., DITMAROVÁ L., KMEŤ J., 2008: Citlivost reakcie biomarkérov stresu zo sucha u smreka obyčajného. *Acta Facultatis Forestalis* 50(1): 33–45.
- LARCHER, W., 2003: *Physiological Plant Ecology. Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. Fourth Edition. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 513 p.
- LICHTENTHALER H.K., 1987: Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology* 148: 350–382.
- LU, C., ZHANG, J., 1998: Effect of water stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence and photoinhibition in wheat plants. *Australian Journal of Plant Physiology* 25: 883–892.
- MAJUMDAR S., GHOSH S., GLICK B.R., DUMBROFF E.B., 2006: Activities of chlorophyllase, phosphoenolpyruvate carboxylase and ribulose-1,5-bisphosphate carboxylase in the primary leaves of soybean during senescence and drought. *Physiologia Plantarum* 81 (4): 470–480.
- MANES F., DONATO E., VITALE M., 2001: Physiological response of *Pinus halepensis* needles under ozone and water stress conditions. *Physiologia Plantarum* 113: 249–257.
- MAREK, M., PROCHTOVÁ, M., MARKOVÁ, I., 1992: Production activity of mountain cultivated Norway spruce stands under the impact of air pollution. II. Vertical distribution of photosynthetic activity in the stand canopy. *Ekológia* 11(2): 121–132.
- MAXWELL, K., JOHNSON, G.J., 2000: Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *Journal of Experimental Botany* 51(345): 659–668.
- MEDRANO, H., ESCALONA, J.M., BOTA, J., GULIAS, J., FLEXAS, J., 2002: Regulation of photosynthesis of C₃ plants in response to progressive drought stomatal conductance as a reference parameter. *Annals of Botany* 89: 895–905.
- OMASA K., TAKAYAMA K., 2003: Simultaneous measurement of stomatal conductance, non-photochemical quenching and photochemical yield of photosystem II in intact leaves by thermal and chlorophyll fluorescence imaging. *Plant and Cell Physiology*, 44 (12): 1290–1300.
- PAPAGEORGIOU G.C., MURATA N., 1995: The unusually stabilising effects of glycine betaine on the structure and function of the oxygen-evolving Photosystem II complex. *Photosynthesis Research* 44(3): 243–252.
- PERCIVAL, G.C., SHERIFFS, C.N., 2002: Identification of drought tolerance woody perennials using chlorophyll fluorescence. *Journal of Arboriculture* 28(5): 215–223.
- PROCHÁZKA, S., I. MACHÁČKOVÁ, J. KREKULE, J. ŠEBÁNEK. 1998. *Fyziologie rostlin*. Academia, Praha, 484 p.
- PUKACKI, P.M., KAMINSKA-ROZEK, E., 2005: Effect of drought stress on chlorophyll fluorescence and electrical admittance of shoots in Norway spruce seedlings. *Trees* 19: 539–544.
- RAVEN, J.A., 2004: Gas Exchange: new challenges with *Arabidopsis*. *New Phytologist* 162: 1–8.
- SCHREIBER U., BILGER W., 1986: Rapid assessment of stress effects on plant leaves by chlorophyll fluorescence measurements. In Tenhunen J.D., Catarino F.M., Lange O.L., Oechel W.C. (Eds.): *Plant response to stress functional analysis in Mediterranean ecosystems*. Springer Verlag, Berlin: 27–53.
- SUBRAHMANYAM, D., SUBASH, N., HARIS, A., SIKKA, A.K., 2006: Influence of water stress on leaf photosynthetic characteristics in wheat cultivars differing in their susceptibility to drought. *Photosynthetica* 44(1): 125–129.
- TESCHE M., 1980: Prolin – ein unspezifischer Stressindikator bei Gehölzen. *Wissenschaftliche Beiträge* 9: 58–66.
- TESKEY, R.O., FITES, J.A., SAMUELSON, L.J., BONGARTEN, B.C., 1986: Stomatal and nonstomatal limitations to net photosynthesis in *Pinus taeda* L. under different environmental conditions. *Tree Physiology* 2: 131–142.
- WALLIN G., KARLSSON P.E., SELLDÉN G., OTTOSSON S., MEDIN E.L., PLEIJEL H., SKÄRBY L., 2002: Impact of four years exposure to different levels of ozone, phosphorus and drought on chlorophyll, mineral nutrients, and stem volume of Norway spruce, *Picea abies*. *Physiologia Plantarum* 114: 192–206.
- WOHLFAHRT S., SCHMITT V., WILD A., 1998: Investigation of phosphoenol pyruvate carboxylase an proline in damaged and undamaged needles of *Picea abies* and *Abies alba*. *Chemosphere* 36 (4–5): 877–881.
- YANBAO L., CHUNYING Y., CHUNYANG L., 2006: Differences in some morphological, physiological and biochemical responses to drought stress in two contrasting populations of *Populus Przewalskii*. *Physiologia Plantarum* 127 (2): 182–191.

ŽIVČÁK, M., 2006: Využitie diverzity fyziologických reakcií pre skríning genotypov pšenice tolerantných na sucho. Dizertačná práca, VES SPU Nitra, 157 p.

Adresa autorov:

doc. Ing. Jaroslav Kmet', PhD.

Katedra fytológie

Lesnícka fakulta

TU vo Zvolene

T. G. Masaryka 24

960 53 Zvolen

SR

e-mail: kmet@vsld.tuzvo.sk

RNDr. Ľubica Ditmarová, PhD.

Ústav ekológie lesa SAV

Štúrova 2

960 53 Zvolen

SR

e-mail: ditmarova@sav.savzv.sk

Ing. Daniel Kurjak, PhD.

Katedra prírodného prostredia

Lesnícka fakulta

TU vo Zvolene

T. G. Masaryka 24

960 53 Zvolen

SR

e-mail: kurjak@vsld.tuzvo.sk

Fyziologicko-biochemické parametre ako možné bioindikátory stresu zo sucha

Abstrakt

V súčasnosti sledujeme procesy náhleho rozpadu lesných porastov (tzv. novodobé odumieranie) odlišujúce sa od „klasických“ disturbančných schém. Neustále zhoršovanie stavu lesov, nielen na našom území, prirodzene vústilo do snahy vysvetliť mechanizmus fungovania tohto javu a eliminovať ho. Často diskutovanou témou v tejto súvislosti je zmena klimatických podmienok ako jedna z príčin podieľajúcich sa na odumieraní najmä nepôvodných, ale i prirodzených smrekových porastov. Zmena pôdnej i vzdušnej vlhkosti je jednou z predpokladaných príčin oslabenia stromov, ktorá môže viesť k neskoršiemu rozpadu celých porastov. V predkladanej práci uvádzame možnosti využitia konkrétnych fyziologicko-biochemických parametrov ako bioindikátorov stresu zo sucha, predovšetkým pri výskume odumierania smrekových porastov.

Kľúčové slová: sucho, fyziológia, biomarkéry stresu, smrek

VÝSKUM ŠTRUKTÚRY, PRODUKCIE, NEKROMASY, RIZOLÓGIE A REGENERAČNÝCH PROCESOV PRÍRODNÝCH LESOV SLOVENSKA

Milan S A N I G A – Miroslav B A L A N D A – Peter J A L O V I A R

Saniga, M., Balanda, M., Jaloviar, P., 2009: **The research of structure, necromass, rhizology and regeneration. processes of natural forests in Slovakia.** Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 77–88, 2009.

The paper deals with methodology and methods applied in research of structure, necromass, rhizology and regeneration processes of natural forests in Slovakia. Mentioned methods, measurements and analysis of selected dendrological features is considered as the top of natural forest research in Europe. The usage of Field-Map technology and other aforementioned measuring instruments allows scientific shift to forward in the problematics of canopy gaps research. The usage of index methods for mathematical description of stand structure enables more precise quantification of individual developmental stages within developmental cycle of natural forest. The presented procedures of sampling, processing and evaluation of fine roots will significantly shift upward the level of knowledge in this area of interest.

Key words: virgin forest, texture, structure, research methodology, rhizology

1. PROBLEMATIKA

Lesnícky výskum zameraný na štúdium dynamiky štruktúry prírodných lesných ekosystémov zaznamenal od čias prvých priekopníckych prác značný pokrok. Za prvé koncepcne pojaté štúdie sukcesie lesného ekosystému môžeme pokladať diela Cowlesa a Clementsa (COWLES 1899, CLEMENTS 1916 ex. GLENN-LEWIN and VAN DER MAAREL 1992). Časopriestorový vývoj lesného ekosystému môžeme charakterizovať ako zmenu v populácii jedincov spôsobenú ich zrodom, rastom a smrťou. Tento proces vedie k neustálej zmene a vývoju priestorovej štruktúry rastlinného spoločenstva v čase a má rozhodujúci význam pre pochopenie dynamiky ekosystému (GRATZER *et al.*, 2004).

WATT (1925, 1947) odvodil koncepcný model vývoja prírodného lesa (vývojového cyklu), ktorý popísal ako neustále striedanie vzrastajúcich a degradujúcich vývojových štádií. Vznik medzier považuje za spúšťač mechanizmus prirodzenej regenerácie a iniciátora začiatku nového vývojového cyklu prírodného lesa. Cyklický asynchrónny vznik medzier na ktoromkoľvek mieste pralesa vedie v konečnom dôsledku k vzniku mozaiky neustále sa presúvajúcich vývojových štádií. Celý tento časový a priestorový systém, ktorý REMMERT (1991) nazval zjednodušene „mozaikový cyklus“, je vo všeobecnosti považovaný

za základný rámec pre popis dynamiky prírodných opadavých lesov temperátneho pásma. (MUELLER-DOMBOIS, 1987; PEET a CHRISTENSEN, 1987; OLDEMANN, 1990; VEBLEN, 1992).

Pre oblasť zmiešaných lesov strednej Európy, a teda oblasť výskumu pralesov na Slovensku sa používa triedenie vývojových štádií používané spravidla v germanofónnych krajinách popísané WECKOM (1956) a LEINBUNDGUTOM (1959), podľa potrieb modifikované rôznymi autormi (KORPEL 1989). Autori, ktorí sa zaoberajú štúdiom pralesov, najmä európskych, nie sú jednotní v používaní názvov a v rozlišovaní počtu vývojových štádií a fáz pralesa. Vo všeobecnosti je však možné vyčleniť tri základné vývojové štádiá používané v podmienkach praxe pri výskume pralesov. KORPEL (1989) opisuje tri základné časti vývojového cyklu ako štádiá dorastania, optima a rozpadu. Každé štádium je pritom charakterizované typickou priestorovou výstavbou porastu.

Štruktúra prírodných lesov je plošne a výškovo cez celý vývojový cyklus viac či menej diferencovaná. Základnou charakteristikou štruktúry prírodného lesa je mnohými európskymi autormi považované rozdelenie početností v rámci určitých hrúbkových kategórií – tzv. hrúbkové početnosti. Ako prvý sa toto rozdelenie pokúšal matematicky charakterizovať DELIACOURT (1898), pričom priradením počtu jedincov jednotlivým hrúbkovým kategóriám odvodil frekvenčný histogram tvaru obráteného písmena „J“. Mnohé výskumy štruktúry prírodných lesov potvrdili význam negatívne exponenciálnej funkcie, ktorá je v súčasnosti považovaná za jeden zo základných znakov prirodzenosti lesov. Tvar tejto funkcie je možné ekologicky interpretovať ako pomer, resp. rýchlosť mortality medzi jednotlivými hrúbkovými kategóriami pozdĺž celého hrúbkového gradientu (WESTPHAL et al. 2006). Priestorová štruktúra prírodného lesa závisí vo všeobecnosti od pôsobenia celého komplexu faktorov. KORPEL (1989) odvodil z výsledkov systematického výskumu prírodných lesov Slovenska zovšeobecnenia týkajúce sa štruktúr prírodných lesov v rámci typických rastlinných spoločenstiev jednotlivých lesných vegetačných stupňov. Štruktúra prírodných lesov je v rámci gradientu lesných vegetačných stupňov značne odlišná.

V prírodných lesoch je výskum štruktúrálnej diverzity dôležitý z hľadiska hodnotenia ich ekologickej stability a plnenia ostatných funkcií lesa (MERGANIČ 2001). Porastová štruktúra človekom nenarušených lesných ekosystémov v sebe navyše nesie informácie o dynamike vývoja týchto lesov (HOFGAARD 1993).

Štruktúra lesa sa popisuje rôznymi štruktúrnymi prvkami, ako je priestorové rozdelenie, hustota, diferencovanie, zmiešanie (ZENNER 1999). Pri správnom hodnotení štruktúry porastov je však potrebné ju vnímať komplexne ako charakteristiku zloženú z horizontálnej a vertikálnej štruktúry vyjadrenej rozrôznením porastu v týchto smeroch.

Pre popis a kvantifikáciu štruktúrálnej diverzity je možné použiť viacero kvantitatívnych a kvalitatívnych metód. Najčastejšie používanými kvantifikačnými metódami sú indexové metódy.

Vo všeobecnosti ich môžeme rozdeliť do nasledovných skupín, a to na indexy:

- popisujúce horizontálne rozmiestnenie jedincov po ploche porastu. Pravdepodobne najznámejším indexom z tejto skupiny je index agregácie (CLARK & EVANS 1954), ktorý je založený na porovnaní skutočnej vzdialenosti susediacich stromov k ich očakávanej vzdialenosti susediacich stromov k ich očakávanej vzdialenosti v tzv. Poissonovom lese, t. j. lese, v ktorom sú stromy rozložené po ploche porastu náhodne (TOMPPA 1986 in VORČÁK 2005),

- hodnotiace premiešanie jednotlivých druhov v poraste, a to na základe hodnotenia druhového zloženia mikroskupiny n susediacich stromov. Medzi tieto indexy radíme napr. segregančný PIELOU (1977) index zohľadňujúci jedného najbližšieho suseda, a DM index navrhnutý GADOWOM (1999) a upravený FÜLDNEROM (1995), ktorý berie do úvahy troch najbližších susedov cieľového stromu,
- indexy hrúbkovej a vertikálnej diferenciácie porastu vychádzajúce z porovnania hrúbok, resp. výšok susediacich stromov. Takýto index je napr. Giniho koeficient (DIXON *et al.* 1987), ktorý charakterizuje stupeň vertikálnej diferencovanosti porastov, alebo index hrúbkovej diferenciácie (FÜLDNEROM 1995), ktorý kvantifikuje vzájomné relácie hrúbok susedných stromov v poraste,
- komplexné indexy zahŕňajúce dve a viac zložiek štrukturálnej diverzity. Medzi tieto indexy môžeme zaradiť indexy autorov: PRETZSCH (1998), JAHNE & DOHRENBUSCH (1997), ZENNER (1999).

V poslednom období z hľadiska vitality lesných ekosystémov nadobúda na význame výskum podzemnej biomasy fyziologicky aktívnych – jemných koreňov. Za jemné korene sa podľa väčšiny rizologických štúdií považujú korene s hrúbkou do 2 mm, ktoré sú prevažne fyziologicky aktívne, bez vyvinutej korkovej vrstvy, s prevládajúcou sacou symbiotickou a vodivou funkciou. Funkcia jemných koreňov nie je determinovaná výhradne ich hrúbkou, ale aj postavením v hierarchii koreňového systému (PRETZIGER 2002). Jemné korene sa obmieňajú rýchlejšie ako asimilačný aparát a to aj v prípade opadavých drevín (ZHOU, SHANGGUAN 2007). Rovnako aj ich rozklad je často rýchlejší ako rozklad a mineralizácia opadanky, čím sa obmena jemných koreňov stáva veľmi významnejším komponentom uhlíkového cyklu v lesných porastoch. NADELHOFFER (2000) uvádza, že produkcia jemných koreňov je najvýznamnejším komponentom netto- produkcie biomasy pre vysokú mieru obmeny. Hoci samotná aktuálne existujúca biomasa jemných koreňov ani jej podiel na celkovej biomase stromov a porastov nie je vysoký, je systém efemérnych jemných koreňov dôležitou súčasťou metabolizmu terestriálnych ekosystémov. Odhaduje sa, že viac ako 33 % čistej globálnej ročnej produkcie je využitých na produkciu jemných koreňov s krátkou životnosťou a krátkou dobou dekompozície (NORBY, JACKSON 2000, WENK *et al.* 2006). Podľa RADEMACHERA *et al.* (1992) predstavuje podiel jemných koreňov v dospelom smrekovom poraste približne 0,52 % z celkovej biomasy stromovej zložky smrekového ekosystému, MEIER, LEUSCHNER (2008) uvádzajú hodnotu podielu biomasy jemných koreňov v rozpätí 2–3 %.

HENDRICK, PRETZIGER (1993) uvádzajú životnosť jemných koreňov od niekoľkých dní po niekoľko týždňov, ale jej variabilita je veľmi vysoká. EISSENSTAT *et al.* (2000) uvádzajú, že mediánová životnosť nerozvetvených jemných koreňov s hrúbkou do 0,25 mm je nižšia ako 300 dní, ale korene s hrúbkou nad 0,25 mm majú mediánovú životnosť nad 600 dní.

Vo všeobecnosti platí, že jemné korene sa vždy koncentrujú v tých vrstvách pôdy, ktoré obsahujú vysoké množstvá dostupných živín. Rozdiel medzi rôznymi ekosystémami, resp. pôdami je v hĺbke, do ktorej je skoncentrovaná prevažná väčšina jemných koreňov. GALE, GRIGAL (1987) použili na vyjadrenie závislosti kumulatívneho podielu jemných koreňov od hĺbky v pôde exponenciálnu rovnicu v tvare $y = 1 - \beta^d$, kde y je kumulatívny podiel jemných koreňov a d je hĺbka v pôde.

Okrem dostupnosti živín a vody má na priestorové rozmiestnenie jemných koreňov rovnako významný vplyv aj koncentrácia toxických látok v pôdných horizontoch. Väčšina potenciálnych fytotoxických prvkov, predovšetkým kovov, je prirodzenou súčasťou pôdného prostredia, avšak vyskytuje sa vo forme, ktorá nie je pre rastliny škodlivá. Postupným znižovaním pH pôdy však dochádza k zmene chemickej charakteristiky a ich uvoľneniu z organominerálneho komplexu vo forme voľných katiónov. Fytotoxické pôsobenie Al^{3+} je známe dlhodobo, podľa KOCHIANA *et al.* (2005) sa jedná o formu hliníka s najvyššou rizotoxicitou. Okrem toxicky pôsobiacich zlúčenín sú lesné ekosystémy vystavené depozícii látok, ktoré sú minerálnymi živinami. Depozícia dusíka vo forme NH_3^+ alebo NO_2^- má podľa NADELHOFFERA (2000) a NORBYHO, JACKSONA (2000) za následok znižovanie biomasy jemných koreňov ale zároveň aj nárast miery ich obmeny. ABER *et al.* (1985) uvádzajú, že v lesných porastoch zaťažených vysokými depozíciami dusíka dochádza k úbytku biomasy jemných koreňov a následne k vymývaniu nitrátov.

2. CIEĽ VÝSKUMU PRÍRODNÝCH LESOV

Cieľom výskumu prírodných lesov je posúdenie štruktúry, textúry, regeneračných procesov a dynamiky mŕtveho dreva v rámci ich vývojového cyklu. Tento komplexný cieľ pozostáva z viacerých čiastkových cieľov:

- kvantifikovať a charakterizovať zmeny v typickej porastovej štruktúre, v závislosti od jednotlivých úsekov vývojového cyklu prírodného lesa;
- špecifikovať proces striedania jednotlivých štádií vývojového cyklu v závislosti od striedania generácií hlavných porastotvorných drevín;
- kvantifikovať štruktúru mŕtveho dreva v závislosti od drevín, jeho priestorovú distribúciu a charakterizovať dynamický proces vzniku a akumulácie a dekompozície nekromasy v závislosti od vývojového štádia prírodného lesa;
- popísať priestorový poriadok a plošné rozmiestnenie medzier v porastovom zápoji, stanoviť ich plošný podiel, charakterizovať proces ich vzniku a stanoviť úlohu vzniku porastových medzier v procese nástupu prirodzeného zmladenia a striedania jednotlivých generácií pralesa;
- zhodnotiť priestorové rozmiestnenie, druhovú a vekovú štruktúru prirodzeného zmladenia s dôrazom na opis mechanizmu zapĺňania porastových medzier v podmienkach druhovo pestrého prírodného lesa;
- popísať svetelné podmienky pod materským porastom a v rámci porastovej medzery, s dôrazom na distribúciu priameho, difúzneho a fotosynteticky účinného svetelného žiarenia, v súvislosti s nástupom a priestorovým poriadkom prirodzeného zmladenia.

3. METODIKA VÝSKUMU PRÍRODNÝCH LESOV

Založenie trvalých výskumných plôch a fixácia v teréne

Pre potreby výskumu štrukturálnych charakteristík a dynamiky prírodného lesa je na ploche pralesa založená jedna trvalá výskumná plocha (ďalej TVP). Umiestneniu TVP predchádza dôsledná rekognoskácia terénu. Jej umiestnenie je účelové, s cieľom zachytiť výrazne odlišné drevinové zloženie a štrukturálne charakteristiky v rámci celej plochy NPR.

Založená TVP je o rozmeroch 100×500 m, rozloha 5 ha. resp. 200×300 m (6 ha). Kvôli lepšej orientácii a prehľadnosti je celá plocha (TVP) rozdelená na jednotlivé časti o rozmere 100×100 m. Tieto plochy o výmere 1 ha sú následne zahustené rastrom 50×50 m – rastrová plocha (ďalej RP). V rámci každej RP sa nachádzajú štyri čiastkové plochy o rozmere 25×25 metrov (ďalej ČP). Takýmto spôsobom vznikne na celej TVP 20 (24) rastrových plôch (RP) a 80 (96) čiastkových plôch (ČP). Stredom celej TVP prechádza transekt o rozmeroch 50×500 m resp. 100×300 m a výmere 2,50 (3,0)/ ha. V teréne sa hranice TVP vymeriavajú prístrojom Field-MAP a sústavou výtyčiek.

4. ZBER ÚDAJOV Z JEDNOTLIVÝCH TVP

Na transekte sú merané nasledovné veličiny:

- hrúbka stromov s $d_{1,3}$ väčšou ako 2,0 cm s presnosťou na 1 mm,
- výška stromov s presnosťou na 0,5 m,
- výška nasadenia ich korún s presnosťou na 0,5 m,
- zaradenie stromov do vrstiev,
- situácia stojacich stromov v súradnicovom systéme x,y ($d_{1,3} \geq 2,0$ cm) a projekcie korún živých stromov ($x_l - x_n$),
- situácia padnutých stromov a ich objem,
- situácia otvorených a rozšírených medzier, ich výmeru a počet vypadnutých stromov,
- plošná evidencia prirodzenej obnovy podľa prevládajúcej vývojovej kategórie,
- štruktúra jedincov prirodzenej obnovy podľa druhu dreviny a výškovej kategórie na kruhových skusných plochách.

Meranie na ostatnej ploche zahŕňa zisťovanie:

- hrúbky stromov s $d_{1,3}$ väčšou ako 8,0 cm s presnosťou na 1 mm,
- výšky vybraných stromov s presnosťou na 0,5 m pre zostavenie výškového grafikonu,
- zaradenie stromov do vrstiev,
- situácie padnutých stromov a ich objem,
- situácie otvorených a rozšírených medzier, ich výmeru a počet vypadnutých stromov,
- situácie prirodzenej obnovy v plošnej forme podľa prevládajúcej vývojovej kategórie,
- určenie vývojových štádií.

5. METODIKA MERANIA JEDNOTLIVÝCH VELIČÍN

Meranie hrúbky a výšky stromov

Meranie hrúbky stromov $d_{1,3}$ je vykonávané podľa všeobecne platných pravidiel priemerkovania (ŠMELKO 2000). V rámci tranzecktu sú hrúbkovo zaznamenané jedince s minimálnym priemerom $d_{1,3}$ 2 cm. U jedincov s $d_{1,3}$ 2 až 7,9 cm je hrúbka zisťovaná meraním dendrometrickou priemerkou s milimetrovým delením, s presnosťou na 1 mm. Na ostatnej ploche TVP je hrúbka jedincov meraná dendrometrickou priemerkou vo dvoch na seba kolmých smeroch. Jednotlivé jedince sú zaznamenávané, pokiaľ hrúbka $d_{1,3}$ meraná v dvoch smeroch dosiahne hodnotu 8 cm.

Výška jedincov tranzecktu je meraná laserovým výškomerom VERTEX III s presnosťou 0,5 m. Podobne je meraná i výška nasadenia koruny u stromov nachádzajúcich sa na tranzeckte. Pre ostatnú plochu sa výšky prevezmú z výškových grafikonov pre jednotlivé dreviny, ktoré sú zostavené na základe výšok nameraných na tranzeckte a vyrovnané krivkou podľa Korfovej funkcie (KORF 1939).

Jednotlivé stromy sú zatriedené do stromových vrstiev. Hraničné hodnoty výšky stromu pre jednotlivé stromové vrstvy získame pomocou hornej výšky (h_0), ktorá reprezentuje priemernú výšku 10 % najhrubších živých stromov tranzecktu. Stromy sú do jednotlivých vrstiev zatriedované nasledovne:

- Horná vrstva – výška stromu $\leq 2/3 h_0$,
- Stredná vrstva – $1/3 h_0 \leq$ výška stromu $\leq 2/3 h_0$,
- Spodná vrstva – výška stromu $\leq 1/3 h_0$.

Pozičné zameranie živých stromov a plošné projekcie koruny

Na tranzeckte sú pozične zamerané všetky jedince s minimálnym priemerom $d_{1,3}$ 2 cm. Na zameranie je použitá technológia Field-MAP.

Plošná projekcia koruny živého stromu je zameraná prístrojom Field-MAP pomocou podľa potreby minimálne štyroch hraničných bodov, pričom ich počet závisí na pravidelnosti tvaru koruny. Výstupom je mapa plošných projekcií korún stromov tranzecktu s ich pozičným ukotvením.

Pozičná evidencia nekromasy

Plošná distribúcia nekromasy je zaznamenávaná na celej ploche TVP pomocou prístroja Field-MAP. Pozične zamerané sú ležiace kmene, ktoré dosahujú dĺžku minimálne 2 m a priemer na tenšom konci minimálne 20 cm a stojace sucháre s výškou minimálne 2 m a priemerom $d_{1,3}$ min. 8 cm. Po pozičnom zachytení je potrebné zmerať priemer na hrubšom (d_0) a tenšom konci (d_n) ležiaceho kmeňa, pri stojacej nekromase priemer $d_{1,3}$. Pozičná situácia nekromasy je vyhodnocovaná pre celú TVP1, objem nekromasy je určený v rámci každej ČP.

Nekromasa je klasifikovaná do v nasledovných štyroch stupňov rozkladu podľa AL-BRECHTA (1990):

- 1) čerstvo odumreté stromy,
- 2) začínajúci rozklad: uvoľnená kôra, po použití sekery drevo ešte pevné, hniloba jadra do 1/3 priemeru,
- 3) pokračujúci rozklad: bel mäkká, jadro ešte miestami pevné pre sekeru, hniloba jadra je väčšia ako 1/3 priemeru,
- 4) silná hniloba: drevo po celej hrúbke mäkké, hlavné znaky nie sú viditeľné.

Evidencia porastových medzier

Plošné zachytenie porastových medzier pomocou prístroja Field-MAP je vykonávané na celej ploche porastu.

Medzera je pre potreby tejto práce definovaná ako vertikálny priemet otvoru v porastovom zápoji, ktorý vznikol vypadnutím jedného alebo viacerých jedincov hornej vrstvy. Pomocou výškových kriviek získaných meraním výšok jedincov porastu je odvodená hraničná hrúbka stromu, ktorá zodpovedá 2/3 hornej výšky (h_0) porastu. Za jedince, vypadnutím ktorých medzera vznikla, sú považované iba tie, ktoré presiahli hraničnú hrúbku reprezentujúcu 2/3 hornej výšky porastu.

Z dôvodu podchytenia zmeny svetelných pomerov i v poraste nachádzajúcom sa v blízkosti vertikálneho priemetu otvorenej medzery, je pri evidencii medzier meraná i tzv. rozšírená medzera (*sensu* RUNKLE 1992) Zozšírená medzera je teda definovaná ako plocha ohraničená bázami kmeňov stromov tvoriaci hranicu otvorenej medzery (RUNKLE 1992).

Otvorená a uzavretá medzera sú evidované iba v prípade, ak sú na pôdnom povrchu medzery ešte identifikovateľné zvyšky odumretých jedincov, ktorých vypadnutím medzera vznikla a následný porast (generácia) nedosiahne výšku 1/3 hornej výšky porastu (h_0), tzn. kým nedosiahne výškové postavenie strednej vrstvy porastu.

Evidencia prirodzeného zmladenia

Plošné zachytenie prirodzenej obnovy je vykonávané pomocou prístroja Field-MAP na celej ploche porastu. Prirodzená obnova je zároveň klasifikovaná do kategórií podľa výšky resp. hrúbky jedincov. Na klasifikáciu jedincov prirodzenej obnovy na celej ploche TVP je použitá nasledovná klasifikačná schéma uvedená v tabuľke 1.

Tab. 1 Klasifikačná schéma na plošné hodnotenie prirodzenej obnovy podľa priemernej výšky, resp. hrúbky (RÖHRING, GUSSONE 1990 ex TABAKU 1999, upravené)

Table 1 The classification scheme for areal evaluation of natural regeneration (RÖHRING, GUSSONE 1990 ex TABAKU 1999, modified)

Trieda	Popis kategórie
1	zapojená obnova do 50 cm výšky
2	prevládajúce jedince od 50 cm do 1,0 m výšky
3	prevládajúce jedince od 1,0 m výšky do 2,0 m výšky
4	prevládajúce jedince od 2,0 m výšky do 2,0 cm hrúbky v $d_{1,3}$
5	prevládajúce jedince od 2,1 cm do 4,0 cm hrúbky v $d_{1,3}$
6	prevládajúce jedince od 4,1 cm do 6,0 cm hrúbky v $d_{1,3}$
7	prevládajúce jedince od 6,1 cm do 8,0 cm hrúbky v $d_{1,3}$
8	plocha pod ostatným porastom bez zapojeného zmladenia

Evidencia prirodzeného zmladenia na tranzekte je na jednotlivých čiastkových plochách z dôvodu vysokej početnosti prirodzeného zmladenia evidovaná na piatich kruhových skusných plochách o polomere 2 m. Jednotlivé získané dáta sú následne prepočítané na hektárové početnosti. Skusné plochy sú umiestnené v rohoch ČP pričom piata plocha je umiestnená do stredu ČP. Jedince prirodzenej obnovy, ktoré nedosiahli $d_{1,3}$ 2 cm sú na ploche tranzektu klasifikované podľa výšky do kategórií uvedených v tabuľke 2. Jedince prirodzenej obnovy ktoré na tranzekte dosiahli $d_{1,3}$ 2 cm sú pozične zamerané v pomocou prístroja Field-MAP podobne ako dospelé jedince. Plošné zameranie prirodzenej obnovy bude konfrontované s plošnou distribúciou medzier v hornej vrstve porastu a mapou plošnej distribúcie mŕtveho dreva

Tab. 2 Klasifikačná schéma na hodnotenie jedincov prirodzenej obnovy na tranzekte (KORPEL 1989)

Table 2 The classification scheme for individual evaluation of natural regeneration (KORPEL 1989)

Trieda	Popis kategórie
1	jedince do výšky 20 cm
2	jedince s výškou 21–50 cm
3	jedince s výškou 51–80 cm
4	jedince s výškou 81–130 cm
5	jedince s výškou 131 cm – jedince s hrúbkou $d_{1,3}$ 2,0 cm

6. METODIKA VYHODNOTENIA DENDROMETRICKÝCH VELIČÍN

Pre analýzu a stanovenie textúry vývojových štádií pralesov budú použité štruktúrálné indexy /Clark-Evens, Fuldner, Jähne-Dohrenbusch, Gini/. Hrúbková, výšková

štruktúra a usporiadanie stromov v rastovom produkčnom priestore pralesa a rozdelenie nekromasy na ploche bude vyhodnotené v systéme SVS. Štruktúra porastových medzier a plošná evidencia prirodzenej obnovy bude vyhodnotená systémom Field-MAP. Svetelné pomery v medzerách budú vyhodnotené softvérom Winscanopy.

7. METODIKA RIZOLOGICKÉHO VÝSKUMU

Pre stanovenie biomasy a nekromasy jemných koreňov je pri odbere vzoriek potrebné zachovanie presne definovaného objemu pôdy spolu s koreňmi v pôvodnom (prirodzenom uložení). V takomto prípade sa ako najvhodnejší spôsob ukázal odber pôdneho monolitu pomocou dutého vrtáka s priemerom 80 mm t.j. s prierezom cca 50 cm² a s dĺžkou dutej časti 200 mm (MURACH 1984). Vzhľadom na to, že sa pri plánovaní experimentov vychádza z predpokladu, že jemné korene sú kumulované vo vrstve nadložného humusu a v minerálnej pôde do hĺbky 30–40 cm (JACKSON *et al.* 1996, GALE, GRIGAL, 1987, MEINEN *et al.* 2009, MEIER, LEUSCHNER 2008, ŠÁLY 1988), vykonávajú sa odbery v dvoch, prípadne troch krokoch tak, aby bola dosiahnutá hĺbka aspoň 40 cm. Spracovanie vzoriek začína vymytím jemných koreňov z pôdy. Triedenie jemných koreňov na živé a odumreté sa vykonáva na základe zohľadnenia niektorých všeobecne platných kritérií (GÖBL 1995, HERTEL, LEUSCHNER 2002, RICHTER *et al.* 2007, LEUSCHNER *et al.* 2001, MURACH 1984). V sporných prípadoch sa na definitívne posúdenie používa farbenie pomocou trifenylytetrazólium-chloridu (TTC) (RUF, BRUNNER 2003). Na stanovenie základných biometrických parametrov jemných koreňov sa použil systém WinRhizo 2004b regular (Règent Instruments Inc.), ktorý na nepriame meranie dĺžky, povrchu, objemu a počtu zakončení jemných koreňov využíva analýzu digitálnych snímok jemných koreňov. Vhodnosť programu ako aj niektoré obmedzenia z hľadiska dosiahnuteľnej presnosti merania dĺžky, priemeru a rozdelenia jemných koreňov do hrúbkových kategórií testovali BAUHUS, MESSIER (1999). Z ich výsledkov vyplýva, že pri vhodnom rozmiestnení častí jemných koreňov na skenovanej ploche nie je relatívna chyba merania dĺžky nikdy väčšia ako 5 %, čo sa vzhľadom na komplikovanosť merania dĺžky jemných koreňov považuje za veľmi dobrý výsledok.

Obraz jemného koreňa sa sníma pomocou skenera (Epson Perfection 4 870 photo) s vysokou rozlišovacou schopnosťou (6 400 dpi). Vymytý koreň sa uloží do obdĺžnikovej plastovej nádoby naplnenej vodou. Jemné korene sa pritlačia ku dnu misky priložným sklom tak, aby nedošlo ku skresleniu dĺžky v dôsledku ohnutia vo vertikálnom smere. Vzorka sa skenuje ako transparentný materiál. Pri skenovaní koreňov je potrebné použiť rozlíšenie minimálne 800 dpi, častejšie sa však pracuje s rozlíšeniami nad 1 000 dpi, hoci aj mierne zvyšovanie rozlíšenia podstatne predlžuje čas skenovania a ďalšieho spracovania snímku. Veľkosť zachyteného bodu je 0,032 mm pri 800 dpi a 0,021 mm pri 1 200 dpi. Na druhej strane je nastavenie vyššieho rozlíšenia dôležité preto, lebo ako dokumentujú BAUHUS, MESSIER (1999), použitý software vykazuje tendenciu podhodnotiť dĺžku v konkrétnej hrúbkovej triede, ak je skutočná hrúbka analyzovanej časti koreňa nižšia v porovnaní s hornou hranicou hrúbkovej triedy o menej ako je rozmer 1 bodu. Snímka je uložená formáte bitovej mapy, t.j. nekomprimovaného obrazu napr. tiff (*.tif), obraz je čiernobiely, počet stupňov šedosti je 256, od hodnoty 0 – biela po hodnotu 255 – čierna.

Program predstavuje štandardnú metodiku na zisťovanie uvedených parametrov. Jeho výstupom sú údaje o celkovej dĺžke a priemernej hrúbke, celkovom povrchu, objeme a počte zakončení koreňového systému resp. jeho analyzovanej časti. Druhou časťou výstupu je rozdelenie týchto veličín (okrem priemernej hrúbky) po hrúbkových triedach stanovených pred analýzou. Voľba triedneho intervalu je kompromisom medzi potrebou zachytiť rozdiely v hrúbkovej štruktúre jemných koreňov a zároveň zachovať prehľadnosť výstupu. Triedny interval má najčastejšie hodnotu 0,5 mm (zriedkavejšie 0,25 mm alebo 1,0 mm).

Podakovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- ABER, J. D., MELILLO, J. M., NADELHOFFER, K. J., MC CLAUGHERTY, C., PASTOR, J., 1985: Fine root turnover in forest ecosystems in relation to quantity and form of nitrogen availability. A comparison of two methods. *Oecologia* 66: 317–321.
- ALBRECHT, L., 1990: Grundlagen, Ziele und Methodik der waldökologischen Forschung in Naturwaldreservaten. Naturwaldreservate in Bayern. Schriftenreihe des Bayerischen Staatsministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten gemeinsam mit dem Lehrstuhl für Landschaftstechnik, Band 1, München, 221 s. und Anhang.
- BAUHAUS, J., MESSIER, Ch., 1999: Evaluation of fine root length and diameter measurements obtained using RHI-ZO Image analysis. *Agronomy Journal*: 91: 142–147.
- CLARK, P. J., EVANS, F. C., 1954: Distance to nearest neighbour as a measure of spatio relationship in populations. *Ecology*, 35, p. 445–453.
- DELIOCOURT, F., 1898: De l'amenagement des Sapiniers. *Bul. Soc. For. Franche-Compte' et Belfort* 396–409.
- DIXON, P. M., WEINER, J., MITCHELL-OLDS, T., WOODLEY, R., 1987: Bootstrapping the Gini Coefficient of Inequality, *Ecology* 68, p. 1548–1551.
- EISSENSTAT, D. M., WELLS, C. E., YANAI, R. D., WHITBECK, J. L., 2000: Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist* 147: 33–42.
- FÖLDNER, K., 1995: Strukturbeschreibung von Buchen-Edellaubholz-Mischwäldern, Dissertation Forstliche Fakultät Göttingen, Cuvillier Verlag, Göttingen, 146 p.
- GADOW, K., 1999: Waldstruktur und Diversität. *AFJZ*, 170, 7, s. 117–121.
- GALE, M. R., GRIGAL D. F., 1987: Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Canadian journal of forest research* 17: 829–834.
- GLENN-LEWIN, D. C. AND VAN DER MAAREL, E. 1992: Patterns and processes of vegetation dynamics. / In: Glenn-Lewin, D. C., Peet, R. and Veblen, T. (eds), Plant succession. Chapman and Hall, pp. 11–59.
- GÖBL, F., 1995: Mykorrhiza- und Feinwurzeluntersuchungen in einem Wald- und Weidegebiet. *FBVA Berichte* 87: 201–213.
- GRATZER, G., CANHAM, C., DIECKMANN, U., FISCHER, A., IWASA, Y., LAW, R., LEXER, M. J., SANDMANN, H., SPIES, T. A., SPLECHTNA, B. E., SZWAGRZYK, J. 2004: Spatio-temporal development of forests -/ current trends in field methods and models. / *Oikos* 107: 3–15.
- HENDRICK, R. L., PREGITZER, K. S., 1993: The dynamics of fine root length, biomass, and nitrogen content in two northern hardwood ecosystems. *Canadian Journal of Forest Research* 23: 2507–2520.
- HERTEL, D., LEUSCHNER, Ch., 2006: The in situ root chamber: A novel tool for the experimental analysis of root competition i forest soils. *Pedobiologia* 50: 217–224.
- HOFGAARD, A., 1993: Structure and regeneration patterns in a virgin *Picea abies* forest in northern Sweden. *Journal of Vegetation Science* 4, p. 601–608.
- JACKSON, R. B., CANADELL, J., EHLERINGER, J. R., MOONEY, H. A., SALA, O. E., SCHULZE, E. D., 1996: A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia* 108: 389–411.

- JAHNE, S., DOHRENBUSCH, A., 1997: Ein Verfahren zur Beurteilung der Bestandesdiversität. Forstw. Centralblatt, 116, p. 333–345.
- KOCHIAN, L. V., PINEROS, M. A., HOEKENGA, O. A., 2005: The physiology, genetics and molecular biology of plant aluminium resistance and toxicity. *Plant and soil* 274: 175–195.
- KORF, V. 1939: Příspěvek k matematické definici vzrůstového zákona hmot lesních porostů. Lesnická práce, 18, s. 339–379.
- KORPEL, Š., 1989: Pralesy Slovenska. Bratislava : Veda, SAV. 332 s.
- LEIBUNDGUT, H., 1959: Über Zweck und Methodik der Struktur- und Zuwachsanalyse von Urwäldern. – Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 110: 111–124.
- MEIER, I. C., LEUSCHNER Ch., 2008: Belowground drought response of European beech: fine root biomass and carbon partitioning in 14 mature stands across a precipitation gradient. *Global change biology* 14: 2081–2095.
- MEINEN, C., HERTEL, D., LEUSCHNER, CH., 2009: Biomass and morphology of fine roots in temperate broad-leaved forests differing in tree species diversity: is there evidence of below-ground overyielding?. *Oecologia* 161:99–111.
- MERGANIČ, J., 2001: Regionálna inventarizácia lesa s dôrazom na kvantifikáciu biodiverzity. Dizertačná práca, TU Zvolen, 176 p.
- MUELLER-DOMBOIS, D., 1987: Natural dieback in forests. *BioSci.* 37(8), 575±583.
- MURACH, D., 1984 Die Reaktion der Feinwurzeln von Fichten auf zunehmende Bodenversauerung. Göttinger Bodenkundliche Berichte 77, 127 s.
- NADELHOFFER, K. J., 2000: The Potential Effects of Nitrogen Deposition on Fine-Root Production in Forest Ecosystems. *New Phytologist* 147: 131–139.
- NORBY, R. J., JACKSON, R. B., 2000: Root dynamics and global change: seeking an ecosystem perspective. *New Phytologist* 147: 3–12.
- OLDEMANN, R.A.A., 1990: Forests: Elements of Silvology. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. pp. 624.
- PEET, R.K., CHRISTENSEN, N.L., 1987: Competition and tree death. *BioSci.* 37(8), 586±595.
- PIELOU, E.C., 1977: Mathematical Ecology. New York, Wiley, 385 p.
- PRETZIGER, K.S., 2002: Fine roots of trees – a new perspective. *New Phytologist* 154: 267–270.
- PRETZSCH, H., 1998: Struktural diversity as a result of silvicultural operations. *Lestnictví-Forestry*, 44, 10, p. 429–439.
- RADEMACHER, P., ULRICH, B., MICHAELIS, W., 1992: Bilanzierung der Elementvorräte und Elementflüsse innerhalb der Ökosystemkompartimente Krone, Stamm Wurzel und Boden eines belasteten Fichtenbestandes am Standort „Postturm“. In: Luftverunreinigungen und Waldschäden am Standort „Postturm“, Forstamt Farchau/Ratzeburg. 149–187.
- REMMERT, H., 1991: The mosaic-cycle concept of ecosystems an overview. In: Remmert, H. (Ed.), The Mosaic-Cycle Concept of Ecosystems. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg; Ecological Studies 85, pp. 1±21.
- RICHTER, A. K., WALTHERT, L., FROSSARD, E., BRUNNER, I., 2007: Does low base saturation affect fine root properties of European beech (*Fagus sylvatica* L.)? *Plant and soil* 298: 69–79.
- RUF, M., BRUNNER, I., 2003: Vitality of tree fine roots: reevaluation of the tetrazolium test. *Tree physiology* 23(4): 257–63.
- RUNKLE, J.: Guidelines and Sample Protocol for Sampling Forest Gaps, General Technical Report, 1992, 31 s.
- ŠÁLY, R., 1988: Pedológia a mikrobiológia. VŠLD Zvolen, 39–103
- ŠMELKO, Š. 2000: Dendrometria, Vysokoškolská učebnica, TU Zvolen, 399 s.
- VEBLEN, T.T., 1992: Regeneration dynamics. In: Glenn-Lewin, D.C., Peet, R.K., Veblen, T.T. (Eds.), Plant Succession, Theory and Prediction. Chapman and Hall. pp. 152±187.
- VORČÁK, J., 2005: Štrukturálna diverzita vybraných horských lesov Oravských Beskyd a Západných Tatier vo väzbe na ich ekologickú stabilitu. Dizertačná práca, Zvolen- Tvrdošín, 135 p.
- WATT, A.S., 1925: On the ecology of British beechwoods with special reference to their regeneration. Part II, sections II and III: The development and structure of beech communities on the Sussex Downs (continued). *J. Ecol.* 13, p. 27–73.
- WATT, A.S., 1947: Pattern and process in the plant community. *J. Ecol.* 35: 1–22.
- WECK, H., 1956: Entwicklungsstufen und Gefügetypen von Baumbeständen. Forstwiss. Centralblatt ½, p. 108–114.

- WENK, R. C., BATTLES, J. J., JACKSON R. J., BARTOLOME, J. W., ALLEN-DIAZ, B., 2006: An accurate and efficient method for sorting biomass extracted from soil cores using point-intercept sampling. *Soil Science Society of America Journal* 70: 851–855.
- WESTPHAL, CH., TREMER, N., VON OHEIMB, G. , HANSEN, J., VON GADOW, K., HÄRDLE, W., 2006: Is the reverse J-shaped diameter distribution universally applicable in European virgin beech forests? *Forest Ecology and Management* 223 p. 75–83.
- ZENNER, E. K., 1999: Eine neue Methode zur Untersuchung der Dreidimensionalität in Waldbeständen. Universität Freiburg, 11 p.
- ZENNER, E. K., 1999: Eine neue Methode zur Untersuchung der Dreidimensionalität in Waldbeständen. Universität Freiburg, 11 p.
- ZHOU, Z., SHANGGUAN, Z., 2007: Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China. *Plant Soil* 291: 119–129.
-

Adresa autora:

Prof. Ing. Milan Saniga, DrSc.

Katedra pestovania lesa

TU Zvolen

Masarykova 24

960 53 Zvolen

Slovenská republika

e-mail: saniga@vsld.tuzvo.sk

Výskum štruktúry, produkcie, nekromasy, rizológie a regeneračných procesov prírodných lesov Slovenska

Abstrakt

Príspevok pojednáva o metodológii a metodike výskumu vybraných častí štruktúry, textúry, regeneračných procesov a rizológie pralesov Slovenska. Metodika analýzy, merania a vyhodnotenia vybraných biometrických znakov a veličín predstavuje vrcholovú úroveň výskumu pralesov v Európe. Použitie Field-Map a ďalších meracích prístrojov umožní posun poznatkov v oblasti štúdia porastových medzier. Presnejšiu kvantifikáciu vývojových štádií pralesa a matematický popis štruktúrálnej diverzity umožní použitie vybraných druhov indexových metód. Prezentované postupy odberu , spracovania a vyhodnotenia jemných koreňov významne posunú poznatky v oblasti rizológie v skúmaných pralesoch.

Kľúčové slova: prales, textúra, štruktúra, metodika výskumu, rizológia

HODNOTENIE GENETICKEJ VARIABILITY ENDEMICKÝCH DRUHOV RODU *SORBUS*

Dušan G Ö M Ö R Y – Ladislav P A U L E – Jaroslav Ď U R K O V I Ć
– Veronika K U Ć E R O V Á

Gömöry, D., Paule, L., Ďurkovič, J., Kučerová, V.: Diversity of trees and ground-layer vegetation. II. Assessment of the genetic variation of endemic *Sorbus* taxa. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 89–97, 2009.

Formation of the genetic differentiation is the principle mechanism of speciation. The common metaphor of the evolutionary process, namely phylogenetic tree, does not conform to reality in many cases, as reticulations among already diverged taxa frequently occur. One of the mechanisms of reticulation is represented by allopolyploid hybridization. The genus *Sorbus* may be a good example of allopolyploidy, several hybridogenous *Sorbus* taxa were described. The study will focus on hybrid taxa among *S. chamaemespilus*, *S. aria* and *S. aucuparia*, which occur naturally in subalpine communities of Slovakia. In addition to the methods of classical taxonomy, morphometry and the study on the variation of wood elements and wood structure will be performed. The determination of the origin of hybridogenous taxa and mechanisms of their formation will be based on gene markers. We suggested a combination of maternally inherited chloroplast markers (cpPCR-RFLP and cpVNTR) for the identification of the maternal taxon completed by biparentally inherited nuclear AFLP markers for the determination of the participating paternal taxon or taxa. The possibilities of the use of individual methods for the study of allopolyploid hybridization in *Sorbus* are discussed.

