



Záverečná karta projektu

Názov projektu

Evidenčné číslo projektu

APVV-18-0195

Ekonomická optimalizácia modelov cieľového stavu prírode blízkych lesov

Zodpovedný riešiteľ **Ing. Ladislav Kulla, PhD.**

Príjemca **Národné lesnícke centrum**

Názov pracoviska, na ktorom bol projekt riešený

Národné lesnícke centrum, Zvolen

Názov a štát zahraničného pracoviska, ktoré spolupracovalo pri riešení

-

Udelené patenty/podané patentové prihlášky, vynálezy alebo úžitkové vzory, ktoré sú výsledkami projektu

-

Najvýznamnejšie publikácie (knihy, články, prednášky, správy a pod.) zhrňujúce výsledky projektu – uveďte aj publikácie prijaté do tlače

Kulla, L., Roessiger, J., Bosela, M., Kucbel, S., Murgas, V., Vencurik, J., Pittner, J., Jaloviar, P., Sumichrast, L., Saniga, M., 2023 (v elektronickej verzii 2022): Changing patterns of natural dynamics in old-growth European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests can inspire forest management in Central Europe. *Forest Ecology and Management* 529 (2023) 120633. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2022.120633>

Rössiger, J., Kulla, L., Murgaš, V., Sedliak, M., Kovalčík, M., Ciencala, E., Šebeň, V., 2022: Funding for planting missing species financially supports the conversion from pure even-aged to uneven-aged forests and climate change mitigation. *European Journal of Forest Research*. - ISSN 1612-4669, Roč. 141 s. 517-534. <https://doi.org/10.1007/s10342-022-01456-6>

Woods, K.D., Nagel, T.A., Brzeziecki, B., Cowell, C.M., Firm, D., Jaloviar, P., Kucbel, S., Lin, Y., Maciejewski, Z., Szwarzyk, J., Vencurik, J., 2021: Multi-decade tree mortality in temperate old-growth forests of Europe and North America: non-equilibrium dynamics and species-individualistic response to disturbance, *Global Ecology and Biogeography* 30: 1311–1333, WoS, CC

Roessiger, J., Kulla, L., Sedliak, M., 2020: A high proportion of norway spruce in mixed stands increases probability of stand failure. *Cent. Eur. For. J.* 66, 218-226

Rössiger, G., Kulla, L., Bošela, M., 2019: Changes in growth caused by climate change and other limiting factors in time affect the optimal equilibrium of close-to-nature forest management. *Central European Forestry Journal* 66(3-4), pp.180-190

Pittner, J., Sedmáková, D., Parobeková, Z., Jaloviar, P., Kucbel, S., Vencurik, J., Saniga, M., 2020: Pred a podisturbančný vývoj smrekového prírodného lesa v západných Tatrách.

Zprávy lesnického výzkumu 60 (4), 281-286

Šumichrast, L., Vencurik, J., Pittner, J., Kucbel, S., 2020: The long-term dynamics of the old-growth structure in the National Nature Reserve Badínsky prales. Journal of forest science 166 (12), 501-510

Saniga, M., Kucbel, S., Jaloviar, P., 2021: Disturbančný režim a temporárne zmeny zastúpenia drevín - ich vplyv na hrúbkovú štruktúru vo vývojovom cykle Badínského a Dobročského pralesa. Technická univerzita vo Zvolene, ISBN 978-80-228-3258-8, 60 s.

Saniga, M., Pittner, J., Vencúrik, J., 2020: Štruktúra vybraných pralesov Slovenska ako základ kreovania modelov lesa hrúbkových tried. Technická univerzita vo Zvolene, 68 s.

Uplatnenie výsledkov projektu

Výsledky výskumu projektu SilvaMod uplatní v praxi riešiteľská organizácia Národné lesnícke centrum (NLC), ktorá je súčasne odberateľom výsledkov výskumu. NLC je metodický garant hospodárskej úpravy lesov na Slovensku.

Výsledky výskumu sa uplatnia pri implementácii prírody blízkeho hospodárenia v lesoch v zmysle novely zákona 326/2005 Z.z. o lesoch z roka 2020, a novely vyhlášky 435/2006 Z.z. o hospodárskej úprave a ochrane lesov.

Projekt má dva hlavné aplikačné výsledky výskumu: 1) Modely cieľového stavu základných typov prírody blízkeho lesov Slovenska, 2) Softvérový produkt SilvMod.