Key words: *Sorbus* sp., hybridization, allopolyploidy, endemic taxa

1. ÚVOD

Genetická diferenciácia je základným predpokladom speciácie, vzniku nových taxónov. Základ druhovej diverzity spočíva v charaktere genetickej premenlivosti a mechanizmoch, ktoré ju ovládajú. Evolúcia druhov bola dlho prezentovaná ako proces vetvenia alebo odštepovania nových taxónov. Retikulátne, sieťovité vzťahy medzi taxónmi však boli popísané v celom rade situácií. V rastlinnej ríši je najdôležitejším mechanizmom ich vzniku hybridizácia a introgresia. Až 25 % rastlinných druhov sa podieľa na medzidruhovej hybridizácii (MALLET 2005). Hybridizácia a introgresia sú teda skôr pravidlom než výnimkou v rastlinnej ríši, najmä u krytosemenných rastlín a výskyt hybridov sa ani zďaleka neobmedzuje len na špecifické stanovišťa (ARNOLD 2006, CRONN a WENDEL 2004, RIESEBERG a CARNEY 1998).

V prípade alopolyploidie je hybridizácia spojená so zväčšením genómu. Polyploidizácia je veľmi častým mechanizmom diverzifikácie a speciace rastlín (RIESEBERG 1997). Aj keď mnohé z alopolyploidných druhov sú apomiktické, neplatí to všeobecne, takže v niektorých rodoch vznikajú komplikované hybridné komplexy.

Aloploidia ako mechanizmus speciace sa vo veľkom rozsahu uplatňuje v rode *Sorbus*, v ktorom sú niektoré taxóny dokonca považované za produkty kríženia troch či viacerých druhov (BERNÁTOVÁ a MÁJOVSKÝ 2003, NELSON-JONES *et al.* 2002). Rod *Sorbus* obsahuje 5 diploidných druhov, zaradovaných k rôznym podrodod: *Sorbus aria*, *Sorbus aucuparia*, *Sorbus torminalis*, *Sorbus chamaemespilus* a *Sorbus domestica*. Podrod *Aria* zahŕňa okrem nominátneho diploidného druhu *S. aria sensu stricto* aj celý rad triploidných a tetraploidných taxónov. Ich status je sporný, často sú označované ako samostatné druhy, ale väčšinou sú považované za súčasť agregátneho druhu *S. aria sensu lato*. Triploidy boli identifikované aj u ďalších podrodov (LILJEFORS 1955). Okrem týchto základných druhov existuje celý rad morfologicky prechodných taxónov (je sporné, nakoľko možno hovoriť o samostatných druhoch), u ktorých sa predpokladá hybridogénny pôvod. „Motorom“ medzidruhovej hybridizácie je agregát *S. aria s.l.* Zúčastňuje sa na nej aj jeden alebo niekoľko ďalších základných druhov (AAS *et al.* 1994, STACE 1997). Nápadné sú taxóny s účasťou jarabiny mišpulky (*S. chamaemespilus*), ktorá je jediným druhom jarabín s ružovými kvetmi. Ružové zafarbenie sa v tej či onej forme (celoplošné zafarbenie okvetných lístkov, ružový okraj a pod.) objavuje u každého hybridného taxónu tejto skupiny (BERNÁTOVÁ a MÁJOVSKÝ 2003). Všeobecne sa predpokladá, že ide o polyploidné taxóny, avšak v rode *Sorbus* existujú aj homoploidné hybridy, napr. *S. thuringiaca* či *S. vagensis* (NELSON-JONES *et al.* 2002). Rovnako paušálny je predpoklad, že tieto hybridy sa množia sčasti alebo úplne apomikticky (JANKUN 1993). Naša predbežná štúdia hybridov na lokalite NPR Skalná alpa však naznačuje opak: jadrové mikrosatelitné markéry vykazovali variabilitu práve v hybridných taxónoch (aj keď priestorová genetická štruktúra svedčí o veľkom rozsahu klonálneho šírenia), naopak, u jedincov *S. chamaemespilus* boli úplne monomorfne (GÖMÖRY a KRAJMEROVÁ 2008).

Retikulátna evolúcia sa neobmedzuje len na medzidruhovú úroveň, evolúcia v rámci druhu takisto zahŕňa výmenu genetického materiálu medzi odlišnými jedincami a populáciami. Častou príčinou tejto odlišnosti je pôvod z rozdielnych glaciálnych refúgií. Pozdĺž línii stretu migračných prúdov sa vytvárajú hybridné zóny, ktorých šírka závisí od mechanizmov toku génov (HEWITT 2001).

Pre získavanie lesného reprodukčného materiálu a definovanie vhodných opatrení pre zachovanie genetických zdrojov najmä *in situ* je teda nevyhnutné poznať rozsah a smer vnášania cudzích génov do genofondu populácie. Iným spoločensky významným aspektom je ochrana prírody. Často bol ako druh popísaný jediný aloploidný genotyp množiaci sa apomikticky. Vzhľadom na obmedzený výskyt potom takéto taxóny podliehajú druhovej ochrane, ktorá v tomto prípade nie je zmysluplná. Objasnenie mechanizmov hybridnej speciace a udržiavania druhov môže byť významným podkladom pre vypracovanie efektívnych postupov ochrany.

Aktivita „Biodiverzita drevín a bylinnej synúzie“ v rámci projektu Adaptívne lesné ekosystémy sa z hľadiska hodnotenia genetickej variability endemických taxónov

a objasňovania mechanizmov ich vzniku zameriava na proces aloploidnej hybridizácie komplexu vysokohorských druhov jarabín. Cieľom projektu v tejto oblasti je upresnenie taxonomickej klasifikácie slovenských resp. stredoeurópskych hybridogénnych taxónov rodu *Sorbus*. Štúdium ich morfolologickej a fyziologickej premenlivosti, veľkosti a usporiadania ich genómu, ich genetickej variability, jej priestorového rozdelenia a reprodukčnej biológie má prispieť k objasneniu ich fylogeniezy, predovšetkým k odpovedi na otázky, či ide o monofyletické alebo polyfyletické taxóny a aká je úloha apomixie v ich rozmnožovaní, a tým k položeniu racionálnych základov pre taxonomickú klasifikáciu. Prínosom bude okrem spresnenia morfologického popisu hybridných taxónov aj ich štruktúrna charakteristika (štruktúra sekundárneho xylému, obsahové zastúpenie hlavných drevných komponentov) a zhodnotenie základných fyziologických parametrov. Výsledky by mali prispieť k objasneniu mechanizmov umožňujúcich vznik hybridných taxónov, ich prežívanie a udržanie ich taxonomickej identity.

2. MATERIÁL A METODIKA

Aktivita 3.1 sa zameriava na tzv. ružovokveté hybridné taxóny v rode *Sorbus*, t.j. taxóny, v ktorých jedným z rodičovských partnerov je jarabina mišpuľka (*S. chamaemespilus*). Podobne ako mišpuľka, aj u hybridných taxónov sa jedná o subalpínske druhy s centrom rozšírenia v 8. l.v.s. Na Slovensku je ich výskyt koncentrovaný do vrcholových polôh vysokých pohorí stredného Slovenska (Veľká Fatra, Krivánska Malá Fatra, západná časť Nízkyh Tatier).

Popísaných bolo celkovo 9 hybridných taxónov tejto skupiny. Na základe morfológie sa u niektorých predpokladá pôvod z jednoduchšej hybridizácie medzi *S. aria* a *S. chamaemespilus*, u iných sa predpokladá aj prímes génov *S. aucuparia* (Tab. 1; cf. BER-NÁTOVÁ a MÁJOVSKÝ 2003).

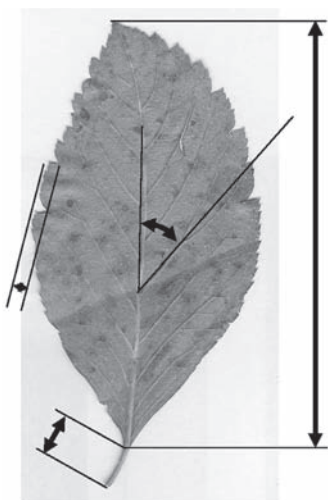
Tab. 1 Prehľad ružovokvetých hybridogénnych taxónov rodu *Sorbus*

Tab. 1 List of rosy-flowered hybridogenous taxons of the genus *Sorbus*

Taxón	Rodičovské druhy		
	<i>S. chamaemespilus</i>	<i>S. aria</i>	<i>S. aucuparia</i>
<i>S. zuzanae</i>	X	X	
<i>S. haljamovae</i>	X	X	
<i>S. montisalpae</i>	X	X	X
<i>S. atrimontis</i>	X	X	X
<i>S. salatini</i>	X	X	X
<i>S. margittaitana</i>	X	X	X
<i>S. caeruleomontana</i>	X	X	X
<i>S. sudetica</i>	X	X	
<i>S. diversicolor</i>	X	X	X

Ako modelové lokality boli vybrané NPR Skalná alpa a NPR Suchý. NPR Skalná alpa v NP Veľká Fatra má výmeru 524 ha a zahŕňa spoločenstvá 3 lesných vegetačných stupňov s výškovým rozpätím 940–1 463 m n. m. Podloží sú triasové dolomity. Spoločenstvá vo vrcholovej časti patria k asociácii *Adenostylo-Pinetum mughii* a sú tvorené nízkymi porastami kosodreviny s prímесou jarabiny vtáčeј a roztrúsenými jedincami smreka. Okrem *S. aucuparia*, tu bolo identifikovaných 6 ďalších taxónov jarabín: *S. chamaespilus*, *S. aria*, *S. zuzanae*, *S. haljamovae*, *S. montisalpaе* a *S. atrimontis* (BERNÁTOVÁ a MÁJOVSKÝ 2003). NPR Suchý sa nachádza na juhozápadnom výbežku NP Malá Fatra na rozlohe 429 ha. Zasahuje od 5. po 8. l.v.s. na rozmanitých podložiach, vrcholová časť je opäť tvorená dolomitmi a pokrytá porastami kosodreviny s prímесou jarabiny vtáčeј a viacerých druhov vŕb. *S. aria* sa priamo vo vrcholovej časti nenachádza, ale možno ju nájsť v blízkosti hornej hranice lesa. V porastoch kosodreviny má pomerne bohaté zastúpenie *S. margittiana* a je možné nájsť aj niekoľko jedincov *S. chamaespilus*.

Projekt stavia čiastočne na predchádzajúcich aktivitách. V oboch NPR boli zozbierané vzorky ako materských druhov, tak aj predpokladaných hybridogénnych taxónov, a archivované v herbároch.



Obr. 1 Príklady meraných charakteristík pre morfometrickú štúdiu

Fig. 1 Examples of characteristics measured for morfometric study

Herbárové položky budú použité pre morfometrické analýzy. Z každého jedinca bude vybraný štandardný list (brachyblast, 3. list od apexu), oskenovaný, a pomocou softwaru tpsDIG v. 2 (ROHLF 2004) budú zmerané morfometrické údaje (obr. 1). Okrem základných rozmerových premenných budú prostredníctvom svetelnej mikroskopie posudzované aj charakteristiky povrchu listov (hustota a veľkosť trichómov) a štruktúry listov (hrúbky mezofylu a palisádového parenchýmu). Pre analýzu bude použitá kanonická diskriminačná analýza (proc CANDISC, SAS 1988). Z hľadiska fotosynthetickej výkonnosti v konštantných podmienkach koncentrácie CO₂, teploty a relatívnej vzdušnej vlhkosti sa *in situ* porovnajú parametre výmeny plynov (rýchlosť asimilácie CO₂, transpirácia, stomatálna konduktancia) a fluorescencie chlorofylu *a* (fotochemická účinnosť F_v/F_m , potenciálna elektrónová kapacita a fotosyntetická kapacita F_v/F_0).

Projekt počíta na menšom počte vzoriek s komparatívnou analýzou štruktúry dreva. Prostredníctvom skenovaceј elektrónovej mikroskopie a svetelnej mikroskopie sa naša pozornosť zameria na sledovanie veľkosti lumenov ciev, typy perforácie ciev a frekvencie zastúpenia ciev v sekundárnom xyléme dospelých jedincov. Z hľadiska zastúpenia hlavných drevných komponentov sa stanoví percentuálny podiel celulózy, hemicelulózy, lignínu a extraktívnych látok. Pomocou géloveј permeačnej chromatografie sa určí priemerný polymerizačný stupeň celulózy medzi sledovanými ta-

xónmi a nitrobenzénovou oxidáciou sa stanoví zastúpenie monomérnych podjednotiek v makromolekule lignínu (pomer medzi syringylovými a guajacylovými štruktúrami).

Pre analýzu genetických markérov bola z herbárových vzoriek izolovaná celková genomická DNA. Z listov boli vystrihnuté dva krúžky s priemerom cca 8 mm a rozomleté vo vibračnom mlyne (Retsch) na jemný prášok. DNA bola extrahovaná štandardnou metódou CTAB podľa DOYLA a DOYLA (1987) modifikovanou pre menšie množstvo materiálu. Do použitia pre analýzy je uskladnená pri -80°C .

Pre identifikáciu rodičovských taxónov a smeru hybridizácie bude použitá kombinácia maternálne a biparentálne dedených markérov. Ako maternálne budú použité chloroplastové PCR-RFLP markéry metodikou podľa RASPÉ *et al.* (2000) a minisatelitný (VNTR) markér podľa KINGA a FERRISA (2002). Ako biparentálne dedené markéry budú použité AFLP markéry, analyzované štandardnou metodikou podľa Vos *et al.* (1995) a protokolu Applied Biosystems (Applied Biosystems 2005) s miernymi úpravami (MEREĎA *et al.* 2008).

3. DISKUSIA

Aplikácia molekulárnych metód v taxonómii (predovšetkým od čias, keď ju PCR technológia umožnila v masovom meradle) priniesla množstvo nových poznatkov o úlohe hybridizácie a rekurentnom vzniku predovšetkým u pohlavne sa rozmnožujúcich homoploidných hybridogénnych taxónov (LEITCH a BENNETT 2004, RIESEBERG a CARNEY 1998). Podstatne menej je však známe o evolúcii aloploidných taxonomických komplexov, najmä preto, že vznikajúce taxóny sú často agamické alebo sa rozmnožujú iným nepohlavným spôsobom (NELSON-JONES *et al.* 2002). Dreviny, napriek niektorým vlastnostiam sťažujúcim ich použitie pre genetický výskum, môžu byť v tomto smere dobrým modelom.

Zásadnou otázkou je výber vhodných genetických markérov, ktorý závisí od účelu, pre ktorý majú byť použité (GILLET 1999). Maternálne dedené markéry umožňujú pri štúdiu hybridizácie identifikáciu materského druhu resp. materského jedinca. Možnou komplikáciou tohto prístupu je introgresia, teda spätné kríženie hybridov F_1 s rodičovským druhom a tým postupné zavádzanie génov jedného druhu do genofondu druhého, a štiepenie znakov v následných generáciách (RIESEBERG a CARNEY 1998). V populácii sa po niekoľkých generáciách môžu nájsť jedinci, vykazujúci fenotyp jedného druhu a súčasne chloroplastový genóm druhého. Introgresia za normálnych okolností vedie k vytváraniu hybridných rojov, teda populácií s kontinuálnou fenotypovou premenlivosťou zahŕňajúcou všetky stupne fenotypových prechodov medzi rodičovskými druhmi. Asymetrická hybridizácia, teda preferenčné kríženie v jednom smere, v spojení s ekologickou diferenciáciou rodičovských taxónov, však môže viesť k vzniku celých populácií, v ktorých chloroplastový genóm vykazuje taxonomickú príslušnosť odlišnú od jadrového genómu (BACILIERI *et al.* 1996). Pri vysokohorských jarabinách sme síce žiadne explicitné informácie o existencii introgresie a jej rozsahu nezaregistrovali, ovšem túto hypotézu nie je možné *a priori* vylúčiť. Komplikované pomery ploidie a predpokladaná existencia taxónov, v ktorých sa stretávajú genómy viac ako dvoch druhov, naznačujú, že F_1 hybridy môžu

byť plodné a ak sú schopné kríženia s tretím taxónom, nie je možné vylúčiť ani spätné kríženie. Vzhľadom na doterajšie poznatky o genotypovej štruktúre hybridogénnych taxónov (GÖMÖRY a KRAJMEROVÁ 2008) však nepredpokladáme masový rozsah spätných krížení. Niektoré z hybridných taxónov vykazujú istú mieru vnútrodruhovej genetickej variability (*S. haljamovae*, t.j. jednoduchý hybrid *S. aria* × *S. chamaespilus*), ale masové opakovanie rovnakých genotypov svedčí o veľkom rozsahu apomixie. Hypoteticky možno existenciu tohto typu premenlivosti vysvetliť buď prevládajúcou, ale nie úplnou agamospermiou (v tomto prípade majú hybridogénne taxóny monofyletický pôvod a pokiaľ sa jedná o relatívne recentný vznik, čo je v prípade jarabín vysoko pravdepodobné, mali by vykazovať rovnaký chloroplastový genóm), alebo opakovaným vznikom fenotypovo rovnakých F₁ hybridov z viacerých krížení s následnou apomixiou (z čoho vyplýva polyfyletický pôvod hybridogénnych taxónov a potenciálne rozdiely v chloroplastovom genóme medzi klonmi). Analýza chloroplastových markérov by mala umožniť rozhodnúť medzi oboma hypotézami. Pochopiteľne, výsledok závisí od dostatočnej miery polymorfizmu. Preto pripadla voľba na vysoko variabilný minisatelitný markér podľa KINGA a FERRISA (2002). Markéry použité v štúdií RASPÉ *et al.* (2000) sú odvodené zo sady univerzálnych chloroplastových markérov vyvinutých DEMESURE *et al.* (1995). Vhodná kombinácia primerov a restriktčných endonukleáz by mala odhaliť variabilitu v príslušných úsekoch chloroplastovej DNA, pokiaľ existuje. Porovnanie chloroplastových génov hybridogénnych taxónov a lokálnej populácie rodičovských taxónov by mohlo vnieť svetlo do otázky, či sa v prípade hybridov jedná o recentný produkt lokálneho kríženia (čo sa nedá vylúčiť najmä v prípade úzko endemických taxónov s jedinou lokalitou výskytu, napr. *S. salatini*), alebo o starší, stabilizovaný taxón, ktorý sa na jednotlivé stanovištia rozšíril migráciou.

Chloroplastové markéry umožňujú identifikovať len základný materský taxón. Určenie ďalšieho rodičovského taxónu (prípadne taxónov) si vyžaduje použitie jadrových markérov. Štandardným nástrojom molekulárno-taxonómických štúdií je sekvenovanie spacerov v géne kódujúcom malú podjednotku ribozómu (ITS). Hoci tento markér sa ukázal byť veľmi efektívny pri diploidných druhoch, máme obavu z jeho použitia a interpretácie sekvencií v taxónoch, ktoré sú predpokladanými hexaploidmi. Z tohto dôvodu sme za najrozumnejšiu voľbu pokladali AFLP markéry. Ich jednoznačnou nevýhodou je dominancia, aj keď niektorí autori uvádzajú, že intenzita signálu z jednotlivých fragmentov môže byť interpretovaná ako miera homo- či heterozygotnosti (VAN ECK *et al.* 1995). Na druhej strane, reprezentujú náhodný a pomerne rozsiahly výber z celého genómu a vykazujú pomerne vysokú variabilitu, čo môže byť pre naše účely vhodné (VENDRAMIN a HANSON 2005). Ostatne, AFLP markéry sa v posledných rokoch priradili k najčastejšie používaným typom markérov pre taxonomické a biogeografické štúdie (KARDOLUS *et al.* 1998).

Pochopiteľne, molekulárna štúdia v taxonómii musí byť prepojená s morfológickou determináciou prípadne morfometrickou štúdiou. Morfometrii je občas vytýkaná tautologickosť – rovnaké znaky sú použité ako pre určenie druhov, tak aj pre ich následnú diskrimináciu. Aj toto je motivácia pre zaradenie štruktúrnych znakov dreva do projektu. Predchádzajúce práce potvrdili mimoriadnu užitočnosť anatómie dreva pre taxonomické a fylogenetické štúdie (LENS *et al.* 2004, SCHWEINGRUBER 2006, MARTINEZ-CABRERA *et al.*

2008, ESTEBAN *et al.* 2009) alebo pri identifikácii evolučných trendov v štruktúre sekundárneho xylému (LENS *et al.* 2007, 2008).

Okrem prínosu v oblasti základného poznania je spoločensky významným aspektom tejto časti projektu ochrana prírody. Často bol ako druh popísaný jediný aloploidný genotyp množiaci sa apomikticky. Vzhľadom na obmedzený výskyt potom takéto taxóny podliehajú druhovej ochrane, ktorá v tomto prípade nie je zmysluplná, najmä ak sa jedná o rekurentne vznikajúce hybridy. Objasnenie mechanizmov hybridnej špeciácie a udržiavania druhov môže byť významným podkladom pre vypracovanie efektívnych postupov ochrany endemických taxónov.

Pod'akovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- AAS, G., MAIER, J., BALTISBERGER, M., MERZGER, S., 1994: Morphology, isozyme variation, cytology, and reproduction of hybrids between *Sorbus aria* (L.) Crantz and *S. torminalis* (L.) Crantz. *Botanica Helvetica* 104: 195–214.
- Applied Biosystems, 2005: AFLP Plant mapping. Protocol. Foster City, CA: PE Applied Biosystems.
- ARNOLD, M.L., 2006: Evolution through genetic exchange. Oxford University Press, Oxford.
- BACILIERI, R., DUCOUSSO, A., PETIT, R.J., KREMER, A., 1996: Mating system and asymmetric hybridization in a mixed stand of European oaks. *Evolution* 50: 900–908.
- BERNÁTOVÁ, D., MÁJOVSKÝ, J., 2003: New endemic hybridogamous species of the genus *Sorbus* in the Western Carpathians. *Biologia* 58 (4): 781–790.
- CRONN, R., WENDEL, J.F., 2004: Cryptic trysts, genomic mergers, and plant speciation. *New Phytologist* 161: 133–142.
- DEMESURE, B., SODZI, N., PETIT, R.J., 1995: A set of universal primers for amplification of polymorphic noncoding regions of mitochondrial and chloroplast DNA in plants. *Molecular Ecology* 4: 129–131.
- DOYLE, J.J., DOYLE, J.L., 1987: A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bulletin* 19: 11–15.
- ESTEBAN, L.G., DE PALACIOS P., 2009: Comparative wood anatomy in Abietoideae (Pinaceae). *Botanical Journal of the Linnean Society* 160: 184–196.
- GILLET, E.M., 1999: Purposes – Classification and desired marker characteristics. In: Gillet, E.M. (ed.), Which DNA Marker for which Purpose? Final Compendium of the Research Project Development, optimisation and validation of molecular tools for assessment of biodiversity in forest trees in the European Union DG-XII Biotechnology FW IV Research Programme. <http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/y/1999/whichmarker/index.htm>
- HEWITT, G.M., 2001: Speciation, hybrid zones and phylogeography - or seeing genes in space and time. *Molecular Ecology* 10: 537–549.
- GÖMÖRY, D., KRAJMEROVÁ, D., 2008: Spatial structure of a natural mixed topodeme of subalpine *Sorbus* taxa. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae* 77: 305–311.
- JANKUN, A., 1993: Evolutionary significance of apomixis in the genus *Sorbus* (Rosaceae). *Fragmenta Floristica et Geobotanica* 38: 627–686.
- KARDOLUS, J., VAN ECK, H.J., VAN DEN BERG, R.G., 1998: The potential of AFLPs in biosystematics: a first application in *Solanum* taxonomy (Solanaceae). *Plant Systematics and Evolution* 210: 87–103.
- KING, R.A., FERRIS, C., 2002: A variable minisatellite sequence in the chloroplast genome of *Sorbus* L. (Rosaceae: Maloideae). *Genome* 45: 570–576.

- LEITCH, I.J., BENNETT, M.D., 2004: Genome downsizing in polyploid plants. *Biological Journal of the Linnean Society* 82: 651–663.
- LENS, F., KRON, K.A., LUTEYN, J.L., SMETS, E., JANSEN, S., 2004: Comparative wood anatomy of the blueberry tribe (Vaccinieae, Ericaceae s.l.). *Annals of the Missouri Botanical Garden* 91: 566–592.
- LENS, F., BAAS, P., JANSEN, S., SMETS, E., 2007: A search for phylogenetically informative wood characters within Lecythidaceae s.l. *American Journal of Botany* 94: 483–502.
- LENS, F., ENDRESS, M.E., BAAS, P., JANSEN, S., SMETS, E., 2008: Wood anatomy of Rauvolfioideae (Apocynaceae): a search for meaningful non-DNA characters at the tribal level. *American Journal of Botany* 95: 1199–1215.
- LILJEFORS, A., 1955: Cytological studies in *Sorbus*. *Acta Horticulturae Bergiani* 17: 47–113.
- MALLET, J., 2005: Hybridization as an invasion of the genome. *Trends in Ecology and Evolution* 20: 229–237.
- MARTINEZ-CABRERA, D., TERRAZAS T., FLORES, H., OCHOTORENA, H., 2008: Morphology, anatomy, and taxonomic position of *Plocaniophyllon brandegeei* (Rubiaceae), a monospecific genus endemic to Mesoamerica. *Taxon* 57: 33–42.
- MEREĎA, P. JR., HODÁLOVÁ, I., MÁRTONFI, P., KUČERA, J., LIHOVÁ, J., 2008: Intraspecific variation in *Viola suavis* in Europe: parallel evolution of white-flowered morphotypes. *Annals of Botany* 102: 443–462.
- NELSON-JONES, E.B., BRIGGS, D., SMITH, A.G. 2002: The origin of intermediate species of the genus *Sorbus*. *Theoretical and Applied Genetics* 105: 953–963.
- RASPÉ, O., SAUMITOU-LAPRADE, P., CUGUEN, J., JACQUEMART A.-L. 2000: Chloroplast DNA haplotype variation and population differentiation in *Sorbus aucuparia* L. (Rosaceae: Maloideae). *Molecular Ecology* 9: 1113–1122.
- RIESEBERG, L.H., 1997: Hybrid origins of plant species. *Annual Review of Ecology and Systematics* 28: 359–389.
- RIESEBERG, L.H., CARNEY, S.E., 1998: Plant hybridization. *New Phytologist* 140: 599–624.
- ROHLF, F.J., 2004: tpsDig version 2. Software to digitize the coordinate locations of landmarks and to record other morphometric data. Stony Brook University. Stony Brook, NYSAS, 1988: SAS/STAT® User's Guide, Release 6.03 Edition. SAS Institute Inc., Cary NC, 1028 pp.
- SCHWEINGRUBER, F.H., 2006: Anatomical characteristics and ecological trends in the xylem and phloem of Brassicaceae and Resedaceae. *IAWA Journal* 27: 419–442.
- STACE, C.A., 1997: *New Flora of the British Isles*. Cambridge University Press, Cambridge.
- VAN ECK, H. J., ROUPPE VAN DERVOORT, J., DRAAISTRA, J., VAN ZANDVOORT, P., VAN ENCKEVORT, E., SEGERS, B., PELEMAN, J., JACOBSEN, E., HELDER, J., BAKKER, J., 1995: The inheritance and chromosomal localization of AFLP markers in a non-inbred potato offspring. *Molecular Breeding* 1: 397–410.
- VENDRAMIN, G.G., HANSON, O.K., 2005: Molecular markers for characterizing variation in forest trees. In: T. Geburek, J. Turok (eds.), *Conservation and Management of Forest Genetic Resources in Europe*. Arbora Publishers, Zvolen, p. 337–368.
- VOS, P., HOGERS BLEEKER, M., REIJANS, M., VAN DE LEE, T., HORNES, M., FRIJTERS, A., POT, J., PELEMAN, J., KUIPER, M., 1995: AFLP: a new technique for DNA fingerprinting. *Nucleic Acids Research* 23: 4407–4414.

Adresa autorov:

Dušan Gömöry

Ladislav Paule

Jaroslav Ďurkovič

Veronika Kučerová

Technická univerzita vo Zvolene

Lesnícka fakulta

T. G. Masaryka 24

960 53 Zvolen

Hodnotenie genetickej variability endemických druhov rodu *Sorbus*

Abstrakt

Genetická diferenciácia je základným mechanizmom speciácie. Bežná metafora fylogenetického procesu, teda evolučný strom, v mnohých prípadoch nezodpovedá skutočnosti, časté sú sieťovité prepojenia medzi už vyvinutými taxónmi. Jedným z mechanizmov retikulácie, teda evolučného spájania fylogenetických vetiev, je aloploidná hybridizácia. Rod *Sorbus* môže slúžiť ako dobrý model aloploidie, bol v ňom popísaných celý rad hybridogénnych taxónov. Predmetom štúdia budú hybridné druhy s účasťou *S. chamaemespilus*, *S. aria* a *S. aucuparia*, ktoré sa prirodzene vyskytujú v subalpínskych spoločenstvách Slovenska. Okrem metód klasickej taxonómie sa predpokladá použitie morfometrie a štúdia variability drevných elementov a štruktúry dreva. Základom pre určenie pôvodu hybridných taxónov a mechanizmov ich vzniku bude použitie genetických markérov. Navrhujeme využitie kombinácie maternálne dedených chloroplastových markérov (PRL-RFLP a cp SSR) na identifikáciu materského taxónu a biparentálne dedených AFLP markérov pre determináciu zúčastneného otcovského taxónu prípadne taxónov. Práca rozoberá možnosti využitia jednotlivých metód pre štúdium aloploidnej hybridizácie v rode *Sorbus*.

Kľúčové slová: *Sorbus* sp., hybridizácia, aloploidia, endemické taxóny

EMPIRICKÝ MODEL TRANSPIRÁCIE BUKA LESNÉHO V RASTOVOM SIMULÁTORE SIBYLA

Marek F A B R I K A – Katarína S T Ř E L C O V Á – Dagmar M A G O V Á

Fabrika, M., Střelcová, K., Magová, D.: Empirical model for transpiration of European beech in tree growth simulator. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 99–112, 2009.

Nowadays, tree growth simulators are preferred in forest modeling. The models are able to predict forest development regarding wide range of input parameters (SILVA, BWIN, MOSES, PROGNAUS, SIBYLA). Climate data are usually one of them and they allow estimate impact of climate change to forest growth and production. Recently climate change is evident by planet warming and drying. Greenhouse gasses and their reduction by wood sequestration are modeled nowadays, but questions of water outgo by tree transpiration models are not well investigated till now. The paper presents methodology of the transpiration model and its software implementation. The model is based on tree growth simulator SIBYLA developed on Technical University Zvolen. The growth simulator was already successfully applied for impact of climate change to Slovak forest development. The transpiration model is based on measurements of tree transpiration flow on permanent research plots in Slovakia with detailed measurements of tree parameters (regarding tree co-ordinates and crown parameters) and climate parameters. The model is statistically oriented. The model estimates amount of transpired water by tree crown surface, mean daily temperature in vegetation season, number days of vegetation season, and number of rainy days during vegetation season. Climatic scenarios and SIBYLA growth prognosis produce amount of transpired water at forest stand level.

The paper provides examples of model usage. Stand models in different vegetation zones and elevation levels are used for mentioned purposes. Changing management concepts are applied and impact on forest transpiration is discussed.

Key words: global and regional climate change, forest modeling, transpiration, European beech, growth simulators

1. ÚVOD A PROBLEMATIKA

Transpirácia predstavuje v klimatických podmienkach Európy približne polovicu z celkového ročného úhrnu zrážok (DENMEAD & SHAW 1962). Podiel transpirácie na celkovej vodnej bilancii povodia alebo lesného porastu je predovšetkým závislý od: (1) klimatických podmienok územia, teda: množstvo a rozdelenie zrážok, obsahu pôdnej vlhkosti a evaporačných podmienok atmosféry, (2) vegetačného krytu a jeho vlastností, pretože transpirácia je určovaná nielen fyzikálnymi zákonmi, ale aj anatomickými, morfológickými a fyziologickými vlastnosťami rastlín (STŘELCOVÁ *et al* 2004). Množstvo vyparenej vody z lesného porastu je predovšetkým určované druhom, vekom, štruktúrou

zloženia a zdravotným stavom porastov a vzájomným vzťahom medzi porastom a prostredím. Energetická spotreba na transpiráciu predstavuje významný podiel na energetickej bilancii Zeme. Regulácia transpirácie pomocou prieduchov zohráva dôležitú úlohu v procesoch výmeny hmoty a energie medzi vegetáciou a atmosférou. Pôdne sucho môže predstavovať faktor, ktorý významne ovplyvňuje transpiračný prúd a teda aj podiel energie na energetickej bilancii vyparujúcich sa povrchov (LAGERGREN & LINDROTH 2002). Množstvo vytranspirovanej vody určuje vlastnosti hraničnej vrstvy atmosféry (WILSON & BALDOCCHI 2000) a jeho znižovanie vodným stresom môže mať významný vplyv na klímu (SHUKLA & MINTZ, 1982). Z tohto dôvodu sa výskum transpirácie stáva dôležitým zvlášť v poslednom desaťročí, keď sa zvyšuje frekvencia fenoménu extrémneho počasia (KARL *et al.* 1995, ČERMÁK *et al.* 2004, STŘELCOVÁ *et al.* 2009).

Získanie údajov o transpirácii a evapotranspirácii lesných porastov si vyžaduje špeciálne metodologické, experimentálne a modelové postupy. Výber vhodných metód má rozhodujúcu úlohu aj kvôli veľkému množstvu vnútorných a vonkajších faktorov, ktoré ovplyvňujú transpiráciu. Pre stanovenie transpirácie lesných porastov bolo vyvinutých niekoľko metodologických postupov. Hodnotenie množstva transpirovanej vody môže byť chápané na rôznych úrovniach z hľadiska stromov, lesných porastov, povodí, či regiónov. Výskumy úrovne stromov (napr. LAGERGREN & LIDROTH 2002, STŘELCOVÁ *et al.* 2004, ČERMÁK *et al.* 2007) poskytujú odpoveď na väčšinu nelineárnych fyziologických procesov, a preto sa viac používajú pre empirické modelovanie. Takéto výskumy môžu byť použité pre modelovanie tokov niektorých lesných porastov a plôch. Extrapolácia zo skupiny jednotlivých stromov na celý porast by mala byť vykonávaná s ohľadom na existujúce prirodzené odchýlky medzi stromami pod vplyvom rôznych environmentálnych faktorov. Pre tento účel je vhodné použitie biometrických parametrov získaných z jednotlivých stromov a porastových úrovní (ČERMÁK *et al.* 2004). Rastové modely predstavujú do budúcnosti ďalšiu možnosť modelovania procesov na úrovni lesných porastov. Modelovanie rastových a fyziologických procesov drevín a lesných porastov sa v súčasnosti dostáva do popredia lesníckeho a ekofyziologického výskumu. Jednou z možností je modelovanie pomocou rastových simulátorov. Tieto modely umožňujú predpovedať vývoj lesa týkajúci sa širokého rozsahu vstupných parametrov (SILVA, BWIN, MOSES, PROGNAUS, SIBYLA), napr. klimatických parametrov, ktoré umožňujú odhadnúť vplyv klimatických zmien na rast stromov a produkciu (PRETZSCH 1992, NAGEL 1996, HASENAUER 1994, STERBA 1995, FABRIKA 2005). Posledné desaťročie môžeme z hľadiska klimatických zmien hodnotiť ako veľmi teplé a suché. Veľká pozornosť sa v modelovaní zameriava na znižovanie skleníkových plynov pomocou prirodzeného viazania do biomasy, ale otázky výdaja vody cez transpiráciu stromov neboli doteraz veľmi preskúmané.

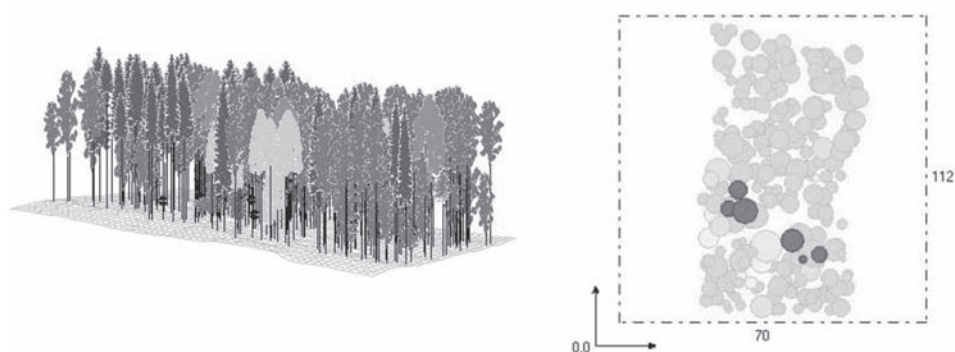
Cieľom tohto príspevku je predstaviť metodiku modelovania transpirácie lesných drevín a prezentovať príklad jej softvérového riešenia. Model je založený na rastovom simulátore SIBYLA, ktorý bol vyvinutý na Technickej Univerzite vo Zvolene (FABRIKA 2005). Tento rastový simulátor bol doteraz úspešne používaný na modelovanie vplyvov klimatických zmien na vývoj lesných ekosystémov na Slovensku. Model transpirácie spracováva namerané údaje štatisticky a je založený na kontinuálnom meraní transpirácie na výskumnej ploche Poľana – Hukavský grúň spolu s detailným meraním parametrov

jednotlivých stromov (súradnice stromov a parametre korún) a meraním klimatických parametrov. Model odhaduje množstvo vytranspirovanej vody pomocou veľkosti povrchu korún stromov, priemernej dennej teploty počas vegetačného obdobia, počtu dní vegetačného obdobia a počtu daždivých dní cez vegetačné obdobie. Klimatické scenáre a rastový simulátor SIBYLA predpovedajú množstvo vytranspirovanej vody z celého lesného porastu.

V práci uvádzame použité príklady modelovania lesných porastov v rôznych vegetačných stupňoch a nadmorských výškach a tiež vplyv rôznych prístupov obhospodarovania na transpiráciu.

2. MATERIÁL A METODIKA MERANIA

Experimentálny výskum sa uskutočnil v dospelom zmiešanom jedľovo-smrekovo-bukovom poraste (*Abieto-Fagetum*) na výskumnej ploche Poľana – Hukavský Grúň, ktorá sa nachádza v juhovýchodnej časti Biosférickej rezervácie Poľana, zapísanej do UNESCO, na strednom Slovensku ($\Phi = 48^{\circ}39' \text{ N}$, $\lambda = 19^{\circ}29' \text{ E}$) v nadmorskej výške 850 m n. m. Výskumný porast bol vybraný na svahu so severovýchodnou expozíciou ($5-10^{\circ}$), v klimaticky chladnej oblasti s priemernou ročnou teplotou $5,8^{\circ} \text{ C}$ (1951–1980) a s ročným úhrnom zrážok 853 mm. Pôdny typ, ktorý sa tu vyskytuje je kambizem andozemná s priemernou hĺbkou 80 cm. Skúmaný lesný porast má vek okolo 100 rokov so 70 % zastúpením buka lesného (*Fagus sylvatica* L.), 20 % zastúpením smreka obyčajného (*Picea abies* (L.) Karst.), 3,5 % zastúpením jedle bielej (*Abies alba* Mill.) a ostatný doplnok do 100 % zastúpenia tvoria jednotlivé stromy jaseňa štíhleho (*Fraxinus excelsior* L.) a javora horského (*Acer pseudoplatanus* L.). Porast je vertikálne diferencovaný, od mája do konca septembra úplne zapojený s indexom listovej plochy (LAI) 5,89, ktorý bol určený v júni. Charakteristiky jednotlivých vzorníkov stromov sú uvedené v Tab. 1 a ich priestorové usporiadanie na výskumnej ploche je znázornené na Obr. 1.



Obr. 1 Štruktúra lesného porastu na výskumnej ploche s vyznačenými stromami na ktorých sa meral transpiračný prúd (tmavé body)

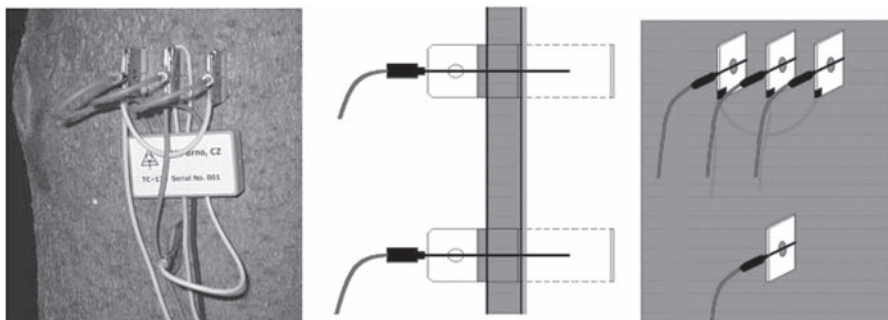
Fig. 1 Sample plot with individual tree data and sample trees (red ones) with transpiration measurements

Tab. 1 Biometrické parametre modelových stromov
 Tab. 1 Measured variables of sampled trees

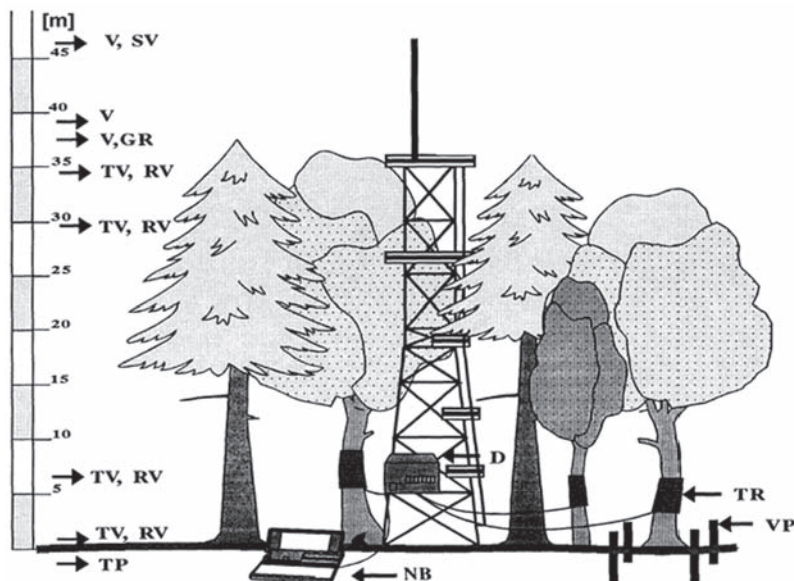
Vzorník	Biosociologické postavenie stromu	Rok merania transpirácie	Výška [m]	$d_{1,3}$ [cm]	Horizontálna korunová projekcia [m ²]
Buk 1	zatičený	1995	28,0	21,3	18
Buk 2	vrastavý	1995	32,0	33,1	30
Buk 3	úrovňový	1995	37,0	43,9	75
Buk 4	zatičený	1996, 1997	32,0	25,5	19
Buk 5	úrovňový	1996, 1997	37,0	44,1	78
Buk 6	predrastavý	1996, 1997	37,5	49,8	69

Merané charakteristiky

Transpiračný prúd. Na meranie transpiračného prúdu vybraných vzorníkov buka sme použili priamu, nedeštruktívnu a kontinuálnu metódu tepelnej bilancie (THB), ktorá je založená na vnútornom vyhrievaní xylémových pletív. Konkrétne bol použitý Sap flow meter P4.1 (vyrábaný firmou Environmental Measuring Systems, Brno, Česká Republika) zobrazený na Obr. 2. Táto metóda je často využívaná pri stanovení transpirácie stromov a porastov (CIENCIALA *et al.* 1999, STŘELCOVÁ *et al.* 2004) a bola overená experimentálne (LUNDBLAD *et al.* 2001). V práci sme použili hodnoty intenzity transpiračného prúdu, ktorý bol meraný kontinuálne v 15 minútových intervaloch na šiestich vzorníkoch buka počas vegetačného obdobia 1995, 1996 a 1997 (od 1. mája do 30. októbra).



Obr. 2 Meranie transpiračného prúdu v kmeni stromu metódou tepelnej bilancie
 Fig. 2 Measurements of sap flow by the tree-trunk heat balance method



Obr. 3 Schematické znázornenie meteorologickej veže a jednotlivých meraných charakteristík na výskumnej ploche Poľana – Hukavský Grúň, V – rýchlosť vetra, SV – smer vetra, GR – globálna radiácia, TV – teplota vzduchu, RV – relatívna vlhkosť vzduchu, TP – teplota pôdy, VP – vodný potenciál pôdy, TR – transpiračný prúd, D – datalogger, NB – notebook

Fig. 3 Meteorological tower in the research plot Poľana – Hukavský Grúň, V – wind speed, SV – wind direction, GR – global radiation, TV – air temperature, RV – relative air humidity, TP – soil temperature, VP – soil water potential, TR – transpiration sap flow, D – datalogger, NB – notebook

Mikroklimatické merania. Na výskumnej ploche bola nainštalovaná meteorologická veža, kde sa použitím prístrojov DELTA-T (vyrábané vo Veľkej Británii firmou DELTA) v 10 minútových intervaloch zaznamenávali a merali údaje o teplote a vlhkosti vzduchu (TV, RV), globálnej radiácii (GR), zrážkach (P) a rýchlosti vetra (V) nad porastom (vo výške 34–37 m nad zemou). Meteorologická veža je znázornená na Obr. 3. Teplota pôdy sa merala v hĺbke 0,1 m a vodný potenciál pôdy sa meral raz za týždeň pomocou tenzometrov umiestnených do vzdialenosti 0,5 a 1,0 m od jednotlivých vzorníkov stromov do hĺbky 15, 30, 50 a 70 cm.

3. METODIKA

Na základe údajov meraní transpiračného prúdu stromov bol vytvorený regresný model medzi povrchom koruny stromu (resp. hrúbkou stromu), priemernou dennou teplotou a denným množstvom transpirovanej vody. Na vyrovnanie bola použitá Mitscherlichova funkcia (MITSCHERLICH 1948). Hodnota denného množstva transpirovanej vody je modelovaná touto funkciou v závislosti od priemernej dennej teploty, pričom prvý koeficient je konštantný a druhý koeficient je modelovaný polynómom druhého stupňa v závislosti od povrchu koruny stromu (resp. hrúbky stromu):

$$tr_{H_2O} = a_0 \cdot \left(1 - e^{\left((a_1 + a_2 \cdot CS + a_3 \cdot CS^2) t \right)} \right) \quad (1)$$

$$tr_{H_2O} = a_0 \cdot \left(1 - e^{\left((a_1 + a_2 \cdot d_{1,3} + a_3 \cdot d_{1,3}^2) t \right)} \right) \quad (2)$$

kde tr_{H_2O} je denné množstvo transpirovanej vody v litroch za deň, CS je veľkosť korunového plášťa stromu v m^2 , $d_{1,3}$ je hrúbka stromu v cm , t je priemerná denná teplota v $^{\circ}C$ a a_0 , a_1 , a_2 a a_3 sú regresné koeficienty (Tab. 2). Povrch koruny stromu je pritom stanovený na základe vzťahov PRETZSCHA (2001) a je závislý od hrúbky a výšky stromu.

Tab. 2 Koeficienty regresných modelov transpirácie stromu

Tab. 2 Regression coefficients for tree transpiration model

	a_0	a_1	a_2	a_3	I_{yx}
model (1)	-35,895	-0,03306	0,000774	-0,0000011	0,708
model (2)	-37,907	0,014461	0,000593	0,0000224	0,723

Stredná chyba m_x modelu (1) je 59,66 litra vody na strom a pre model (2) 58,69 litra vody na strom. Stredná chyba pre n stromov je:

$$m_x = \frac{m_x}{\sqrt{n}} \quad (3)$$

Celková skutočná suma transpirovanej vody stromov za celé obdobie merania bola 80 223 litrov vody, pričom podľa modelu (1) je to 79270 litrov a podľa modelu (2) 84792 litrov. Skutočná priemerná denná transpirácia stromov je 77 litrov vody za deň, pričom podľa modelu (1) je to 76 litrov vody za deň a podľa modelu (2) je to 81 litrov vody za deň. Oba modely sú vhodné pre použitie. Prvý model sa hodí pre účely rastového simulátora SIBYLA, ktorý počíta priamo povrch koruny stromu. Druhý model sa hodí skôr pre praktickú inventarizáciu lesa, kde sú známe iba hrúbky stromov.

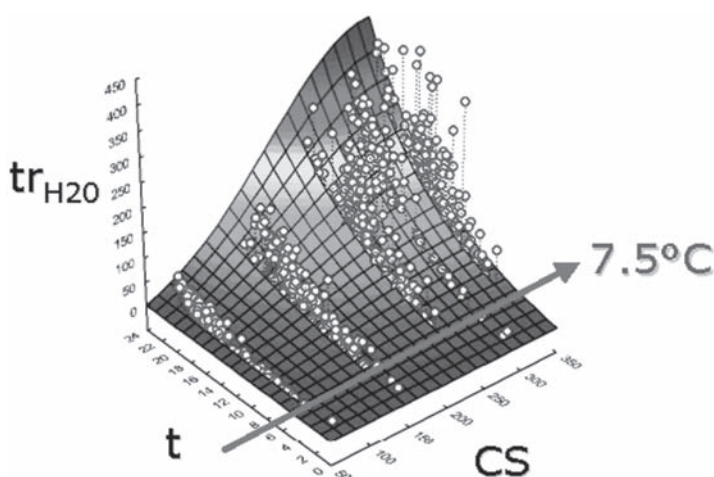
Ročné množstvo transpirovanej vody stromu sa vypočíta podľa vzťahu:

$$TR_{H_2O} = tr_{H_2O}(CS, MT_{VP>10}) \cdot DAYS_{VP>10} \cdot k_{VP>7.5} \cdot (1 - I_R \cdot k_{TR}) \quad (4)$$

kde TR_{H_2O} je ročné množstvo transpirovanej vody stromu v litroch, $MT_{VP>10}$ je priemerná

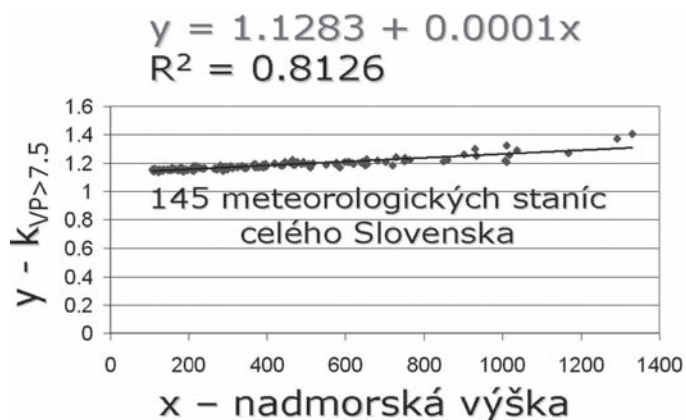
denná teplota počas „krátkeho“ vegetačného obdobia (keď priemerná denná teplota je väčšia ako 10 °C), $DAYS_{VP>10}$ je počet dní „krátkeho“ vegetačného obdobia, $k_{VP>7.5}$ je korektor „dlhého“ vegetačného obdobia (keď priemerná denná teplota je väčšia ako 7,5 °C), I_R je index daždivých dní a k_{TR} je korektor dní so zanedbateľnou transpiráciou.

Teplotná hranica 7,5 °C pre „dlhé vegetačné“ obdobie bola stanovená na základe empirických údajov terénnych meraní. Ide o teplotnú hranicu kedy začínajú stromy transpirovať (obrázok 4).



Obr. 4 Model dennej transpirácie stromu a teplotná hranica začiatku transpirácie

Fig. 4 The model of daily tree transpiration and limit of temperature for beginning of transpiration

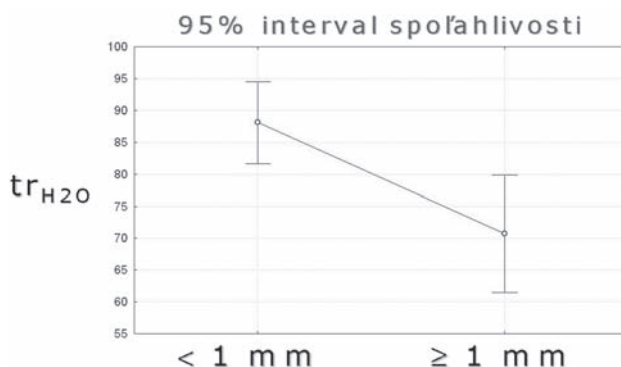


Obr. 5 Model korektora „dlhého“ vegetačného obdobia

Fig. 5 The model of corrector for „long“ vegetation period

Korektor „dlhého“ vegetačného obdobia ($k_{VP>7,5}$) je závislý od nadmorskej výšky. Bol odvodený na základe lineárnej závislosti znázornenej na obrázku 5. Použili sa údaje Slovenského hydrometeorologického ústavu (KOLEKTÍV 1991). Empirické údaje pozostávajú z priemerného počtu dní vegetačného obdobia v roku za obdobie rokov 1951–1980 s priemernou teplotou 5 °C a 10 °C pre 145 meteorologických staníc z územia Slovenska. Na základe týchto údajov bol lineárnou interpoláciou určený počet dní s priemernou dennou teplotou 7,5 °C a bol vypočítaný index medzi počtom dní s priemernou dennou teplotou 7,5 °C a teplotou 10 °C. Tento index bol vyrovnaný regresnou priamkou v závislosti od nadmorskej výšky meteorologickej stanice.

Index daždivých dní (I_R) predstavuje relatívny počet dní vegetačného obdobia s dennými zrážkami presahujúcimi 1 mm. Hranica 1 mm zrážok za deň predstavuje štatisticky významný rozdiel v úrovni transpirácie stromov (Obr. 6).



Obr. 6 Hranica denného úhrnu zrážok pre odvedenie indexu daždivých dní

Fig. 6 The limit of daily precipitation for calculation of rainy days index

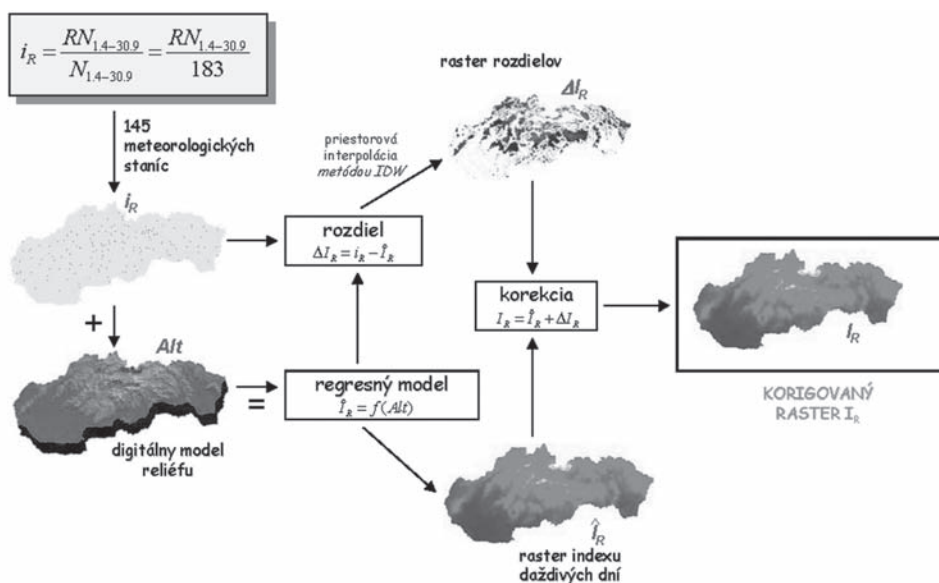
Korektor dní so zanedbateľnou transpiráciou (k_{TR}) vyjadruje relatívny počet dní z počtu daždivých dní, keď denná globálna radiácia poklesne pod 2,5 kWh.m⁻². Z pozorovania empirických údajov sa preukázalo, že pod touto úrovňou radiácie prestáva prebiehať proces transpirácie stromov. Keďže v bežných prevádzkových údajoch sa veľmi ťažko stretáme s údajmi o globálnej radiácii, bol počet dní kedy neprebíha transpirácia odvodený z počtu daždivých dní. Počet daždivých dní (so zrážkami nad 1 mm) sa stanoví v prevádzke omnoho jednoduchšie. Z pozorovania empirických údajov sa ukázalo, že počet dní so zanedbateľnou radiáciou a teda aj transpiráciou je rovný konštante 0,40.

Pre praktické použitie modelu je potrebné odvodiť index daždivých dní. Index daždivých dní bol odvodený na základe údajov 145 meteorologických staníc z územia Slovenska (KOLEKTÍV 1991). Je vypočítaný ako podiel počtu daždivých dní počas vegetačného obdobia (od 1. apríla do 30. septembra) voči dĺžke periódy (183 dní):

(5)

$$I_R = \frac{rDAYS_{1.4-30.9}}{DAYS_{1.4-30.9}} = \frac{rDAYS_{1.4-30.9}}{183}$$

Pre každú meteorologickú stanicu bol takýmto spôsobom vypočítaný index daždivých dní. Medzi indexom daždivých dní a nadmorskou výškou meteorologickej stanice bol odvodený regresný model. Na základe digitálneho modelu reliéfu Slovenska a regresného modelu bol v prostredí ArcGIS odvodený raster indexu daždivých dní. Pre každú meteorologickú stanicu bol vypočítaný rozdiel medzi skutočným indexom daždivých dní a indexom odvodeným z regresného modelu. Tieto rozdiely boli potom interpolované pre všetky body rastra na základe metódy IDW (Inverse Distance Weighting) s použitím 6 najbližších meteorologických staníc ku každému bodu. Takto vznikol raster rozdielov. K rastru indexu daždivých dní bol potom pripočítaný raster rozdielov pomocou mapovej algebry. Takto bol odvodený finálny korigovaný raster indexu daždivých dní. Tento raster zabezpečuje, že index daždivých dní v bodoch meteorologických staníc sa zhoduje so skutočnosťou, pričom sa zohľadňuje nielen vzťah k nadmorskej výške, ale aj priestorová variabilita. Celý postup je názorne zobrazený na Obr. 7.



Obr. 7 Odvodenie indexu daždivých dní v prostredí GIS
Fig. 7 Derivation of rainy days index in GIS environment

Kvôli praktickému použitiu bola z korigovaného rastra indexu daždivých dní odvodená tabuľka klimatickej amplitúdy. Pre 74 lesných oblastí Slovenska bola na základe modelu reliéfu odvodená minimálna a maximálna nadmorská výška. Pre každú lesnú oblasť bol potom urobený regresný model medzi nadmorskou výškou a indexom daždivých dní. Regresný model bol odvodený v prostredí GIS na základe rastra modelu reliéfu a korigovaného rastra daždivých dní. Operácie boli robené zonálne (zvlášť pre každú lesnú

oblasť). Vzniklo 74 regresných rovníc. Pre každú lesnú oblasť sa do príslušnej regresnej rovnice dosadila minimálna a maximálna nadmorská výška. Takto sa odvodil spodný a horný index daždivých dní. Odvodenie indexu daždivých dní potom závisí na lesnej oblasti a nadmorskej výške lesného porastu. Na základe príslušnosti porastu do lesnej oblasti sa z tabuľky klimateckej amplitúdy odvodí spodný a horný index daždivých dní. Potrebný index daždivých dní sa potom vypočíta interpoláciou na základe nadmorskej výšky porastu.

4. VÝSLEDKY

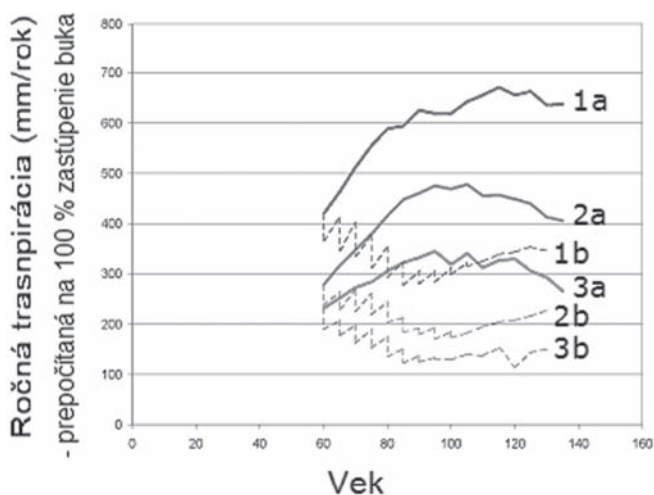
Uvedená metodika výpočtu ročného objemu transpirovanej vody stromu sa implementovala do programového riešenia rastového simulátora SIBYLA. Toto programové riešenie zabezpečuje, že výpočet transpirácie stromov je plne automatizovaný, pričom výsledky sú na úrovni jednotlivých stromov ako aj súborne pre celý lesný porast a to pre každú periódu rastovej simulácie. Použitie tohto modelu je znázornené na príklade troch lesných porastov. Prvý bukový porast sa nachádza v nadmorskej výške 400 m n. m. v Zvolenskej pahorkatine. Druhý lesný porast sa nachádza v orografickom celku Veľkej Fatry v nadmorskej výške 800 m n. m. Je to zmiešaný bukový porast so 65 % zastúpením buka a 35 % zastúpením jedle. Posledný porast tvorí jedľovo-bukovo-smrekový zmiešaný les (percentuálne zastúpenie buk 27 %, jedľa 14% a smrek 59%) v lokalite Kráľova hoľa s nadmorskou výškou 1000 m n. m. Znázornenie jednotlivých lokalít je na Obr. 8.



Obr. 8 Znázornenie troch lesných oblastí vybraných pre simuláciu lesných porastov
Fig. 8 Location of 3 forest eco-regions selected for simulation of the forest stands

Vybrané porasty predstavujú v podmienkach Slovenska typické lesné porasty so zastúpením buka. Pre zistenie produkcie porastov sme použili slovenské rastové tabuľky (HALAJ *et al.* 1987). Ako vstupné porastové parametre boli vybrané priemerná bonita (24),

kritické zakmenenie porastu (HALAJ 1985) a vek 60 rokov. Podľa metodiky regionalizácie klímy na Slovensku sme v závislosti od nadmorskej výšky a lesnej oblasti vytvorili typické klimatické parametre pre vybrané porasty (FABRIKA *et al.* 2005). Okrem toho sme vypracovali prognózy vývoja lesných porastov pre obdobie 70 rokov. Použili sme dva varianty. Prvý variant predstavuje prirodzený vývoj bez akéhokoľvek prebierkového režimu. Druhý variant uvažuje s metódou budúcich rubných stromov (cieľových stromov). Počet vybratých stromov bol 200 na hektár s prihliadnutím na rovnomerné rozdelenie medzi dreviny pričom na každý budúci rubný strom pripadal jeden konkurent. Perióda prebierky bola 5 rokov. Výsledky sa prepočítali pre 100 % zastúpenie buka a prognózy sú znázornené na Obr. 9. Môžeme vidieť, že maximálnu transpiráciu vykazuje lesná oblasť s najnižšou priemernou nadmorskou výškou Zvolenská pahorkatina (400 m n. m.) a minimálnu transpiráciu lesná oblasť s najvyššou nadmorskou výškou v oblasti Kráľová hoľa (1000 m n. m.). Tieto výsledky potvrdzujú logický dôsledok klimatických parametrov typických pre zmenu nadmorskej výšky. Prvý variant prirodzeného vývoja mal vyššiu transpiráciu ako variant druhý uvažujúci s metódou budúcich rubných stromov. Ako je vidieť na obrázku 9, variant metódy budúcich rubných stromov má svoj vývoj typický lomenou čiarou, čo vyjadruje rozdiely medzi stavom pred a po prebierke počas periódy 5 rokov.



Obr. 9 Vývoj porastovej transpirácie pre 3 modelované bukové porasty (1 = Zvolenská pahorkatina (400 m n. m.), 2 = Veľká Fatra (800 m n. m.), 3 = Kráľová hoľa (1000 m n. m.), a = variant prirodzeného vývoja, b = metóda budúcich rubných stromov)

Fig. 9 Development of stand transpiration for 3 simulated beech stands (1 = Zvolenská pahorkatina (400 m a.s.l.), 2 = Veľká Fatra (800 m a.s.l.), 3 = Kráľová hoľa (1000 m a.s.l.), a = natural development, b = crop trees method)

4. ZÁVER

Uvedený príspevok prezentuje prvotné riešenie empirického modelu transpirácie pre bukové stromy a porasty. Požadované údaje potrebné pre modelovanie dennej dynamiky transpirácie vychádzajú z povrchu korún stromov a dennej priemernej teploty. Povrchy korún stromov môžu byť v prípade ak nie sú známe dopočítané na základe rovníc PRETZSCHA (2001) podľa hrúbok a výšok stromov. Pre modelovanie ročnej dynamiky sú potrebné ďalšie vstupné údaje: priemerná teplota počas vegetačného obdobia, počet dní vegetačného obdobia, lesná oblasť a nadmorská výška. Model je vhodný pre dospelé bukové porasty staršie ako 60 rokov a použiteľný pre výpočet transpirácie jednotlivých stromov a prognózovanie vývoja porastovej transpirácie vzhľadom na štruktúru porastu, klimatické údaje (vrátane klimatických zmien) a výchovné zásahy. Ďalšie úlohy výskumu sa objavujú v súvislosti so zovšeobecnením použitého modelu. Chceli by sme rozšíriť model transpirácie bukových porastov pre rôzne vekové kategórie a sociálne postavenie stromov. Taktiež by sme chceli model rozšíriť pre ďalšie dreviny (smrek, jedľa, borovicu, dub a aj smrekovec). Pre potvrdenie správnosti modelu je do budúcnosti potrebný ďalší výskum vo forme analýz senzitivity modelu na široký rozsah vstupných parametrov.

Pod'akovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci realizácie projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja. Vznikla na základe spolupráce Aktivita 1.3 – Modelovanie rastových procesov lesných ekosystémov (50 %) a Aktivita 2.1 – Globálne a regionálne zmeny (50 %).

Literatúra

- ČERMÁK, J., KUČERA, J., NADEZHINA, N., 2004: Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees* 18: 529–546.
- ČERMÁK, J., PALÁT, M., PENKA, M., 1976: Transpiration Flow Rate in a Full Grown Tree of *Prunus avium* (L.) Estimated by the Method of Heat Balance in Connection with Some Meteorological Factors. *Biologia Plantarum* 18: 111–118.
- ČERMÁK, J., ULEHLA, J., KUČERA, J., PENKA, M., 1982: Sap Flow Rate and Transpiration Determination in Full Grown Oak (*Quercus robur* L.) in Floodplain Forest Exposed to Seasonal Floods, as Related to Potencial Evapotranspiration and Tree Dimensions. *Biologia Plantarum* 24: 446–460.
- CIENCIALA, E., LINDROTH, A., ČERMÁK, J., HÄLLGREN, J.E., KUČERA, J., 1994: The Effects of Water Availability on Transpiration, Water Potential and Growth of *Picea abies* During Growing Season. *J. Hydrol.* 155: 57–71.
- CIENCIALA, E., KUČERA, J., LINDROTH, A., 1999: Long-term measurements of stand water uptake in Swedish boreal forest. *Agric. For. Meteorol.* 98/99: 547–554.
- DENMEAD, O.T., SHAW, R.H., 1962: Availability of soil water to plants as affected by soil moisture content and meteorological conditions. *Agron. J.* 54: 385–390.
- FABRIKA, M. 2005: Simulátor biodynamiky lesa SIBYLA, koncepcia, konštrukcia a programové riešenie (Simulator of forest biodynamics SIBYLA, conception, construction, and software solution), Habilitation work, Technical University of Zvolen, Zvolen, 238 P.
- FABRIKA, M., ĎURSKÝ, J., PRETZSCH, H., SLOBODA, B., 2005: Regionalisation of climatic values for ecological site classification using growth simulator SIBYLA with GIS. In: "Remote Sensing and Geographical Information Systems for Environmental Studies. Application in Forestry, Edited by KLEIN, CH., NIESCHULTZE,

- J. and SLOBODA, B., Band 138, Universität Göttingen, J.D. Sauerländer's Verlag Frankfurt am main., 245–255.
- HALAJ, J., 1985: Kritické zakmenenie porastov podľa nových rastových tabuliek (Critical stand density by new yield tables). *Lesnícky časopis*, 31, 4: 267–276.
- HALAJ ET AL., 1987: Rastové tabuľky hlavných drevín ČSSR (Yield tables for main tree species in Czechoslovakia). *Príroda Bratislava*, 361 P.
- HASENAUER, H., 1994: Ein Einzelbaumsimulator für ungleichaltrige Fichten-Kiefern- und Buchen-Fichtenmischbestände. *Forstliche Schriftenreihe Universität für Bodenkultur, Wien*, Band 8, 152 s.
- NAGEL, J., 1996: Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung. *Forst und Holz*, 3, p.76–78.
- KARL, T.R., KNIGHT, R.W., PLUMMER, N., 1995: Trends in high-frequency climate variability in the twentieth century. *Nature* 377: 217–220.
- KAUFMANN, M.R., KELLIHER, F.M., 1991: Estimating Tree Transpiration rates in Forest Stands. In: J.P. Lassoie, T.M. Hinckley (eds.), *Techniques and Approaches in Forest Tree Eco-physiology*. CRC Press, Boca Raton, FL: 117–140.
- KOLEKTÍV 1991: Zborník prác SHMÚ 33/11.
- KUČERA, J., ČERMÁK, J., PENKA, M., 1977: Improved Thermal Method of Continual Recording the Transpiration Flow Rate Dynamics. *Biologia Plantarum* 19: 413–420.
- LAGERGREN, F., LINDROTH, A., 2002: Transpiration response to soil moisture in pine and spruce trees in Sweden. *Agric. For. Meteorol.* 112: 67–85.
- LUNDBLAD, M., LAGERGREN, F., LINDROTH, A., 2001: Evaluation of heat balance and heat dissipation methods from sapflow measurements in pine and spruce. *Ann.For.Sci.* 58: 625–638.
- MITSCHERLICH, A., 1948: Die Ertragsgesetze. *Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Vorträge und Schriften*, H. 31, Akademie-Verlag Berlin, 42 P.
- NAGEL, J., 1996: Anwendungsprogramm zur Bestandesbewertung und zur Prognose der Bestandesentwicklung. *Forst und Holz*, 3, p.76–78.
- PRETZSCH, H., 1992: Konzeption und Konstruktion von Wachstumsmodellen für Rein- und Mischbestände. *Forstliche Forschungsberichte München*, Nr.115, 332 p.
- PRETZSCH, H., 2001: Modellierung des Waldwachstums. *Parey Buchverlag Berlin*, 341 P.
- SHUKLA, J., MINTZ, Y., 1982: Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate. *Science* 215: 1498–1501.
- STERBA, H., 1995: Prognaus – ein absandsunabhängiger Wachstumssimulator für ungleichaltrige Mischbestände. *DVFF – Sektion Ertragskunde, Joachimstahl*, p.173–183.
- STŘELCOVÁ, K., MATEJKA, F., KUČERA, J., 2004: Beech stand transpiration assessment – two methodical approaches. *Ekologia* 22, Supplement 2/2004: 147–162.
- STŘELCOVÁ, K., MÁTYÁS, Cs., KLEIDON, A., LAPIN, M., MATEJKA, F., BLÁŽENEC, M., ŠKVARENINA, J., HOLÉCY, J., 2009: *Bioclimatology and Natural Hazards*. Springer Book. 298 P.
- WILSON, J.B., BALDOCCHI, D.D., 2000: Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broadleaved temperate deciduous forest in North America. *Agric. For. Meteorol.* 100: 1–18.

Adresa autorov:

Doc. Ing. Marek Fabrika, PhD.
Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie
Lesnícka fakulta
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen

e-mail: fabrika@vsl.d.tuzvo.sk

Doc. Ing. Katarína Střelcová, PhD.
Ing. Dagmar Magová
Katedra prírodného prostredia
Lesnícka fakulta
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen

Empirický model transpirácie buka lesného v rastovom simulátore SIBYLA

Abstrakt

Modelovanie rastových a fyziologických procesov drevín a lesných porastov sa v súčasnosti dostáva do popredia lesníckeho a ekofyziologického výskumu. Jednou z možností je modelovanie pomocou rastových simulátorov. Tieto modely umožňujú predpovedať vývoj lesa týkajúci sa širokého rozsahu vstupných parametrov (SILVA, BWIN, MOSES, PROGNAUS, SIBYLA). Článok predstavuje metodiku modelovania transpirácie a jej realizáciu pomocou softvéru. Model je založený na rastovom simulátore SIBYLA, ktorý bol vyvinutý na Technickej Univerzite vo Zvolene. Tento rastový simulátor bol doteraz úspešne používaný na modelovanie vplyvov klimatických zmien na vývoj lesných ekosystémov na Slovensku. Model transpirácie spracováva namerané údaje štatisticky a je založený na kontinuálnom meraní transpirácie na výskumnej ploche Poľana – Hukavský grúň spolu s detailným meraním parametrov jednotlivých stromov (súradnice stromov a parametre korún) a meraním klimatických parametrov. Model odhaduje množstvo vytranspirovanej vody pomocou veľkosti korún stromov, priemernej dennej teploty počas vegetačného obdobia, počtu dní vegetačného obdobia a počtu daždivých dní cez vegetačné obdobie. Klimatické scenáre a rastový simulátor SIBYLA predpovedajú množstvo vytranspirovanej vody z celého lesného porastu. V článku uvádzame použité príklady modelovania lesných porastov v rôznych vegetačných stupňoch a nadmorských výškach a tiež vplyv rôznych prístupov obhospodarovania na transpiráciu.

Kľúčové slová: globálne a regionálne zmeny klímy, modelovanie lesa, transpirácia, buk lesný, rastové simulátory

TVORBA KLIMATICKO-STANOVIŠTNÝCH STRÁT PRE ÚČELY TVORBY MODELU HUSTOTY PRIRODZENÉHO ZMLADENIA

Ján M E R G A N I Č – Marek F A B R I K A

Merganič, J., Fabrika, M.: Determination of climatic-site strata based on rectified climatic rasters for the purposes of natural regeneration density model. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 113–124, 2009.

The work presents the methodology of the development of climatic-site strata and their relationship to initial density of young tree individuals, which was quantified using Reineke's rule. Climatic-site strata are determined on the base of two main ecological variables: mean air temperature in vegetation season (from April to September), and mean precipitation sum in vegetation season (from April to September) taken from rectified climatic rasters. Stratification was performed using cluster and discriminant analyses. In total, 15 climatic-site strata were distinguished. The overall correctness of the discriminant model used for determining climatic-site stratum is 94.4% (it ranges from 87 to 100%). The distinguished climatic-site strata are closely related to other climatic and site variables (air temperature amplitude, length of vegetation season, aridity index, elevation, relative soil moisture, relative nutrient content in soil). The analyses showed that the quantification of density of young tree individuals performed with regard to specified climatic-site strata is sensitive to ecological conditions. The specified climatic-site strata can be regarded as an appropriate modification of ecological site quality classification applied in the individual-tree growth simulator SIBYLA.

Key words: cluster analysis, discrimination model, growth simulator, SIBYLA, natural regeneration model

1. ÚVOD A ROZBOR PROBLEMATIKY

Výskum ekologických vzťahov medzi vegetáciou a prostredím je veľmi zložitý. Ekologické faktory ovplyvňujú mnohé rastové zákonitosti v lesných ekosystémoch, ich existenciu i produkciu. V lesníckej terminológii sa pre určovanie produkčnej schopnosti stanovišta zaužíval pojem bonita. Bonitu stanovišta určujú vlastnosti pôdy (štruktúra, prevzdušnosť, hĺbka pôdy, chemické zloženie, obsah vody, obsah živín, humifikácia a pod.), reliéf a poloha terénu, ako aj klimatické faktory (teplota, zrážky a pod.) bez ohľadu na to, aká drevina (stanovištne vhodná alebo nevhodná) a aký porast (normálny alebo netvárný) momentálne na danom stanovišti rastie (HALAJ 1978). Takýto prístup sa využíval v počiatočných pokusoch o klasifikáciu bonity pred viac ako 200 rokmi. Nazýva sa geocentrický, pretože je založený na poznatkoch o zemi (SKOVSGAARD a VANCLAY 2008). V lesníctve sa však častejšie využíva tzv. dendrocentrický prístup (SKOVSGAARD a VANCLAY 2008),

v rámci ktorého je bonitácia stanovišťa vykonávaná prevažne cez porastové charakteristiky (PRESSLER 1870, EICHORN 1904, GERHARD 1921, WIEDEMAN 1951, ASSMAN a FRANZ 1963, HALAJ a ŘEHÁK 1979) ako sú horná výška porastu, stredná výška porastu, prírastok a pod. S rozvojom počítačovej techniky sa od tejto klasickej bonitácie ustupuje a začínajú sa opäť presadzovať trendy priamej bonitácie cez prírodné a ekologické charakteristiky (BOTKIN *et al.* 1972, SHUGART a WEST 1977).

Klimatické faktory patria medzi fenomény, ktoré sa v priestore súvislo menia, relatívne dobre korelujú s ľahko dostupnými informáciami o teréne a jednoducho sa priestorovo modelujú. Ich dlhotrvajúci vplyv determinuje mnohé z pôdných vlastností (BUOL *et al.* 2003) a zároveň aj hlavnú drevinovo špecifickú klasifikáciu prostredia vyjadrenú vegetačnou stupňovitosťou (ZLATNÍK 1976), kde veľkú úlohu zohráva teplota vzduchu a pôdy a množstvo zrážok. Implementácia priamej bonitácie do rastových simulátorov zvyšuje ich flexibilitu i praktickú upotrebitelnosť, pretože rastové modely predstavujú systémy vzťahov, kde pri širokej škále podmienok je možné prognózovať rast a vývoj lesného porastu a to na rozdielnych časových a priestorových úrovniach.

Stratifikáciou gradientu klíma – stanovište na podklade rastovo reprezentovaných modelov (ĎURSKÝ *et al.* 2002) sledujeme zachovanie senzitivity stromového rastového simulátora na ekologické podmienky aj pri submodeli prirodzeného zmladenia, ktorý sa vyvíja ako jedna z piatich riešených úloh v rámci aktivity 1.3 „Modelovanie rastových procesov lesných ekosystémov“ projektu Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy.

2. MATERIÁL

Pre tvorbu klimaticko-stanovištných strát boli použité jednak stanovištné informácie z inventarizačných plôch (IP) Národnej inventarizácie a monitoringu lesov SR (NIML SR) (ŠMELKO *et al.* 2006) a jednak rastovo reprezentované modely (ĎURSKÝ *et al.* 2002) s rozlišovacím obrazovým prvkom 90×90 m pre nasledovné klimaticko-stanovištné premenné: počet dní v roku s priemernou dennou teplotou vzduchu vyššou ako 10°C (dĺžka vegetačného obdobia), ročná teplotná amplitúda vzduchu, priemerná teplota vzduchu počas vegetačného obdobia (apríl až september) a priemerný úhrn zrážok počas vegetačného obdobia (apríl až september). Na vytvorenie rastovo reprezentovaných modelov boli použité údaje z výsledkov meraní staničnej siete Slovenského hydrometeorologického ústavu, ktoré boli vydané v priebehu rokov 1966–1991. Priemerné hodnoty teplotných charakteristík sa štandardizovali na jednotné časové obdobie rokov 1951–1980. Pre tento účel bolo použitých 172 meteorologických staníc. Priemerné hodnoty zrážkových charakteristík boli štandardizované na jednotné časové obdobie rokov 1901–1980 z 522 meteorologických staníc (FABRIKA 2005, BORGOŇ 2003). Stanovištné informácie z IP NIML SR boli zisťované na plochách o výmere $p = 500 \text{ m}^2$ s polomerom $r = 12,62 \text{ m}$. NIML SR bola realizovaná v rokoch 2005–2006 ako výberová reprezentatívna metóda s komplexným zisťovaním informácií na pravidelnej sieti trvalých inventarizačných plôch v spone $4 \times 4 \text{ km}$ na celom území SR (ŠMELKO *et al.* 2006). Celkový počet IP bol 3071 a z toho na 1419 IP sa nachádzal les. Pre účely konštrukcie modelu prirodzeného zmladenia sa použili údaje, ktoré sa viažu na rovnomeré časti IP (subplochy) a ich celkový počet je 1507. Pre

účely tejto práce sa z údajov z NIML SR použili informácie o lesnom type (HANČINSKÝ 1972) a počte jedincov s výškou nad 1,3 m a hrúbkou do 7 cm.

3. METODIKA

Tvorba klimaticko-stanovištných strát je založená na dvoch základných priamych ekologických faktoroch a to na priemernej teplote vzduchu počas vegetačného obdobia (apríl až september) a priemernom úhrne zrážok počas vegetačného obdobia. Aj keď stratifikačnými veličinami sú iba klimatické údaje, z analýz vyplýva, že tieto veličiny majú vplyv aj na stanovištné veličiny, preto sa použil súborný pojem klimaticko-stanovištné stratá. Klimaticko-stanovištné stratá boli definované za použitia zhlukovej analýzy metódou *k*-priemerov (STATSOFT INC. 2004). Pre dosiahnutie relatívne podrobnej stratifikácie klimatického gradientu sa zvolilo vytvorenie 15 zhlukov (strát). Pri tvorbe zhlukov sa hľadala podobnosť pri súčasnom pôsobení oboch klimatických faktorov (interakcia teploty a zrážok). Pre spätné zatriedenie jednotky, lokality, skusnej plochy a pod. do klimaticko-stanovištného strata bola použitá prediktívna diskriminačná analýza (COOLEY a LOHNES 1971, HUBERTY 1994, STATSOFT INC. 2004). Pre analýzu vplyvu klimaticko-stanovištných strát na jednotlivé klimatické a stanovištné premenné bola použitá analýza variancie (ANOVA).

Stanovištné premenné zisťované v teréne na IP a integrované do určeného lesného typu boli transformované pomocou fuzzy množín podľa FABRIKU (2005), t.j. pre každý lesný typ sa pomocou prevodových tabuliek a funkcií fuzzy množín určili relatívne hodnoty pôdnej vlhkosti a zásoby živín v pôde. Pre účely implementácie klimaticko-stanovištných strát do stromového rastového simulátora je ich vplyv prezentovaný na analýze drevinovo nešpecifikovaných údajoch o hustote prirodzeného zmladenia získaných v rámci NIML SR 2005-2006. Hustota prirodzeného zmladenia je odvodená pomocou Reinekeho funkcie (REINEKE 1933). Bližšia charakteristika údajov je v práci FABRIKA *et al.* (2009).

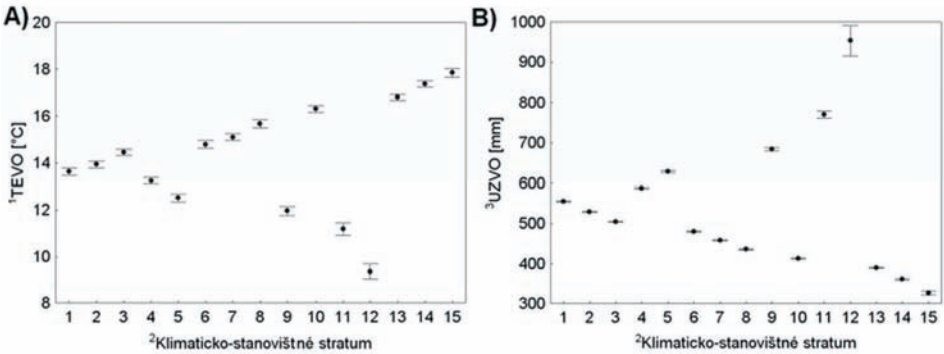
4. VÝSLEDKY

Aplikáciou metódy *k*-priemerov zhlukovej analýzy bolo vytvorených 15 klimaticko-stanovištných strát. Rozdiely medzi jednotlivými stratami sú prezentované na obrázku 1. Z obrázka je vidieť, že rozdiely medzi aritmetickými priemerami stratifikačných veličín sú štatisticky signifikantné na 95 % hladine spoľahlivosti. Z pohľadu faktora priemernej teploty vzduchu počas vegetačného obdobia (*TEVO*) je stratum 12 spodným extrémom (priemer 9,3 °C) a stratum 15 horným extrémom (priemer 17,8 °C). K uvedeným stratám prináležia aj extrémne faktora priemerného úhrnu zrážok počas vegetačného obdobia (*UZVO*). Stratum 12 je možné charakterizovať priemerom priemerného úhrnu zrážok počas vegetačného obdobia vo výške 953 mm a stratum 15 priemerom vo výške 325 mm. Pre spätné zatriedenie skusnej plochy do jedného z 15 klimaticko-stanovištných strát sa odvodila diskriminačná funkcia. Diskriminačný model má nasledovný tvar:

$$\text{DiskrimSkóre}_i = a_i + b_i \times TEVO + c_i \times UZVO \quad [1]$$

kde: *i* – klimaticko-stanovištné stratum (1–15).

Parametre diskriminačného modelu a , b , c sú uvedené v tabuľke 1. Vlastná kvantifikácia klimaticko-stanovištného strata spočíva v tom, že po zadaní konkrétnej hodnoty $TEVO$ a $UZVO$ do diskriminačného modelu sa vypočíta 15 diskriminačných skóre. Hodnotená jednotka, lokalita, skusná plocha patrí do toho klimaticko-stanovištného strata, v ktorom je hodnota diskriminačného skóre maximálna.



Obr. 1 Rozdiely medzi klimaticko-stanovištnými stratami pri priemernej teplote vzduchu počas vegetačného obdobia ($TEVO$) (A) a priemernom úhrne zrážok počas vegetačného obdobia ($UZVO$) (B). Legenda: ● – priemer, — 95 % interval spoľahlivosti

Fig. 1 Differences of mean air temperature in vegetation season ($TEVO$) (A) and mean precipitation sum in vegetation season ($UZVO$) (B) between specified climatic-site strata. Legend: ● – average, — 95% confidence interval

Tab. 1 Parametre diskriminačného modelu klimaticko-stanovištnej stratifikácie

Tab. 1 Coefficients of the discriminant model used for climatic-site stratification

¹ Klimaticko-stanovištné stratum	² Absolútny koeficient	³ $TEVO$	⁴ $UZVO$
	a	b	c
1	-886,968	25,647	2,554
2	-829,094	25,815	2,443
3	-784,986	26,319	2,344
4	-961,691	25,413	2,690
5	-1057,710	24,790	2,860
6	-736,859	26,557	2,239
7	-698,372	26,780	2,150
8	-665,603	27,369	2,056
9	-1208,960	24,560	3,100
10	-638,459	28,061	1,966
11	-1470,580	24,330	3,460

Tab. 1 Pokračovanie
Tab. 1 Continued

¹ Klimaticko-stanovištné stratum	² Absolútny koeficient	³ TEVO	⁴ UZVO
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
12	-2131,470	23,620	4,230
13	-606,896	28,522	1,869
14	-573,271	29,050	1,756
15	-524,640	29,364	1,598

¹climatic-site stratum, ²intercept, ³regression coefficient of mean air temperature in vegetation season, ⁴regression coefficient of mean precipitation sum in vegetation season

Výsledky klasifikačnej matice parametrizačného súboru sú uvedené v tabuľke 2. Z nej vyplýva, že celková úspešnosť klasifikácie klimaticko-stanovištného strata je 94,4 %. Najvyššia pravdepodobnosť správnej klasifikácie sa dosiahla pri stratách 9, 11 a 12 (100 %) a najhoršia pri strate 8 (87 %).

V ďalšej tabuľke 3 uvádzame testovacie charakteristiky modelu. Na základe Fischerovej štatistiky *F* a Willkinsovej štatistiky lambda môžeme s 99,9 % pravdepodobnosťou tvrdiť, že navrhovaný diskriminačný model je štatisticky veľmi významný. Hodnota Willkinsovej štatistiky lambda sa blíži k 0, čo indikuje, že model je vhodný. V ďalšom stĺpci tabuľky sú uvedené parciálne hodnoty Willkinsovej lambdy, na základe ktorých môžeme posúdiť príspevok jednotlivých vstupných veličín ku diskriminácii závislej veličiny. Oba použité ekologické faktory sú štatisticky významné, čo značí, že prispievajú ku diskriminácii klimaticko-stanovištného strata. Väčší vplyv má úhrn zrážok počas vegetačného obdobia.

Nasledujúca analýza je smerovaná na posúdenie vzťahu medzi vytvorenými klimaticko-stanovištnými stratami a ďalšími klimatickými a stanovištnými charakteristikami dostupnými napr. z rastrovo reprezentovaných modelov resp. stanovištných prieskumov vyjadrených lesným typom. Informácie zisťované v teréne a previazané na lesný typ boli transformované pomocou fuzzy množín podľa FABRIKU (2005). Prezentované veličiny (teplotná amplitúda vzduchu, dĺžka vegetačného obdobia, index aridity (DE MARTONE 1926)) sú v úzkej korelácii so vstupnými premennými, preto sa ich vzájomný vzťah očakával. Prezentácia polohy priemerných hodnôt uvedených premenných môže byť však zaujímavá z pohľadu charakteristiky vylíšených klimaticko-stanovištných strát. Na obrázku 2 je znázornená poloha priemerných hodnôt teplotnej amplitúdy vzduchu a dĺžky vegetačného obdobia v jednotlivých klimaticko-stanovištných stratách. Na nasledovnom obrázku 3 vidíme polohu priemerných hodnôt indexu aridity a nadmorskej výšky ako topografickej veličiny, ktorá je v úzkom vzťahu ku klimatickým veličinám.

Tab. 2 Klasifikačná matica diskriminačného modelu

Tab. 2 Classification matrix of the discriminant model

¹ Klimaticko-stanovištné stratum	² % správnej klasifikácie	³ Klimaticko-stanovištné stratum klasifikované diskriminačným modelom															⁴ Spolu
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
1	96.9	126	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	130
2	93.4	3	113	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	121
3	95.5	0	4	147	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	154
4	97.2	3	0	0	138	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	142
5	98.1	0	0	0	2	102	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	104
6	95.0	0	0	1	0	0	113	5	0	0	0	0	0	0	0	0	119
7	89.4	0	0	0	0	0	4	118	10	0	0	0	0	0	0	0	132
8	87.0	0	0	0	0	0	0	7	107	0	9	0	0	0	0	0	123
9	100.0	0	0	0	0	0	0	0	0	92	0	0	0	0	0	0	92
10	90.7	0	0	0	0	0	0	0	5	0	98	0	0	5	0	0	108
11	100.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	59	0	0	0	0	59
12	100.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0	0	0	22
13	90.7	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	88	2	0	0	97
14	95.9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	71	0	74
15	96.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	29	30
⁴ Spolu	94.4	132	120	153	141	103	120	130	122	92	114	59	22	96	74	29	1507

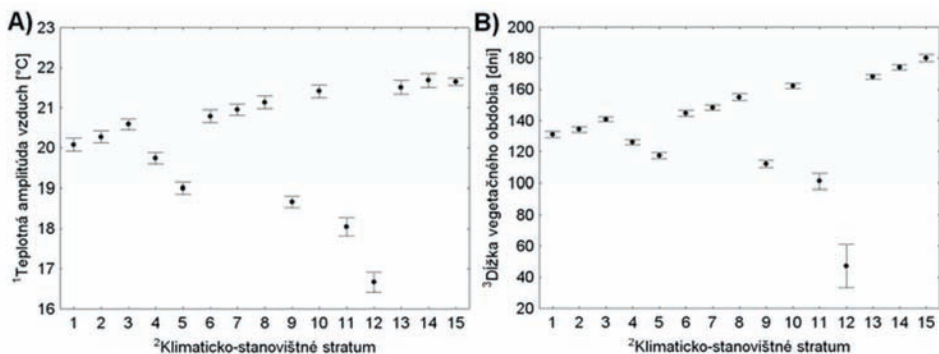
Legend: ¹climatic-site stratum, ²percentage of correct classification, ³climatic-site stratum determined with the discriminant model, ⁴sum, ■ – correctly determined climatic-site stratum

Tab. 3 Štatistická charakteristika diskriminačného modelu

Tab. 3 Statistic description of the discriminant model

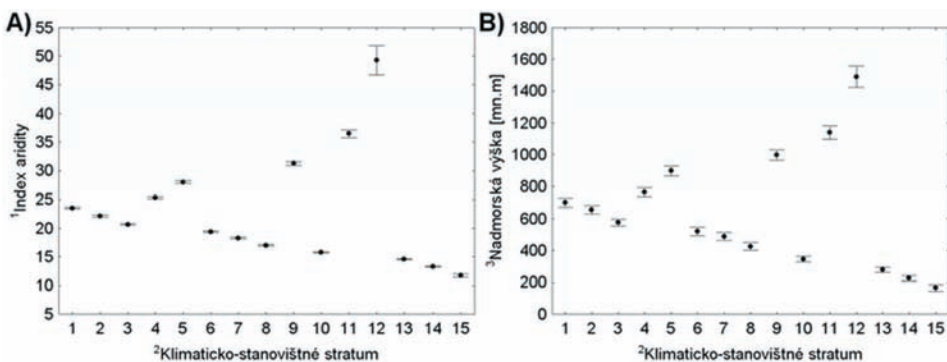
¹ Diskriminačný model			
² Počet premenných: 2		³ Počet skupín: 15	
Wilks' Lambda: 0,01461		$F_{(28,2982)} = 774,45^{***}$	
⁴ Jednotlivé vstupné premenné			
⁵ Vstupný parameter	Wilks'Lambda	Partial Lambda	$F_{(14,1491)}^{***} 99,9\%$
⁶ Priemerná teplota vzduchu počas vegetačného obdobia (TEVO) [°C]	0,017	0,840	20,2***
⁷ Priemerný úhrn zrážok počas vegetačného obdobia (UZVO) [mm]	0,185	0,079	1238,9***

¹discriminant model, ²number of variables, ³number of groups, ⁴individual independent variables, ⁵independent variable, ⁶mean air temperature in vegetation season, ⁷mean precipitation sum in vegetation season



Obr. 2 Poloha priemerných hodnôt teplotnej amplitúdy vzduchu (A) a dĺžky vegetačného obdobia (B) v jednotlivých klimaticko-stanovištných stratách. Legenda: ● – priemer, ┐ – 95 % interval spoľahlivosti

Fig. 2 Position of ¹average values of air temperature amplitude (A) and of the ³length of vegetation season (B) in specified ²climatic-site strata. Legend: ● – average, ┐ – 95 % confidence interval

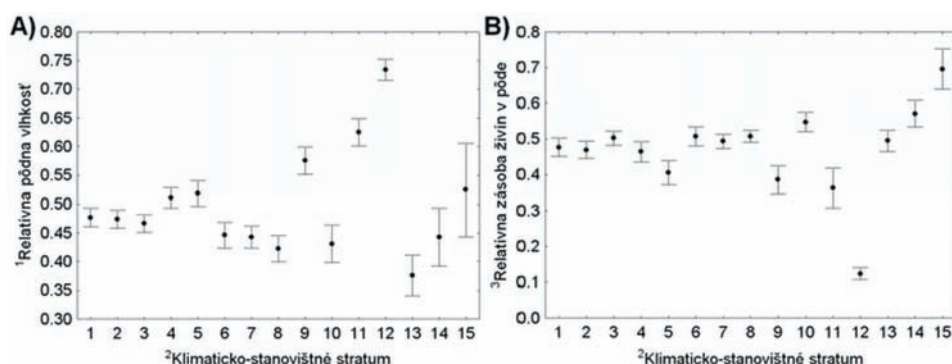


Obr. 3 Poloha priemerných hodnôt indexu aridity (De Martone 1926) (A) a nadmorskej výšky (B) v jednotlivých klimaticko-stanovištných stratách. Legenda: ● – priemer, ┐ – 95 % interval spoľahlivosti

Fig. 3 Position of average values of ¹aridity index (De Martone 1926) (A) and ³elevation (B) in specified ²climatic-site strata. Legend: ● – average, ┐ – 95% confidence interval

Na obrázku 4 môžeme vidieť polohu priemerných hodnôt transformovaných stanovištných parametrov v jednotlivých klimaticko-stanovištných stratách. Rozdiely v hodnotách relatívnej pôdnej vlhkosti a zásoby živín sú medzi jednotlivými klimaticko-stanovištnými stratami menej výrazné ako pri klimatických údajoch (Obr. 1 a 2). Najnižšia relatívna pôdna vlhkosť sa zaznamenala v strate 13, ktoré patrí z pohľadu teploty k teplejším, ale na druhej strane na zrážky chudobnejším stratám. Stratum 12 je druhým extrémom, t.j. stratom s najvyššou relatívnou pôdnou vlhkosťou, reprezentuje polohy s nadmorskou výškou okolo 1 490 m n. m., s vysokým úhrnom zrážok a nízkou teplotou vo vegetačnom období. Toto stratum je zároveň na živiny najchudobnejším klimaticko-stanovištným

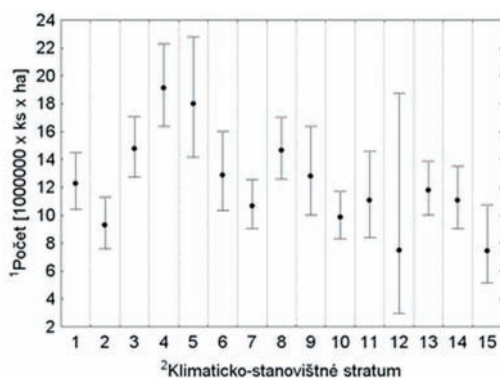
stratom. Najbohatším klimaticko-stanovištným stratom na obsah živín v pôde je stratum 15, ktoré je zároveň reprezentantom najteplejších, ale na zrážky chudobnejších polôch.



Obr. 4 Vplyv stratifikácie na priemerné hodnoty relatívnej pôdnej vlhkosti a relatívnej zásoby živín v pôde v jednotlivých klimaticko-stanovištných stratách. Legenda: ● – priemer, ┐ – 95 % interval spoľahlivosti

Fig. 4 Effect of stratification on average values of ¹relative soil moisture and ³relative nutrient content in soil of ²climatic-site strata. Legend: ● – average, ┐ – 95% confidence interval

Na obrázku 5 je prezentovaný vplyv vytvorených klimaticko-stanovištných strát na východiskovú hustotu jedincov mladých rastových fáz (výška nad 1.3 m a hrúbka $d_{1,3}$ do 7 cm). Z obrázku vyplýva, že stratá 12 a 15 vykazujú najnižšie východiskové hustoty. Ide o stratá, ktoré reprezentujú extrémny, jednak teplotný, zrážkový ale aj trofický (zásoba živín). Najvyššiu hustotu vykazujú stratá 4 a 5, ktoré z pohľadu klimatických a stanovištných charakteristík reprezentujú stanovištia priemerných vlastností. Určitým spôsobom sa tu prejavuje tzv. efekt podkovy (arch effect). Vcelku je možné konštatovať, že signifikantné rozdiely v počiatkovej hustote jedincov mladých rastových fáz nastali vplyvom vytvorených klimaticko-stanovištných strát v 33 prípadoch zo 105 možných vzájomných kombinácií.



Obr. 5 Vplyv stratifikácie na východiskovú hustotu (počet) jedincov s výškou nad 1,3 m a hrúbkou $d_{1,3}$ do 7 cm na hektár v jednotlivých klimaticko-stanovištných stratách.

Legenda: ● – priemer, ┐ – 95 % interval spoľahlivosti

Fig. 5 Stratification impact on the initial per hectare ¹density (number) of trees higher than 1.3 m and with a diameter at breast height below 7 cm in individual ²climatic-site strata.

Legend: ● – average, ┐ – 95% confidence interval

5. DISKUSIA

Z ekologických štúdií je známe, že hustota lesného porastu je podobne ako viaceré rastové veličiny lesného porastu previazaná s kvalitou stanovišťa (REINEKE 1933, STERBA a MONSERUD 1993). Stanovištno-klimatické premenné sú implementované vo viacerých rastových simulátoroch. Napr. rastový simulátor PROGNAUS (STERBA 1995) využíva vo svojich submoduloch ako nezávislé premenné nadmorskú výšku, sklon, expozíciu, hrúbku humusu, hĺbku pôdy, reliéf, vlhkosť pôdy, lesný typ, pôdny typ, rastovú oblasť. V stromovom rastovom simulátore SILVA 2.2 (PRETZSCH *et al.* 2002) sú rastové funkcie špecifikované na základe troch agregovaných ekologických faktorov („teplo“, „voda“, „živiny“). Obdobne aj náš domáci stromový rastový simulátor SIBYLA (FABRIKA 2005) je konštruovaný na podobnom princípe ekologickej bonitácie ako simulátor SILVA 2.2. Klíma a stanovište ovplyvňujú nielen samotný rast a produkciu lesného ekosystému, ale aj proces jeho regenerácie. Z toho dôvodu sa so stanovištnými a klimatickými charakteristikami uvažuje nielen v modeloch rastu stromu resp. lesa (vid'. napr. PRETZSCH *et al.* 2002), ale aj v modeloch zmladenia. Častou vstupnou veličinou, ktorá v modeloch zmladenia charakterizuje stanovište, je nadmorská výška implementovaná napr. autormi LEDERMANN *et al.* (2001) alebo TRASOBARES *et al.* (2004), pretože ide o dostupnú a ľahko zisiteľnú informáciu. V nami navrhovanom modeli s nadmorskou výškou priamo neuvažujeme, keďže ide o nepriamu veličinu úzko prepojenú na klimatické faktory, čo dokumentuje aj obr. 3B, kde je zrejmé, že jej vplyv je už zakomponovaný v klimaticko-stanovištných stratách. Podobne ani SCHWEIGER a STERBA (1997) nezakomponovali do svojho modelu dorastu nadmorskú výšku, pretože využívajú diskkrétne veličiny charakterizujúce rastové oblasti a vegetačné typy, ktoré do modelu vstupujú ako dummy premenné. Podobný prístup zvolili aj EK *et al.* (1996), ktorí vo svojom systéme deliacich tabuliek využili tzv. lesné typy pokrytia špecifikované pre USA a Kanadu. Obe tieto klasifikácie predstavujú analógiu k v tejto práci navrhnutým klimaticko-stanovištným stratám. Kým vzťahy medzi parametrami hustoty prirodzeného zmladenia a klimaticko-stanovištnými parametrami sú v globále veľmi slabé, v určitých úsekoch pozdĺž gradienta klíma-stanovište sú tieto vzťahy tesnejšie, majú však rôzny zmysel a priebeh. Tvorba klimaticko-stanovištných strát teda predstavuje doplnkovú modifikáciu ekologickej bonitácie, ktorá vyplynula z analýz pri konštrukcii modelu prirodzenej obnovy.

Hoci stratifikácia bola založená len na dvoch parametroch, t.j. teplote a zrážkach počas vegetačného obdobia, ďalšie analýzy potvrdili, že vytvorené stratá odrážajú rozdiely aj v ďalších klimatických a stanovištných charakteristikách (obr. 2 až 4). Na základe týchto výsledkov môžeme teda tvrdiť, že vyvíjaný model zmladenia bude vďaka stratifikácii stanovištne citlivý.

6. ZÁVER

Predkladaná práca prezentuje metodiku tvorby klimaticko-stanovištných strát a ich vzťahu k rastovej veličine lesného porastu – východiskovej hustote jedincov mladých rastových fáz. Klimaticko-stanovištné straty sú vytvorené na podklade dvoch hlavných priamych ekologických veličín a to na priemernej teplote vzduchu počas vegetačného obdobia (apríl až september) a priemernom úhrne zrážok počas vegetačného obdobia (apríl až september). Analýzy poukázali, že kvantifikácia hustoty jedincov mladých rastových fáz na základe vytvorených klimaticko-stanovištných strát je senzitívna k ekologickým podmienkam prostredia.

Pod'akovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- ASSMANN, E., FRANZ, F. 1963: Vorläufige Fichten-Ertragstafel für Bayern. Institut für Ertragskunde der Forstlichen Forschungsanstalt, München, 104 s.
- BORGON, M. 2003: Odhad klimatických a stanovištných charakteristík ako podklad pre ekologickú bonitáciu lesných porastov. Technická univerzita Zvolen, Diplomová práca, 71 s.
- BOTKIN, D.B., JANAK, J.F., WALLIS, J.R. 1972: Some ecological consequences of a computer model of forest growth. *Journal of Ecology*, 60, s. 849–872.
- BUOL S.W., SOUTHARD R.J., GRAHAM R.C., MCDANIEL P.A. 2003: Soil genesis and classification. 5th ed. Iowa State Press, Blackwell Publishing Company.
- COOLEY W.W., LOHNES P.R. 1971: Multivariate data analysis. Wiley, New York.
- DE MARTONE, E., 1926: Aréisme et indice d'aridité. *Cr Séanc Acad Sci Paris* 182: 1395–1398.
- ĎURSKÝ, J., MINĎÁŠ, J., KONÓPKA, M. 2002: Klimatické rastre pre ekologickú bonitáciu. Nepublikovaný výsledok geografickej analýzy v prostredí IDRISI32 v rámci vedeckej spolupráce.
- EICHHORN, F. 1904: Bezirungen zwischen Bestandshöhe und Bestandsmasse. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 80, p. 45–49.
- EK, A.R., ROBINSON A.P., RADTKE P.J., WALTERS D.K. 1996: Regeneration imputation models and analysis for forests in Minnesota. Staff Paper Series No. 115, St.Paul, Minnesota. 47 pp.
- FABRIKA, M. 2005: Simulátor biodynamiky lesa SIBYLA. Konceptia, konštrukcia a programové riešenie. Habilitačná práca. Technická univerzita vo Zvolene, 238 s.
- FABRIKA, M., MERGANIČ, J., MERGANIČOVÁ, K. 2009: Model hustoty prirodzeného zmladenia pre účely stromového rastového simulátora. *Acta Facultatis Forestalis, LI*, 3, 115–127.
- GEHRHARDT, E. 1921: Eine neue Kiefern-Ertragstafel. *Allg. Forst. Jagdztg.* 97, 145–156.
- HALAJ, J. 1978: Výškový rast a štruktúra porastov, Slovenská akadémia vied v Bratislave, 284 s.
- HALAJ, J., ŘEHÁK, J. 1979: Rastové tabuľky hlavných drevín ČSSR. Bratislava, Príroda, 352 s.
- HANČINSKÝ, L. 1972: Lesné typy Slovenska. *Príroda*, Bratislava 307 s.
- HUBERTY C.J. 1994: Applied discriminant analysis. Wiley, New York.
- LEDERMANN, T.H., GOLSER, M., MOSER, M., STERBA, H., 2001: Validierung eines Einwuchsmodells aus den Daten der Österreichischen Waldinventur 1981–1996. *Cbl. f. d. ges. Forstw.*, 119, 1, p. 40–76.
- PRESSLER, M. 1870: Forstliche Ertrags- u. Bonitirungstafeln nach Cubicmeter pro Hectar. Baumgärtner'sche Buchhandlung, Leipzig.
- PRETZSCH, H., BIBER, P., DURSKEY, J. 2002: The single tree-based stand simulator SILVA: construction, application and evaluation. *For. Ecol. Manage.* 162, s. 3–21.

- REINEKE, L.H. 1933: Perfecting a stand density index for even-aged forests. *Journal of Agricultural Research*, 46 (7): 627–638.
- SHUGART, H.H., WEST, D.C. 1977: Development of an Appalachian deciduous forest succession model and its application to assessment of the impact of the chestnut blight. *Journ. Environ. Manag.*, 5: 161–179.
- SCHWEIGER J., STERBA H. 1997: A model describing natural regeneration recruitment of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Austria. *Forest Ecology and Management* 97: 107–118.
- SKOVSGAARD, J.P., VANCLAY, J.K. 2008: Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry*, 81 (1): 13–31.
- STATSOFT, INC. 2004: STATISTICA Cz [Softwarový systém na analýzu dat], verze 7. [Www.StatSoft.Cz](http://www.StatSoft.Cz)
- STERBA, H. 1995: PROGNAUS – ein absandsunabhängiger Wachstumssimulator für ungleichaltrige Mischbestände. DVFF – Sektion Ertragskunde, Joachimstahl, s. 173–183.
- STERBA, H., MONSERUD, R.A. 1993: The Maximum Density Concept Applied to Uneven-Aged Mixed-Species Stands. *Forest Science*, 39 (3): 432–452.
- ŠMELKO Š., MERGANIČ J., ŠEBEŇ V., RAŠI R., JANKOVIČ J. 2006: Národná inventarizácia a monitoring lesov Slovenskej republiky 2005-2006. Metodika terénneho zberu údajov (Pracovné postupy – 3. Doplnená verzia). Národné lesnícke centrum Zvolen, s. 129 s., ISBN: 80-88852-98-2.
- TRASOBARES A., PUKKALA T., MIINA J. 2004: Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. In catalonia, north-east Spain. *Annals of Forest Science* 61: 9–24.
- WIEDEMANN, E. 1951: Ertragskundliche und waldbauliche Grundlagen der Forstwirtschaft. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- ZLATNÍK, A. 1978: Lesnická fytoecologie, Státní zemědělské nakladatelství, Praha, 495 s.
-

Adresa autorov:

Doc. Ing. Marek Fabrika, PhD.
Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
e-mail fabrika@vsld.tuzvo.sk

Ing. Ján Merganič, PhD.
Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
e-mail: merganic@vsld.tuzvo.sk

Tvorba klimatickостanovištných strát pre účely tvorby modelu hustoty prirodzeného zmladenia

Abstrakt

Práca prezentuje metodiku tvorby klimaticko-stanovištných strát a ich vzťahu k východiskovej hustote jedincov mladých rastových fáz kvantifikovanej podľa Reinekeho pravidla. Klimaticko-stanovištné stratá sú vytvorené na podklade dvoch hlavných priamych ekologických veličín a to na priemernej teplote vzduchu počas vegetačného obdobia (apríl až september) a priemernom úhrne zrážok počas vegetačného obdobia (apríl až september) z podkladov rastovo reprezentovaných modelov. Na tvorbu strát sa použila zhluková a diskriminačná analýza. Celkovo bolo vytvorených 15 klimaticko-stanovištných strát. Celková úspešnosť vytvoreného diskriminačného modelu pre klasifikáciu klimaticko-stanovištného strata je 94,4 % (pohybuje sa od 87 do 100 %). Vytvorené stratá majú relatívne tesnú väzbu aj k ďalším klimatickým a stanovištným veličinám (teplotná amplitúda vzduchu, dĺžka vegetačného obdobia, index aridity, nadmorská výška, relatívna pôdna vlhkosť, relatívna zásoba živín v pôde). Analýzy poukázali, že kvantifikácia hustoty jedincov mladých rastových fáz na základe vytvorených klimaticko-stanovištných strát je citlivá k ekologickým podmienkam prostredia.

Kľúčové slová: zhluková analýza, diskriminačný model, rastový simulátor, SIBYLA, model prirodzeného zmladenia

MODEL HUSTOTY PRIRODZENÉHO ZMLADENIA PRE ÚČELY STROMOVÉHO RASTOVÉHO SIMULÁTORA

Marek F A B R I K A – Ján M E R G A N I Č
– Katarína M E R G A N I Č O V Á

Fabrika, M., Merganič, J., Merganičová, K.: Natural regeneration density model developed for the purposes of the individual-tree growth simulator. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51 (3): 125–137, 2009.

Models of natural regeneration represent an important amendment to complex growth models. They allow making prognoses behind one production cycle of a forest, and simulating the development of natural and virgin forests. This work deals with modelling natural regeneration density, which is the first step towards the complex model of natural regeneration. The model will be a part of the individual-tree growth simulator SIBYLA. The model was developed using the data from National forest inventory and monitoring of the Slovak Republic (NFIM SR), and using the climatic rasters with the pixel of size of 90×90 m, which capture spatial distribution of all important climatic characteristics. The model itself consists of an empirical part, which simulates regeneration density (number per hectare) at a stand level, and of a process-based part, which simulates seed production and seedling germination at a tree level. The empirical part of the model is based on the data of NFIM SR and climatic rasters, and simulates regeneration density for individual tree species in relation to quadratic mean diameter of the parent stand and its crown coverage. In addition, the model is site-specific. The process-based part of the model is based on seeding functions and fuzzy logic. It is based on the prediction of seed yield of individual trees in relation to such characteristics as seed purity, seed quality, germination capacity, absolute weight of seeds, seed production per an adult tree, etc. The production is further modified with regulators and reduction factors, which describe other conditions necessary for the germination, survival, and the establishment of the next generation. In the next step, empirically-derived regeneration density is reduced in relation to the ratio of individual tree species to the total production of all individuals estimated from the process-based model.

Key words: regeneration density, empirical model, process model, growth simulator, SIBYLA

1. ÚVOD

Ľudia sa od pradávna snažili pochopiť prírodu a jej chovanie. Významným výsledkom snahy o pochopenie rastu lesa boli rastové tabuľky. S rozvojom metód matematického modelovania a výkonnosti výpočtovej techniky sa modely lesa postupne zdokonaľujú. Od vývoja celého porastu sa postupne prechádza na rast jednotlivých stromov, ba dokonca aj na rast jednotlivých orgánov stromov. Potreba takýchto modelov sa javí

o to aktuálnejšou, že sa človek začína zaujímať viac o lesné ekosystémy, ktoré sa svojou štruktúrou blížia k prirodzeným a teda aj zložitejším a ekologicky stabilnejším. Od rovnorodých monokultúr sa prechádza na zmiešané, horizontálne a vertikálne zložitejšie formované lesné porasty. Na takéto lesné porasty už nevystačia klasické rastové tabuľky. Preferovanie zložitejších porastových štruktúr a snahy o prírode blízke koncepty hospodárenia vedú odborníkov k tvorbe a vývoju modelov, ktoré umožnia modelovať a prognózovať vývoj takýchto lesných ekosystémov. Vývoj modelov začal v 60-tych rokoch minulého storočia. V súčasnosti existuje viacero typov modelov, ktorých použitie závisí od časovej a priestorovej úrovne (stromové modely, procesné modely, sukcesné modely atď.). Jeden takýto model sa vyvíja aj na Technickej univerzite vo Zvolene: stromový rastový simulátor SIBYLA (FABRIKA 2005).

Keďže modelovanie zložitých porastových štruktúr a procesov nie je jednoduché, rastový simulátor je zvyčajne zložený z viacerých submodulov, ktoré medzi sebou komunikujú na základe predom definovaných vzťahov. Stromový rastový simulátor SIBYLA už v sebe integruje viaceré submodely (prírastkový model, korunový model, konkurenčný model, mortalitný model, prebierkový model). Model prirodzeného zmladenia je ďalší dôležitý submodul potrebný pre simuláciu a prognózu zložitých lesných ekosystémov a to hlavne z nasledovných dôvodov:

- model umožní simulovať rastové prognózy lesných ekosystémov aj na obdobie dlhšie ako jeden produkčný cyklus lesa,
- umožní prognózovanie vývoja porastových štruktúr a hospodárskych foriem, ktoré sú založené na prirodzenom zmladení – prírode blízkom pestovaní lesa (podrastové formy, výberkové lesy),
- umožní simulovať a prognózovať vývoj prírodných lesov – pralesov.

V súčasnosti sa model prirodzeného zmladenia pre stromový rastový simulátor SIBYLA vyvíja ako jedna z piatich riešených úloh v rámci aktivity 1.3 Modelovanie rastových procesov lesných ekosystémov projektu Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy. Cieľom predkladaného článku je predstaviť model hustoty prirodzeného zmladenia ako prvého čiastkového výstupu projektu.

2. ROZBOR PROBLEMATIKY

Potrebu simulovať fázu regenerácie porastu po rubnej ťažbe si uvedomovali vedci modelári už v 70. rokoch minulého storočia, kedy boli navrhnuté prvé modely zmladenia (MONSERUD a EK 1977). Počas viac ako 30 rokov bolo vyvinutých viacero modelov od najjednoduchších tabelárnych, ktoré poskytujú informácie o rozdelení zmladenia medzi jednotlivé dreviny a hrúbkové stupne (EK *et al.* 1996), až po komplexné modely simulujúce čiastkové procesy vrátane produkcie semena, klíčenia, mortality a konkurencie materského porastu (MONSERUD a EK 1977). Z hľadiska počiatku simulovania zmladenia sa rozlišuje niekoľko typov modelov (MIINA *et al.* 2006):

- modely regenerácie (regeneration models) – simulujú vývoj zmladenia od semena (napr. LEXER a HÖNNINGER 2001),
- modely založenia zmladenia (regeneration establishment models) – začínajú so simuláciou v čase zabezpečenej obnovy (napr. SCHWEIGER a STERBA 1997),

- modely dorastu (ingrowth models) – modely s počiatkom v čase, keď stromčeky mladšej generácie dosiahli určitú predom definovanú hranicu, napr. prsnú výšku 1.3 m,
- modely dorastu do hlavného porastu (recruitment models) – modely, ktoré simulujú počet a dimenzie nových stromov, ktoré vstupujú do najmenej triedy hlavného porastu, napr. prekročia hrúbku 7 cm (napr. TRASOBARES *et al.* 2004).

Tradičné modely zmladenia využívajúce štatistický prístup simulovania sú založené na veľmi veľkých databázach, pretože údaje o zmladení sa vyznačujú vysokou variabilitou (EK *et al.* 1996). Alternatívne prístupy k regresným technikám predstavujú neparametrické metódy (deliace tabuľky – imputation tables podľa EKA *et al.* 1996, metódy kNN, kMSN, t.j. k-najbližších susedov), neurónové siete (HASENAUER a MERKL 2001) a rozhodovacie stromy (KINDERMANN *et al.* 2002).

Samotný model zmladenia sa zvyčajne skladá z čiastkových submodelov, ktoré simulujú jednotlivé procesy (produkciu semien, klíčenie), resp. jednotlivé veličiny (pravdepodobnosť zmladenia, počet a dimenzie nových jedincov) v závislosti od stanovištných (nadmorská výška, sklon, skeletnosť), klimatických (teplota) a porastových (hustota porastu, stredná hrúbka) charakteristík. Úroveň detailnosti a vstupy sa medzi jednotlivými modelmi líšia v závislosti od dostupných informácií a účelu, pre ktorý boli modely vyvinuté (HYPPONEN *et al.* 2005).

3. MATERIÁL

Konštrukcia modelu hustoty prirodzeného zmladenia vychádza z databázy údajov Národnej inventarizácie a monitoringu lesov SR (NIML SR). NIML SR bola realizovaná v rokoch 2005–2006 ako výberová reprezentatívna metóda s komplexným zisťovaním informácií na pravidelnej sieti trvalých inventarizačných plôch (IP) v sponu 4×4 km na celom území SR (ŠMELKO *et al.* 2006). Celkový počet IP bol 3071 a z toho na 1419 IP sa nachádzal les.

Pre účely tejto práce sa využili prevažne údaje o stromoch, obnove lesa, poraste a stanovišti zisťované v zmysle pracovných postupov pre NIML SR (ŠMELKO *et al.* 2006). Tieto údaje boli zisťované na troch druhoch inventarizačných plôch: A – základná inventarizačná plocha (konštantný kruh o výmere $p = 500 \text{ m}^2$ s polomerom $r = 12,62 \text{ m}$), slúžila pre zisťovanie stanovištných, porastových a ekologických charakteristík a pre inventarizáciu mŕtveho ležiaceho dreva a pňov, B – dva konštantné kruhy pre inventarizáciu stromov s hrúbkou $d_{1,3} \geq 7 \text{ cm}$ (s kôrou), a to B_1 – veľký kruh pre stromy s $d_{1,3} \geq 12 \text{ cm}$, polomer $r = 12,62 \text{ m}$ ($p = 500 \text{ m}^2$), ktorý je totožný s kruhom A a B_2 – malý kruh pre stromy s $d_{1,3} \geq 7 \text{ cm}$ a $< 12 \text{ cm}$, polomer $r = 3 \text{ m}$ ($p = 28,26 \text{ m}^2$) a napokon C – variabilný obnovný kruh pre inventarizáciu náletu, nárastov, kultúr a mladín s výškou od 0,1 m a hrúbkou $d_{1,3} < 7 \text{ cm}$ (vrátane kôry), ktorého „optimálna“ veľkosť (výmera p a polomer r) sa zvolila individuálne na každom stanovisku podľa konkrétnej hustoty (sponu) jedincov. V prípade silnej heterogenity IP spôsobenej napr. hranicou les/neles, les/bezlesie, rozdielnym rastovým stupňom v rámci IP a podobne, sa IP rozčlenila na menšie homogénnejšie časti – subplochy (ŠMELKO *et al.* 2006). Pre účely konštrukcie modelu prirodzeného zmladenia sa použili údaje, ktoré sa viažu na subplochy a ich celkový počet je 1507.

Pre účely konštrukcie modelu hustoty prirodzeného zmladenia pre stromový rastový simulátor SIBYLA sa stromy s výškou nad 1,3 m a hrúbkou do 7 cm zaradili do kategórie „prirodzené zmladenie“. Pre analýzy vzťahov medzi porastovými údajmi a stanovištno-klimatickými údajmi boli použité jednak stanovištné informácie z IP transformované pomocou fuzzy množín podľa FABRIKU (2005) a jednak korigované klimatické rastre (ĎURSKÝ *et al.* 2002) s rozlišovacím obrazovým prvkom 90×90 m pre všetky potrebné klimaticko-stanovištné premenné (počet dní v roku s priemernou dennou teplotou vyššou ako 10°C , ročná teplotná amplitúda, priemerná teplota v mesiacoch apríl až september a priemerný úhrn zrážok za mesiace apríl až september) podľa FABRIKU (2005).

3. METODIKA

Dôležitým východiskovým submodelom modelu prirodzeného zmladenia je submodel hustoty zmladenia. Je skonštruovaný na podklade matematického vzťahu definovaného REINEKEM (1933), kde počet stromov závisí od strednej hrúbky porastu (d_g):

$$N = e^a \cdot d_g^{-1,605} \quad (1)$$

Hodnota e^a vyjadruje maximálny východiskový počet jedincov a exponent $-1,605$ vyjadruje sklon Reinekeho krivky. Reineke svoje pravidlo použil pre odvodenie maximálnej hustoty plne zapojených porastov pri 100 % zastúpení dreviny. Pri aplikácii tohto pravidla na údaje z NIML SR bolo potrebné prepočítať údaje o stromoch na plne zapojený porast pri 100 % zastúpení dreviny. Ako najvhodnejšia veličina na prepočet sa ukázala stanovisková plocha stromu (*SPS*), ktorá je aplikovateľná aj pre jedince, ktoré ešte nemajú prsnú hrúbku, t.j. pre jedince s výškou do 1,3 m (MERGANIČ 2007). Model stanoviskovej plochy jednotlivého stromu bol odvodený na podklade údajov získaných v rámci NIML. Model je zatiaľ generalizovaný pre kategóriu ihličnatých a listnatých drevín. Pri jedincoch s výškou do 1,3 m je stanovisková plocha stromu funkciou výšky a pri jedincoch s výškou nad 1,3 m je stanovisková plocha stromu funkciou hrúbky $d_{1,3}$. Stanovisková plocha stromu udáva plochu dreviny pri plnom zápoji a 100 % zastúpení. Počet stromov na hektár pre *i*-ty druh dreviny na subploche IP sa určí nasledovne:

$$N \cdot ha_i^{-1} = \frac{10000}{\sum_{j=1}^{n_i} SPS_i} \cdot n_i \quad (2)$$

kde: n – počet stromov (štandardizovaný na rovnakú výberovú reprezentatívnosť),
 SPS – stanovisková plocha stromu.

Pri aplikácii rovnice (1) na upravené údaje z NIML je jedinou neznámou exponent a . Úpravou rovnice (1) do tvaru $a = \ln \left(N \cdot d_g^{\frac{321}{200}} \right)$ sa vyčítali hodnoty parametra a pre každú subplochu a drevinu. Za N sa dosadil počet stromov príslušnej dreviny s výškou nad 1,3 m

a hrúbkou do 7 cm na hektár ($N \cdot ha^{-1}$), za d_g stredná hrúbka (kvadratický priemer) materského porastu (stromy s hrúbkou $d_{1,3} \geq 7$ cm).

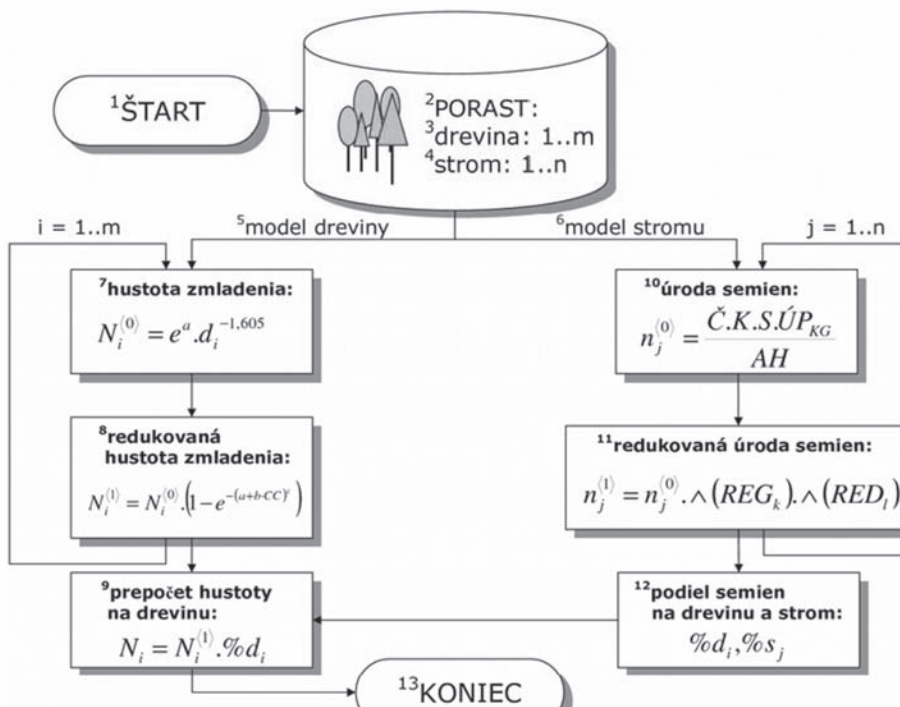
Je všeobecne známe, že hustota porastu i zmladenia značne závisí okrem iného aj od bonity stanovišta. Na bonitu stanovišta vplývajú prevažne klimatické faktory ako zrážky a teplota. Využitím údajov z korigovaných klimatických rastrov, a to priemernej teploty v mesiacoch apríl až september a priemerného úhrnu zrážok za mesiace apríl až september (najvplyvnejšie faktory), sa vykonala klasifikácia IP do 15 klimaticko-stanovištných kategórií pomocou zhlukovej a diskriminačnej analýzy. Vyhľadáním maximálnej hodnoty parametra a v možných kombináciách drevina a klimaticko-stanovištná kategória sa stanovili maximálne východiskové hustoty jedincov s výškou nad 1,3 m a hrúbkou do 7 cm. Pre posúdenie štatistickej významnosti a vplyvu klimaticko-stanovištnéj kategórie na maximálne hustoty jedincov zmladenia príslušnej dreviny sa simuláciou na počítači odvodili chyby maximálnych hodnôt, ktoré závisia od rozsahu výberu (počtu stromov v kombinácii).

Ďalším významným faktorom ovplyvňujúcim hustotu prirodzeného zmladenia je zápoj porastu. Za týmto účelom sa vybralo 36 typických homogénnych IP (prevažne dvojetážové), ktoré reprezentovali plochy so zápojom 0 až 10 (zápoj stromov s hrúbkou $d_{1,3} \geq 7$ cm). Model redukcie zápoja je vzhľadom na povahu empirického materiálu konštruovaný ako drevinovo nešpecifický. Počet stromov prirodzeného zmladenia sa vyjadril ako index k maximálnej hodnote hustoty pri nulovom zápoji. Pre analýzu vzťahu medzi indexom hustoty a zápojom sa použila nelineárna regresia.

4. VÝSLEDKY

Výsledné modelovanie hustoty prirodzeného zmladenia je znázornené vývojovým diagramom na obrázku 1. Model sa skladá z dvoch vetiev. Prvá vetva vyjadruje model na úrovni dreviny a druhá vetva na úrovni stromu.

Na úrovni dreviny sa modeluje najskôr maximálna hustota prirodzeného zmladenia na hektár. Hustota vyjadruje maximálny počet jedincov prirodzeného zmladenia s výškou jedincov nad 1,3 m a hrúbkou do 7 cm. Hustota prirodzeného zmladenia $N_i^{(0)}$ je závislá na strednej kvadratickej hrúbke dreviny materského porastu (d_i). Ako bolo uvedené v časti metodika, koeficient a je odvodený pre každú vyskytujúcu sa kombináciu drevina a klimaticko-stanovištná kategória (KSK), pomocou ktorého sa definovali maximálne hustoty jedincov na hektár. Celkovo sa maximálna hustota definovala pre 127 kombinácií tvorených 29 druhmi drevín (*Abies alba*, *Acer campestre*, *Acer negundo*, *Acer platanoides*, *Acer pseudoplatanus*, *Alnus glutinosa*, *Alnus incana*, *Betula pendula*, *Carpinus betulus*, *Fagus sylvatica*, *Fraxinus excelsior*, *Fraxinus ornus*, *Larix decidua*, *Padus racemosa*, *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Populus tremula*, *Prunus avium*, *Prunus domestica*, *Pyrus pyraeaster*, *Quercus cerris*, *Quercus petraea*, *Robinia pseudoacacia*, *Salix caprea*, *Salix fragilis*, *Sorbus aria*, *Sorbus aucuparia*, *Tilia cordata*, *Ulmus minor*). V tabuľke 1 uvádzame hodnoty parametra a Reinekeho funkcie pre drevinu buk (*Fagus sylvatica*) a smrek (*Picea abies*) v jednotlivých KSK.



Obr. 1 Vývojový diagram modelu hustoty prirodzeného zmladenia.

Fig. 1 Algorithm of the model simulating natural regeneration density

¹start, ²forest stand, ³tree species, ⁴tree, ⁵tree species model, ⁶tree model, ⁷regeneration density, ⁸reduced regeneration density, ⁹calculation of tree species regeneration density, ¹⁰seed yield, ¹¹reduced seed yield, ¹²percentage of seed yield per tree species and per tree, ¹³end

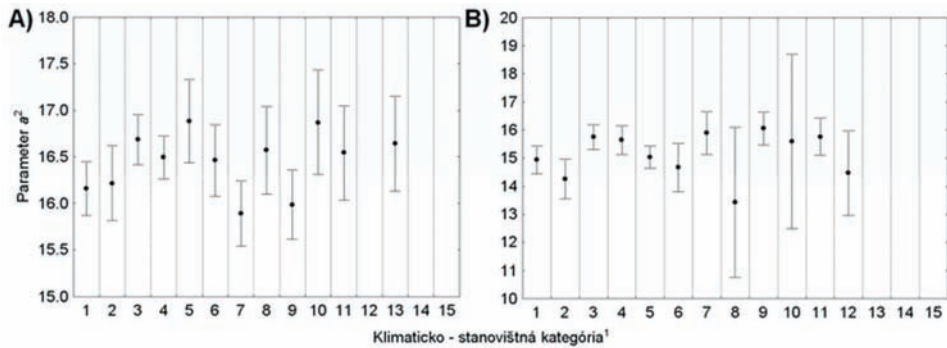
Pri drevine buk sa východisková maximálna hustota na hektár pohybuje v rozpätí hodnôt od 21 452 496 *ks.ha⁻¹* (KSK 5) do 7 959 388 *ks.ha⁻¹* (KSK 7). Pri drevine smrek je toto rozpätie užšie, keď sa maximálna hustota pohybuje medzi hodnotami 9 402 371 *ks.ha⁻¹* (KSK 9) a 678 444 *ks.ha⁻¹* (KSK 8). Vplyv jednotlivých KSK na maximálny východiskový počet jedincov je vidieť na obrázku 2.

Tab. 1 Maximálne hodnoty parametra a Reinekeho funkcie pre drevinu buk (*Fagus sylvatica*) a smrek (*Picea abies*) v jednotlivých klimaticko-stanovištných kategóriách

Tab. 1 Maximum values of the coefficient a of Reineke's function for two tree species: common beech (*Fagus sylvatica*), and Norway spruce (*Picea abies*) in individual climatic-site categories

Klimaticko-stanovištná kategória (KSK) ¹	<i>Fagus sylvatica</i>			<i>Picea abies</i>		
	Parameter a^2	Počet na ha ³	Počet subplôch ⁴	Parameter a^2	Počet na ha ³	Počet subplôch ⁴
1	16,16	10406951	19	14,93	3055725	8
2	16,22	11052226	12	14,26	1554672	5
3	16,68	17615779	22	15,75	6903363	10
4	16,49	14573290	27	15,64	6206168	8
5	16,88	21452496	11	15,03	3383976	11
6	16,46	14073559	13	14,67	2345602	4
7	15,89	7959388	14	15,9	8006544	5
8	16,57	15706186	10	13,43	678444	1
9	15,99	8775384	13	16,06	9402371	7
10	16,87	21188557	8	15,59	5869989	1
11	16,54	15276760	9	15,76	6997441	6
12				14,46	1911572	2
13	16,64	16904337	9			

¹climatic-site category, ²coefficient a , ³number per hectare, ⁴number of subplots



Obr. 2 Vplyv klimaticko-stanovištnej kategórie na parameter a Reinekeho funkcie pre drevinu buk (*Fagus sylvatica*) (A) a drevinu smrek (*Picea abies*) (B)

Fig. 2 Relationship between the climatic-site category and the coefficient a of Reineke's function for two tree species: common beech (*Fagus sylvatica*) (A) and Norway spruce (*Picea abies*) (B)

¹climatic-site category, ²coefficient a

Ako je vidieť z obrázka 2, vplyv *KSK* na maximálne východiskové hustoty jedincov sú výraznejšie pri drevine buk. Signifikantné rozdiely sú hlavne medzi *KSK* 7 a 3, 4, 5, 10, ďalej medzi *KSK* 9 a 3, 5. Pri drevine smrek sa rozdiel zaznamenal medzi *KSK* 2 a 3, 4, 7, 8, 11, ďalej medzi *KSK* 5 a 9.

V druhom kroku sa redukuje hustota zmladenia na základe zápoja materského porastu (*CC*):

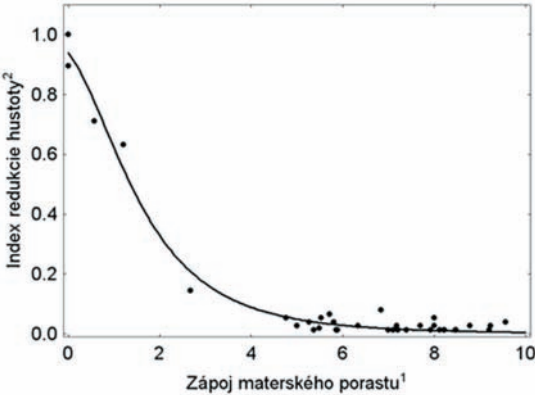
$$N_i^{(1)} = N_i^{(0)} \cdot \left(1 - e^{-(a + b \cdot CC)^c} \right) \quad (3)$$

So zvyšovaním zápoja materského porastu hustota zmladenia výrazne klesá (Obr. 3). Model vyjadruje relatívnu redukciu hustoty zmladenia v závislosti na percentuálnom zápoji materského porastu vypočítaného podľa vzťahu CROOKSTON a STAGE (1999). Štatistické charakteristiky parametrov modelu sú uvedené v tabuľke 2.

Tab. 2 Parametre nelineárneho modelu redukcie hustoty zmladenia
Tab. 2 Coefficients of the non-linear model reducing regeneration density

Parameter ¹	Odhad hodnoty parametra ²	Chyba odhadu parametra ³	Studentov test ⁴ t_{32}	Hraničná hladina významnosti ⁵
a	0,83646211	0,07	12,28	0,000***
b	0,16788563	0,07	2,25	0,032*
c	-5,78913678	2,21	-2,62	0,013*

¹Coefficient, ²Estimated value of the coefficient, ³Error of coefficient estimation, ⁴Student t-test, ⁵significance level



Obr. 3 Priebeh modelu redukcie hustoty zmladenia v závislosti od zápoja materského porastu
Fig. 3 Performance of the model of the reduction of regeneration density in relation to crown coverage of the parent stand materského porastu

¹crown coverage of the parent stand, ²density reduction index

Na úrovni stromu sa najprv modeluje plná úroda semien podľa vzťahu:

$$n_j^{(0)} = \frac{\check{C}.K.S.\dot{U}P_{KG}}{AH} \quad (4)$$

kde $\check{C}$ je čistota semien v %, K je klíčivosť semien v %, S je sypavosť semien v %, AH je absolútna hmotnosť 1000 kusov semien v gramoch a $\dot{U}P_{KG}$ je množstvo kilogramov plodov na 1 dospelý plne zrelý strom pri 100% úrode. Hodnoty sú závislé od dreviny a sú prevzaté z publikácií ŠMELKOVÁ (2003), HOFFMANN *et al.* (2005) a podľa SCHREIBERA, MESSERA, SIEGLA a MICHAELISA (in ROHMEDER 1972). Plná úroda semien každého stromu je následne regulovaná pomocou regulátorov úrody semien (REG_k) a redukovaná pomocou reduktorov hustoty zmladenia (RED_j). Bolo využitých 5 regulátorov a 5 reduktorov.

Regulátory úrody semien majú hodnotu od 0 po 1 a sú vyjadrené na základe fuzzy funkcií. Regulátor biosociologického postavenia stromu (REG_{LIGHT}) je závislý na konkurenčnom postavení stromu a počíta sa na základe normalizovanej odchýlky konkurenčného indexu stromu (PRETZSCH 2001) od priemernej hodnoty ($z_{a/2}$):

$$REG_{LIGHT} = e^{-(0,903113+0,257922.z_{a/2})^{3,6}} \quad (5)$$

Regulátor plodivosti ($REG_{FERTILITY}$) stromu je závislý od jeho veku (t) a zápoja porastu (CC) a je vyjadrený podľa vzťahu:

$$REG_{FERTILITY} = r(t)^{(0)} + \frac{CC}{100} \cdot [r(t)^{(1)} - r(t)^{(0)}] \quad (6)$$

kde $r(t)^{(0)}$ a $r(t)^{(1)}$ sú fuzzy funkcie pre solitér a strom v plnom zápoji (FABRIKA 2005). Regulátor kvality stanovišťa (REG_{SITE}) sa určí na základe koncentrácie CO_2 v ovzduší, koncentrácie NO_x v ovzduší, relatívneho obsahu živín v pôde, priemernej teploty počas vegetačného obdobia a úhrnu zrážok počas vegetačného obdobia. Vychádza zo vzťahu odvodeného pre redukciiu prírastkového potenciálu kruhovej základne stromu v rastovom simulátore SIBYLA (FABRIKA 2005). Regulátor periodicity semenných rokov ($REG_{PERIODICITY}$) sa vypočíta podľa:

$$REG_{PERIODICITY} = 0,5 + 0,5 \cdot \sin \left[\frac{2\pi \cdot (x - r)}{p} \right] \quad (7)$$

kde p je periodicita semenných rokov, r je východiskový rok simulácie a x je aktuálny rok simulácie. Periodicita semenných rokov závisí od dreviny a stanovišťa. Bola prevzatá podľa ŠMELKOVEJ (2003) a jej stanovenie je uvedené v práci FABRIKA (2005). Regulátor vitality stromu ($REG_{VITALITY}$) závisí od veľkosti povrchu koruny stromu (CS) podľa:

$$REG_{VITALITY} = 1 - e^{-a \cdot CS} \quad (8)$$

Koeficient a závisí od druhu dreviny a je publikovaný v práci FABRIKA (2005).

Reduktory množstva semenáčikov majú tiež hodnotu od 0 po 1 a sú zadané užívateľom modelu. Využíva sa reduktor kvality substrátu ($RED_{SUBSTRAT}$), reduktor abiotických

strát na semenách ($RED_{ABIOTLOSS}$), reduktor biotických strát na semenách ($RED_{BIOTLOSS}$), reduktor konkurencie bylín a krovín (RED_{HERB}) a reduktor škôd zverou (RED_{DAMAGE}). Reduktory sú špecifikované zvlášť podľa druhov drevín. Na základe hodnoty regulátorov a reduktorov sa vypočíta výsledná agregovaná hodnota pomocou fuzzy operátora „AND (^)“ vyjadreného vzťahom podľa REYNOLDSA (1999). Táto hodnota sa aplikuje na konečnú redukciu úrody semien daného stromu:

$$n_j^{(1)} = n_j^{(0)} \cdot \wedge (REG_k) \cdot \wedge (RED_l) \quad (9)$$

Na základe úrody semien jednotlivých stromov sa vypočíta celková úroda semien porastu a vyjadrí sa percentuálny podiel úrody za drevinu ($\%d_i$) a za jednotlivé stromy ($\%s_j$). Napokon sa prepočíta hustota zmladenia dreviny pomocou percentuálneho podielu úrody semien danej dreviny:

$$N_i = N_i^{(1)} \cdot \%d_i \quad (10)$$

5. DISKUSIA

Z hľadiska dynamiky predstavuje proces zmladenia zložitý vedecký problém, pretože sa nejedná o typický kontinuálny proces ako je rast stromu, ale skôr o dej typu „všetko alebo nič“ (ROBINSON 2008), ktorý spúšťajú zmeny materského porastu spôsobené človekom (ťažba) alebo prírodou (kalamity). Navyše sa proces založenia budúcej generácie skladá zo súboru čiastkových procesov počínajúc kvitnutím, cez oplodnenie, produkciu semena a ich rozširovanie, až po ich klíčenie a rast semenáčikov. Hoci z biologického hľadiska by bolo najsprávnejšie simulovať celý vývoj, v skutočnosti sa takýto detailný prístup využíva len zriedka, lebo vyžaduje veľké množstvo ťažko definovateľných parametrov (MIINA *et al.* 2006).

V jednotlivo-stromových rastových simulátoroch sa často aplikujú modely dorastu (ingrowth alebo recruitment models, SCHWEIGER a STERBA 1997, TRASOBARES *et al.* 2004). Detailnejší prístup modelovania zmladenia zväčša využívajú sukcesné modely, napr. PICUS simuluje produkciu semena, rozširovanie semena vrátane zochórie, klíčivosť semien, a rast mladých jedincov (LEXER a HÖNNINGER 2001). Po zhodnotení jednotlivých prístupov sme na modelovanie zmladenia v simulátore SIBYLA zvolili detailnejší prístup, keď v prvom kroku simulujeme úrodu semien a v druhom kroku vzídené zmladenie (Obr. 1). Na rozdiel od jednotlivo-stromových rastových simulátoroch, kde sa v prvom rade modeluje pravdepodobnosť, či sa zmladenie na ploche objaví alebo nie (SCHWEIGER a STERBA 1997, MIINA *et al.* 2006), sa v nami navrhovanom modeli výskyt zmladenia simuluje priamo na základe charakteristík stromu a/alebo porastu. Podobne ako v PICUS-e sa v SIBYLE najskôr stanoví skutočná úroda semien každého stromu, ktorá sa ďalej redukuje, čím sa získa množstvo potenciálne vzídeného semena v závislosti od kvality substrátu a strát spôsobených abiotickými a biotickými činiteľmi. Na rozdiel od PICUS-u sa však množstvo skutočne vzídených semenáčikov zo semena vzhľadom k priestorovému usporiadaniu

v poraste určí až v ďalšom kroku na úrovni dreviny, kedy sa maximálna hustota zmladenia redukuje v závislosti od zápoja hlavného porastu (Obr. 2).

Závislosť skutočnej hustoty zmladenia od stavu hlavného porastu zistili a do svojich modelov začlenili aj iní autori, pričom najčastejšie používanou veličinou je porastová kruhová základňa (MOSER 1972, EK 1974, TRASOBARES *et al.* 2004). BURK (1978 in SHIFLEY *et al.* 1993) použil zakmenenie a SHIFLEY *et al.* (1993) kompetičný faktor CCF. V našom prípade sme použili veličinu stupeň zápoja porastu CC podľa CROOKSTON a STAGE (1999), pretože uvedený algoritmus je relatívne jednoduchý, ľahko implementovateľný a je v úzkom vzťahu s hustotou prirodzeného zmladenia.

6. ZÁVER

Predstavený model hustoty prirodzeného zmladenia tvorí prvý čiastkový výstup v rámci modelovania prirodzenej obnovy v stromovom rastovom simulátore SIBYLA. Model kombinuje porastový empirický prístup so stromovým procesným prístupom. Empirický prístup zabezpečuje previazanosť výstupov modelu na reálne experimentálne údaje, ktoré zachytávajú územie celého Slovenska. Procesný prístup zasa zabezpečuje flexibilitu modelu vzhľadom na príčinnú-následnú súvislosť ovplyvňujúcu úrodu semena, jeho vyklíčenie, ujetie a prežitie vo forme zabezpečených jedincov. Prístup sa snaží zachovať reálne proporcie medzi jednotlivými drevinami a stromami. Modelovanie hustoty prirodzeného zmladenia rieši východiskový problém budúceho komplexného modelu. V rámci finalizácie modelu sa budeme sústreďovať na ďalšie problémy, bez ktorých nebude môcť model fungovať vo svojej komplexnosti. Ide o modelovanie frekvenčnej funkcie prirodzeného zmladenia, modelovanie výšky jedincov a ich umiestnenia v lesnom poraste. Na tieto problémy sa budeme koncentrovať v rámci ďalšieho výskumu.

Podakovanie:

Uvedená publikácia, bola vytvorená realizáciou projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006. Na odvodenie modelu hustoty prirodzeného zmladenia boli využité údaje Národnej inventarizácie a monitoringu lesov SR, ktoré nám boli poskytnuté Národným lesníckym centrom vo Zvolene v rámci spolupráce v projekte Centra excelentnosti.

Literatúra

- CROOKSTON, N.L., STAGE, A.R., 1999: Percent canopy cover and stand structure statistics from the Forest Vegetation Simulator. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-24. Ogden, UT. U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. 11 s.
- ĎURSKÝ, J., MINÁŠ, J., KONÔPKA, M., 2002: Klimatické rastre pre ekologickú bonitáciu. Nepublikovaný výsledok geografickej analýzy v prostredí IDRISI32 v rámci vedeckej spolupráce.
- EK, A.R. 1974: Nonlinear models for stand table projection in northern hardwood stands. Canadian Journal of Forest Research 4:23–27.

- Ek, A.R., ROBINSON A.P., RADTKE P.J., WALTERS D.K. 1996: Regeneration imputation models and analysis for forests in Minnesota. Staff Paper Series No. 115, St.Paul, Minnesota. 47 pp.
- FABRIKA, M., 2005: Simulátor biodynamiky lesa SIBYLA. Konceptia, konštrukcia a programové riešenie. Habilitačná práca. Technická univerzita vo Zvolene, 238 s.
- HASENAUER H., MERKL D. 2001: Predicting regeneration establishment within mixed species stands using neural networks. In: Proceedings 21st IUFRO World Congress, 7-12 August 2000, Kuala Lumpur, Malaysia. Freiburg Forschungsber 37:145–154.
- HOFFMANN, J., CHVÁLOVÁ, K., PALÁTOVÁ, E., 2005: Lesné semenárstvo na Slovensku. Bratislava, LESMEDIUM, k.s., 193 s.
- HYPOENEN M., ALENIOUS V., VALKONEN S. 2005: Models for the establishment and height development of naturally regenerated *Pinus sylvestric* in finnish Lapland. Scandinavian Journal of Forest Research, 20:347–357.
- KINDERMANN G., HASENAUER H., GASCH J. 2002: Ankommen und Wachstum von Naturverjüngung in Mischbeständen. Centralblatt für das gesamte Forstwesen 119:159–186.
- LEXER M., HÖNNINGER K. 2001: A modified 3D-patch model for spatially explicit simulation of vegetation composition in heterogeneous landscapes. Forest Ecology and Management 144:43–65
- MERGANIČ J., 2007: Model stanoviskovej plochy jednotlivého stromu pre ihličnaté a listnaté dreviny. Čiastková správa pre projekt NIML SR, FORIM, 2 p.
- MIINA J., EERIKÄINEN K., HASENAUER H. 2006: Modeling Forest Regeneration, In HASENAUER H.(ed.): Sustainable forest management: Growth Models for Europe. p. 93–110.
- MONSERUD, R.A., Ek, A.R. 1977: Prediction of understory tree height growth in northern hardwood stands. Forest Science 23:391–400.
- MOSER, J.W., Jr. 1972: Dynamics of an uneven-aged forest stand. For. Sci. 18:184–191.
- PRETZSCH, H., 2001: Modellierung des Waldwachstums. Parey Buchverlag Berlin, 341 s.
- REINEKE, L.H., 1933: Perfecting a stand density index for even-aged forests. Journal of Agricultural Research, 46 (7), s. 627–638.
- REYNOLDS, K. M., 1999: NetWeaver for EMDS user guide (version 1.0): a knowledge base development system. Gen. Tech. Rep. PNW-GTR-XX. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station. 88 p.
- ROBINSON D.C.E. 2008: Development of external rgeneration models for FVS: another wrench in the toolkit. USDA Forest Service Proceedings, RMRS-P-54, p. 225–234.
- ROHMEDER, E., 1972: Das Saatgut in der Forstwirtschaft. Verlag P. Parey, Hamburg und Berlin, 273 s.
- SCHWEIGER J., STERBA H. 1997: A model describing natural regeneration recruitment of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) in Austria. Forest Ecology and Management 97:107–118.
- SHIPLEY S.R., Ek A.R., BURK T.E. 1996: A generalized methodology for estimating forest ingrowth at multiple threshold diameters. Forest Science 39(4):776–798.
- ŠMELKO Š., MERGANIČ J., ŠEBEŇ V., RAŠI R., JANKOVIČ J., 2006: Národná inventarizácia a monitoring lesov Slovenskej republiky 2005-2006. Metodika terénneho zberu údajov (Pracovné postupy – 3. Doplnená verzia). Národné lesnícke centrum Zvolen, s. 129 s., ISBN: 80-88852-98-2.
- ŠMELKOVÁ, L., 2003: Zakladanie lesa. Vysokoškolské skriptá, Technická univerzita vo Zvolene, 256 s.
- TRASOBARES A., PUKKALA T., MIINA J. 2004: Growth and yield model for uneven-aged mixtures of *Pinus sylvestris* L. and *Pinus nigra* Arn. in Catalonia, north-east Spain. Annals of Forest Science 61:9–24.

Adresa autorov:

Doc. Ing. Marek Fabrika, PhD.
 Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie
 Lesnícka fakulta
 Technická univerzita vo Zvolene
 T. G. Masaryka 24
 960 53 Zvolen
 e-mail fabrika@vsld.tuzvo.sk

Ing. Ján Merganič, PhD.
Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita vo Zvolene
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen

e-mail: merganic@vsld.tuzvo.sk

Dr. nat. tech. Ing. Katarína Merganičová – FORIM
Výskum, inventarizácia a monitoring lesných ekosystémov
Huta 14
962 34 Železná Breznica

www.forim.sk

e-mail: k.merganicova@forim.sk

Model hustoty prirodzeného zmladenia pre účely stromového rastového simulátora

Abstrakt

Modelovanie prirodzeného zmladenia predstavuje dôležitý doplnok komplexných rastových modelov. Umožňuje vykonávať prognózy presahujúce jeden produkčný cyklus lesa, modelovať vývoj prírody blízkyh lesov a prírodných lesov. Práca sa zaoberá modelovaním hustoty prirodzeného zmladenia, ktoré predstavuje prvý krok ku komplexnému modelu prirodzenej obnovy. Model bude súčasťou stromového rastového simulátora SIBYLA. Na odvodenie modelu boli použité údaje Národnej inventarizácie a monitoringu lesov SR (NIML SR) a klimatické rastre s obrazovým prvkom veľkosti 90 × 90 m, ktoré zachytávajú priestorovú distribúciu všetkých dôležitých klimatických charakteristík. Samotný model je zložený z empirickej časti, ktorá modeluje hustotu zmladenia na úrovni porastovej plochy a z procesnej časti, ktorá modeluje produkciu semien a potomkov na úrovni stromu. Empirická časť modelu vychádza z údajov NIML a klimatických rastrov. Modeluje hustotu zmladenia pre jednotlivé dreviny v závislosti od strednej kvadratickej hrúbky materského porastu a od jeho zápoja. Model je zároveň stanovištne špecifický. Procesná časť modelu je založená na semenárskych rovniciach a fuzzy logike. Vychádza z predpovede úrody semien jednotlivých stromov v závislosti od parametrov ako sú čistota semien, klíčivosť semien, sypavosť semien, absolútna hmotnosť semien, úroda plodov zrelého jedinca a podobne. Úroda je následne regulovaná pomocou regulátorov a reduktorov, ktoré vyjadrujú ďalšie podmienky pre vznik, vyklíčenie a prežitie následnej generácie jedincov. Empiricky odvodená hustota prirodzeného zmladenia podľa jednotlivých drevín je potom redukovaná v závislosti od podielu jednotlivých drevín na celkovej produkcii jedincov odvodenéj z procesného modelu.

Kľúčové slová: hustota zmladenia, empirický model, procesný model, rastový simulátor, SIBYLA

MOŽNOSTI REGULÁCIE ŤAŽIEB METÓDOU MATEMATICKÝCH MODELOV V LESNÝCH UŽÍVATEĽSKÝCH CELKOCH S NEPRAVIDELNÝMI VEKOVÝMI ŠTRUKTÚRAMI

Anton Ž Í H L A V N Í K

Žíhlavník, A.: The possibilities of cutting control by the method of mathematical models in forest user units with irregular age structures. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 139–151, 2009.

The paper deals with possibilities of solving forest cut regulation in forest user units. That forest user units have disordered age structures. The selected file of forest user units was used with assigned to largeness class between 1300 and 1600 ha. Evaluation of the real age structures situation of forest user units resulted from, that despite the large area is the age structure unequal and their age class distribution is disordered. The disordered of the age structures were evaluated by use of variation coefficients presented as variability in individual decades. Age structure controlling has been realized by using of various variants of mathematical models. Achieved results have supported possibility of equalization of disordered age structures point to point control during the regeneration period. The first five decades are adjusted variability of forest user units reasonably. Big variability differences between decades exist in forest user units, where the age classes are extremely distributed compared to normal distribution.

Key words: cutting control, forest management unit

1. PROBLEMATIKA A CIEĽ PRÁCE

Vplyv obnovených vlastníckych a užívateľských vzťahov k lesu sa výrazne prejavuje vo všetkých oblastiach hospodárskej úpravy lesov i napriek tomu, že od roku 1990 je dosť dlhé obdobie na ich vyriešenie. Ide hlavne o oblasť priestorovej úpravy lesa, kde dochádza k neustálym zmenám základných jednotiek pre vypracovanie lesných hospodárskych plánov. Uvedené zmeny sa následne dotýkajú aj zmien základných jednotiek pre ťažbovú úpravu lesa.

Od roku 1990 do roku 2009 bolo vykonané niekoľko zmien v priestorovej úprave lesov vo väzbe na zmeny legislatívy.

Dochádza k vytváraniu rôznych veľkostných vlastníckych jednotiek a to rozdeľovaním ucelených lesných častí na menšie jednotky. Toto ovplyvňuje ich obhospodarovanie a zabezpečovanie požiadaviek plnenia mimoprodukčných funkcií lesa. I napriek tomu, že

do priestorovej úpravy lesa sa zaviedla novým lesným zákonom 326/2005 Z. z. (360/2007) a vyhláškou č. 453/2006 Z. z. o HÚL a ochrane lesa nová jednotka a to lesný celok a vlastnícky celok, naďalej sa ešte používa podľa predchádzajúcich právnych predpisov do ukončenia platnosti príslušných lesných hospodárskych plánov lesný užívateľský celok (LUC).

Preto aj problematika uvádzaná v práci je zameraná na LUC. Získané poznatky z LUC sa následne budú aplikovať aj v lesných celkoch, keď sa naplní dostatočne databáza údajov o lesných celkoch.

Zavedením LUC do priestorovej úpravy lesa došlo k určitým zmenám v postupoch riešenia problematiky ťažbovej úpravy lesa.

Veľkosť tejto jednotky výrazne ovplyvnila metódy ťažbovej úpravy lesa. Problémy v stanovení výšky obnovnej ťažby sa prejavovali už v minulosti, aj keď sa jednalo o väčšie ucelené lesné časti. Vzhľadom na súčasné vlastnícke a užívateľské vzťahy nie je možné úplne použiť doterajšie metódy ťažbovej úpravy lesa. Preto sa skúmajú rôzne možnosti použitia metód ťažbovej úpravy lesa v LUC k zabezpečeniu určitej vyrovnanosti ťažieb, čo úzko súvisí s vyrovnanosťou vekovej štruktúry a následne s ekologickou stabilitou týchto LUC.

Uplatňovanie jednotlivých hospodárskych spôsobov a ich foriem v tejto jednotke sa musí odrážať aj v rôznych prístupoch riešenia ťažbovej úpravy lesa. Veková štruktúra týchto jednotiek je veľmi nepriaznivá, čo sa týka zastúpenia jednotlivých vekových stupňov. Skúma sa preto možnosť dlhodobého sledovania vývoja takýchto vekových štruktúr LUC. Vzhľadom na zmeny, ktoré nastali v oblasti hospodárskej úpravy lesov, je potrebné využiť všetky možné metódy ťažbovej úpravy lesa na zabezpečenie možnosti regulácie ťažieb v takýchto vekových štruktúrach LUC. Dosiahnuté výsledky je možné následne použiť pri prognózovaní a regulácii ťažieb na dlhšie obdobie. Ďalej je ich možné využiť v nových jednotkách a to lesných celkoch, resp. vlastníckych celkoch. Stav vekovej štruktúry LUC v príslušnom sledovanom období vplýva na stanovenie vhodnej výšky ťažby. Pre praktickú hospodársku úpravu lesov (HÚL) je významný stav vekovej štruktúry sledovanej počas troch až piatich desaťročí. Z teoretického hľadiska je potrebné sledovať vekovú štruktúru počas celej rubnej doby a následne odvodzovať určité závery.

V priebehu vývoja HÚL vznikol celý rad spôsobov riešenia ťažbovej úpravy lesa, ktoré vychádzali z rôznych hospodársko-úpravníckych prvkov. Boli vypracované deduktívne riešenia ťažbovej regulácie, ktoré vychádzali jednak z veľkých výmer základných jednotiek pre ťažbovú úpravu lesa a jednak neboli ovplyvnené vlastníckymi vzťahmi k lesu. V súčasnosti, vzhľadom na problematiku ťažbovej úpravy lesa, je potrebné neustále hľadať nové metódy ťažbovej úpravy lesa, ktoré zohľadňujú vlastnícke a užívateľské vzťahy k lesu (ŽÍHLAVNÍK, A. 2000, 2001, 2003, 2004, 2005, 2008). K rozšíreniu a zdokonaleniu metód ťažbovej úpravy lesa je potrebné využiť všetky doterajšie riešenia (GREGUŠ 1976; HERICH 1994; POZNAŇSKI 2001a, 2001b, 2004).

Používané metódy ťažbovej úpravy lesa v súčasnom období je potrebné zamerať na jemnejšie hospodárske spôsoby i napriek tomu, že týmito jemnejšími hospodárskymi spôsobmi sa zaoberá málo autorov, napr.: SANIGA (2006).

Uplatnenie ťažbových ukazovateľov založených na ploche, v nadväznosti na možnosť plochovej kontroly, je snahou pri hospodárení v lesoch od vzniku ťažbovej úpravy

lesa. Prvé začiatky ťažbovej úpravy lesa boli spojené výlučne s plochovou úpravou. Začína sa používať ako plochový ukazovateľ, tzv. normálne ročné rúbanisko, ktoré sa už v súčasnej ťažbovej úprave lesa nepoužíva, vzhľadom na jeho charakter a použiteľnosť len pri dodržaní určitých podmienok.

Plochové ťažbové ukazovatele sú považované za jednoduché a presné, hlavne pri použití foriem hospodárskeho spôsobu holorubného.

Ich použiteľnosť je však čiastočne obmedzená novou právnou úpravou, ktorá na prvé miesto kladie v rámci použitia jednotlivých hospodárskych spôsobov hospodársky spôsob podrastový.

Kritika spoľahlivosti plochových ťažbových ukazovateľov a údajov v podrastovom lese je len čiastočne opodstatnená v súvislosti s výskytom prekrývajúcich sa etáží na tej istej ploche.

Zdôvodňovanie potreby použitia plochových ťažbových ukazovateľov, potreby návratu ku plochovej kontrole, nie je snaha o presadzovanie holorubného hospodárskeho spôsobu. Vychádza len z nutnosti usmerňovania nepriaznivého stavu vekovej štruktúry lesa a z nutnosti dosiahnutia priaznivého pomeru jednotlivých vekových stupňov v príslušných jednotkách. Toto je možné len s takou veličinou, ktorá je presná, ľahko zmerateľná, ktorá nepodlieha zmenám v priebehu vývoja v jednotlivých obdobiach výpočtu a zároveň je ľahko kontrolovateľná. Tieto kritériá spĺňa v prvom rade plocha, ktorá sa počas celého obdobia výpočtu vo väčšine vekových stupňov nemení a ostáva stála. Zmeny vo výmerách nastávajú len vplyvom obnovnej ťažby vo vekových stupňoch obnovovaných a v najmladšom vekovom stupni vplyvom presunu obnovených plôch. Celková výmera sledovanej jednotky sa však pri dodržaní stanovených podmienok hospodárenia počas celého obdobia výpočtu vo väčšine prípadov vôbec nemení a nemajú na ňu vplyv výchovné ani obnovné zásahy, na rozdiel od zásob, ktoré sa týmito zásahmi v každom desaťročí neustále menia vo všetkých vekových stupňoch (ŽÍHLAVNÍK, A. 2005).

K problému nepravidelnosti až extrémnosti vekových štruktúr LUC, pristupuje problém určenia výmer a hraníc jednotlivých LUC. Riešenie problematiky vývoja vekovej štruktúry LUC a zároveň prognózovanie ťažieb, predpokladá požadovanú presnosť. Túto je možné dosiahnuť len za predpokladu presného určenia výmer LUC.

Podrobne uvedenú problematiku rozoberá ŽÍHLAVNÍK, Š. (2004a, 2004b).

Cieľom tejto práce je poukázať na možnosť riešenia regulácie ťažieb matematických modelov v LUC s nepravidelnými vekovými štruktúrami, vo väzbe na postupné zlepšovanie ekologickej stability týchto LUC.

Ďalej cieľom tejto práce je zhodnotenie vekových štruktúr LUC a to jednak zhodnotenie zastúpenia jednotlivých vekových stupňov a jednak zhodnotenie variačných koeficientov vekových štruktúr LUC počas 5. desaťročí. Získané poznatky potom následne využiť v nových jednotkách priestorového rozdelenia lesa a to v lesných celkoch. Ďalej sa v práci posúdil vplyv regulácie na formovanie vekových štruktúr LUC s možnosťou postupného odstraňovania ich nepravidelností.

Uvedená problematika je výsledkom riešenia v rámci projektu „Centrum excelentnosti“: „Adaptívne lesné ekosystémy“, aktivita – Ekologicky vhodné využívanie lesných ekosystémov.

2. PODKLADOVÝ MATERIÁL A METODICKÝ POSTUP PRÁC

Ako podkladový materiál boli použité lesné hospodárske plány (LHP) s rôznou platnosťou vypracované bývalým Lesoprojektom Zvolen. Údaje z rôznych oblastí Slovenska poskytlo Národné lesnícke centrum Zvolen. Problematika sa riešila v LUC, ktoré patrili do kategórie lesov hospodárskych. Z databázy sa urobil výber 5 LUC s výmerami od 1 300 do 1 600 ha.

Jedná sa o LUC, ktorých rubná doba bola 110 rokov a obnovná doba 30 rokov. Z prehľadových tabuliek sa získali a použili údaje o plochách drevín po vekových stupňoch, zásoby po vekových stupňoch a výška ťažieb. Charakteristika a zhodnotenie vekových štruktúr bolo zamerané na skutočné zastúpenie vekových stupňov v porovnaní k normálnemu zastúpeniu. Jednotlivé LUC sú označené číslom, aby nedošlo k zneužitiu údajov o vlastníctve a majetku príslušných subjektov treťou osobou (LUC 1, 5, 6, 7, 9).

Na obrázkoch 1–5 je znázornené skutočné a normálne zastúpenie vekových stupňov jednotlivých LUC.

Veková štruktúra jednotlivých LUC je nepravidelná a vzájomne rozdielna. Zhodnotenie vekovej štruktúry je vykonané v nasledujúcej kapitole.

Stručná charakteristika sledovaných LUC je nasledovná:

LUC č. 1

Výmera lesných porastov kategórie hospodárskych lesov, tvaru vysokého je 1 342,08 ha. Rubná doba je 110 rokov a obnovná doba stanovená na 30 rokov. Celková zásoba predstavuje 287 640 m³, z toho zásoba rubných porastov je 31 347 m³. Výmera rubných porastov je 81,11 ha a ťažbová plocha je 61,31 ha. Stanovená výška obnovnej ťažby je 23 694 m³.

LUC č. 5

Celková výmera lesných porastov kategórie hospodárskych, tvaru vysokého je 1 937,53 ha. Rubná doba bola stanovená na 110 rokov a obnovná doba na 30 rokov. Celková zásoba lesného užívateľského celku predstavuje 319 699 m³. Zásoba rubných porastov je 72 493 m³ a výmera rubných porastov je 325,77 ha. Etát obnovnej ťažby bol stanovený na 4 705 m³.

LUC č. 6

Celková výmera lesných porastov predstavuje 1 615,14 ha. Rubná doba je 110 a obnovná doba 30 rokov. Celková zásoba porastov je 287 941 m³. Zásoba rubných porastov predstavuje 54 001 m³, výmera rubných porastov je 166,25 ha. Na základe LHP bola výška obnovnej ťažby stanovená na 37 500 m³, pričom ťažbová plocha dosiahla výmeru 137,55 ha.

LUC č. 7

Výmera lesných porastov kategórie hospodárskych lesov, tvaru vysokého je 1 442,03 ha. Rubná doba je 110 rokov a obnovná doba 30 rokov. Celková zásoba lesného užívateľského celku je 249 652 m³. Zásoba rubných porastov je 68 581 m³, výmera rub-

ných porastov je 245,14 ha. Stanovená výška obnovnej ťažby je 24 542 m³, na ťažbovej ploche 89,49 ha.

LUC č. 9

Výmera porastov patriacich do kategórie hospodárskych lesov, tvaru vysokého predstavuje 1 631,10 ha. Rubná doba lesného užívateľského celku je 110 rokov a obnovná doba má dĺžku 30 rokov. Celková zásoba v hospodárskych lesoch je 234 154 m³, z toho 2 179 m³ sa nachádza v rubných porastoch. Výmera rubných porastov je 10,06 ha, čo predstavuje 3,39 % z normálnej výmery rubných porastov. Obnovná ťažba bola predpísaná vo výške 31 292 m³, na ťažbovej ploche 136,66 ha.

Výpočet plochového ťažbového ukazovateľa, ktorým sa následne upravovala veková štruktúra LUC, sa vykonal použitím metódy matematických modelov s rôznymi variantami (ŽIHĽAVNÍK, A. 1998, 1999, 2000, 2004, 2005, 2008). Formulácia matematických modelov a úprava základných podmienok pre reguláciu vekovej štruktúry a výpočet plochového ťažbového ukazovateľa je uvedená v predchádzajúcich uvádzaných prácach.

Na zhodnotenie skutočnej vekovej štruktúry sa použilo porovnanie tejto štruktúry s normálnym zastúpením vekových stupňov. Ďalej na zhodnotenie sa použil variačný koeficient $s_x\%$, ktorý sa vypočítal z percentuálnych rozdielov diferencií medzi skutočným a normálnym zastúpením vekových stupňov.

Ďalej boli vypočítané priemerné hodnoty ($\bar{x}$), smerodajné odchýlky (s_x) a variačný koeficient ($s_x\%$) podľa známych vzťahov zo štatistiky.

3. DOSIAHNUTÉ VÝSLEDKY A DISKUSIA

3.1. Zhodnotenie skutočných vekových štruktúr LUC na základe zastúpenia vekových stupňov

LUC č. 1

Vekovú štruktúru tohto LUC môžeme hodnotiť ako štruktúru s nadbytkom vekových stupňov 2., 3., 9., resp. čiastočne s nadbytkom aj 1., 5. a 8. a nedostatkom vekových stupňov 4., 6., 7. a 10.–13., oproti normálnemu zastúpeniu (obr. 1).

LUC č. 5

Vekovú štruktúru tohto LUC môžeme hodnotiť ako štruktúru s nadbytkom vekových stupňov 5., 6., 8. a 10., vekového stupňa, resp. 7. a 9. vekového stupňa a nedostatkom vekových stupňov 1.–4., 11.–13. vekového stupňa (obr. 2).

LUC č. 6

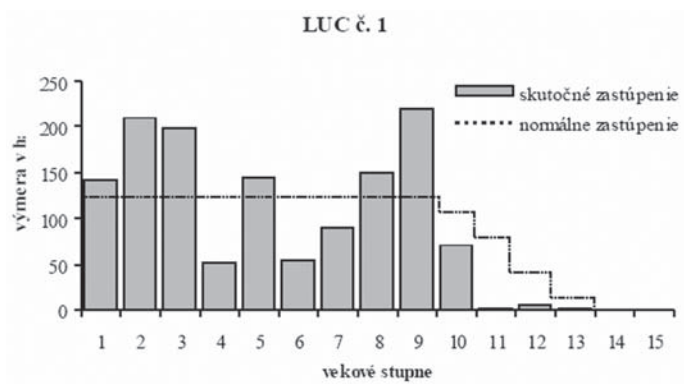
Vekovú štruktúru tohto LUC môžeme hodnotiť ako štruktúru s nadbytkom vekových stupňov 1., 2., 3. a 8. vekového stupňa a nedostatkom vekových stupňov 5., 6., 10.–13. vekového stupňa (obr. 3).

LUC č. 7

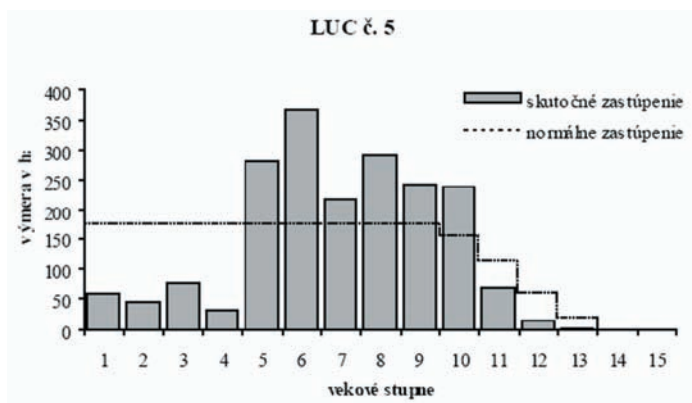
Vekovú štruktúru tohto LUC môžeme hodnotiť ako štruktúru s nadbytkom vekových stupňov 4.–8. a 11. vekového stupňa a nedostatkom vekových stupňov 1.–3., 9., 10., 12. a 13. vekového stupňa (obr. 4).

LUC č. 9

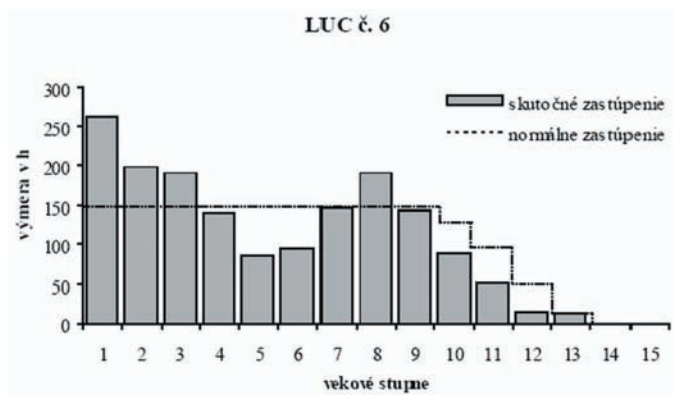
Vekovú štruktúru tohto LUC môžeme hodnotiť ako štruktúru sa nadbytkom vekových stupňov 1.-3., 5. a 6. vekového stupňa a nedostatkom ostatných vekových stupňov. Túto vekovú štruktúru môžeme hodnotiť ako extrémnu s chýbajúcimi, resp. nízkymi výmerami rubných vekových stupňov (obr. 5).



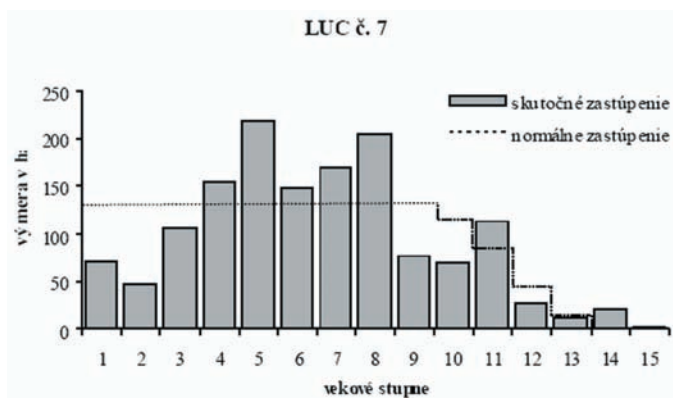
Obr. 1
Fig. 1



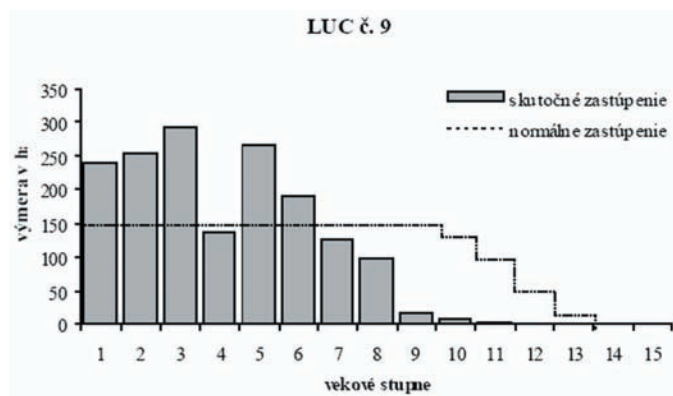
Obr. 2
Fig. 2



Obr. 3
Fig. 3



Obr. 4
Fig. 4



Obr. 5
Fig. 5

Obr. 1–5. Znáznornenie skutočného a normálneho zastúpenia vekových stupňov v lesných užívateľských celkoch (LUC 1, 5, 6, 7, 9)

Fig. 1–5. View of real and normal age class distribution in forest user units (FUU No. 1, 5, 6, 7, 9)

Rozloženie zásob po jednotlivých vekových stupňoch v LUC je zhodné s rozložením hlavne stredných a rubných vekových stupňov. Návrhy ťažieb a ťažbové plochy sú rozdielne podľa skutočného stavu porastov tvoriacich príslušný LUC.

Zo zhodnotenia jednotlivých LUC vyplynulo, že uvedené rozdiely v zastúpení vekových stupňov oproti normálnemu zastúpeniu výrazne ovplyvňujú snahu o dosiahnutie vyrovnanej vekovej štruktúry použitím regulácie vekového zastúpenia počas dlhšieho obdobia. Preto aj prístup k riešeniu vyrovnanosti vekových štruktúr vyžaduje osobitný postup pre určitý typ vekovej štruktúry. Dosiahnutie určitej cieľovej štruktúry je možné vypracovaním modelových vekových štruktúr s rôznym zastúpením vekových stupňov a následným zaradením skutočných vekových štruktúr do týchto modelov. Ďalšie zhodnotenie bolo zamerané na zhodnotenie variability počas 5. desaťročí použitím variačných koeficientov.

3.2. Zhodnotenie skutočných vekových štruktúr použitím variačného koeficienta

Pre zhodnotenie vekových štruktúr sa použila upravená metóda matematických modelov s výpočtom plochových ťažbových ukazovateľov na 5 desaťročí a následne zhodnotenie variability vekových štruktúr v LUC v každom desaťročí. Pri rozdelení ťažbového ukazovateľa do jednotlivých vekových stupňov sa použili dve alternatívy.

V prvej alternatíve (I.) sa použili na rozdelenie plochového ťažbového ukazovateľa do jednotlivých vekových stupňov ťažbové percentá a pri druhej alternatíve (II.) sa použili empirické ťažbové percentá, ktoré sú platné v súčasnom období ako ťažbové ukazovatele.

Na obrázkoch 6–10 je znázornený priebeh variačných koeficientov ($s_x\%$) pre 5 desaťročí pre alternatívu I. a II.

LUC č. 1

Hodnota variačného koeficienta tohto LUC na začiatku bola 67,38 %. Táto hodnota je rovnaká pre I. alternatívu aj pre II. alternatívu. Toto platí pre všetky sledované LUC. Variačný koeficient I. alternatívy stúpa počas 4. desaťročí. Najväčší je v 4. desaťročí (148,19 %). V 5. desaťročí poklesne na hodnotu 130,15 %. Rozdiel medzi maximálnou a minimálnou hodnotou predstavuje 80,81 %. Priebeh variačného koeficienta pre II. alternatívu je podobný, ale s vyššími hodnotami. Obdobie najväčšej variability je tiež v 4. desaťročí. Maximálny rozdiel vo variabilite v sledovanom období pre variačný koeficient II. alternatívy predstavuje až 151,29 % (obr. 6).

LUC č. 5

Variačný koeficient na začiatku desaťročia je 54,11 %. Maximum variačného koeficienta v I. alternatíve je 77,22 % v 5. desaťročí a v II. alternatíve je 145,70 %. Rozdiel maximálnej a minimálnej hodnoty pri I. alternatíve je 23,11 % a pri II. alternatíve je 91,59 % (obr. 7).

LUC č. 6

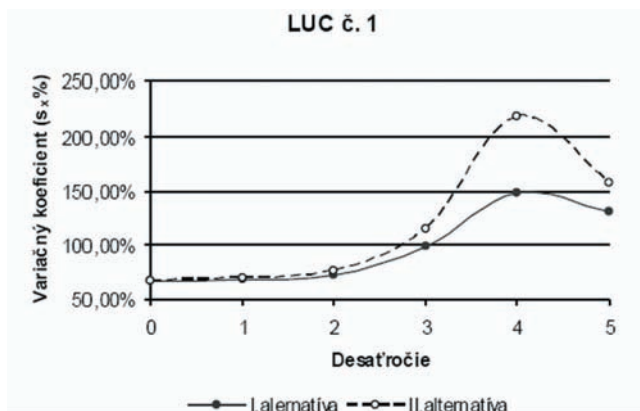
Počiatočná hodnota variačného koeficienta je 84,17 %. Hodnota variačného koeficienta v I. alternatíve je maximálna v 4. desaťročí (89,73 %) a minimálna v 2. desaťročí (82,95 %). Rozdiel extrémnych hodnôt je 6,78 %. Variačný koeficient pri II. alternatíve dosahuje maximum v 5. desaťročí (185,01 %) a minimum v 3. desaťročí (70,13 %). Rozdiel maximálnej a minimálnej hodnoty je 114,93 %. Pribeh hodnôt variačného koeficienta I. alternatívy je oproti variačnému koeficientu II. alternatívy vyrovnanejší. K väčším rozdielom dochádza v 4. a 5. desaťročí (obr. 8).

LUC č. 7

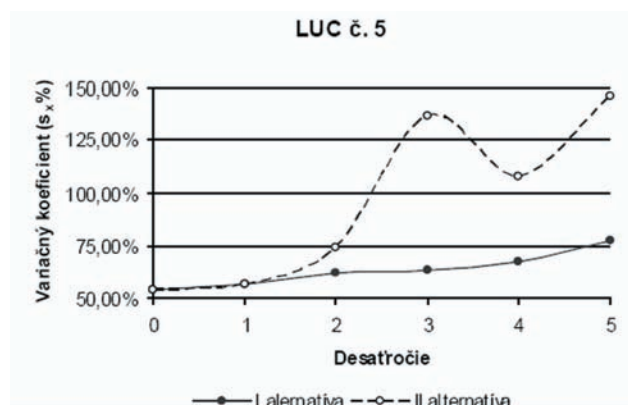
Hodnota variačného koeficienta na začiatku bola 54,11 %. Variačný koeficient pri I. alternatíve dosahuje maximum v 4. desaťročí. Maximum variačného koeficienta pri II. alternatíve je v 5. desaťročí (217,26) a od minima sa odlišuje o 152,56 % (obr. 9).

LUC č. 9

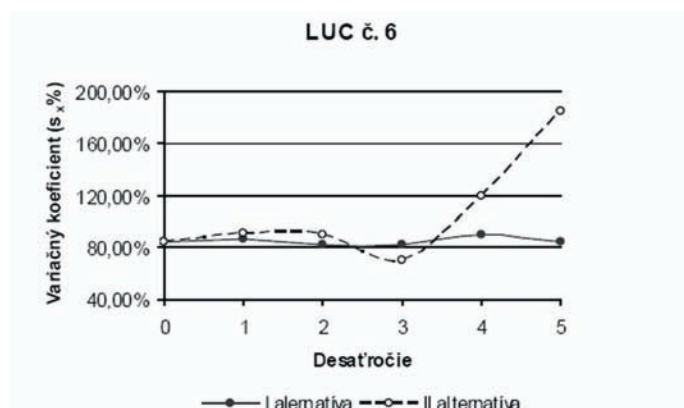
Hodnota variačného koeficienta na začiatku desaťročia bola 65,79 %. Maximum variačného koeficienta v I. alternatíve sa dosiahlo v 3. desaťročí (69,25 %) a odlišuje sa od minimálnej hodnoty o 4,73 %. Maximum variačného koeficienta v II. alternatíve je v 4. desaťročí a od minima sa odlišuje o 8,39 % (obr. 10).



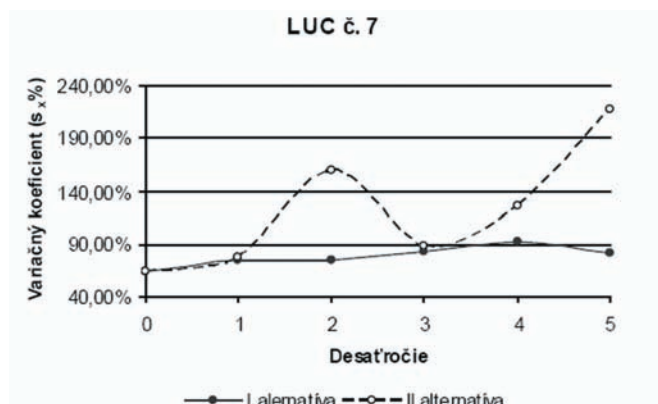
Obr. 6
Fig. 6



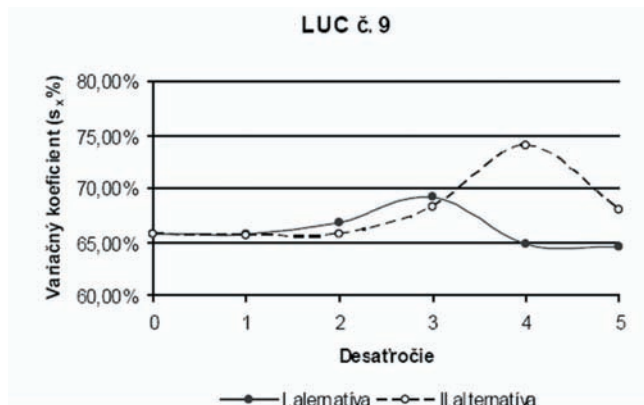
Obr. 7
Fig. 7



Obr. 8
Fig. 8



Obr. 9
Fig. 9



Obr. 10
Fig. 10

Obr. 6–10. Znáznornenie priebehu variačných koeficientov ($s_x\%$) pre 5 desaťročí (alternatíva I. a II.) v lesných užívateľských celkoch (LUC 1, 5, 6, 7, 9)
Fig. 6–10. Trend of variation coefficients ($s_x\%$) for five decades (alternative I. and II) in forest user units (FUU No. 1, 5, 6, 7, 9)

Zo zhodnotenia skutočných vekových štruktúr LUC vyplynulo, že hodnoty variačných koeficientov sa v priebehu jednotlivých desaťročí menia vzhľadom na zastúpenie jednotlivých vekových stupňov a majú v niektorých prípadoch stúpajúcu tendenciu.

Veľké rozdiely medzi jednotlivými desaťročiami sa vyskytujú pri tých LUC, ktorých vekové stupne sú extrémne zastúpené, tvoria skupiny s nadbytkom alebo nedostatkom vekových stupňov. Priaznivý vývoj vekovej štruktúry sa v týchto LUC pozoruje až po niekoľkých desaťročiach.

Pri I. alternatíve priebeh variačných koeficientov je vo všetkých LUC plynulejší ako pri II. alternatíve. Vyplýva to zo silnejšej intenzity použitých ťažbových percent v rubných vekových stupňoch. Z dosiahnutých výsledkov vyplynulo, že vzhľadom na nepravidelnosť zastúpenia vekových stupňov k regulácii ich vyrovnanosti musíme pristupovať zásahmi rôznej intenzity v rubných vekových stupňoch.

Napriek tomu, že variabilita LUC má v prvých desaťročiach stúpajúcu tendenciu, neskôršie sa prejavuje vplyv regulácie znižovaním variability. Pre spresnenie výsledkov v ďalšom výskume je potrebné zhodnotiť okrem variability vekovej štruktúry LUC aj index poklesu variačných koeficientov, resp. index zhody vekovej štruktúry v určitom období.

Odstránenie nepravidielnosti vekových štruktúr a zabezpečenie vyrovnanosti ťažieb predpokladá hlavne zásahy do vekových stupňov, ktoré sú v nadbytku. Uvedené výsledky potvrdzujú aj niektoré predchádzajúce podobné riešenia (POZNAŇSKI 2001, 2004, ŽIHĽAVNÍK, A. 2004, BAŇYL, ŽIHĽAVNÍK 2008). Predpokladá sa väčšia výmera LUC s určitou počiatočnou vyrovnanosťou vekových štruktúr LUC.

Z doterajších výsledkov vyplynulo, že použitím metódy matematických modelov dochádza k postupnému vyrovnávaniu skutočných vekových štruktúr vo väzbe na porovnanie

s normálnymi vekovými štruktúrami. V uplatnení vyrovnanosti metódy matematických modelov sú však výrazné rozdiely medzi jednotlivými lesnými užívateľskými celkami. Preto je potrebné vytvoriť rôzne veľkostné skupiny LUC, s určitým variačným rozpätím a presne stanovenými podmienkami, pomocou ktorých je možné zatriediť jednotlivé LUC do týchto skupín. Určité poznatky sa už v minulosti získali vytvorením modelových vekových štruktúr (BAHÝL, ŽÍHLAVNÍK 2008).

4. ZÁVER

V práci je riešená problematika ťažbovej úpravy lesa v lesných užívateľských celkoch. Ide o lesné užívateľské celky s nepravidelnými vekovými štruktúrami. Použil sa vybraný súbor lesných užívateľských celkov zaradený do veľkostnej skupiny v roz-
pätí výmery 1 300–1 600 ha. Zo zhodnotenia stavu skutočných vekových štruktúr lesných užívateľských celkov vyplynulo, že napriek dost veľkej výmere je veková štruktúra nevyrovnaná s nepravidelným zastúpením vekových stupňov. Nepravidelnosť vekových štruktúr sa hodnotila použitím variačných koeficientov, ktorými sa vyjadrila variabilita v jednotlivých desaťročiach. Regulácia vekovej štruktúry sa vykonala použitím rôznych variantov matematických modelov. Dosiahnuté výsledky potvrdili možnosť vyrovnania nepravidelnej vekovej štruktúry postupnou reguláciou počas rubnej doby. Prvých päť desaťročí sa variabilita lesných užívateľských celkov upravuje veľmi mierne. Veľké rozdiely medzi desaťročiami vo variabilite sa vyskytujú pri tých lesných užívateľských celkoch, ktorých vekové stupne sú extrémne zastúpené oproti normálnemu zastúpeniu.

Pod'akovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- BAHÝL, J., ŽÍHLAVNÍK, A., 2008: Hodnotenie vplyvu metódy matematických modelov na vyrovnávanie vekovej štruktúry. *Acta Facultatis Forestalis Zvolen*, L, č. 2, s. 115–129.
- GREGUŠ, C., 1976: Hospodárska úprava maloplošného rúbaňového lesa. Bratislava, 304 s.
- HERICH, I., 1994: Model regulácie etátu obnovnej ťažby – uplatnenie princípu ťažbovej vyrovnanosti. *Lesnícky časopis*, č. 5, s. 317–333.
- POZNAŇSKI, R., 2001a: A new method of regulation in uneven-aged forests. In: Medzinárodné sympóziu „Súčasná a nové smery rozvoja HÚL“, TU Zvolen, s. 25–29.
- POZNAŇSKI, R., 2001b: Metoda optymalnego porządku cięć w przerębowozrębowym sposobie zagospodarowania z rębnią częściovą. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu. CCCXXXI, Leśnictwo*, 39: 203–208.
- POZNAŇSKI, R., 2004: Nowe metody regulacji w urządzaniu lasu. Katedra Urządzania Lasu Akademii Rolniczej, Krakow, 195 s.
- SANIGA, M., 2006: Pestovanie lesa. TU Zvolen, 311 s.
- ŽÍHLAVNÍK, A., 1998: Využitie plochových ťažbových ukazovateľov v nepravidelných vekových štruktúrach lesa. *Acta Facultatis Forestalis Zvolen*, XL, s. 185–196.
- ŽÍHLAVNÍK, A., 2000: Ťažbová regulácia v lesných užívateľských celkoch s podrastovým hospodárskym spôsobom. *Acta Facultatis Forestalis Zvolen*, XLII, s. 213–225.

- ŽIHĽAVNÍK, A., 2001: Vplyv vekovej štruktúry na vyrovnanosť ťažbových ukazovateľov v podrastovom lese. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, XLIII, s. 389–400.
- ŽIHĽAVNÍK, A., 2003: Ťažbová úprava lesa v lesných užívateľských celkoch s malými výmerami. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, XLV, s. 311–321.
- ŽIHĽAVNÍK, A., 2004: Regulácia vekovej štruktúry podrastového lesa počas rubnej doby. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, XLVI, s. 185–195.
- ŽIHĽAVNÍK, A., 2005: Uplatnenie ťažbových ukazovateľov v dlhodobom sledovaní vývoja vekovej štruktúry lesa. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, XLVII, s. 309–322.
- ŽIHĽAVNÍK, Š., 2004a: Geodézia, fotogrametria a mapovanie v lesníctve. VŠ učebnica, TU Zvolen, 388 s.
- ŽIHĽAVNÍK, Š., 2004b: Problematika vytyčovania hraníc pri reprivatizácii lesných pozemkov. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, XLVI, s. 235–245.
- Vyhláška MP SR č. 453/2006 Z. z. o hospodárskej úprave lesov a ochrane lesa
- Zákon NR SR č. 326/2005 Z. z. o lesoch (360/2007).
-

Adresa autora:

prof. Ing. Anton Žihľavník, CSc.
Katedra hospodárskej úpravy lesov a geodézie
Lesnícka fakulta
TU vo Zvolene
T. G. Masaryka 24, 960 53 Zvolen
Slovensko
e-mail: azihlav@vsld.tuzvo.sk

Možnosti regulácie ťažieb metódou matematických. modelov v lesných užívateľských celkoch s nepravidelnými vekovými štruktúrami

Abstrakt

V práci je riešená problematika ťažbovej úpravy lesa v lesných užívateľských celkoch. Ide o lesné užívateľské celky s nepravidelnými vekovými štruktúrami. Použil sa vybraný súbor lesných užívateľských celkov zaradený do veľkostnej skupiny v rozpätí výmery 1300-1600 ha. Zo zhodnotenia stavu skutočných vekových štruktúr lesných užívateľských celkov vyplynulo, že napriek dost veľkej výmere je veková štruktúra nevyrovnaná s nepravidelným zastúpením vekových stupňov. Nepravidelnosť vekových štruktúr sa hodnotila použitím variačných koeficientov, ktorými sa vyjadrila variabilita v jednotlivých desaťročiach. Regulácia vekovej štruktúry sa vykonala použitím rôznych variantov matematických modelov. Dosiahnuté výsledky potvrdili možnosť vyrovnania nepravidelnej vekovej štruktúry postupnou reguláciou počas rubnej doby. Prvých päť desaťročí sa variabilita lesných užívateľských celkov upravuje veľmi mierne. Veľké rozdiely medzi desaťročiami vo variabilite sa vyskytujú pri tých lesných užívateľských celkoch, ktorých vekové stupne sú extrémne zastúpené oproti normálnemu zastúpeniu.

Kľúčové slová: ťažbová úprava lesa, lesný užívateľský celok

VZNIK SACHARIDOV A PRCHAVÝCH LÁTOK PRI PREDHYDROLÝZE TOPOĽOVÉHO DREVA

Marta L A U R O V Á – František K A Č Í K

Laurová, M., Kačík, F.: Arising of saccharides and volatile compounds at poplar wood (*Populus tremula* L.) prehydrolysis. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 153–161, 2009.

Hydrothermal treatment under mild conditions (160–200 °C, reaction time 30–240 min, liquor to solid ratio 4 : 1 (ml/g)) caused effect on dissolution of aspen (*Populus tremula* L.). The obtained liquors contained a mixture of oligosaccharides (mostly xylooligosaccharides), monosaccharides (mainly xylose, arabinose) and saccharides and lignin decomposition products (volatile compounds – methanol, acetic acid, propionic acid and 2-furaldehyde). It was found that the formation of these compounds depends on the autohydrolysis conditions (reaction time, temperature).

Key words: poplar, hydrolysis, saccharides, 2-furaldehyde, carboxylic acids, methanol

1. ÚVOD

Spôsob zhodnotenia biomasy na energetické účely je do značnej miery určený jej fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami. Veľmi dôležitým parametrom je vlhkosť, resp. obsah sušiny v biomase. Hodnota 50 % sušiny tvorí približnú hranicu medzi mokrymi procesmi a suchými procesmi jej spracovania.

Napriek tomu, že existuje viacero spôsobov energetického zhodnotenia biomasy, vo svete prevláda zo suchých procesov spaľovanie biomasy a z mokrých procesov výroba bioplynu anaeróbnou fermentáciou. Z ostatných spôsobov dominuje výroba metylesterov bioolejov, ktoré sa získavajú v surovom stave lisovaním semien olejnatých rastlín (KÁRA *et al.* 1995, KÁRA, HUTLA, STRAŠIL 2003).

Lignocelulózová (LC) biomasa (dendromasa, fytomasa) predstavuje rastlinnú biomasu, ktorá pozostáva z troch hlavných zložiek: celulózy (38–54 %), lignínu (15–31 %) a hemicelulózy (11–37 %). Zvyšok tvoria extraktívne látky a popol. Prevažujúcou hemicelulózovou zložkou v LC biomase sú xylány. Na výrobu etanolu sú uprednostňované surovinové zdroje s vyšším obsahom acetylových skupín, ktoré pozitívne ovplyvňujú hydrolýzne procesy už pri ich predúprave (GARROTE *et al.* 1999a, LEE *et al.* 2007, SIERRA *et al.* 2008).

Výroba etanolu z lignocelulózovej biomasy pozostáva zo štyroch základných technologických operácií: predúprava biomasy, hydrolýza celulózy (*sacharifikácia*), skvasovanie (*anaeróbná fermentácia*) monosacharidov na etanol, jeho oddelenie zo zmesi a čistenie (REHM, REED 1996, McKENDRY 2002b, PANDEY 2009).

V technologickom procese predúpravy LC biomasy (pareníe, parná explózia, horúcovodná predhydrolyza) sa najčastejšie využíva teplotný rozsah 150 až 300 °C. Pri týchto teplotách, v dôsledku katalytického účinku H_3O^+ iónov, vznikajúcich v prvých fázach autohydrolyzy najmä v autoprotolýzou vody, dochádza k hydrolyzným reakciám podobným, ako pri nižších teplotách, avšak s vyššou intenzitou, ako napr. pri teplote 100 °C (TORTOSA *et al.* 1995). Hemicelulózy sa hydrolyzujú vplyvom štiepenia glykozidových väzieb na vodorozpusťné oligosacharidy alebo až monosacharidy (CARVALHEIRO *et al.* 2004, CONNER 1984, GARROTE, DOMÍNGUEZ, PARAJÓ 1999a, b, GARROTE, PARAJÓ 2002, PARAJÓ, *et al.* 2004). Súčasne do vodného roztoku prechádza aj značná časť vodorozpusťného lignínu. Hydrolyzáty sa môžu využívať napr. ako fermentačné médium na výrobu niektorých látok, nakoľko niektoré typy kvasiniek a baktérií dokážu premieňať hexózy a pentózy na etanol, xylitol atď. (HAHN-HÄGERDAL *et al.* 2006, SÁNCHEZ, CARDONA 2008, OLLSON, HAHN-HÄGERDAL 1996, SREENATH, JEFFRIES 2000, SUN, CHENG 2002).

Rýchlosť a účinnosť fermentácie hydrolyzáto, tzv. C6, resp. C5 frakcie, je obmedzená, pretože pri autohydrolyze, resp. kyslej hydrolyze vznikajú aj inhibítory týchto procesov, ako sú napr. kyselina octová, 2-furaldehyd a niektoré aromatické zlúčeniny vznikajúce z lignínu (DELGENES *et al.* 1996, PALMQVIST, HAHN-HÄGERDAL 2000a, b).

Cieľom práce bolo nájsť optimálne podmienky (teplotu, čas) horúcovodnej predhydrolyzy topoľového dreva (*Populus tremula* L.), pri ktorých sa uvoľní maximálne množstvo mono-, resp. oligosacharidov hemicelulóзовého podielu do hydrolyzáto a súčasne sledovať tvorbu inhibíto, fermentačných procesov vzniknutých sacharidov.

2. MATERIÁL A METÓDY

Výber vzoriek

Vzorky dreva s rozmermi $2 \times 2 \times 10$ mm boli pripravené zo 40-ročného kmeňa topoľa osikového (*Populus tremula* L.).

Analýza dreva

Extraktívne látky v dreve boli stanovené zmesou toluén-etanol (1 : 2) podľa normy ASTM Standard D 1107-96 (1998), celulóza podľa SEIFERTA (1960), holocelulóza podľa Wise *et al.* (1946), lignín podľa normy ASTM Standard D 1106-96 (1998).

Horúcovodná predhydrolyza dreva

Vzorky topoľového dreva (2 g) boli hydrolyzované v destilovanej vode v nereзовých autoklávoch pri teplotách 160, 180 a 200 °C počas 30, 60, 120 a 240 minút. Hydromodul drevo/voda bol 1 : 4 (g a.s./cm³).

Analýza hydrolyzátov

Po skončení časového limitu predhydrolyzy bol autokláv ochladený na laboratórnu teplotu a pevný zvyšok bol oddelený od hydrolyzátu filtráciou. Prchavé produkty (metanol, kyselina octová, kyselina propiónová, 2-furaldehyd) boli analyzované plynovou chromatografiou, metódou kalibračnej krivky (KAČÍK 2001). Monosacharidy a oligosacharidy v hydrolyzátoch boli stanovené po ich derivatizácii na aldonitrilacetáty plynovou chromatografiou, metódou vnútorného štandardu (KAČÍK *et al.* 1993). Hodnoty pH hydrolyzátov boli zistené potenciometricky na prístroji inoLab pH 720 (WTW GmbH).

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

Topoľové drevo použité na hydrolyzu obsahovalo 3,92 % extraktívnych látok, 87,66 % holocelulózy, 45,10 % celulózy a 16,83 % lignínu.

Zvyšovaním teploty horúcovodnej predhydrolyzy dochádzalo k posunu hodnôt pH hydrolyzátov do kyslých oblastí a to v dôsledku prítomnosti nascentných organických kyselín, najmä kyseliny octovej a mravčej, v menšej miere kyseliny propiónovej, levulovej a urónových kyselín. Vzrast acidity v hydrolyzátoch topoľového dreva ovplyvňovala nielen teplota, ale aj dĺžka hydrotermického pôsobenia na drevo (tab. 1).

Tab. 1 Hodnoty pH hydrolyzátov

Tab. 1 Hydrolysates pH values

Čas (min) \ Teplota (°C)	160	180	200
30	3,52	3,38	3,02
60	3,03	2,99	2,89
120	3,00	2,93	2,87
240	2,97	2,91	2,89

Vznikajúce kyseliny katalyzujú štiepenie glykozidových väzieb v polysacharidoch, najmä v hemicelulózach, ktoré sa následne uvoľňujú vo forme mono-, oligo- a polysacharidov do hydrolyzátov. Podľa BOBLETERA (1994) môžu byť hemicelulózy za určitých podmienok takmer kvantitatívne zhydrolyzované bez poškodenia celulózy, keďže väzby v hemicelulózach sú slabšie ako v celulóze.

Hydrolyzáty získané po hydrolyze topoľového dreva obsahovali zmes monosacharidov, ktoré sú typické pre listnaté dreviny. Najväčšie koncentrácie v získaných roztokoch dosahovali monosacharidy D-xylóza, L-arabínóza a D-glukóza (tab. 2). Okrem monosacharidov sa v roztoku nachádzali aj oligo- a polysacharidy, ktoré pochádzali prevažne z hemicelulózovej frakcie skúmaného topoľového dreva (tab. 3).

V listnatých drevinách je hlavnou hemicelulózovou zložkou O-acetyl-(4-O-metylglukuróno)xylán. Jej depolymerizáciou sa do hydrolyzátu uvoľňovala najmä xylóza a jej oligoméry. Pri teplotách 170 až 200 °C je možné hydrolyzu xylánu kineticky vyjadriť ako

sumu dvoch paralelných reakcií prvého poriadku (jedna je platná pre ľahkohydrolyzovateľnú časť a druhá pre viac odolnú časť xylánu). Okrem xylózy a jej oligomérov sa v hydrolyzátoch nachádzajú aj 2-furaldehyd a ďalšie degradačné produkty sacharidov (CONNER 1984), čo je v dobrej zhode s našimi výsledkami (tab. 4).

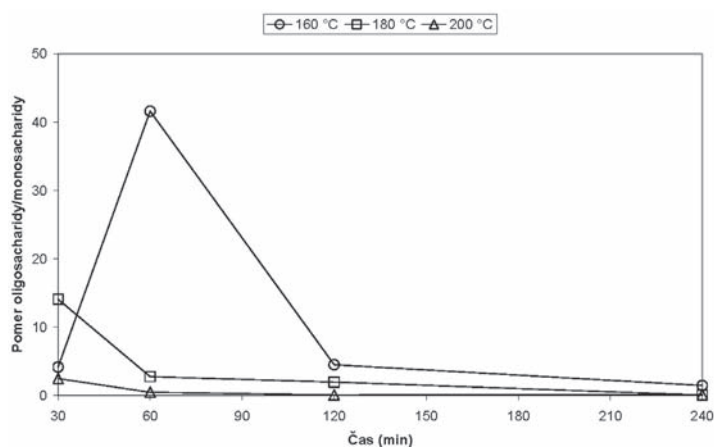
Tab. 2 Koncentrácie monosacharidov v hydrolyzátoch
Tab. 2 Concentration of monosaccharides in hydrolysates

Teplota (°C)	Čas (min)	Koncentrácia (g.dm ⁻³)		
		D-xylóza	D-glukóza	L-arabínóza
160	30	0,06	0,09	0,04
	60	0,23	0,04	0,12
	120	4,15	0,33	1,66
	240	6,41	1,42	2,74
180	30	0,34	0,13	0,21
	60	3,89	0,47	3,12
	120	4,1	2,27	4,19
	240	4,6	1,85	0,86
200	30	3,28	0,09	0,72
	60	6,63	1,29	2,67
	120	1,36	3,29	1,28
	240	1,21	2,57	0,26

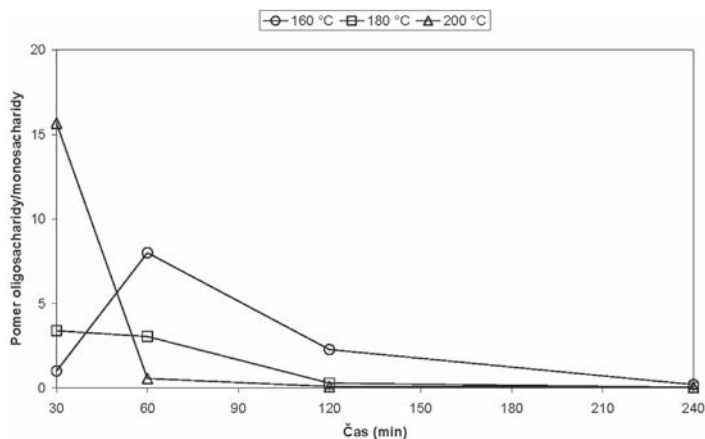
Tab. 3 Koncentrácie celkových sacharidov v hydrolyzátoch (suma mono- a oligosacharidov)
Tab. 3 Concentration of total saccharides in hydrolysates (sum of the mono- and oligosaccharides)

Teplota (°C)	Čas (min)	Koncentrácia (g.dm ⁻³)		
		D-xylóza	D-glukóza	L-arabínóza
160	30	0,31	0,18	0,06
	60	9,80	0,36	0,17
	120	22,83	1,08	1,68
	240	15,85	1,70	2,92
180	30	5,13	0,57	0,78
	60	14,64	1,90	5,40
	120	12,18	2,92	4,35
	240	4,91	1,93	0,89
200	30	11,40	1,50	3,14
	60	9,84	2,01	2,77
	120	1,48	3,56	1,37
	240	1,38	2,71	0,28

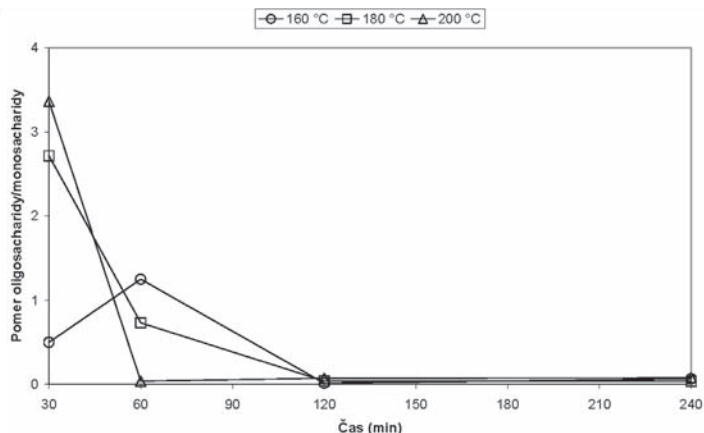
Na obr. 1 až 3 sú znázornené pomery množstiev jednotlivých sacharidov v ich oligomérnej a monomérnej forme. Z grafov vyplýva, že pri nižších teplotách a časoch pôsobenia prevládala rýchlosť odštiepovania reťazcov hemicelulóz z dreva nad ich hydrolýzou na monomérnu formu. Postupne však dominovala hydrolýza nízkomolekulových fragmentov polysacharidov v roztoku na monosacharidy, ktoré boli hlavnou sacharidovou formou v hydrolyzátoch. Podobný trend bol zistený aj pri hydrolýze javorového dreva (KAČÍK 2001).



Obr. 1 Pomer koncentrácií oligosacharidov k monosacharidom v hydrolyzátoch – D-xylóza
Fig. 1 Oligosaccharides to monosaccharides concentration ratio in hydrolysates – D-xylose



Obr. 2 Pomer koncentrácií oligosacharidov k monosacharidom v hydrolyzátoch – D-glukóza
Fig. 2 Oligosaccharides to monosaccharides concentration ratio in hydrolysates – D-glucose



Obr. 3 Pomer koncentrácií oligosacharidov k monosacharidom v hydrolyzátoch – L-arabínóza
 Fig. 3 Oligosaccharides to monosaccharides concentration ratio in hydrolysates – L-arabinose

Optimálne podmienky hydrolýzy, pri ktorých sa dosiahli maximálne výtážky sacharidov, boli teplota 160 °C a čas 120 minút, resp. 180 °C a 60 minút, čo sú podobné podmienky, ako boli dosiahnuté pri hydrolýze jelšového dreva (KAČÍK *et al.* 2008). Pokles koncentrácie sacharidov pri teplote 200 °C, ako aj pri dlhších časoch pri nižších teplotách pôsobenia, je spôsobený degradačnými reakciami monosacharidov, pri ktorých z pentóz vzniká 2-furaldehyd a z hexóz jeho 5-hydroxymetyl derivát.

Medzi najdôležitejšie degradačné produkty hemicelulóz patrí kyselina octová a mimoriadne reaktívny 2-furaldehyd. Ich množstvá v hydrolyzátoch topoľového dreva vzrastali so zvyšujúcou teplotou a predĺžovaním času predhydrolýzy (tab. 4). Pri teplote 200 °C však bolo pri 120 minútach dosiahnuté koncentračné maximum tejto látky. Uvedenú skutočnosť možno vysvetliť už spomínanou schopnosťou 2-furaldehydu vstupovať do kondenzačných reakcií s degradačnými produktmi sacharidov a lignínu.

Keďže uvedené látky pôsobia inhibične, pri ďalšom spracovaní monosacharidov prítomných v hydrolyzátoch, napr. mikrobiálnou fermentáciou, je potrebné do daných technologických postupov zaradiť, tzv. detoxifikáciu hydrolyzátoV (DELGENES *et al.* 1996, PALMQVIST, HAHN-HÄGERDAL 2000a, b). Optimalizácia podmienok hydrolýzy (teplota, čas) sú preto veľmi dôležité na dosiahnutie maximálnych výtážkov sacharidov pri ich minimálnom rozklade na degradačné produkty. Na odstránenie škodlivých látok z hydrolyzátoV sa používajú viaceré detoxifikačné metódy (CARVALHO *et al.* 2006, JÖNSSON *et al.* 1998, JÖNSSON *et al.* 2001, LARSON *et al.* 1999).

Tab. 4 Koncentrácie prchavých látok v hydrolyzátach
 Tab. 4 Concentrations of volatile compounds in hydrolysates

Teplota (°C)	Čas (min)	Koncentrácia (g.dm ⁻³)			
		Metanol	Kyselina octová	Kyselina propiónová	2-Furaldehyd
160	30	0,17	0,74	0,14	0,12
	60	0,37	1,91	0,38	0,12
	120	0,39	7,75	0,93	0,51
	240	0,74	10,80	0,98	3,19
180	30	0,23	0,98	0,19	0,11
	60	0,98	10,40	1,00	1,31
	120	1,20	12,62	0,86	7,77
	240	1,36	14,46	0,68	13,72
200	30	0,55	6,49	0,96	0,75
	60	1,07	11,31	0,74	8,31
	120	1,44	13,30	1,40	11,83
	240	1,43	14,83	1,05	8,77

4. ZÁVER

Horúcovodná predhydrolyza pri teplotách 160, 180 a 200 °C a reakčných časoch 30, 60, 120 a 240 °C spôsobuje najmä hydrolyzu hemielulózu topoľového dreva (*Populus tremula* L.), ktoré sa pri nižších teplotách (160 °C), resp. kratších reakčných časoch (do 120 minút) uvoľňujú do roztoku prednostne vo forme oligosacharidov. Tieto sa predĺžovaním času predhydrolyzy hydrolyzujú na monosacharidy. Maximálne koncentrácie v získaných roztokoch dosahujú D-xylóza, L-arabinóza a D-glukóza. Najvyššie koncentrácie sacharidov v hydrolyzátach sa dosahujú pri teplote 160 °C a čase 120 minút, resp. pri teplote 180 °C a čase 60 minút.

Degradáciou uvoľnených monosacharidov a odštepovaním funkčných skupín hemielulózu a lignínu vznikajú ďalšie produkty, ako sú najmä 2-furaldehyd, ktorý kondenzuje s inými produktmi degradácie sacharidov a lignínu, a kyselina octová.

Pod'akovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy”, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- BOBLETER, O. 1994. Hydrothermal degradation of polymers derived from plants. In: *Progress in Polymer Science*, Vol. 19, 1994, Issue 5, pp. 797–841.
- CARVALHEIRO, F., ESTEVES, M. P., PARAJÓ, J. C., PEREIRA, H., GORIL, F. M. 2004. Production of oligosaccharides by autohydrolysis of brewery's spent braun. In: *Bioresource Technology*, Vol. 91, 2004, Issue 1, pp. 93–100.
- CARVALHO, G.B.M., MUSSATTO, S.I., CÂNDIDO, E.J., ALMEIDA E.S., JOÃO, B. 2006. Comparison of different procedures for the detoxification of eucalyptus hemicellulosic hydrolysate for use in fermentative processes. In: *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, Vol. 81, 2006, Issue 2, pp. 152–157.
- CONNER, A.H. 1984. Kinetic modelling of hardwood prehydrolysis. Part I. Xylan removal by water prehydrolysis. In: *Wood and Fiber Science*, Vol. 16, 1984, Issue 2, pp. 268–277.
- DELGENES, J.P., MOLETTA, R., NAVARRO, J.M. 1996. Effects of lignocellulose degradation products on ethanol fermentations of glucose and xylose by *Saccharomyces cerevisiae*, *Pichia stipitis*, and *Candida shehatae*. In: *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 19, 1996, Issue 3, pp. 220–225.
- GARROTE, G., DOMÍNGUEZ, H., PARAJÓ, J.C. 1999a. Hydrothermal processing of lignocellulosic materials. In: *Holz als Roh- und Werkstoff*, Vol. 57, 1999, Issue 3, pp. 191–202.
- GARROTE, G., DOMÍNGUEZ, H., PARAJÓ, J.C. 1999b. Mild autohydrolysis: an environmentally friendly technology for xylooligosaccharide production from wood. In: *Journal of Chemical technology and Biotechnology*, Vol. 74, 1999, Issue 11, pp. 1101–1109.
- GARROTE, G., PARAJÓ, J.C. 2002. Non-isothermal autohydrolysis of Eucalyptus wood. In: *Wood Science and Technology*, Vol. 36, 2002, Issue 2, pp. 111–123.
- HAHN-HÄGERDAL, B., GALBE, M., GORWA-GRAUSLUND, M.F., LIDÉN, G., ZACCHIA, G. 2006. Bio-ethanol – the fuel of tomorrow from the residues of today. In: *Trends in Biotechnology*, Vol. 24, 2006, Issue 12, pp. 549–556.
- JÖNSSON L. J., NILVEBRANT N-O., REIMANN A., LARSSON S. 2001. Detoxification of Lignocellulose Hydrolysates with Ion-Exchange Resins. In: *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol. 91, 2001, Issue 1–3, pp. 35–49.
- JÖNSSON L. J., PALMQVIST, E., NILVEBRANT N-O. 1998. Detoxification of wood hydrolysates with laccase and peroxidase from the white-rot fungus *Trametes versicolor*. In: *Applied Microbiology and Biotechnology*, Vol. 49, Issue 6, 1998, pp. 691–697.
- KÁČÍK F. 2001. Tvorba a chemické zloženie hydrolyzáto v systéme drevo-voda-teplo. Zvolen : Technická univerzita vo Zvolene, 2001. 75 pp.
- KÁČÍK, F., LAUROVÁ, M., KÁČÍKOVÁ, D. 2008. Determination of volatile compounds and saccharides at alder wood hydrolysis. In: *Chemické Listy*, Roč. 102, 2008, s. 383–385. ISSN 1803–2389.
- KÁČÍK, F., SOLÁR, R., MELČER, I. 1993. Stanovenie monosacharidov v dreve a drevných materiáloch metódou plynovej chromatografie. In: *Zborník vedeckých prác DF TU vo Zvolene*, s. 99–104.
- KÁRA, J. *et al.* 1995. Kvantifikace a využití obnovitelných a druhotných zdrojů energie v zemědělství. Praha : VÚZT. 143 s.
- KÁRA, J., HUTLA, P., STRAŠIL, Z. 2003. Technologické systémy pro využití biopaliv z energetických plodin. Praha : VÚZT. 44 s.
- LARSSON S., REIMANN A., NILVEBRANT N-O., JÖNSSON L. J. 1999. Comparison of different methods for the detoxification of lignocellulose hydrolyzates of spruce. In: *Applied Biochemistry and Biotechnology*, Vol. 77, 1999, Issue 1–3, pp. 91–103.
- LEE, D., OWENS, V., BOE A. 2007. Composition of herbaceous biomass feedstocks. In: <http://ncsungrant.sdstate.org/uploads/publications/SGINC1-07.pdf>, 20. 2. 2009.
- MCKENDRY, P. 2002. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass. In: *Bioresource Technology*, Vol. 83, pp. 37–46.
- OLLSON, L., HAHN-HÄGERDAL, B. 1996. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates for ethanol production. In: *Enzyme and Microbial Technology*, Vol. 18, 1996, Issue 5, pp. 312–331.
- PALMQVIST, E., HAHN-HÄGERDAL, B. 2000a. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. I: inhibitors and detoxification. In: *Bioresource Technology*, Vol. 74, 2000, Issue 1, pp. 17–24.
- PALMQVIST, E., HAHN-HÄGERDAL, B. 2000b. Fermentation of lignocellulosic hydrolysates. II: inhibitors and mechanisms of inhibition. In: *Bioresource Technology*, Vol. 74, 2000, Issue 1, pp. 25–33.
- PANDEY, A. 2009. Handbook of plant-based biofuels. Boca Raton : CRC Press. ISBN 978-1-56022-175-3.

- REHM, H. J., REED, G. 1996. Biotechnology : Products of primary metabolism. Wiley-VCH, 753 pp. ISBN 3527283161.
- SÁNCHEZ, Ó. J., CARDONA, C. A. 2008. Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks. In: Bioresource Technology, Vol. 99, 2008, Issue 13, pp. 5270–5295.
- SIERRA, R., SMITH, A., GRANDA, C., HOLTZAPPLE, M.T. 2008. Producing fuels and chemicals from lignocellulosic biomass. In: Chemical Engineering Progress, August 2008. (http://findarticles.com/p/articles/mi_qa5350/is_200808/ai_n28083408?tag=content;col1, 7. 2. 2009).
- SREENATH, H.K., JEFFRIES, T.W. 2000. Production of ethanol from wood hydrolyzate by yeasts. In: Bioresource Technology, Vol. 72, 2000, Issue 3, pp. 253–260.
- SUN, Y., CHENG, J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. In: Bioresource Technology, Vol. 83, 2002, Issue 1, pp. 1–11.
- SEIFERT V. K. 1960. Zur Frage der Cellulose-Schnellbestimmung nach der Acetylaceton- Methode. In: Das Papier, Volume 14, 1960, pp. 104–106.
- TORTOSA, J.F. RUBIO, M., DEMETRIO, G. 1995. Autohidrólisis de tallo de maíz en suspensión acuosa. In: Afinidad, roč. 52, s. 181–188.
- WISE L. E., MURPHY M., D'ADDIECO A. A. 1946. Chlorite holocellulose, its fractionation and bearing on summative wood analysis and on studies on the hemicelluloses. In: Paper Trade Journal, Volume 122, 1946, Issue 35, pp. 35–34.
- ASTM STANDARD D 1106-96: Standard test method for acid insoluble lignin in wood (1998).
- ASTM STANDARD D 1107-96: Standard test method for ethanol toluene solubility of wood (1998).
-

Adresa autorov:

RNDr. Marta Laurová, PhD.

Prof. RNDr. František Kačfík, PhD.

Katedra chémie a chemických technológií

Drevárska fakulta

Technická univerzita vo Zvolene

T. G. Masaryka 24

960 53 Zvolen

e-mail: laurova@vsld.tuzvo.sk

kacik@vsld.tuzvo.sk

Vznik sacharidov a prchavých látok pri predhydrolýze topoľového dreva

Abstrakt

Horúcovodná predhydrolýza je efektívna metóda na predúpravu lignocelulóзовých materiálov pri ich využívaní ako alternatívnych zdrojov energie a surovín na výrobu rôznych chemických látok. Topoľové drevo (*Populus tremula* L.) bolo podrobené hydrolýze v teplotnom rozsahu 160 °C až 200 °C, pričom sa do roztoku uvoľnili najmä hemicelulózy a časť amorfnej celulózy. Maximálne koncentrácie sacharidov v hydrolyzátoch boli stanovené pri teplote 160 °C (120 minút) a 180 °C (60 minút). V hydrolyzátoch boli stanovené aj deštruktívne produkty polysacharidov a lignínu: 2-furaldehyd, karboxylové kyseliny a metanol.

Kľúčové slová: topoľ, hydrolýza, sacharidy, 2-furaldehyd, karboxylové kyseliny, metanol

METODIKA MERANIA VYBRANÝCH ERGONOMICKÝCH CHARAKTERISTÍK ŤAŽBOVO-DOPRAVNÝCH TECHNOLOGIÍ

Valéria MESSINGEROVÁ – Miroslav STANOVSKÝ
– Michal FERENČÍK – Jozef SLUGEŇ – Peter KOVÁČIK
– Daniel KINDERNAY

Messingerová, V., Stanovský, M., Ferenčík, M., Slugeň, J., Kováčik, P., Kindernay, D.: Design of the methodology for measurement of selected ergonomic characteristics in wood harvesting process. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 163–173, 2009.

Main goal of presented paper is to design methodology for measurement of physical and noise workload which influence on workers during the process of forest harvesting in Slovakia. Various technologies, such as harvesters, forwarders, tractor skidding will be a subject of measurement according the methodology. The work also presents brief results of previous research, which has been aimed to evaluate the physical workload of forest workers, such as chain saw and harvester operators. Physical workload will be measured through the heart (with use of the Polar S625X and WearLink device) and energy consumption (with use of the MWE-1). Noise load of the workers will be estimated with use of the Norsonic Nor 118 Noise analyser and the Brüel & Kjær Type 4436 noise dosimeter. The results obtained, will be compared with maximal allowed values according the valid legislation.

Key words: physical workload, noise, wood harvesting technologies

1. ÚVOD A CIELE PRÁCE

V lesnom hospodárstve sú napriek vysokému stupňu mechanizácie zastúpené aj motomanuálne práce, vyplýva to zo zložitých výrobnotechnických podmienok, heterogénnych požiadaviek a potrieb práce v lese. Aj preto značná časť týchto prác, najmä v ťažbovo-dopravnom procese, patrí medzi fyzicky náročné a rizikové. Práca sa tu vykonáva z veľkej časti manuálne, resp. s použitím hlučných mechanizmov. Typickými príkladmi sú o motomanuálna ťažba dreva s použitím jednomužnej motorovej pily (JMP), ručné vyťahovanie lana do porastu pri traktorovom sústreďovaní dreva. Pri ručnej a polomechanizovanej práci spočíva zaťaženie človeka v namáhaní pohybovej, dýchacej a obehovej sústavy. Pri mechanizovanej práci telesné zaťaženie ustupuje a do popredia sa dostáva zaťaženie nervovej sústavy a zmyslových orgánov. Ťažba a sústreďovanie dreva v zložitom prírodnom prostredí je jedným z najnáročnejších pracovných ergonomických systémov. Analýza práce

vykonaná na ergonómickom základe slúži ako prvotný podklad pre prípadné zracionalizovanie výrobného procesu. Technika v mnohých prípadoch uľahčuje a zjednodušuje fyzicky náročné a komplikované pracovné operácie a zrýchľuje prácu. Napriek tomu sú pracovníci lesného hospodárstva vystavení mnohým rizikám poškodenia zdravia. Medzi takéto faktory patrí aj hluková a fyzická záťaž pracovníkov, ktorá je predmetom skúmania tejto práce.

Cieľom tejto práce je stručný opis problematiky merania hlukovej a fyzickej záťaže pracovníkov v ťažbovo-dopravnom procese, a prehľad legislatívnych limitov, ktoré určujú maximálne prípustné hodnoty sledovaných škodlivých faktorov. Hlavným cieľom práce je stanoviť postupy a prostriedky, pomocou ktorých budú tieto merania vykonané a pre ilustráciu uviesť aj niekoľko príkladov z čiastkových výsledkov meraní vykonaných v predchádzajúcom období.

2. PROBLEMATIKA

Medzi významné faktory, ktoré majú vplyv na pracovnú výkonnosť a zdravotný stav pracovníka, patrí fyzická náročnosť vykonávanej práce, ktorá sa hodnotí prevažne prostredníctvom energetického výdaja a srdcovej frekvencie. Jedným z významných škodlivých faktorov, a to nielen v pracovnom procese je hluk, ktorý má na ľudský organizmus negatívny dopad. Tento škodlivý faktor pôsobí komplexne na celý organizmus, nielen na sluchový aparát.

2.1 Fyzická záťaž pri práci

Na hodnotenie fyzickej záťaže organizmu pracovníka počas vykonávania dynamickej práce sa najčastejšie používajú ukazovatele, ktoré sú ľahko zmerateľné aj v terénnych podmienkach, sú jednoducho a jednoznačne vyhodnotiteľné. Týmito ukazovateľmi sú v praxi najmä srdcová frekvencia a spotreba energie (kJ) za jednotku času.

Na stanovenie energetického výdaja sa používa ventilometria, meranie pľúcnej ventilácie, ktoré je založené na poznatku, že so stúpajúcou intenzitou práce sa zvyšuje spotreba kyslíka a produkcia oxidu uhličitého, a že spotreba kyslíka v $l \cdot min^{-1}$ je priamo úmerná vzostupu kalorického výdaja, pričom sa tiež zvyšuje intenzita (hlbka a frekvencia) dýchania.

Mierou veľkosti zaťaženia pri dynamickej telesnej práci je čistý energetický výdaj (netto) za časovú jednotku (E_w v $kJ \cdot min^{-1}$). Preto sa dovoľené zaťaženie vyjadruje dovoľeným energetickým výdajom ($E_{w,lic}$). Je daný hodnotou hranice trvalého výkonu, prípadne dlhodobej únosnej práce. V skutočnosti nejde o trvale možný výkon, ale o priemerné zaťaženie, ktoré zdravá osoba pri dodržiavaní primeraného režimu práce a odpočinku zvládne za zmenu bez väčšej únavy, alebo preťaženia (RÓNAY, SLÁMA, 1989). Dovoľené zaťaženie a dovoľené namáhanie pri dynamickej práci rôznych svalových skupinách u žien a mužov podľa platnej legislatívy je uvedené v tabuľkách 1 a 2.

Rozdelenie fyzického zaťaženia podľa náročnosti s príslušnými ukazovateľmi fyzického zaťaženia sú zobrazené v tabuľke 3. Hodnoty v kJ uvedené v tejto tabuľke platia pre muža a za predpokladu, že sa na práci podieľa prevažná časť svalov, pre ženy platí

hodnota zhruba o 20 % nižšia. Podľa prípustných hodnôt energetického výdaja uvedených v tabuľke 1, stredne ťažkú prácu – 6 250 kJ.zmenu⁻¹, t.j. 33 kJ.min⁻¹ – môže vykonávať zdravý človek dlhodobo, veľmi ťažkú prácu – 10 500 kJ.zmenu⁻¹, t.j. nad 46 kJ.min⁻¹, môže vykonávať krátkodobo zdravý človek medzi 20. až 30. rokom.

Tabuľka č. 1 Prípustné hodnoty energetického výdaja (netto) mužov vo veku 18–65 rokov pri fyzickej práci vykonávanej veľkými svalovými skupinami (Vyhláška 542/2007 Z. z.)

Table 1 Maximal allowed values of energy consumption (netto) for men between 18–65 years, working with use of great muscular groups (Regulation Nr. 542/2007)

Energetický výdaj ¹⁾	Jednotky	Veková skupina (roky)				
		18–29	30–39	40–49	50–59	60–65
Zmenový priemerný	MJ	8, 3	7, 5	6, 8	6, 0	5, 2
Zmenový prípustný	MJ	9, 9	9, 0	8, 0	7, 2	6, 2
Ročný	MJ	1 940	1 760	1 600	1 400	1 220
Minútový prípustný	kJ.min ⁻¹	41, 1	38, 7	34, 5	30, 9	28, 7
	W	685	635	575	515	478

Tabuľka č. 2 Prípustné hodnoty energetického výdaja (netto) žien vo veku 18–65 rokov pri fyzickej práci vykonávanej veľkými svalovými skupinami (Vyhláška 542/2007 Z. z.)

Table 2 Maximal allowed values of energy consumption (netto) for women between 18–65 years, working with use of great muscular groups (Regulation Nr. 542/2007)

Energetický výdaj	Jednotky	Veková skupina (roky)				
		18–29	30–39	40–49	50–59	60–65
Zmenový priemerný	MJ	5, 1	4, 8	4, 5	4, 0	3, 7
Zmenový prípustný	MJ	6, 1	5, 8	5, 4	4, 8	4, 4
Ročný	MJ	1 200	1 130	1 060	940	858
Minútový prípustný	kJ.min ⁻¹	26, 0	25, 5	23, 7	21, 6	20, 0
	W	445	425	395	360	334

Tabuľka č. 3 Kategorizácia fyzického zaťaženia (HUBAČ 1978)

Table 3 Classification of physical workload (HUBAČ 1978)

Svalová práca	Energetický výdaj	Ventilácia	Spotreba O ₂	Srdcová frekvencia
	kJ.min ⁻¹	liter.min ⁻¹	liter.min ⁻¹	min ⁻¹
Veľmi ľahká	< 2,5	< 10	< 0,5	< 80
Ľahká	2,5–5,2	10–15	0,5–1,0	80–105
Mierna	5,2–8,8	15–20	1,0–1,5	105–120
Stredná	8,8–13,1	20–35	1,5–2,0	120–130
Ťažká	13,1–17,5	35–50	2,1–2,5	130–150
Veľmi ťažká	> 17,5	> 50	> 2,5	> 150

Srdcová frekvencia sa meria pomocou pulzometrov. Tieto prístroje umožňujú merať pulz v reálnom čase. Vychádza sa z poznatku, že zo zvýšením fyzickej námahy sa úmerne zvýši aj hodnota srdcovej frekvencie. Pri zaťaženiach pod hranicu trvalej výkonnosti sa dosiahne pokojová hodnota srdcovej frekvencie v priebehu prestávky na oddych za niekoľko minút. Pri zaťaženiach, ktoré prevyšujú hranicu trvalej výkonnosti sa vyžaduje návrat srdcovej frekvencie do východiskových hodnôt relatívne dlhší čas. Súčet všetkých srdcových frekvencií počas práce a po nej sa označuje ako suma pracovných srdcových frekvencií a jej hodnota je tým väčšia, čím rýchlejšie sa určité práca vykonala. Srdcová frekvencia je vhodným ukazovateľom individuálnej námahy človeka, ale nie objektívnou mierou skutočného zaťaženia. Rovnaké zaťaženie, t.j. tá istá práca pri rovnakom výkone, môže byť pre rozličné osoby rozlične namáhavá. Najväčšie sú tieto rozdiely medzi tréningovanými a netréningovanými osobami, medzi mužmi a ženami a medzi jednotlivcami rôzneho veku (RÓNAY, SLÁMA, 1989).

Zmenové priemerné hodnoty srdcovej frekvencie pri fyzickej práci mužov a žien vykonávané veľkými svalovými skupinami, nesmú prekročiť ani krátkodobu hodnotu 150 tepov za minútu (Vyhláška č. 542/2007 Z. z.). Táto hodnota sa môže prekročiť za výnimočných situácií u vybraných skupín zamestnancov (napríklad banskí záchranári, hasiči, policajti, likvidácie havárií), ktorí sa podrobili lekárskej preventívnej prehliadke a sú zdravotne spôsobilí na túto prácu. Pre mladistvých nie sú limitné hodnoty srdcovej frekvencie stanovené s ohľadom na špecifické zmeny prebiehajúce v organizme v tomto období života. V tabuľke č. 4 sú uvedené kritériá na posudzovanie zmenovej srdcovej frekvencie pri práci vykonávanej prevažne veľkými svalovými skupinami.

Tabuľka č. 4 Kritériá na posudzovanie zmenovej srdcovej frekvencie pri práci vykonávanej prevažne veľkými svalovými skupinami (Vyhláška č. 542/2007 Z. z.)

Table 4 Criteria for consideration of the heart rate during the work performed with use of the great muscular groups

Veková skupina	Hodnoty zmenovej srdcovej frekvencie za minútu			
	absolútne hodnoty		zvýšenie srdcovej frekvencie nad východiskovú hodnotu	
	A priemerné hodnoty	B medzné hodnoty	C priemerné hodnoty	D medzné hodnoty
18–29	108	117	30	33
30–39	106	115	29	32
40–49	101	110	26	28
50–59	97	105	23	25
60–65	93	100	20	22

Vysvetlivky k tabuľke č. 4:

- A – hodnota určená na posúdenie nálezov pri vyšetroaní skupiny osôb, ak nie je stanovená aj východisková hodnota srdcovej frekvencie.
- B – hodnota, ktorá môže byť pre vyšetrovanú osobu ešte dlhodobu únosná, ak nie je prekračovaná hodnota C, t. j. zvýšenie pracovnej srdcovej frekvencie nad východiskovú (pokojovú) hodnotu.

- C – najvyššia prípustná hodnota zvýšenia srdcovej frekvencie nad východiskovú hodnotu, ktorá je u zdravých jednotlivcov dlhodobou únosná.
- D – najvyššia prípustná hodnota zvýšenia srdcovej frekvencie nad východiskovú hodnotu, ktorá sa nesmie prekročiť.

2.2 Hluk

Hluk je škodlivý, alebo nežiadúci zvuk. RÓNAY, SLÁMA (1989) uvádzajú, že hluk prostredia sa definuje ako zvukový jav vyvolávajúci nepríjemné, rušivé alebo škodlivé vnímanie u človeka.

Hluk, na rozdiel od ostatných činiteľov určujúcich prostredie, nepôsobí na človeka zjavne len v priebehu trvania, alebo tesne po skončení práce, ale aj skryto, t.j. jeho účinky sa hromadia a prejavujú až po určitom čase. Hlavné nepriaznivé účinky hluku sú: znižovanie telesnej a duševnej výkonnosti, predčasná únava, znižovanie bdlosti a sústredenosti pri práci, zhoršovanie reakčnej schopnosti, znižovanie produktivity práce.

Zamestnávateľia majú zákonnú povinnosť zabrániť alebo obmedziť vystavenie pracovníkov pôsobeniu hluku (www.europe.osha.eu.int/aboutt/) ale aj napriek tomu sú počty pracovníkov vystavených hluku veľmi vysoké. Výskum, ktorý robila Washingtonská univerzita na vzorke 43 pracovníkov, ktorý pracujú v lesníctve ukázal, že až 60 % hluku bolo nad 85 dB a 23 % hluku nad 90 dB. Až 81 % z nich boli operátori strojov a boli vystavení hluku 85,6–89,1 dB. (www.staff.washington.edu/meitzel/forestry).

Podľa účinkov vyvolávajúcich u pracovníka sa rozlišuje:

- škodlivý hluk – spôsobuje poruchy na zdraví človeka,
- rušivý hluk – sa prejavuje znižovaním produktivity práce a pod., t.j. bez spôsobenia chorobného stavu,
- obťažujúci hluk – spôsobuje len psychickú labilitu človeka.

Na Slovensku je najčastejšie využívanou mechanizáciou v sústreďovaní dreva je traktorová technológia, ktorú z hľadiska hlukovej záťaže pracovníka pri obsluhu traktora vo svojej práci zhodnotil MRAČNA (1998). Jednalo sa o špeciálny lesný kolesový traktor LKT 81 TE, v ktorom sa hladina hluku pôsobiaca na vodiča pohybovala od 75,25 dB pri voľnobehu až po 85,6 dB pri jazde do porastu a prácach na odvoznom mieste. LUKÁČ (2005) uvádza, že hlučnosť v kabínach moderných harvesterov nepresahuje 60–70 dB.

Hladiny hlučnosti JMP, ktoré predstavujú prevažnú časť mechanizácie (pri stínke a odvetvovaní) na Slovensku, sa pohybujú podľa výrobcov v rozmedzí od 99–105 dB (www.husqvarna.com, www.stihl.com). RÓNAY (1975), vo svojej práci nameral pre jednotlivé JMP hladina hluku 82–91 dB pri voľnobehu a 98–109 dB pri rezaní ($L_{Aeq} = 96,9 - 108,7$ dB). FERENČÍK (2004) vo svojej diplomovej práci nameral hodnoty L_{Aeq} jednotlivých JMP v rozsahu 92,8–95,6 dB.

Podľa Nariadenia vlády SR č. 115/2006 Z. z. z 15. februára 2006 o minimálnych zdravotných a bezpečnostných požiadavkách na ochranu zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou hluku nej patrí práca operátorov lesných strojov a pracovníkov v ťažbovo-dopravnom procese do skupiny prác č. IV a maximálna prípustná hladina $L_{EX,8h}$ je 80 dB.

3. MATERIÁL A METODIKA

Merania hlukovej a fyzickej záťaže pracovníkov v ťažbovo-dopravnom procese budú vykonané na celom území Slovenska a predmetom merania budú dostupné technológie pracujúce v sledovanom období na našom území. Pritom sa budú sledovať tak operátori jednotlivých mechanizmov, ako aj pracovníci zapojení do technologického procesu, ktorí budú pracovať manuálne (motomanuálne).

3.1 Meranie hluku

Merania boli vykonané podľa STN ISO 9612 „Akustika, pokyny na meranie a hodnotenie hlukovej expozície v pracovnom prostredí“. Táto medzinárodná norma poskytuje všeobecný návod, aké typy merania a v akých miestach sa vyžadujú na hodnotenie hluku s ohľadom na jeho pôsobenie na pracovníka, aby sa sledovala zhoda so zavedenými predpismi a aby sa indikovala potreba zníženia hluku protihlukovými opatreniami. Použité meracie prístroje, software a ich parametre sú uvedené v tabuľke 5.

Tabuľka č. 5 Základné údaje o použitých prístrojoch a programoch
Table 5 Basic data about used gear and software

Druh prístroja	Výrobca	Typ	Výrobné číslo	Trieda presnosti	Korekcia
Zvukový analyzátor	Norsonic Dánsko	Nor 118	30484	I.	0
Mikrofón	Norsonic Dánsko	Nor 1225	38645	I.	0
Predzosilňovač	Norsonic Dánsko	Nor 1206	29606	I.	0
Akustický kalibrátor	Norsonic Dánsko	Nor 1251	30932	I.	0
Software	Norsonic Dánsko	NorXfer	–	–	–
Software	Norsonic Dánsko	NorReview	–	–	–
Hlukový dozimeter	Brüel & Kjær	Typ 4436	2077762	II.	0

Pri meraní a vyhodnocovaní hluku strojov budú merania vykonané v zmysle normy „STN 47 0176-1 Metódy merania hluku v mieste obsluhy“, ktorá stanovuje technické metódy merania hluku v mieste obsluhy. Pri všetkých takýchto meraniach hlukovej záťaže obsluhy strojov sa bude analyzovať hluk v kabíne. Pri meraní hluku v týchto prípadoch majú byť dvere kabíny a okná stroja zatvorené. V prípade, že je stroj vybavený ventiláciou je potrebné, aby bola zapnutá na najväčší výkon. Hlukomer sa umiestňuje pri hlave operátora cca 20 cm od vonkajšieho zvukovodu. Predmetom merania bude maximálna hladina A zvuku ($L_{A,max}$) a ekvivalentnú hladinu A zvuku ($L_{A,eq}$). Namerané údaje budú použité na výpočet normalizovanej hladiny hlukovej expozície ($L_{EX,8h}$). Merania hlukovej záťaže pracovníkov v teréne (zapínač, traktora, pracovník s JMP...) budú vykonané pomocou osobného dozimetra Brüel & Kjær Typ 4436 (tab. 5). Údaje budú vyhodnotené pomocou programov Norreview od firmy Norsonic a softvéru BZ 7028 dodávanému ku hlukovému

dozimetru B&K. Výsledné namerané hodnoty budú následne porovnané s maximálnymi prípustnými hodnotami, ktoré udáva Nariadenia vlády SR č. 115/2006 Z. z. zo 15. februára 2006 o minimálnych zdravotných a bezpečnostných požiadavkách na ochranu zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou hluku.

3.2 Meranie fyzickej záťaže pracovníkov

Meranie srdcových frekvencií sa vykoná pomocou mikropočítača Polar S 625 X (tabuľka 6). Pri všetkých meraniach sa elastický popruh s prackou a kódovaným vysielacom (WearLink) nasadí skúmanej osobe pevne na hrudník v oblasti hrudnej kosti. Na mikropočítači sa nastaví údaje o hmotnosti, výške, veku, pohlaví a stupni vykonávanej záťaže. Po nastavení sa náramkový prijímač pripevní na ruku skúmanej osoby a následne sa vykoná meranie a záznam hodnôt srdcovej frekvencie. Namerané údaje sa po prenose do počítača následne spracujú pomocou softvéru Polar Precision Performance SW.

Tabuľka č. 6 Parametre prístroja Polar S 625 X a vysieláča srdcovej frekvencie WearLink
Table 6 Basic parameters about the Polar S 625 X and the WearLink devices

Parameter	Hodnota
Vodotesnosť	do 20 m
Životnosť batérií	cca 1 rok
Prevádzková teplota	– 10 – +50 °C
Presnosť merania SF	± 1 %
Rozsah merania nadm. výšky	– 448 až + 7590 m n. m
Presnosť merania nadm. výšky	± 1 m

Meranie energetického výdaja sa vykoná pomocou merača energetického výdaja MWE-1 prispôbeného na vykonávanie výskumu v terénnych podmienkach (tabuľka 7).

Tabuľka č. 7 Technické parametre prístroja MWE-1
Table 7 Basic data about the MWE-1 device

Parameter	Hodnota
Max. merateľná ventilácia	60 l.min ⁻¹
Chyba merania ventilácie	± 5 %
Chyba určenia energetického výdaja	± 10 %
Teplotné podmienky	0–60 °C

Uplatnená bude metodika meraní doporučená Centrálnym inštitútom ochrany práce, modifikovaná vhodne k prijatému cieľu výskumu i špecifikám lesných prác. Operátori, ktorí budú predmetom výskumu budú informovaní o jeho priebehu. Pred samotným meraním sa na prístroji nastaví údaje o hmotnosti, výške, veku, pohlaví a zaznamená sa aj teplota

a tlak vzduchu. Následne sa pracovníkovi na tvár nasadí polomaska prístroja, umožňujúca meranie ventilácie pľúc. Pracovník začne prácu, ale na výsledky meraní prvých 4–5 minút sa neprihliada, lebo je potrebné prispôsobenie intenzity ventilácie pľúc intenzite námahy a tiež adaptácii skúmanej osoby na prácu v nových podmienkach. Až z nasledujúcich 6–7 minút práce budú registrované hodnoty energetického výdaja (v $\text{kJ}\cdot\text{min}^{-1}$) a tiež minútová ventilácia pľúc. Po niekoľkých minútach prestávky sa opakuje celý merací cyklus. Pre každú analyzovanú činnosť sa vykonávajú merania aspoň pre 4 pracovné cykly.

Pri hodnotení fyzického zaťaženia organizmu sa bude merať hodnota srdcovej frekvencie, ventilácie a energetického výdaja pri práci. Spoločnými požiadavkami pre všetky merania je výber zdravých zapracovaných osôb a meraný pracovný postup musí byť technologicky ujasnený a prevedený v súlade s predpísanými ochrannými pomôckami a podľa zásad OBP.

Zistené namerané hodnoty energetického výdaja a srdcovej frekvencie budú vyhodnotené a porovnané s maximálnymi prípustnými hodnotami v zmysle platnej legislatívy (Vyhláška č. 542/2007 Z. z.).

4. ČIASTKOVÉ VÝSLEDKY

V tejto kapitole sú pre názornosť uvedené čiastkové výsledky meraní z predchádzajúceho obdobia. Ako príklad sú uvedené výsledky merania fyzickej záťaže a srdcovej frekvencie 2 pracovníkov s JMP, ktorí vykonávali ťažbu a odvetvovanie v poraste a priemerné hodnoty namerané pre operátorov harvesterov. V tabuľke 8 sú uvedené charakteristiky jednotlivých pracovníkov

Tabuľka č. 8 Základné charakteristiky sledovaných pracovníkov
Table 8 Basic characteristics about the observed workers

Pracovník	Výška (cm)	Hmotnosť (kg)	Pohlavie	Vek	Dĺžka praxe	Lokalita	Teplota vzduchu
JMP 1	185	85	Muž	21	0,5	LS Dobšiná	15 °C
JMP 2	170	80	Muž	44	16	LS Pruské	28,5 °C
Rottne H-8	180	100	Muž	40	5	LS Zákamenné	18,0 °C
Valmet 941	180	80	Muž	26	2	LS Budiš	18,1 °C

Výsledné hodnoty energetického výdaja pracovníkov s JMP a operátorov harvesterov sú usporiadané v tabuľke 9.

Tabuľka č. 9 Namerané hodnoty energetického výdaja a srdcovej frekvencie sledovaných pracovníkov
Table 9 Measured values of the energy consumption and the heart rate of observed workers

Pracovník	JMP 1	JMP 2	Operátori harvesterov
$\bar{\sigma}$ SF (n.min ⁻¹)	104,5	107	87
sx	3,54	4,01	16
$\bar{\sigma}$ ventilácia (l.min ⁻¹)	28,7	29,7	11,94
sx	1,5	1,8	1,92
EV netto (kJ.min ⁻¹)	27	28,7	5,51
sx	2,2	2,4	2,26

Srdcová frekvencia oboch pracovníkov s JMP sa pri ťažbe a odvetvovaní dreva v poraste pohybuje v rozpätí od 94–107 úderov za minútu. Najvyššie zaťaženie srdcovo-cievneho systému je pri samotnej ťažbe dreva v poraste, kde minútová srdcová frekvencia dosahuje 121 a 125 n.min⁻¹. Priemerné hodnoty pracovnej srdcovej frekvencie sú 104,5 a 107 úderov za minútu. Energetický výdaj netto u pracovníka číslo 1 pri ťažbe a odvetvovaní dreva je 27,0 kJ.min⁻¹ a pracovníka číslo 2 je 28,7 kJ.min⁻¹, rozdiely medzi oboma skúmanými pracovníkmi nie sú výrazné. Priemerné ukazovatele operátorov harvesterov poukazujú na výrazné zníženie fyzickej náročnosti práce pri použití mechanizácie. Na základe energetického výdaja netto možno skonštatovať, že pracovnú činnosť ťažbu a manipuláciu dreva v poraste môžeme považovať za veľmi ťažkú a prácu operátorov harvesterov možno považovať za ľahkú až mierne náročnú. Je tiež možné konštatovať, že sledovaní pracovníci neprekročili prípustné hodnoty energetického výdaja a srdcovej frekvencie, okrem pracovníka s JMP č. 2, ktorý prekročil hodnotu priemernej srdcovej frekvencie.

5. ZÁVER

Predkladaná práca poukazuje na dôležitosť sledovania ergonomických parametrov ťažbovo dopravných technológií v lesníctve. Zároveň stanovuje metodické postupy pre sledovanie týchto parametrov, medzi ktoré patrí hluková a fyzická záťaž pracovníkov. Predložené čiastkové výsledky poukazujú na výrazné rozdiely v záťaži pracovníkov pri motomanuálnej a plne mechanizovanej technológii ťažby dreva.

Pod'akovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy”, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- FERENČÍK, M., 2004: Expozícia pracovníka v ťažbe dreva hlukom, Diplomová práca, KLŤM.
- HUBAČ, M.: Kvantitatívne hodnotenie zaťaženia dynamickou prácou, Pracov.lek. 30, 1978, č. 4, s. 128–138.
- LUKÁČ, T., 2005: Viacoperačné stroje v lesnom hospodárstve, Zvolen, 134 s.
- MRAČNA, V., 1998: Zhodnotenie hlukovej záťaže pracovníka pri obsluhu LKT 81 TE, Lesy a lesnícky výskum pre tretie tisícročie, Zborník prednášok z medzinárodnej vedeckej konferencie, Zvolen.
- NARIADENIE VLÁDY Č. 115/2006 o minimálnych zdravotných a bezpečnostných požiadavkách na ochranu zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou hluku.
- RÓNAY, E. – SLÁMA, O., 1989: Ergonómia a bezpečnosť pri práci v lesnom hospodárstve. 309 s.
- RÓNAY, E., 1972: Výskum novej technológie a techniky výroby dreva v ihličnatých a listnatých predrubných porastoch.(Záverečná správa výskumnej úlohy č. R VII – 11/3). Zvolen: ES VŠLD. 160 s.
- VYHLÁŠKA 542/2007 Z. z. o podrobnostiach o ochrane zdravia pred fyzickou záťažou pri práci, psychickou pracovnou záťažou a senzorickou záťažou pri práci.
- www.europe.osha.eu.int/sector/agriculture/noise
- www.staff.washington.edu/meitzel/forestry
-

Adresa autorov:

Prof. Messingerová Valéria, CSc.
Katedra lesnej ťažby a mechanizácie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
tel.: 421-45-5206 284
e-mail: messin@vsld.tuzvo.sk

Ing. Stanovský Miroslav, CSc.
Katedra lesnej ťažby a mechanizácie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
tel.: 421-45-5206 287
e-mail: stanov@vsld.tuzvo.sk

Ing. Ferenčík Michal, PhD.
Katedra lesnej ťažby a mechanizácie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen
tel.: 421-45-5206 832
e-mail: ferencik@vsld.tuzvo.sk

Ing. Jozef Slugeň, Phd.
Katedra lesnej ťažby a mechanizácie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen

tel.: 421-45-5206 262
e-mail: slugen1@hotmail.com

Ing. Peter Kováčik
Katedra lesnej ťažby a mechanizácie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen

tel.: 421-45-5206 282
e-mail: kpkovacik@yahoo.com

Ing. Daniel Kindernay
Katedra lesnej ťažby a mechanizácie
Lesnícka fakulta
Technická univerzita
T. G. Masaryka 24
960 53 Zvolen

tel.: 421-45-5206 286
e-mail: daniel.kindernay@gmail.com

Metodika merania vybraných ergonomických charakteristík, ťažbovo-dopravných technológií

Abstrakt

Práca je zameraná na popis problematiky a metodiky merania fyzickej a hlukovej záťaže pracovníkov pri rozličných technológiách v ťažbe a sústredovaní dreva v podmienkach slovenského lesného hospodárstva. Prezentované sú aj čiastkové výsledky meraní fyzickej záťaže pre vybrané ťažbovo-dopravné technológie. Fyzická záťaž pracovníkov bola stanovená na základe merania pulzu (prístroj Polar S625X) a energetického výdaja (prístroj MWE-1). Hluková záťaž pracovníka sa bude stanovovať na základe merania ekvivalentnej hladiny hluku (hlukomer Norsonic Nor 118 a pomocou osobného dozimetra Brüel & Kjær Typ 4436). Výsledná hluková záťaž pracovníka bude porovnaná s maximálnou prípustnou hodnotou stanovenou platnou legislatívou.

Kľúčové slová: fyzická záťaž, hluk, ťažbovo-dopravné technológie

METODIKA STANOVENIA POŠKODZOVANIA PORASTOVEJ PÔDY HARVESTEROVÝMI TECHNOLÓGIAMI

Jozef S L U G E Ň – Michal F E R E N Č Í K

– Valéria M E S S I N G E R O V Á – Miroslav S T A N O V S K Ý

– Daniel K I N D E R N A Y – Peter K O V Á Č I K

Slugeň, J., Ferenčík, M., Messingerová, V., Stanovský, M., Kindernay, D., Kováčik, P.: **Methods of evaluating forest soil damage by cut-to-length technologies.** Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 175–190, 2009.

This paper presents the forest soil damage by cut-to-length technologies. In general, the cut-to-length technologies are considered as less destructive compared to the other logging technologies. Mainly, the knowledge about the forest soil damage in Slovak terrain conditions are less researched. The goal of this study is to create, develop and check out the appropriate measuring methods of the forest soil damage by cut-to-length technologies. Right now, we can confirm, that the proper technological planning of logging and forest stand is very important. Precautions against the potential damage are also important.

Key words: harvester technologies, soil damage, static penetration

1. ÚVOD

Vedecké poznatky a praktické skúsenosti ostatných rokov ukazujú, že plne mechanizované integrované technológie ťažby a sústreďovania dreva na báze viacoperačných strojov umožňujú zmeniť ťažbovú činnosť na vysoko účinný, ekonomicky efektívny a ekologicky prijateľný výrobný systém.

Predmetom výskumu a diskusie je najmä otázka potenciálneho poškodenia produkčnej a ekologickej funkcie porastovej pôdy prejazdmi ťažkých strojov a otázka možných negatívnych dopadov malých rozstupov vyvážacích liniek širokých 3,5–4,0 m na produkciu a stabilitu lesných porastov.

Základný okruh súvisiacich otázok je zatiaľ vyriešený iba čiastočne alebo s obmedzenou mierou zovšeobecnenia dosiahnutých výsledkov.

V oblasti potenciálneho poškodenia pôdy prejazdmi lesníckych strojov sa to týka najmä:

- určenia medzných hodnôt medzi tolerovateľnou a škodlivou intenzitou a plošným rozsahom stlačenia (zhutnenia) vrchných horizontov porastovej pôdy,

- stanovenia jednoduchých, prakticky použiteľných ukazovateľov (vonkajších znakov) na kvantifikáciu vzťahov medzi mechanickým pretvorením pôdy a potenciálnymi negatívnymi dopadmi na pôdu, resp. lesný ekosystém,
- vypracovania účinnej metódy pre prax na vymedzenie prípustného zaťaženia pôdy určitého druhu a konzistencie prejazdmi lesníckych strojov – napr. formou stanovenia maximálnej hodnoty kontaktného tlaku kolies na pôdnu podložku vo vzťahu ku momentálnej vlhkosti určitého druhu pôdy tak, aby prejazdy strojov nemali za následok neprípustné poškodenie pôdy (napr. MATHIES – KREMER 1999).

2. PROBLEMATIKA

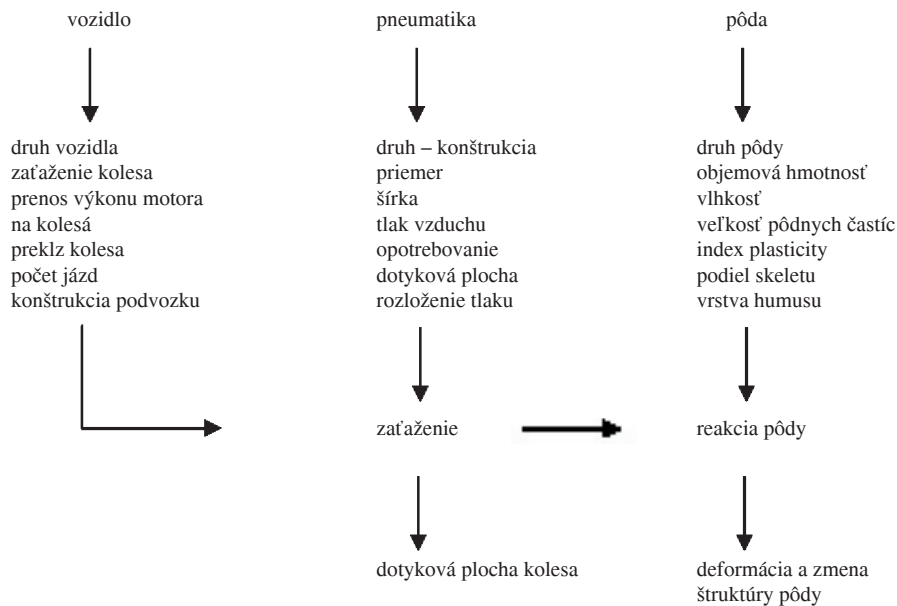
Ťažbové mechanizmy sa pri výkone svojich činností prevažnú väčšinu pracovného času pohybujú po neupravenom povrchu lesnej pôdy. Jedná sa hlavne o približovacie a vyvážacie linky (VL), ktorých povrch je priamo atakovaný pohybujúcimi sa strojmi. Vlhkostné a teplotné pomery porastovej pôdy predstavujú základné faktory ovplyvňujúce možnosť vzniku škôd (vytváranie koľají, pôdna erózia, poškodenie koreňov, zatlačenie humusovej vrstvy do pôdy a pod.).

Pri nasadení harvesterovej technológie nastáva riziko poškodenia pôdy hlavne na zamokrených ílovitých pôdach. Na pôdu stroj pôsobí nielen svojou hmotnosťou (statickým tlakom), ale aj dynamickými účinkami, ktoré sú pre poškodzovanie pôdy oveľa nebezpečnejšie. Z hľadiska pretvorenia foriem povrchových vrstiev porastovej pôdy dochádza buď k zhutneniu alebo k rozrytiu vrchných vrstiev pôdy, čo v konečnom dôsledku vedie k erózii, a to v závislosti už od spomínaných prírodných podmienok.

Pri práci na rovine môže byť odvetvený materiál rozložený po VL rovnomerne, no pri práci na svahu sa snaží operátor dosiahnuť z jedného miesta viac stromov z dôvodu využitia lepšej stability stroja na danom mieste. Preto dochádza k hromadeniu vetiev iba pomiestne a tým aj k nedostatočnej ochrane koreňov a pôdy pred jej zhutnením. Hmotnosť stroja je tak bez ochrannej vrstvy odvetveného materiálu prenášaná priamo na pôdu, čo môže viesť aj k jej trvalým deštruktívnym zmenám (MATTHIES 1997).

Únosnosť lesných pôd je dosť rozdielna, a to od 20–200 kPa. Väčšina špeciálnych lesníckych kolesových traktorov (ŠLKT) vyvíja na pôdu tlak veľkosti od 50–300 kPa (RÓNAY 2004). Pre posudzovanie škôd vzniknutých na pôde pri prejazde ťažbových strojov ako základné kritérium platí hranica únosného tlaku na pôdu 50 kPa (WÄSTERLUND 1986; MATHIES – KREMER 1999). RÓNAY (2004) uvádza, že k podstatným zmenám štruktúry pôd dochádza už pri tlaku od 50 do 120 kPa.

Medzi najdôležitejšie faktory pôsobiace na porastovú pôdu pri prejazde stroja patrí samotné vozidlo a jeho konštrukcia, typ podvozku a druh pôdy (ULRICH *et al.* 2002), obr. 1.



Obr. 1 Faktory pôsobiace na pôdu pri prejazde stroja (ULRICH *et al.* 2002)

Fig. 1 Factors of the work cycle impact to the soil

LUKÁČ *et al.* (2003) v tab. 1 udáva nasledovné tlaky na podložku v závislosti na rôznych typoch použitých prostriedkov.

Tabuľka 1 Tlak na podložku rôznych typov prostriedkov (LUKÁČ *et al.* 2003)
Table 1 Pressure to the ground caused by different machines

Typ prostriedku	Merný tlak v MPa
Noha človeka	0,020–0,050
Kôň	0,120–0,140
Poľnohospodársky traktor (UKT)	0,100–0,160
UKT so široko-profilovými pneumatikami	0,050–0,070
LKT 81	0,160–0,200
LKT s nízkotlakovými pneumatikami	0,060–0,080
Pásový traktor	0,030–0,050
Pásový traktor so širokými pásmi	0,007–0,012

Veľká hmotnosť kmeňov sama o sebe spôsobuje, že pri ich pohybe dochádza ku narušaniu citlivého porastového prostredia. Aby stroje mohli pracovať aj s ťažkým nákladom, musia disponovať dostatočným výkonom motora a s ním spojenou vyššou hmotnosťou, ktorá zaručí efektívne využitie potenciálnych ťahových vlastností stroja. Ich použitie

sa ale potom dostáva do rozporu so zásadami ekologického obhospodarovania lesných porastov. Negatívne účinky ťažbového procesu sa prejavujú v nasledovných základných formách poškodenia pôdy:

a) Porušenie štruktúry vrchných horizontov porastovej pôdy je prevažujúcou formou negatívnych účinkov prejazdov lesníckych strojov na rovinatých a mierne naklonených terénach. Môže ísť:

- o *sťahovanie (zhutnenie) pôdy* na úkor vzduchom naplnených (najmä hrubých) pórov,
- o *deštrukciu pôdnej štruktúry*, ak je prekonaná jej šmyková pevnosť.

Tvorí sa hlboké kofaje, vedľa ktorých sú valy bočne vytlačenej pôdy (vytečenej plastickým tokom). Je to typický prípad poškodenia pri zvýšenej pôdnej vlhkosti.

b) Ťažbovo-dopravná erózia (ĎDE) je definovaná ako množstvo pôdy premiestnenej v procese ťažby a sústreďovania dreva pôsobením mechanizačných alebo animálnych prostriedkov a vlečeného dreva za spolupôsobenia vody. Spôsobovaná je prešmykom kolies (menej pásov) na svahoch a strhávaním pôdnych čiastočiek trecou silou vlečeného dreva (prípadne rozrývaním pôdy čelom kmeňa pri prostom vlečení). Vztáhuje sa najmä na kmeňovú a stromovú metódu približovania dreva.

Tabuľka 2 Medzné hodnoty neškodnej vodnej erózie podľa hĺbky pôdy a ťažbovo-dopravnej erózie (ĎDE) pri 100 a 120 ročnej rubnej dobe (ZACHAR 1984)

Table 2 Limit water erosion levels by soil depth and logging erosion (100 and 120 cutting age)

Hĺbka pôdy (cm)		<30	30–60	61–120	>120
Vodná erózia	mm . rok ⁻¹	<0,05	0,05–0,2	0,2–0,5	0,5–0,8
	m ³ . ha ⁻¹ . rok ⁻¹	<0,50	0,5–2,0	2,0–5,0	5,0–8,0
ĎDE 100	mm	<0,50	0,5–2,0	2,0–5,0	5,0–8,0
ĎDE 120	mm	<0,75	0,75–3,0	3,0–7,5	7,5–12,0

c) Zvýšená vodná erózia. Ide o druhotné poškodzovanie pôdy mechanicky porušenej v procese ťažby. Vykonané analýzy (ŠACH et al. 1999) preukázali, že o veľkosti nesústredeného povrchového odtoku a ním spôsobenej vodnej erózie v daných stanovištných podmienkach rozhoduje popri sile a výdatnosti dažďa najmä stupeň primárneho porušenia vegetačného pôdneho krytu a vrchných horizontov pôdy. Pri pôde ide najmä o stupeň zníženia jej priepustnosti. Predpoklady pre vznik sústreďeného povrchového odtoku so škodlivou vodnou eróziou predstavujú najmä líniové formy porušenia, akými sú traktormi atakované vyvážacie linky, najmä linky s vytvorenými ryhami, preto sa zdôrazňuje nutnosť povýrobnej úpravy pracovísk.

Pôsobením vonkajšieho mechanického zaťaženia (prejazdy strojov) možno rozlíšiť podľa KOREŇA (1997) nasledovné prejavy mechanického pretvorenia štruktúry pôdy v pôde:

a) *pružná deformácia*, pri ktorej dochádza len ku krátkodobému stlačeniu pôdy. Po pominutí zaťaženia sa pôda vracia späť do pôvodného stavu. V teréne sú viditeľné na povrchu pôdy odtlačky dezénu pneumatiky.

b) *plastická deformácia*, prejavom ktorej je vytváranie koľají. Dochádza ku trvalému zníženiu povrchu pôdy pod pneumatikou. Pôda je stláčaná na úkor pórov vyplnených vzduchom, nastáva jej zhutnenie. Dôsledkom môže byť znížená priepustnosť pôdy pre vodu a výmenu vzduchu. Ak nie je zhutnenie príliš veľké, pôda ostáva aj naďalej osídlená živými organizmami. Takto poškodená pôda je schopná regenerácie. Zároveň dochádza k poraneniu koreňov (ich max. obsah je v hĺbke pôdy 8–20 cm).

c) *plastická deformácia s viskóznym tokom* – pôdna štruktúra sa úplne mení, dochádza ku rozrušovaniu pôdnych agregátov a zmene orientácie systému pórov z vertikálneho na horizontálny, čím je úplne znemožnená vertikálna výmena vody a vzduchu. Pôdne prostredie sa stáva anaeróbnym, nevhodným pre život mikroorganizmov a koreňov rastlín. Regenerácia pôdy sa stáva dlhodobým procesom. Zmeny takéhoto rozsahu sú v teréne dobre viditeľné – hlboké koľaje po bokoch s vysokými valmi vytlačenej pôdy.

Zhutňovanie spôsobuje vtlačenie pôdnych častíc, napr. ílovitých, do pórov naplnených vzduchom (vodou naplnené póry sú nestlačiteľné) a následné porušenie kontinuity a orientácie pórov (najmä pri vlhkej pôde) a zníženie podielu hrubých pórov (nad 30 μm). LÖFFLER (1986) uvádza, že k najväčšiemu zhutneniu pôdy dochádza v zóne pod osou pneumatiky v hĺbke 10–35 cm a prejavuje sa bočne až do vzdialenosti 1 m. Pri citlivých pôdach dosahuje zhutnenie po prvej jazde 20–30 %, po štyroch jazdách 70–90 % z maximálneho zhutnenia.

Škodlivosť mechanického pretvorenia pôdy závisí od:

- *intenzity pretvorenia pôdnej štruktúry,*
- *plošného podielu pretvorenej plochy.*

Intenzita pretvorenia pôdnej štruktúry závisí od:

- veľkosti a druhu vonkajšieho zaťaženia (statické, dynamické, veľkosť a tvar dotykovej plochy – bližšie terramechanika),
- únosnosti pôdy a jej momentálnej vlhkosti (poddajná podložka),
- druhu pôdy,
- únosnosti, šmykovej pevnosti, uhla šmykového trenia, súdržnosti (kohézie),
- zrnitosti,
- pórovitosti,
- skeletnatosti,
- obsahu humusu,
- druhu ílových minerálov.

Plošný podiel pretvorenej plochy závisí od rozostupu vyvážacích liniek, zvoleného technologického postupu práce a typu podvozku stroja. Aby sa zohľadnila nehomogénnosť lesných stanovišť a zároveň aby prejazd lesníckych strojov nebol nadmerne obmedzovaný, prijala sa zásada, aby min. 80 % z prejazdmi atakovanej porastovej plochy zostalo v nepoškodenom alebo v reverzibilne zmenenom stave (z toho vyplývajúci min. rozstup vyvážacích liniek 20 m pri šírke linky 4 m).

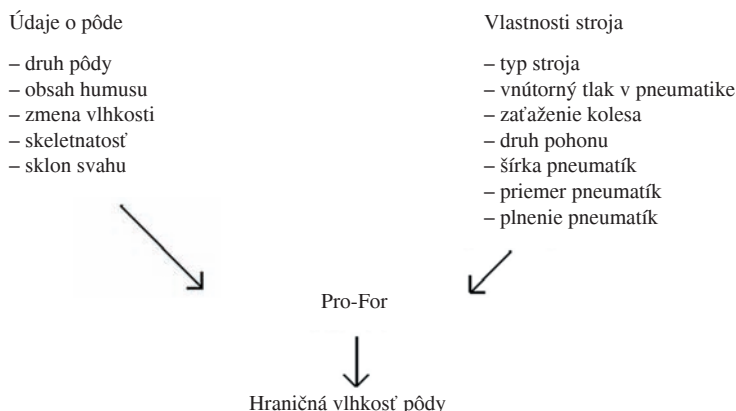
Aby nedochádzalo ku dlhodobému narušeniu ekologických a následne aj produkčných funkcií lesných porastov, je potrebné prejazdy lesníckych strojov po porastovej pôde vhodne usmerňovať. Treba dbať na to, aby sa mechanizmy pohybovali výlučne po vyvážacích linkách, ktorých povrch by mal byť v čo najväčšej miere pokrytý zvyškami po ťažbe.

Z hľadiska účinnosti sa za potrebnú považuje minimálna hrúbka vrstvy odvetvených vetiev, tzv. „koberca“, po čiastočnom stlačení, najmenej 35 cm (ULRICH *et al.* 2002). Taktiež je potrebné venovať vysokú pozornosť vhodnosti nasadenia ťažbových mechanizmov, sledovať stav terénnych podmienok a snažiť sa stanoviť isté hranice, po prekročení ktorých sa nedopustí alebo aspoň obmedzí použitie konkrétnej mechanizácie (WEISE 2002).

Všeobecnou požiadavkou v tomto smere je obmedziť pomocou *preventívnych opatrení* také pretvorenie pôdy, ktoré by mohlo viesť k trvalému (ireverzibilnému) alebo ťažko odstrániteľnému narušeniu lesných porastov.

Na stanovenie určitých limitov, či spomenutých hraníc, vypracoval MATTHIES (2000) na základe výsledkov dlhoročného výskumu metódu Pro-For. Je to počítačový program, ktorý umožňuje kvalifikovane určiť medzné podmienky, *maximálny prípustný obsah vody v pôde*, pri ktorom lesnícke stroje s konkrétnymi technickými parametrami môžu jazdiť po určitej pôde bez obáv, že dôjde ku nezvratnému pretvoreniu jej štruktúry.

Program pracuje na základe analýzy vstupných údajov, ktorými sú informácie o konkrétnom zvažovanom stroji a poznatky o vlastnostiach pôdy v daných podmienkach. Výsledkom je určenie hraničnej vlhkosti pôdy, po prekročení ktorej by stroj v príslušných podmienkach nemal pracovať. Princíp metódy znázorňuje obr. 2.



Obr. 2 Princíp programu Pro-For (MATTHIES 2000)

Fig. 2 The Pro-For programme principle

Pedologické základy programu Pro-For sú založené na nasledovnej filozofii:

- čím je pôda suchšia, tým väčšia je jej únosnosť,
- pre každú pôdnu vlhkosť existuje kritické medzné zaťaženie,
- veľkosť medzného zaťaženia závisí od druhu pôdy.

Je problematické presne definovať vzájomné pôsobenie vzťahu koleso verzus pôda. Jeho exaktné určenie si vyžaduje rozsiahle poznatky z oblasti pedológie, chémie, fyziky, terramechaniky, geológie, ako aj ťažbovo-dopravných technológií a ďalších vedných disciplín. Veľká premenlivosť podmienok prostredia si vyžaduje individuálny prístup ku každému jednému prípadu a znemožňuje tak vytvorenie všeobecne platných kritérií.

Aj napriek zložitosti uvedených vzťahov medzi kolesom stroja a lesnou pôdou, boli zostavené určité zjednodušujúce algoritmy ohodnotenia negatívnych účinkov strojov na pôdu.

WEISE (2002) v oblasti zaťaženia pôd kolesami lesníckych strojov zostavil klasifikačnú schému, ktorá slúži na vzájomné porovnanie rôznych typov strojov.

- vytvoril súbor 6-tich kritérií, pričom každé kritérium je jasne definované (napr. tlak v pneumatike, zaťaženie kolesa a i.),
- v tab. 3 sú zostavené informácie o štruktúre jednotlivých kritérií,

Tabuľka 3 Kritéria na hodnotenie zaťaženia lesnej pôdy kolesami strojov (WEISE 2002)

Table 3 Forest soil load by the machine tires criteria

Kritérium 1		Kritérium 2	
Vnútorný tlak v pneumatikách p (kPa)		Zaťaženie jedného kolesa F (kN)	
Faktor významnosti: 10	body	Faktor významnosti: 4	body
$p \leq 100$	10	$F \leq 10$	10
$100 < p \leq 125$	9	$10 < F \leq 20$	9
$125 < p \leq 150$	8	$20 < F \leq 30$	8
$150 < p \leq 175$	7	$30 < F \leq 40$	7
$175 < p \leq 200$	6	$40 < F \leq 50$	6
$200 < p \leq 225$	5	$50 < F \leq 60$	5
$225 < p \leq 250$	4	$60 < F \leq 70$	4
$250 < p \leq 275$	3	$70 < F \leq 80$	3
$275 < p \leq 300$	2	$80 < F \leq 90$	2
$300 < p \leq 350$	1	$90 < F \leq 100$	1
$p > 350$	0	$F > 100$	0
Kritérium 3		Kritérium 4	
Druh pohonu		Šírka pneumatík b (mm)	
Faktor významnosti: 2	body	Faktor významnosti: 1	body
Bezstupňový (plynulý)	10	$b \geq 800$	10
		$760 \leq b < 800$	9
		$720 \leq b < 760$	8
Automatické radenie podľa záťaže	5	$670 \leq b < 720$	7
		$630 \leq b < 670$	6
		$580 \leq b < 630$	5
Manuálne radenie/turbospojka	3	$640 \leq b < 580$	4
		$490 \leq b < 540$	3
		$450 \leq b < 490$	2
Manuálne radenie	0	$400 \leq b < 450$	1
		$b < 400$	0

Tabuľka 3 Pokračovanie
Table 3 Continued

Kritérium 5		Kritérium 6	
Priemer pneumatík d (mm)		Plnenie pneumatík kvapalinou	
Faktor významnosti: 1	body	Faktor významnosti: 2	body
$d \geq 1900$	10	nie	10
$1800 \leq d < 1900$	9		
$1700 \leq d < 1800$	8		
$1600 \leq d < 1700$	7	áno	0
$1500 \leq d < 1600$	6		
$1400 \leq d < 1500$	5		
$1300 \leq d < 1400$	4		
$1200 \leq d < 1300$	3		
$1100 \leq d < 1200$	2		
$1000 \leq d < 1100$	1		
$d < 1000$	0		

- na základe výsledkov výskumu každému kritériu priznal faktor významnosti od 1 do 10 s tým, že vnútorný tlak v pneumatike je najvýznamnejší,
- každý stupeň konkrétneho kritéria je ohodnotený bodmi od 0 po 10,
- súčin hodnoty bodov kritéria a faktora významnosti dáva bodovú hodnotu za konkrétne kritérium. Súčet bodov všetkých kritérií dáva celkovú bodovú hodnotu stroja.
- v rámci 1. kritéria autor zaviedol špeciálnu prirážku. Pri strojoch bez regulačného zariadenia na zmenu vnútorného tlaku (hustenia) v pneumatikách, sa uvedie hodnota hustenia daná výrobcom. Pri strojoch s regulačným zariadením sa použije prirážka 20 bodov.
- pri hodnotení kritéria č. 2 sa musí vziať do úvahy, že pri harvesteroch sa počíta s maximálnou hodnotou zaťaženia (tlakovej sily), ktoré môže pôsobiť na jedno z kolies. K nemu dochádza pri plnom vyložení hydraulického manipulátora v smere nad uvažovaným kolesom. Pri forwarderoch sa použije hodnota vypočítaná zo zaťaženia zadnej nápravy maximálnym nákladom. Pri ťahačoch sa vychádza zo zaťaženia zadnej nápravy s maximálnym bremenom. Pri harwarderoch sa vychádza zo zaťaženia zadnej nápravy podobne ako pri forwarderoch.
- ako kvapalinová náplň sa používa: – glykol, pre bezdušové pneumatiky
– kalcium-chlorid, pre pneumatiky s dušami
Maximálna náplň pneumatiky je 75 % jej vnútorného objemu.
- maximálne možné ohodnotenie stroja je 200 bodov za kritéria a 20 bodov za prirážku (kritérium č. 1), t.j. spolu 220 bodov,
- týmto postupom sa dá ohodnotiť každý lesnícky kolesový stroj,
- v tab. 4 je uvedený príklad na ohodnotenie štyroch anonymných strojov,

Tabuľka 4 Príklad ohodnotenia 4 strojov metódou podľa WEISEHO (2002)

Table 4 Example of the evaluating of four different machines by WEISE method

Kritérium	Faktor významnosti	Stroj 1	Stroj 2	Stroj 3	Stroj 4
		Hodnota/Body			
Vnútorný tlak pneu. (kPa)	10	250/40	270/30	350/10	400/0
Zaťaženie kolesa (kN)	4	54/20	35/28	51/20	53/20
Druh pohonu	2	aut. radenie pod zaťaž.	bez-stupňový	bez-stupňový	bez-stupňový
Šírka pneumatiky (mm)	1	600/5	700/7	700/7	600/5
Priemer pneumatiky (mm)	1	1640/7	1150/2	1333/4	1333/4
Plnenie pneumatík vodou	2	nie/20	nie/20	nie/20	nie/20
Regulátor vnútorného tlaku		nie/0	nie/0	nie/0	nie/0
Body spolu		102	107	81	69

- maximálne možný počet bodov je spolu aj s prirážkou 220. Stroj, ktorý je najbližšie k tejto hodnote je najvhodnejší a naopak ten, ktorý má najmenej bodov najmenej vhodný. V našom príklade uvedenom v tab. 18, by sme vybrali ako najvhodnejší stroj č. 2 (107 bodov). Najmenej vhodný je stroj č. 4 (69 bodov).

Oba popísané hodnotiace systémy (Pro-For, pre voči pôde šetrné, resp. vzhľadom k pôde znesiteľné používanie lesníckych strojov, ako aj postup hodnotenie zaťaženia pôdy lesníckymi kolesovými strojmi podľa WEISEHO (2000), sú overené a odporúčané nemeckým KWF (Lesnícky skúšobný ústav pre prácu v lese a lesnícku techniku) a mali by byť vhodnými pomocníkmi pri rozhodovaní o správnej voľbe technológie a techniky ťažby a sústreďovania dreva, resp. pri porovnávaní jednotlivých vlastností lesníckych strojov.

3. METODIKA PRÁCE

Poškodenie pôdy ostávajúceho porastu sa bude vykonávať dvomi spôsobmi:

- najskôr po práci harvesteru a opätovne po práci forwardera (komplexné merania),
- až po ukončení práce obidvoch prostriedkov.

Z pedologickej mapy bude určený pôdny typ a pôdny druh pre skúmaný porast. Momentálna vlhkosť pôdy sa bude zisťovať elektronickým vlhkomerom alebo hmatom podľa ŠÁLYHO (1978), (tab. 5) v kombinácii s odberom pôdnych vzoriek.

Tabuľka 5 Znaký stavu momentálnej vlhkosti pôdy (ŠÁLY 1978)
Table 5 Marks of the momentary soil moisture

Vlhkostný stav pôdy	Poznávacie znaky
Suchá	Pri dotyku s prstami nevyvoláva pocit chladu, pri prevahe fľových častíc tvorí pevné agregáty, pri prevahe piesku je rozsýpavá až sypká, nie je formovateľná, podľa obsahu jemných častíc až silne práši, po zvlhčení stmavne.
Mierne vlhká	Pri dotyku vyvoláva náznaky pocitu chladu (mierne chladí), ale ruky nemaže. Okrem zrnitostne ľahkých pôd je čiastočne formovateľná, nepráši, pri zvlhčení trochu stmavne.
Čerstvo vlhká	Pri dotyku vyvoláva pocit chladu (chladí), ale ruky nemaže. Okrem zrnitostne ľahkých pôd je dobre formovateľná, pri zvlhčení nestmavne.
Vlhká	Pri dotyku chladí a maže ruky, pri stlačení nepúšťa vodu, okrem piesčitých pôd je formovateľná.
Mokrá	Chladí a maže ruky, pri stlačení púšťa vodu, povrch elementárnych častíc a agregátov sa od vody leskne.
Zbahnená	Pri vyzdvíhovaní z profilu rozteká sa medzi prstami a odkvapkáva z nej voda samovoľne, čvachtá pod nohami.

Zisťovať sa budú nasledovné charakteristiky:

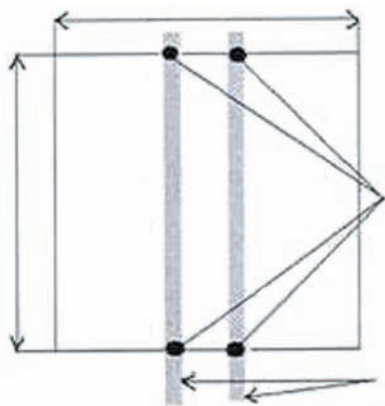
- Podiel** porastovej plochy (%) zabratej vyvážacími linkami (trvalými, dočasnými) = celková dĺžka liniek (m) prenášobená ich priemernou šírkou (m).
- Druh a intenzita porušenia** pôdy v poraste a zvlášť na vyvážacej linke (zhutnenie pomocou statickej penetrácie, ťažbovo-dopravná erózia, koľaje a ryhy mikroniveláciou).

Pre zisťovanie škôd spôsobených harvesterovými technológiami na lesnej pôde použijeme modifikovanú nemeckú metódu, ktorá vznikla na rovinách Dolného Saská. Vychádza z kategorizácie potenciálneho ohrozenia pôd podľa stanovišťa a dáva návod na konkrétne opatrenia pre prax. Základom meraní je síce kruhová výskumná plocha s výmerou 0,05 ha, ale vzhľadom na to, že jej vytyčovanie je v poraste vždy viac alebo menej obtiažne,

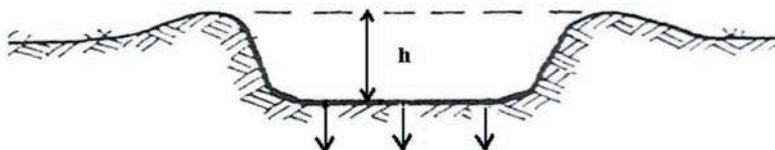
tak na vlastné merania využijeme upravené výskumné plochy štvorcového tvaru s rozmermi 20 × 20 m (obr. 3).

Meranie zhutnenia pôdy sa bude vykonávať na každej výskumnej ploche, kde to druh a pôdny typ umožní.

Na meranie hĺbky koľají spôsobených pohybom strojov po vyvážacej linke (VL) využijeme metódu Mc MAHONA (1995), ktorá vznikla na Novom Zélande, obr. 4.



Obr. 3 Tvar výskumnej plochy na meranie poškodenia pôdy
Fig. 3 The research area shape for soil damage evaluating



Obr. 4 Meranie hĺbky koľají metódou MC MAHONA (1995)

Fig. 4 Measuring of the forest road trails depth by MC MAHONA (1995) method

Miesta merania hĺbky koľají sa určia dvomi spôsobmi:

- zmeria sa hĺbka koľají na priečných profiloch v mieste statickej penetrácie,
- zameria sa poškodenia po celej VL, pričom hĺbka koľají sa bude merať v pravidelných intervaloch, resp. sa zamerajú úseky s rovnakou hĺbkou koľají podľa ULRICHA *et al.* (2002).



Na tento účel sa použije mikronivelačná metóda (obr. 5).

Obr. 5 Mikronivelačné meranie poškodenia približovacej linky po ťažbe

Fig. 5 Measuring of the skidding road damage

Pri hodnotení sme sa budeme opierať o klasifikáciu podľa MC MAHONA (1995), tab. 6.

Tabuľka 6 Klasifikácia intenzity mechanického poškodenia pôdy (MC MAHON 1995)

Table 6 Mechanical soil damage intensity classification

Stupeň porušenia pôdy		Hĺbka koľají (cm)	Charakteristika porušenia
1	Nepoškodená	0	Pôda je s neporušeným prízemným vegetačným krytom a nadložným humusom.
2	Veľmi slabo poškodená	0	Nadložný je humus čiastočne odstránený (do 50 %) alebo premiešaný s humusovým horizontom pôdy. Pôda je bez vonkajších znakov stlačenia aj bez poškodenia pôdneho krytu.
3	Slabo poškodená	< 7	Odstránený nadložný humus a časť (do 50 %) humusového horizontu. Pôda je stlačená prejazdmi strojov v čase mimo zvýšenej vlhkosti podmieňujúcej zmenšenú únosnosť.

Tabuľka 6 Pokračovanie
Table 6 Continued

Stupeň porušenia pôdy		Hĺbka koľají (cm)	Charakteristika porušenia
4	Stredne poškodená	8–15	Odstránené (50–80 %) vrchného pôdneho horizontu. Pôda stlačená prejazdmi strojov má značne zníženú priepustnosť pre vodu. Vidieť bočné vytlačenie pôdy vedľa koľají a rýh.
5	Silne poškodená	16–25	Odstránená je časť minerálnej pôdy. Pôda je stlačená až deštruovaná a pôdnym tokom bočne vytlačená z koľají. Priepustnosť pôdy pre vodu je nízka až veľmi nízka. V koľajach ostáva stáť voda.
6	Veľmi silne poškodená	≥ 26	Obnažený je minerálny horizont pôdy. Sú vytvorené veľmi hlboké koľaje, v ktorých je pôda nepriepustná pre vodu. Voda ostáva stáť v rozblatených koľajach.

c) **Statická penetrácia** (získovanie pomernej zmeny zhutnenia pôdy). Vychádza z poznatku o korelácii medzi penetračným odporom (R_c) a mechanicko-fyzikálnymi vlastnosťami pôdy. Statický penetrometer je zariadenie, ktoré dynamometrom zmeria odpor zeminy proti vnikaniu tuhého, presne definovaného hrotu, buď pri konštantnej rýchlosti alebo v určitej hĺbke. Špecifický statický penetračný odpor R_c na hrote sa vypočítal ako podiel sily odčítanej na dynamometri F a maximálnej priečnej plochy penetračného hrotu S .

$$R_c = \frac{F}{S}$$

kde: R_c – penetračný odpor (MPa),

F – tlačná sila (kN),

S – priemer kužeľovej hlavice ($S = 240 \text{ mm}^2$).



Pre vlastné merania bude použitý ľahký statický penetrometer STP – A (obr. 6) a elektronický penetrometer typu Penetrologger Eijkelkamp (obr. 7), ktorý využíval vo svojom výskume aj HAN et al. (2006). Dostatočne presné výsledky umožňuje dosiahnuť u kohéznych zemín s konzistenciou 0,5–1,25 mm, u nekohéznych zemín do veľkosti zrna $d_{85} \geq 8 \text{ mm}$ (KOREŇ – MESSINGEROVÁ 1992).

Obr. 6 Ľahký statický penetrometer STP – A

Fig. 6 Light static penetrometer STP – A



Obr. 7 Elektronický penetrometer typu Penetrologger Eijkelkamp

Fig. 7 Electronic penetrometer (type Penetrologger Eijkelkamp)

Na jednej výskumnej ploche sa vytýči na VL 8–10 priečných profilov v rozstupe 3–4 m.

Penetračný odpor R_c (MPa), ako ukazovateľ stavu pretvorenia pôdnej štruktúry jej zhutnením v hĺbke 5, 10, 15, 20, 25 a 30 cm, sa bude zisťovať pri použití kužeľovej hlavice s vrcholovým uhlom $\alpha = 30^\circ$. Na prepočet nameraných hodnôt (čítanie ručičky dynamometra závislé od nastavenej citlivosti hrotu 1A–3B) na tlačnú silu F (kN) použijeme rovnice uvedené v tab. 7.

Tabuľka 7 Rovnice na prepočet nameraných hodnôt na tlačnú silu F (kN)

Table 7 Equations of the pressure force

Nastavenie hrotu	Rovnica
1A	$F = -3,6198 + 213,29.x$
2A	$F = -1,7006 + 127,25.x$
3A	$F = -3,3537 + 81,907.x$
1B	$F = -2,4825 + 92,027.x$
2B	$F = -1,6768 + 56,102.x$
3B	$F = -4,4597 + 35036.x$

Na každom priečnom profile sa vykoná meranie v koľaji (príp. v obidvoch koľajach), ako aj medzi koľajami. Pre získanie kontrolných údajov sa vždy vykonávajú merania aj na neporušenej pôde vedľa VL. Penetrovanie v obidvoch koľajach bude potrebné v tom prípade, keď bude VL čiastočne chránená ťažbovými zbytkami a budeme zisťovať zmeny v pôde tak nechránenej, ako aj na chránenej rôznou hrúbkou ťažbových zvyškov. Na jednom mieste sa vykoná 5 vpichov. Medzi vpichmi musí byť minimálna vzdialenosť 10 cm,

aby sa vzájomne neovplyvňovali. Zároveň sa musí dodržiavať rovnomerná rýchlosť a priamy smer vtlačania penetračného kužela do zeme.

d) Odber pôdnych vzoriek na zistenie vlhkosti a objemovej hmotnosti pôdy.

Vmieste odberu pôdnych vzoriek sa vždy vykoná aj statická penetrácia. Odber vzoriek bude vykonaný z troch priemerných hĺbok pôdy: 5, 15 a 25 cm. Na jednom mieste (profile) sa v rovnakých podmienkach urobia aj odbery pôdy do 2 až 3 odberných valčekov, na miestach z mechanicky porušenej ako aj z neporušenej pôdy.

4. ZÁVER

Plne mechanizované integrované ťažbové technológie na báze harvesteru a forwardera si už v súčasnosti našli v slovenských lesoch svoje opodstatnené miesto. Cieľom tejto práce je upozorniť na určité fakty spojené s touto, v našich výrobnotechnických podmienkach novou technológiou a navrhnúť vhodnú metodiku zameranú na zisťovanie a elimináciu škôd vznikajúcich v ťažbovo-dopravnom procese. Pre zabezpečenie preventívnej ochrany pôdy pred jej trvalým alebo dlhodobým poškodením bude potrebné ako v zahraničí, tak aj u nás, realizovať systém opatrení, napr. na metodickom základe MATHIE-SA-KREMER (1999) a s využitím výsledkov hospodársko-úpravníckych prieskumov, ako aj výsledkov domáceho a zahraničného aplikovaného výskumu o odolnosti základných skupín pôdnych predstaviteľov voči mechanickému porušeniu, resp. proti ich poškodeniu. Tento systém opatrení umožní operatívne a čo najobjektívnejšie rozhodovať s ohľadom na konkrétne prírodné a porastové pomery, ktoré vymedzujú prevádzkovo-technické a ekonomické možnosti obhospodarovania lesov a vyžadujú v intenzívnom lesnom hospodárstve diferenciaciu prevádzkových cieľov a teda aj potrebu diferencovaných technológií podľa integrovaných funkcií lesov.

Vzhľadom na reálne predpoklady, že technické parametre súčasných a v blízkej budúcnosti vyrábaných viacoperačných strojov na kolesových podvozkoch neumožnia znížiť kontaktný tlak kolies pod 100–120 kPa, nemôže sa uvažovať pri ich použití s plným zachovaním produkčných a ekologických funkcií pôdy na celej ploche porastu. Preto sa odporúča aj naďalej usmerňovať pohyb strojov výhradne na vyvážacie linky, na ktorých sa toleruje určitý stupeň poškodenia vrchných horizontov porastovej pôdy. Pohyb strojov po porastovej pôde pomedzi stromy je neprípustný, ako aj vzdialenosť medzi vyvážacími linkami menšia než 20 m.

Podakovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy“, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

BACHER, M., 1999: Schäden am verbleibenden Bestand im Zuge der Holzernte. Bedeutung und Vorbeugung. Výskumná správa. FVF, Freiburg, 40 s.

- BUTORA, A., SCHWAGER, G., 1989: Holzernteschäden in Durchforstungsbeständen. Eidgenössische Anstalt für das Forstliche Versuchswesen, Birmensdorf, Berichte, č. 228, 51 s.
- Han, H., S., Page-Dumroese, D., Han, S., K., Tirocke, J., 2006: Effects of Slash, Machine Passes, and Soil Moisture on Penetration Resistance in a Cut-to-Length Harvesting. *IJFE*.
- KOREŇ, J. 1997: Zhutňovanie porastovej pôdy prejazdami lesných strojov. *AFF*, Zvolen, 39:191–203.
- KOREŇ, J., 2002: Prirodzená regenerácia vybraných druhov lesných pôd mechanicky poškodených pri približovaní dreva traktormi. In: Zborník z medzinárodnej konferencie, 9.–10. 9. 2002 – Logistika technickej výroby dreva v Karpatoch. Zvolen, KLŤM, Lesnícka fakulta TU, s. 124–131.
- KOREŇ, J.; MESSINGEROVÁ, V., 1992: Analýza metód zisťovania a hodnotenia vplyvu ťažbovo-dopravných technológií na lesnú pôdu, In: Zborník MVK, Progresívne trendy ťažbovo-dopravného obhospodarovania lesa, Zvolen, TU 1992, s. 99–106.
- LÖFFLER, H., 1986: Bodenschäden bei der Holzernte, Ursachen, Folgen, Vorbeugung Holz. *Zentralblatt*, Nr. 149, 1986, S. 2190 – 21922, SRN.
- LUKÁČ, T. et. al., 1994: Zmena technológií približovania a odvozu dreva. Záverečná správa referenčnej úlohy 39-AÚ-OLH, Zvolen, LF TU, 90 s.
- LUKÁČ, T. et. al., 2003: Výskum technologických, výkonnostných a environmentálnych parametrov viacoperačných strojov v ťažbe a sústreďovaní dreva v horských oblastiach. Projekt VEGA 1/0633/03, 29 s.
- MATTHIES, D., 1997: Maschinelle Holzernte und ihre Auswirkungen auf unsere Bestände. *AFZ/Der Wald*, Nr. 9, S. 474–477.
- MATTHIES, D., 2000: Eine Qualitätsanalyse der bundesländerspezifischen Bodenschutz-Konzepte zum bodenschonenden Forstmaschineinsatz. *Allg. Forst-u. J. Ztg.*, 171 (3):41–46.
- MATTHIES, D., KREMER, J., 1999: Bodenmechanische und Bodenphysikalische Ergebnisse im Rahmen des „Informationssystems zum bodenverträglichen Forstmaschineneinsatz“. *FTI*, č. 5 + 6, s. 35–38.
- MC MAHON SHANE, 1995: Survey Method for Assessing site disturbance. *New Zealand Logging Industry*, P. R. 54, 4/1995, N. Zealand, S. 1–16.
- MENG W., 1978: Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte – Ausmaß und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. *Schriftenreihe der LFB Baden-Württemberg*, Band 53. 159 s.
- RAAB, S. et. al., 2002: Aktuelle Holzernteverfahren am Hang. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Bericht Nr. 36, 80 s.
- RÓNAY, E., 2004: Svetové trendy motivujú k novému mysleniu. *Les* 2004, č. 11–12.
- ŠACH, F., MATĚJKA, K., VACEK, S., 1999: Obnova a stabilizace horských lesů. Sborník z celostátní konference s mezinárodní účastí konané ve dnech 12. 10.–13. 10. 1999 v Bedřichově v Jizerských horách. S. 107–112 / Slodičák Marian – Praha – Zbraslav nad Vltavou: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, 1999.
- ŠÁLY, R., 1978: Pôda, základ lesnej produkcie. Vydavateľstvo Príroda, Bratislava.
- ULRICH, R., SCHLAGHAMERSKY, A., ŠTOREK, V., 2002: Použití harvesterové technologie v probírkách, *MZLU*, Brno, 97 s.
- WÄSTERLUND, I., 1986: Effects of Damage on the Newly Thinned Stand due to Mechanized Forest Operations. Manuscript. Univerzita poľnohospodárskych vied, Uppsala, Švédsko, S. 1–4.
- WEISE, G., 2002: Bewertungsschema zur Bodenbelastung von Großmaschinen im Forst. *FTI*, č. 1 + 2, s. 10–12.

Adresa autorov:

Ing. Jozef Slugeň, PhD.

Ing. Michal Ferenčík, PhD.

prof. Ing. Valéria Messingerová, CSc.

Ing. Miroslav Stanovský, CSc.

Ing. Daniel Kindernay

Ing. Peter Kováčik

Katedra lesnej ťažby a mechanizácie

Lesnícka fakulta Technickej univerzity vo Zvolene

T. G. Masaryka 24

960 53 Zvolen

e-mail: slugen1@hotmail.com

ferencik@vsld.tuzvo.sk

mesin@vsld.tuzvo.sk

stanovsky@vsld.tuzvo.sk

daniel.kindernay@gmail.com

kpkovacik@gmail.com

Metodika stanovenia poškodzovania pôdy harvesterovými technológiami

Abstrakt

Predkladaná práca sa zaoberá problematikou poškodzovania lesnej pôdy pri nasadení integrovanej plne mechanizovanej viacoperačnej technológie na báze harvesteru a forwardera do lesných porastov. Napriek všeobecne uznávanej šetrnosti v porovnaní s ostatnými technológiami, nemôžeme harvesterové technológie akceptovať úplne bez výhrad. Hlavné poznatky zaoberajúce sa poškodzovaním pôdy sú v našich terénnych podmienkach lesov Slovenska málo preskúmané. Cieľom je vytvoriť a neskôr aj priamo v teréne odskúšať vhodnú metodiku zameranú na meranie poškodzovania lesnej pôdy viacoperačnými strojmi. Už teraz vieme povedať, že pri nasadzovaní viacoperačných strojov do porastov je veľmi dôležitá technologická príprava výroby, ale aj samotného porastu, ako aj uplatnenie preventívnych opatrení zameraných proti potenciálnemu vzniku škôd.

Kľúčové slová: harvesterové technológie, poškodenie pôdy, statická penetrácia

STRATÉGIA TRANSFORMÁCIE VEREJNOPROSPEŠNÝCH FUNKCIÍ LESA NA TRHOVÉ STATKY

Jaroslav Š Á L K A – Lukáš F O D R E K – Zuzana D O B Š I N S K Á

Šálka, J., Fodrek, L., Dobšínská, Z.: Transformation strategy of forest recreational and environmental functions into market goods. Acta Facultatis Forestalis Zvolen, 51(3): 191–203, 2009.

The aim of this work is to present the basic idea of the transformation of forest recreational and environmental functions into market mechanism using the extension of the theory of public goods. This work is based on the neoclassic classification of public goods, which divides goods into private and public, ergo into market and nonmarket ones. Based on the methodic approach in the project: Niche Markets for Recreational and Environmental Goods and Services from Multiple Forest Production Systems – RES project; FAIR1 CT95-0743), this article extends neoclassic theory of public goods and thereby provides the basic principle of environmental and recreational functions integration into the market mechanism. This principle will be applied in the Centre of Excellence: Adaptive forest ecosystems activity 4.3 Integration of Recreational and Environmental functions into the market mechanism.

Key words: forest recreational and environmental functions, public goods, competition, exclusion

1. ÚVOD

Integrácia verejnoprospešných funkcií do trhového mechanizmu predstavuje jeden z inovatívnych prístupov v oblasti zabezpečovania ich optimálnej produkcie. Lesné podniky v Európe vyvíjali a vyvíjajú snahu získať platby za poskytovanie úžitkov pre spoločnosť. Nie je to jediná cesta a vôbec netreba vytvárať dojem, že by sa mal štát stiahnuť z ovplyvňovania produkcie verejnoprospešných funkcií prostredníctvom verejnej politiky. Stratégie začlenenia verejnoprospešných funkcií do trhu vyžadujú taktiež zásadné ingerencie štátu.

Cieľom príspevku je ozrejmiť rozšírenú teóriu verejných statkov a načrtnúť metodický prístup hodnotenia stratégií transformácie verejnoprospešných funkcií lesov na trhové produkty alebo služby.

2. PROBLEMATIKA

Verejnoprospešné funkcie lesa môžeme definovať na základe teórie verejných statkov (ŠÁLKA *et al.* 2008). Verejné statky sú charakteristické dvoma znakmi, ktoré znemožňujú trhový mechanizmus:

- **Exkludácia** vyjadruje vylúčiteľnosť jednotlivca zo spotreby určitého statku. Exkludácia spôsobuje, že daný statok sa stáva predmetom trhu a takzvaní „čierni pasažieri“, ktorí by tento statok chceli užívať bezplatne, môžu byť z jeho spotreby vylúčení.
- **Rivalita** vyjadruje skutočnosť, že statok, ktorý je spotrebovávaný jedným jednotlivcom nemôže byť konzumovaný iným. Rivalita medzi jednotlivcami o konzumáciu daného statku je spôsobená jeho obmedzenosťou.

Na základe exkludácie a rivality rozlišujeme nasledujúce druhy statkov, pričom exkludácia a rivalita môže byť vo svojich hraničných hodnotách rovná nule alebo jednej:

Súkromné (individuálne) statky majú úplnú rivalitu a exkludáciu, čo umožňuje, aby boli predmetom trhu.

Verejné statky sa vyznačujú tým, že exkludácia a rivalita sa rovnajú nule. Nie je možné zo spotreby nikoho vylúčiť a neexistuje žiadna rivalita pri ich spotrebe. Vylúčenie neplatičov nie je možné z technických alebo ekonomických dôvodov. Produkcia kyslíka alebo viazanie CO₂ lesnými ekosystémami sú typickými príkladmi.

Kolektívne statky sú charakteristické tým, že nie je možné zo spotreby nikoho vylúčiť, a zároveň pri ich spotrebe existuje rivalita, lebo vlastnícke práva nie sú jasne definované. Intenzívna rekreácia v chránených územiach je bezproblémová až do vtedy, kým nedôjde k stretu záujmov (rekreácia a ochrana prírody).

Klubové statky tvoria prechod medzi verejnými a súkromnými statkami. Týmto statkom je možné priradiť určitý stupeň exkludácie, lebo pri ich využívaní je časté, že zvyšovaním počtu užívateľov sa kvalita statku znižuje. Pri klubových statkoch je potom možné určiť analyticky optimálnu veľkosť skupiny, aby sa umožnila produkcia statku so zodpovedajúcou kvalitou. Majitelia hotelov sú ochotní platiť lesným podnikom za opatrenia, ktoré zvyšujú účinnosť protilavínovej funkcie. Ak je počet hotelierov veľký, nemusí dôjsť k dohode o financovaní týchto opatrení.

Na druhej strane je dôležité miesto poskytovania týchto statkov, lebo pri tzv. **lokálnych statkoch** je možné, že z týchto statkov majú úžitky aj jednotlivci, ktorí uskutočňujú svoje aktivity v blízkosti poskytovania týchto statkov, ale nepodieľajú sa na ich financovaní. Napríklad miestny klub cykloturistiky sa dohodne s lesnými a poľnohospodárskymi podnikmi o poplatkoch k financovaniu úprav cestnej siete, aby bola vhodnejšia pre cykloturistiku. Cestnú sieť však využívajú aj cykloturisti, ktorí nie sú členovia miestneho klubu ale zo spotreby tohoto statku ich nemožno vylúčiť, lebo je zákonne zaistený voľný vstup do lesa. Z tohto dôvodu sú dôležité náklady exkludácie a náklady vytvárania kolektívu, ktoré nazývame transakčné náklady. Ak by boli náklady na exkludáciu príliš vysoké alebo na zabezpečovanie týchto statkov by bolo potrebné vytvárať vždy nové kolektívy s vysokými nákladmi, nie je ich produkcia trhovým mechanizmom zväčša možná.

Zmiešané statky sa vyznačujú tým, že hodnoty rivality a exkludácie sa pohybujú v rozpätí od nula do jedna. Presná kvantifikácia stupňa rivality a exkludácie by umožnila presnejšie určenie verejných statkov a ich potrebu zabezpečovania štátom. V praxi je takáto kvantifikácia veľmi sťažená.

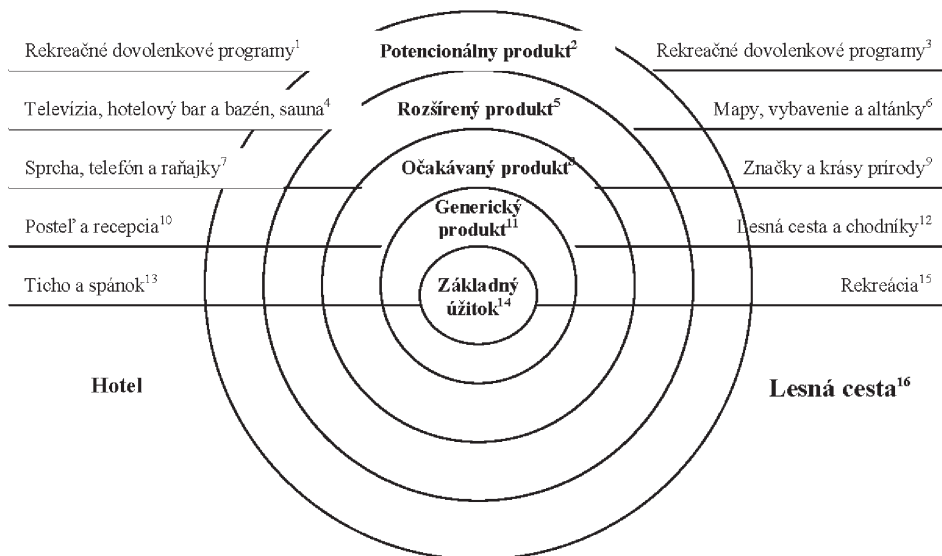
Rozšírená teória verejných statkov (Šálka 2008)

Statky majú vnútornú štruktúru svojich vlastností. Podľa teórie verejných statkov sa statok hodnotí ako homogénna jednotka (prístup čiernej skrinky), pri ktorej sa môže javiť jej produkcia na základe trhového mechanizmu ako nemožná. Prostredníctvom dekompozície vlastností statkov, variability úrovne poskytovaných úžitkov, stupňov ich vylúčiteľnosti a rivality pri spotrebe môže byť však schopnosť ich realizácie cez trh významne ovplyvňovaná. Podľa MANTAU *et al.* 2001 je možné formulovať nasledovné hypotézy, ktoré predstavujú rozšírenie teórie verejných statkov:

1. Vylúčiteľnosť zo spotreby závisí od úrovne poskytovaných úžitkov. V princípe sa vylúčiteľnosť zo spotreby zvyšuje s úrovňou poskytovaných úžitkov. Z toho vyplýva, že vylúčiteľnosť zo spotreby by nemala byť definovaná pre statok ako homogénnu jednotku, ale pre jeho jednotlivé vlastnosti.
2. Statok je generovaný variabilitou jeho vlastností. Vylúčiteľnosť a rivalita týchto vlastností je rozdielna. Na základe variability vlastností a možných marketingových stratégií môže byť vyvinutá zodpovedajúca stratégia integrácie statku do trhového mechanizmu.
3. Hodnota statku a schopnosť statku byť predmetom trhu závisí na dynamických zmenách vo vlastnostiach statku a prostredí.

Formulované hypotézy a predpoklady môžeme ilustrovať na nasledovnom príklade (obr. 1), ktorý umožní priblíženie základnej myšlienky. Majme dva statky. Súkromný statok „hotel“ a verejný statok „lesná cesta“. Všeobecná ekonomická hodnota hotela a lesnej cesty nie je pravdepodobne rozdielna. Ak však definujeme rôzne úrovne poskytovaných úžitkov, môže sa situácia zmeniť. Ak si objedná niekto hotelovú izbu, očakáva, že nájde miesto na spanie a oddych v noci. Tieto vlastnosti si však nemôže kúpiť. Len generický produkt „hotelová izba“ je predmetom trhu, čo je reprezentované posteľou a pultom na recepcii. V prípade lesnej cesty je zrejmé, že najdôležitejší úžitok plyní pre turistu z rekreácie. Tento úžitok plyní turistovi, len v tom prípade, ak má voľný prístup na lesnú cestu. V prípade lesnej cesty ide o verejný statok, lebo podľa slovenského zákona o lesoch má každý peší turista voľný prístup do lesa, a teda aj na lesnú cestu. Generický produkt lesná cesta nie je realizovateľný prostredníctvom trhu. Podľa predchádzajúcich úvah to však neznamená, že je nemožné zlepšiť schopnosť statku byť predmetom trhu.

Teória verejných statkov definovala úžitky z verejnoprospešnej funkcie lesa na úrovni generického produktu, ktoré nie je možné predávať na trhu. Atraktivita produktu pre kupujúcich môže byť vytvorená na vyšších úrovniach poskytovania úžitkov. Spotrebiteľia predpokladajú ďalšie dodatočné úžitky ako samozrejmosť. To môžeme vyjadriť tak, že ak nie sú k dispozícii dodatočné úžitky, spotrebiteľ sa rozhodne produkt nekúpiť, alebo ho bude hodnotiť ako produkt s nízkou kvalitou. V prípade hotela je to kúpeľňa, uteráky, telefón alebo raňajky. Toto je úroveň očakávaného úžitku, teda ide o očakávaný produkt. Na lesnej ceste očakáva turista označenie trasy a výhľad na krásnu krajinu. Na úrovni očakávaného produktu má lesná cesta možnosti zlepšovania jej uplatenia na trhu.



Obrázok 1 Zmena vylúčiteľnosti a rivality na rôznej úrovni užitočnosti produktu (zdroj: MANTAU *et al.* 2001)
 Fig. 1 Changing the character of rivalry and exclusion on different utility/product levels (source: MANTAU *et al.* 2001)

¹Recreation programs and activities, ²Potential product, ³Recreation program licenses ⁴Television, hotel bar, sauna, pool, ⁵Augmented product ⁶Maps, equipment, places, ⁷Cleanliness, phone, break fast, ⁸Expected product, ⁹Signs, benches, views, ¹⁰Bed, reception, ¹¹Generic product, ¹²Forest roads and paths, ¹³Silence and sleep, ¹⁴Basic use, ¹⁵Recreation, ¹⁶Forest road

Na rozvinutých trhoch sa uskutočňuje konkurencia medzi podnikmi na úrovni rozšíreného produktu. To môžeme vysvetliť tak, že pre rôzne produkty existujú rôzne marketingové stratégie a rôzne cenové segmenty. Rozšírený produkt v prípade hotela môže zahŕňať televíziu na izbe, hotelový bazén, saunu alebo hotelový bar. Spotrebiteľ sa rozhoduje podľa úrovne rozšíreného úžitku, či je ochotný priplatiť za hotel viac. Úroveň rozšíreného produktu zlepšuje uplatnenie generického produktu na trhu. Poskytovanie máp, vybavenia na turistiku, altánkov na oddych, detských ihrísk predstavuje úroveň rozšíreného úžitku v prípade lesnej cesty.

Každý generický produkt má ešte úroveň potencionálneho úžitku. Potenciálny produkt v prípade hotela je poskytovanie špeciálnych dovolenkových programov podľa trhového segmentu (zážitkové športy ako rafting, mountain hiking, alebo iné). V prípade lesnej cesty môže lesný podnik ponúkať podobné takéto balíky vo forme ekologicky, lesnícky alebo kultúrne orientovaných náučných chodníkov, ubytovania atď. Celkovo môžeme konštatovať, že podľa uvedeného má každý statok možnosť stať sa súčasťou trhu.

Stratégia integrácie verejnoprospešných funkcií lesov do trhového mechanizmu (Šálka 2008)

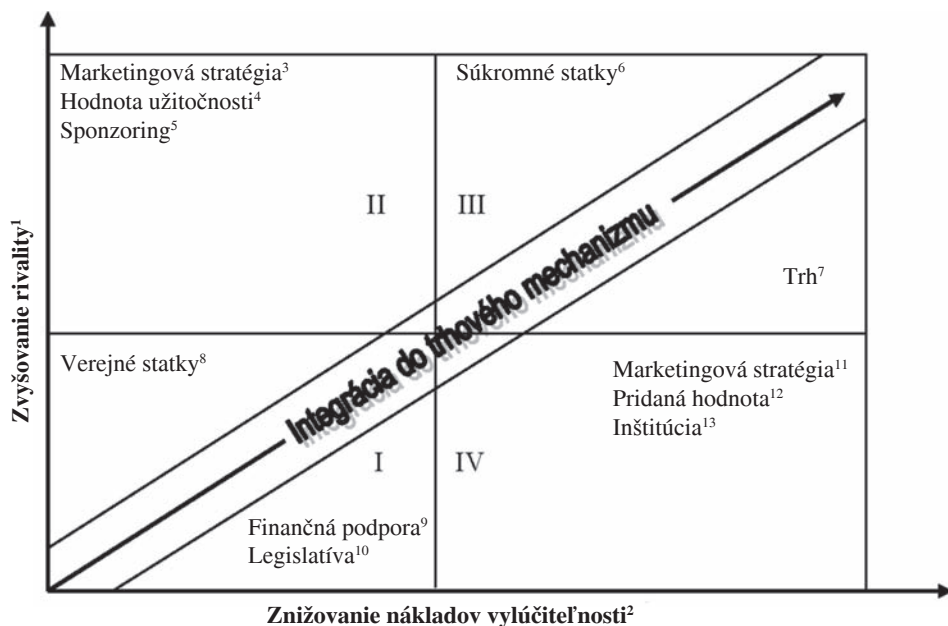
MANTAU vo svojich prácach (1993, 1994, 1995a, b, 2001) zhrnul princípy možností pre verejnoprospešné funkcie stať sa predmetom trhu:

1. Z verejnoprospešných funkcií lesa plynú základné úžitky. Ak by sme chceli uplatňovať na trhu základné úžitky, museli by sme konštatovať, že ide o zlyhanie trhu. To by platilo v prípade rekreačnej funkcie lesnej cesty, ale aj v prípade spánku a nočného oddychu. Toto je logická chyba teórie verejných statkov vysvetľujúca zlyhanie trhu pri verejnoprospešných funkciách lesov, lebo sa uvažuje len na úrovni základného úžitku.
2. Vlastnosti produktu (vylúčiteľnosť a rivalita) reagujú ináč na rôznych úrovniach užitočnosti. Prostredníctvom zmeny dizajnu na vyšších úrovniach užitočnosti môžu byť generické verejné statky transformované na trhové statky, t.j. vylúčiteľnosť a rivalita môžu byť zmenené.
3. Podľa príkladu uvedeného vyššie môžeme konštatovať, že reálny produkt je kombináciou statkov (lesná cesta, náučný chodník, ubytovanie). Štruktúra kombinovaných statkov definuje stupeň exkludácie a rivality. Neoklasická ekonomická teória je založená na homogénnych statkoch. Tento prístup k statku ako k čiernej skrinke je najdôležitejší dôvod, prečo neoklasická škola definovala riešenie problému zisťovania predpokladanej hodnoty verejných statkov a snažila sa dosiahnuť Paretovu optimálnosť ako korekciu zlyhania trhu.
4. Dynamické aspekty sú dôležité pre integráciu verejných statkov do trhového mechanizmu. Zmena stupňa vylúčiteľnosti a rivality môže byť spôsobená zmenami v prostredí alebo zmenami správania podnikov a spotrebiteľov.

Všetky ekonomické prístupy, ktoré rozdeľujú statky na verejné a súkromné prichádzajú k záveru, že existujú statky trhové a netrhové. Rivalita a exkludácia nie sú kritériá, ktoré nadobúdajú len hodnotu nula a jedna, ale sa môžu kontinuálne meniť v rozmedzí od nula po jedna. Rôzne skupiny si konkurujú o atraktívnu lesnú cestu, ktorá je v blízkosti mesta, lebo turisti spôsobujú problémy pri doprave dreva alebo vzniká konkurencia medzi pešími turistami a cykloturistami. Vylúčiteľnosť zo spotreby sa môže meniť napríklad zásahom štátu, ktorý určí, ktoré lesné cesty v akom čase môžu byť využívané pre pešiu turistiku, a ktoré pre cykloturistiku.

Obr. 2 opisuje kontinuálnu štruktúru statkov. Vertikálna os predstavuje rivalitu pri spotrebe a horizontálna os predstavuje vylúčiteľnosť zo spotreby. Vylúčiteľnosť zo spotreby je závislá od nákladov. Vylúčiteľnosť rovná jednej je veľmi nákladná.

Vysoký stupeň rivality pri spotrebe a nízke náklady na zabezpečenie vylúčiteľnosti zo spotreby predstavujú hraničný stav čistého súkromného statku a nízky stupeň rivality, pričom vysoké náklady vylúčiteľnosti definujú čistý verejný statok. Každý statok však má vlastnosti, ktoré môžu jeho vylúčiteľnosť a rivalitu meniť.



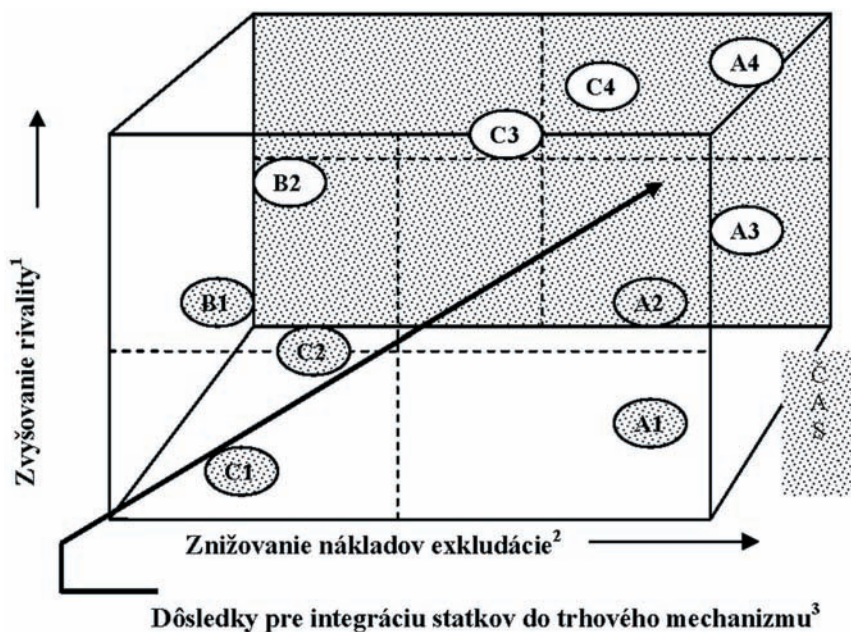
Obrázok 2 Kontinuálna štruktúra vlastností statkov a stratégie (zdroj: MANTAU *et al.* 2001)

Fig. 2 Continuous structure of goods and strategic fields (source: MANTAU *et al.* 2001)

¹Increasing rivalry, ²Decreasing costs for exclusion activities, ³Market strategy, ⁴Value of utility, ⁵Sponsoring, ⁶Private goods, ⁷Market, ⁸Public goods, ⁹Financial support, ¹⁰Legislation, ¹¹Marketing strategy, ¹²Added value, ¹³Institution

Schopnosť integrácie verejného statku do trhového mechanizmu môžeme rozdeliť do štyroch strategických oblastí. Statky s nízkou rivalitou a vysokými nákladmi na vylúčiteľnosť majú veľmi nízke šance na integráciu do trhového mechanizmu. Ak majú byť zabezpečované, je potrebné využiť zásahy štátu vo forme opatrení verejnej politiky (dane, dotácie, regulatívy, poradenstvo atď.). Statkom s vysokou rivalitou ale aj s vysokými nákladmi exkludácie pripisujú spotrebitelia vysokú hodnotu. Je však veľmi drahé vylúčiť niekoho z pohľadu na krásnu lesnatú krajinu. Marketingové stratégie založené na sponzoringu alebo založení klubu môžu byť úspešné. Napríklad mestom financované rekreačné prímestské lesné územia by zodpovedali takejto stratégii. Statky s nízkymi nákladmi vylúčenia zo spotreby a nízkou rivalitou môžeme integrovať do trhového mechanizmu prostredníctvom zvyšovania pridanej hodnoty a zmenami pravidiel (inštitúcií) v efektívnych marketingových organizáciách. Statky s vysokou rivalitou a nízkymi nákladmi na exkludáciu sú typické trhové statky.

Pri každom statku sa môžu zmeniť jeho vlastnosti, a tým aj zaradenie do strategickej oblasti v závislosti od zmien v dopyte, preferenciách a vlastníckych práv, aktivity podnikov a podobne (obr. 3).



Obrázok 3 Dynamické zmeny vlastností trhových a potencionálne trhových statkov (zdroj: MANTAU *et al.* 2001)
 Fig. 3 Dynamic changes in the character of marketable goods and potentially marketable goods. (source: MANTAU *et al.* 2001)
¹increasing rivalry, ²Decreasing costs of excludability, ³Consequences for integration of goods into the market mechanism

Najdôležitejším faktorom je dynamika podmienok na trhoch, správanie firiem a spotrebiteľov. Ak by sa dramaticky znížili po kalamite veľkého rozsahu ceny vláknnového dreva, mohli by sa majitelia lesa rozhodnúť, že znížia ťažbu tohto sortimentu (A1). Cena, ktorá vyjadruje rivalitu je nižšia ako náklady na ťažbu a dopravu dreva. Na základe cyklov na trhu s drevom sa môže zmeniť prebytok ponuky vláknnového dreva na prebytok dopytu po vláknnovom dreve. Tieto zmeny by priniesli zvýšenie ceny vláknnového dreva, a teda aj rivality (A2). Ceny dreva na získanie tepelnej energie boli na prelome tisícročia pomerne nízke, hospodárstvo sa spoliehalo na iné zdroje energie a jeho ponuka prevažovala dopyt. Rivalita vyjadrená cenou bola nízka, aj keď ceny energetického dreva rýchlo dobíjali ceny vláknnového dreva (A3). Dopyt po energetickom dreve ako alternatívnom obnoviteľnom zdroji suroviny však prudko rastie, a tým sa zvyšuje rivalita tohto statku (A4).

Hodnota chráneného biotopu pre spoločnosť je pomerne vysoká, ale jeho dobrovoľná produkcia lesnými podnikmi je sťažená, samozrejme za predpokladu neexistencie opatrení verejnej politiky v ochrane prírody. Je to spôsobené vysokými nákladmi na zabezpečenie exkludácie zo získavania úžitkov chráneného územia. Celá spoločnosť má úžitok z chráneného biotopu, ale nikto nie je reálne ochotný za tieto úžitky platiť. Oplotenie chráneného biotopu a vyberanie vstupného je veľmi nákladné (B1). Marketingová stratégia

založená na vytvorení produktu „chránený biotop“ pre sponzorský podnik by mohla mať úspech. Veľká firma, ktorá sa snaží vylepšiť si svoj environmentálny imidž by mohla mať záujem na financovaní chráneného územia. Rivalita statku ochrana biotopu sa zvýšila, aj keď náklady exkludácie ostali nezmenené (B2).

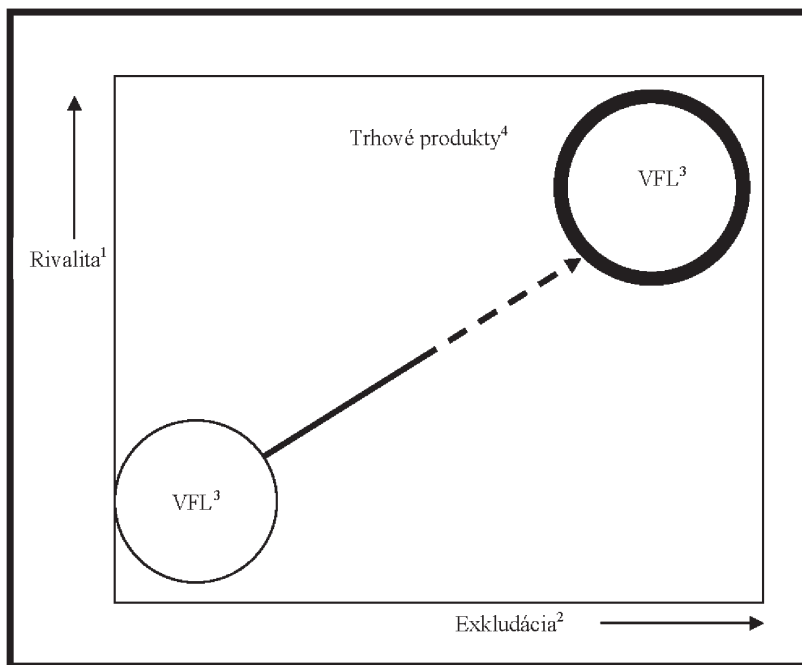
V minulosti nepatrilo bicyklovanie k rozšíreným alebo masovým športom, teda rivalita bicyklovania v lese bola nízka. Náklady na vylúčenie bicyklistov zo spotreby by bol ekonomický nezmysel (C1). V slovenských lesoch sme síce vyznačili trasy pre mountain biking, ale v zásade sme neobmedzili prístup cyklistov na lesné cesty. Rakúske štátne lesy si však obhájili právo vylúčiť cyklistov na lesných cestách zo spotreby a môžu žiadať poplatky od regionálnych cyklistických klubov za cyklistické využívanie lesných ciest (C2). Ak by lesné podniky zatriktívni svoje lesné cesty pre cykloturistov a zvýšila by sa pre nich ich subjektívna užitočnosť z cykloturistiky, môžeme predpokladať zvýšenie rivality a zníženie nákladov exkludácie. Vyššia pridaná hodnota produktu „lesná cykloturistika“ by umožnila lepšie možnosti vylúčenia zo spotreby (C3). Ak by sa v budúcnosti preferencie obyvateľstva v urbánnych regiónoch pre mountain biking ešte zvýšili, mohlo by to opäť spôsobiť zvýšenie rivality a zvýšenie vylúčiteľnosti (C4).

3. METODICKÝ PRÍSTUP HODNOTENIA TRANSFORMÁCIE VEREJNOPROSPEŠNÝCH FUNKCIÍ NA TRHOVÉ STATKY

V projekte „Trhy pre rekreačné a environmentálne statky a služby z lesníckeho multifunkčného produkčného systému“ (Niche Markets for Recreational and Environmental Goods and Services from Multiple Forest Production Systems – RES project; FAIR1 CT95-0743) bolo vypracovaných 95 prípadových štúdií, v ktorých bola opísaná transformácia exkludácie a rivality verejnoprospešných funkcií lesov. Táto transformácia umožní včlenenie úžitkov z verejnoprospešných funkcií lesa do trhového mechanizmu. V aktivite 4.3 Integrácia verejnoprospešných funkcií do trhového mechanizmu bude vypracovaných minimálne 5 prípadových štúdií v Slovenskej republike (bližšie ŠÁLKA *et al.* 2009). Na základe týchto prípadových štúdií bude zistená exkludácia a rivalita a miera ich transformácie. Veľmi dôležité je porovnanie exkludácie a rivality pred a po transformácii. Na kategorizáciu všetkých prípadov exkludácie a rivality sa zvolí nasledovný hodnotiaci postup (MANTAU *et al.* 2001, ŠÁLKA *et al.* 2008):

1. Príjme sa stupnica piatich stupňov exkludácie a rivality (0; 2,5; 5; 7,5; 10), za účelom zakreslenia verejnoprospešných funkcií lesov a ich transformácie na trhové statky do grafu verejných a súkromných statkov (obrázok 4).
2. Exkludácia a rivalita sú hodnotené nezávisle pred a po transformácii alebo vývoji.
3. Pred transformáciou sú exkludácia aj rivalita rovné nule. Je to ten prípad, ak je existujúci úžitok z verejnoprospešnej funkcie lesa využívaná zadarmo bez rivality, t.j. spotrebiteľskej konkurencie. Vylúčiteľnosť ostatných spotrebiteľov zo spotreby je tak isto nulová. Ak by verejnosť nespela tieto úžitky z verejnoprospešných funkcií využívať, z dôvodu jasne stanovených vlastníckych práv, bola by exkludácia pred transformáciou kompletná a mala by hodnotu 10.

4. Po transformácii/vývoji úžitku z verejnoprospešnej funkcie lesa na trhový statok, je exkludácia hodnotená podľa výsledných efektov podniknutých opatrení v zmysle inštitucionálnych zmien vo vlastníckych právach a marketingových technikách. Tieto dva faktory sú posudzované samostatne a zobrazené ako plná alebo prerušovaná čiara podľa obrázku 4. Ak by bolo zaplatenie ceny za transformovaný trhový produkt jedinou cestou, ako využiť verejnoprospešné funkcie lesa, exkludácii by bola priradená hodnota 10. Ak by rôzne stupne komplementárnosti medzi verejnoprospešnými funkciami lesa a transformovanými trhovými produktmi mali za následok zníženie exkludácie (napr. ak je možné vyhnúť sa vyplateniu ceny za úžitok z verejnoprospešnej funkcie lesa), potom sa hodnota exkludácie bude pohybovať v rozpätí 5 až 7,5).
5. Po transformácii by sa rivalita dala len veľmi ťažko zhodnotiť. V ekonomickej literatúre nie je tento koncept jasne definovaný a rivalita sa často interpretuje ako prebytok dopytu. Fakt, že je zavedená určitá úroveň exkludácie naznačuje, že existuje taktiež istá miera rivality, na základe modifikovanej ekonomickej povahy statkov, ktoré už viac nie sú úplne verejnými. Preto sa zavedenie exkludácie prejaví na znížení alebo zvýšení rivality. Pre čisto súkromné statky je pripísaná rivalite hodnota 10. Ak sa transformácia týka statku s plnou rivalitou (napr. certifikácia produktu) a bolo by nevyhnutné zaplatiť cenu za modifikovaný trhový produkt a s ním spojené úžitky z verejnoprospešných funkcií lesa. Pre klubové statky a služby sa rozlíšia dva typy rivality, (i) vnútorná rivalita medzi spotrebiteľmi, ktorí už sú oprávnení využívať statky a/alebo služby alebo (ii) externá rivalita týkajúca sa potenciálnych užívateľov daného modifikovaného trhového produktu. Napríklad pri parkovacích miestach sa môže externá rivalita vyskytnúť, ak je dopyt po parkovacích miestach vyšší, ako je ich ponúkané množstvo. Hodnotenie rivality môže byť opäť skreslené subjektívnym pohľadom. Preto sú potrebné nasledovné kritériá, ktoré platia pre statky, ktoré nemôžu dosiahnuť hodnotenie 10 v kategórii rivalita:
 1. Rivalita = 2,5 – to znamená, že v rámci spolku, alebo klubu nie sú výrazné problémy v rámci rivality internej alebo externej.
 2. Rivalita = 5 – štandardné klubové statky, kde sa môžu vyskytnúť náhodné problémy s preťažením (congestion) v rámci určitej časti roku, prípadne dňa v týždni.
 3. Rivalita = 7,5 – keď je preukázaný vyšší dopyt po určitom produkte, ako je jeho ponuka, čo implikuje vysokú vnútornú rivalitu a/alebo vysokú vonkajšiu rivalitu.



Obrázok 4 Transformačné/vývojové trajektórie od verejnoprospešných funkcií lesa na modifikované trhové produkty (zdroj: MANTAU *et al.* 2001)

Fig. 4 Transformation/development paths from ERGS to modified market products (source MANTAU *et al.* 2001)

- Exkludácia prostredníctvom modifikácie vlastníckych práv: transformácia
- - - Exkludácia prostredníctvom marketingovej techniky: vývoj

¹Rivalry, ²Exclusion, ³Recreational and environmental functions, ⁴Market products

Exkludácia a rivalita pred a po transformácii a vývoji v RES projekte

Dôležitým faktorom transformácie úžitkov z verejnoprospešných funkcií lesa na modifikované trhové produkty je ich úroveň pred transformáciou/vývojom. Väčšina verejnoprospešných funkcií lesa pred transformáciou na modifikované trhové produkty je charakterizovaná v RES projekte nulovou exkludáciou a rivalitou (tabuľka 1 a tabuľka 2). To je spôsobené najmä neuskutočniteľnosťou zákazu využívania úžitkov z verejnoprospešných funkcií lesa alebo značnou náročnosťou takéhoto zákazu.

Tabuľka 1 Exkludácia pred transformáciou/vývojom (zdroj: MANTAU *et al.* 2001)

Tab. 1 Excludability before transformation/development (source: MANTAU *et al.* 2001)

¹Exkludability, ²No, ³Very low, ⁴Low, ⁵Relevant, ⁶Very relevant, ⁷Total

Exkludácia ¹	AT	GE	IT	NL	Celkom ⁷
Žiadna ² (0)	7	25	23	15	70
Veľmi nízka ³ (2,5)	0	0	0	0	0
Nízka ⁴ (5,0)	3	0	2	1	6
Relevantná ⁵ (7,5)	0	0	1	0	1
Veľmi relevantná ⁶ (10,0)	9	3	2	4	18
Celkom ⁷	19	28	28	20	95

Tabuľka 2 Rivalita pred transformáciou/vývojom (zdroj: MANTAU *et al.* 2001)

Tab. 2 Relevance of rivalry before transformation/development (source: MANTAU *et al.* 2001)

¹Rivalry, ²No, ³Very low, ⁴Low, ⁵Relevant, ⁶Very relevant, ⁷Total

Rivalita ¹	AT	GE	IT	NL	Celkom ⁷
Žiadna ² (0)	14	22	14	12	62
Veľmi nízka ³ (2,5)	1	1	3	2	7
Nízka ⁴ (5,0)	1	2	9	1	13
Relevantná ⁵ (7,5)	0	2	2	4	8
Veľmi relevantná ⁶ (10,0)	3	1	0	1	5
Celkom ⁷	19	28	28	20	95

Exkludácia je nevyhnutnou podmienkou transformácie/vývoja. Zavedenie exkludácie prináša so sebou viaceré problémy, ktoré sú spojené s nutnými legislatívnymi zmenami, najmä v oblasti vlastníckych práv. Situácia po transformácii/vývoji je z hľadiska úrovne exkludácie veľmi rôznorodá vo väčšine skúmaných prípadov (tab. 3). V každej zo skúmaných krajín sa nájdu prípady, kde nie je exkludácia kompletná a platba za modifikované trhové produkty je dobrovoľná a nie je nutne spojená s využívaním relevantných úžitkov verejnoprospešných funkcií lesa.

Tabuľka 3 Exkludácia po transformácii/vývoji (zdroj: MANTAU *et al.* 2001)

Tab. 3 Excludability after transformation/development (source: MANTAU *et al.* 2001)

¹Exkludability, ²No, ³Very low, ⁴Low, ⁵Relevant, ⁶Very relevant, ⁷Total

Exkludácia ¹	AT	GE	IT	NL	Celkom ⁷
Žiadna ² (0)	0	0	0	0	0
Veľmi nízka ³ (2,5)	0	1	2	0	3
Nízka ⁴ (5,0)	1	2	0	0	3
Relevantná ⁵ (7,5)	0	0	0	1	1
Veľmi relevantná ⁶ (10,0)	18	25	26	19	88
Celkom ⁷	19	28	28	20	95

Úroveň rivality závisí od charakteristík modifikovaných trhových produktov a súvisiacich verejnoprospešných funkcií lesa. Vo všeobecnosti sa rivalita po transformácii/vývoji zvyšuje (tab. 4). Obyčajne sa dá po transformácii určiť približná úroveň rivality.

Tabuľka 4 Rivalita po transformácii/vývoji (zdroj: MANTAU *et al.* 2001)

Tab. 4 Relevance of rivalry after transformation/development (source: MANTAU *et al.* 2001)

¹Rivalry, ²No, ³Very low, ⁴Low, ⁵Relevant, ⁶Very relevant, ⁷Total

Rivalita ¹	AT	GE	IT	NL	Celkom ⁷
Žiadna ² (0)	0	0	0	0	0
Veľmi nízka ³ (2,5)	4	6	4	1	15
Nízka ⁴ (5,0)	6	5	5	6	22
Relevantná ⁵ (7,5)	1	2	13	3	19
Veľmi relevantná ⁶ (10,0)	8	15	6	10	39
Celkom ⁷	19	28	28	20	95

Transformačné a vývojové trajektórie môžu byť zobrazené graficky na porovnanie sledovaných krajín. Kvantifikácia transformačných trajektórií zo slovenských prípadových štúdií a ich komparácia so zahraničnými umožní posúdiť podporujúce a obmedzujúce faktory integrácie verejnoprospešných funkcií do trhového mechanizmu v Slovenskej republike.

4. ZÁVER

Rozšírená teória verejných statkov umožňuje na základe zmien hodnôt rivality a exkludácie popísať základné princípy transformácie niektorých úžitkov z verejnoprospešných funkcií lesov na trhové statky. Popísanie transformačných trajektórií umožní identifikovať potrebné zmeny vo vlastníckych právach alebo marketingových opatreniach pre modifikáciu verejných statkov lesníctva na trhové statky. Táto teória predstavuje základ pre teoreticko-metodický prístup v riešení aktivity 4.3 Integrácia verejnoprospešných funkcií do trhového mechanizmu v Centre excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy.

Podakovanie:

Táto štúdia vznikla v rámci riešenia projektu „Centrum excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy”, na základe podpory Operačného programu Výskum a vývoj financovaného z Európskeho fondu regionálneho rozvoja na základe zmluvy č. 262201200006.

Literatúra

- MANTAU, U. 1993: Die forstliche Produktlücke – Infrastrukturleistungen marktfähig machen. Allgemeine Forstzeitung 4 (93), 186–190.
- MANTAU, U. 1994a: Produktstrategien für kollektive Umweltgüter – Marktfähigkeit der Infrastrukturleistungen des Waldes. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 3(94): 305–322.

- MANTAU, U. 1994b: Produktstrategien für kollektive Umweltgüter. Zeitschrift für Umweltpolitik und Umweltrecht 3:305–322.
- MANTAU, U. 1995a: Von der Waldfunktionenlehre zur Waldproduktlehre. Holz-Zentralblatt 26 s.
- MANTAU, U. 1995b: Forest policy means to support forest outputs. In: Solberg, B. and Pelli, P. (eds.) Forest Policy Analysis – Methodological and Empirical Aspects EFI Proceedings No. 2. Meeting report, Working group S6.12-01, IUFRO/SNS, s. 131–146.
- MANTAU, U. 1995c: Von der Waldfunktionenlehre zur Waldproduktlehre. Holz-Zentralblatt 26(95), 451–453 s.
- MANTAU, U., MERLO, M., SEKOT, W., WELCKER B. 2001: Recreational and Environmental Markets for Forest Enterprises: a new approach towards marketability of public goods, CABI, 541 s.
- ŠÁLKA, J., TRENČIANSKY, M., BAHULA, P., BALÁŽOVÁ, E. 2008: Ekológia životného prostredia, učebné texty, TU Zvolen, 162 s.
- ŠÁLKA, J., DOBŠINSKÁ, Z., FODREK, L. 2008: Integrácia verejnoprospešných funkcií lesov do trhového mechanizmu, výskumná správa, 98 s.
- ŠÁLKA, J. 2008: Rozšírená teória verejných statkov a verejnoprospešné funkcie lesov, in: Aktuálne otázky ekonomiky LH SR, NLC Zvolen, s. 55–63.
- ŠÁLKA, J., SARVAŠOVÁ, Z., KOVALČÍK, M., DOBŠINSKÁ, Z. FODREK, L. 2009: Integrácia verejnoprospešných funkcií do trhového mechanizmu, In: Acta Facultatis Forestalis, v tlači.
-

Adresa autorov:

Doc. Dr. Ing. Jaroslav Šálka

Ing. Lukáš Fodrek

JUDr. Mgr. Zuzana Dobšínská

Katedra ekonomiky a riadenia lesného hospodárstva

Lesnícka fakulta

Technická univerzita vo Zvolene

T. G. Masaryka 24

960 53 Zvolen

e-mail: salka@vsld.tuzvo.sk

Stratégia transformácie verejnoprospešných funkcií lesov na trhové statky

Abstrakt

Cieľ tohto príspevku spočíva v predstavení základnej myšlienky transformácie verejnoprospešných funkcií lesov do trhového mechanizmu pomocou rozšírenia teórie verejných statkov. Príspevok vychádza z neoklasickej klasifikácie verejných statkov, ktorá rozdeľuje statky na súkromné a verejné, a teda trhové a netrhové. Na základe metodického prístupu v projekte „Trhy pre rekreačné a environmentálne statky a služby z lesníckeho multifunkčného produkčného systému“ (Niche Markets for Recreational and Environmental Goods and Services from Multiple Forest Production Systems – RES project; FAIR1 CT95-0743) rozširuje neoklasickú teóriu verejných statkov, a tým predstavuje základný princíp integrácie verejnoprospešných funkcií do trhového mechanizmu, ktorý bude uplatnený v aktivite 4.3 Integrácia verejnoprospešných funkcií do trhového mechanizmu v projekte Centra excelentnosti: Adaptívne lesné ekosystémy.

Kľúčové slová: verejnoprospešné funkcie lesov, verejné statky, rivalita, exkludácia, užitočnosť, transformácia