1) Modely cieľového stavu základných typov prírody blízkeho lesov Slovenska obsahujú údaje o optimálnej zásobe, optimálnom rozdelení početností podľa hrúbkových stupňov a drevín, a optimálnej decenálnej ťažbe podľa hrúbkových stupňov a drevín pre prírodu blízky 1) dubový les, 2) bukový les, 3) smrekovo-jedľovo-bukový les. Osobitným spôsobom je spracovaný 4) rekonštrukčný model prebudovy pre nepôvodný smrekový les. Modely obsahujú atribúty, ktoré predpisuje nová legislatíva prijatá v rokoch 2020 a 2022 pre nový typ „lesa hrúbkových tried“ naviazaného na prírodu blízke hospodárenie v lesoch. Modely sú ekonomicky optimalizované, t.j. nastavené na udržateľný maximálny výnos z lesa meraný čistou súčasnou hodnotou (NPV), ktorý je diferencovaný podľa základných typov stanovišť (3 stanovišťa pre každý typ lesa) a podľa rôznej váhy na ekonomický výnos (tri úrovne úrokovej miery).

2) Softvérový produkt SilvaMod je naprogramovaný v prostredí R, a zaznamenáva závislosti základných ekologických, (dorast, prírastok, mortalita stromov) a ekonomických (cena dreva, náklady na ťažbu, náklady na zalesňovanie) faktorov od vybraných stromových, porastových a stanovištných charakteristík. V aktuálnej podobe je zostavený a parametrizovaný na obdobie posledného desaťročia, je však adaptívny, pripravený pre reparametrizáciu po každom novom cykle Národnej inventarizácie a monitoringu lesov (NIML SR), a/alebo po každom zásadnom pohybe trhov. Umožňuje teda adaptívnu aktualizáciu modelov cieľového stavu lesa na základe zmien vstupných ekologických a ekonomických údajov.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v slovenskom jazyku (max. 20 riadkov)

Cieľ 1: Analýza výsledkov výskumu pralesov a príprava podkladov pre odvodenie základných modelov ich dynamiky.

V rámci tohto cieľa sa spracovali rozsiahle databázy existujúcich meraní, a preukázalo sa zlepšovanie prírastku a znižovanie mortality buka, premietajúce sa do trendu prirodzeného zvyšovania zastúpenia tejto dreviny na úkor ostatných drevín za posledných 50 rokov. Podiel smreka počas sledovaného obdobia postupne klesal. Pripisujeme tieto javy zmene klímy. Z porovnania hrúbkových štruktúr pralesov s cieľavedomou transformáciou hrúbkových štruktúr pri prebudove na mozaikový prírodu blízky les vyplynulo, že hrúbkovú štruktúru lesa je možné úspešne transformovať cielenou ťažbou.

Cieľ 2: Odvodenie maticových modelov dynamiky prírody blízkeho lesov s využitím poznatkov z výskumu pralesov a údajov Národnej inventarizácie a monitoringu lesov SR. Na základe analýzy údajov z pralesov sa navrhli nasledovné regresné funkcie čiastkových modelov ekologickej časti maticového modelu: Pre dorast Weibullova funkcia so začiatkom s nulovou hodnotou y pri kruhovej základni porastu $x = 0$. Pre funkciu prechodu do vyššieho hrúbkového stupňa (prírastok) multinomická logistická regresia, umožňujúca decenálny prechod do vyššieho, aj do ďalšieho hrúbkového stupňa. Pre pravdepodobnosť mortality binomická logistická regresia s pridaním kvadratickej zložky pre súčasné zachytenie

kompetičnej mortality v najnižších, a fyziologickej mortality v najvyšších hrúbkových stupňoch. Finálne maticové modely sa v tejto podobe parametrizovali údajmi dvoch cyklov NIML SR pre tri prirodzené základné typy lesa Slovenska. Štvrtý model model prebudovy nepôvodnej smrečiny bol parametrizovaný údajmi NIML a ďalších dvoch projektov na území Západných Beskyd.

Cieľ 3: Integrácia optimalizátora ťažby do maticových modelov a odvodenie ekonomicky optimálneho cieľového stavu základných typov manažovaného prírody blízkeho lesa. Algoritmus pre programové riešenie maticovej optimalizácie pozostáva 1) zo sústavy regresných rovníc pre dorast, prírastok a mortalitu odvodených v rámci cieľa 2, a 2) z integrovaného optimalizátora Subplex nastaveného na iteratívnu maximalizáciu čistej súčasnej hodnoty lesa (NPV) rôznym režimom ťažby a zalesňovania, generujúcim rôzne čisté finančné toky (NCF) v čase, pri rôznej úrokovej miere. Simulácie boli s prihliadnutím na dosiahnutie rovnovážneho stavu zásoby, prírastku a ťažby, a na výpočtový výkon, nastavené na simulačnú dobu 400 rokov a simulačnú periódu 10 rokov.

Cieľ 4: Vytvorenie programového riešenia pre automatizovanú aktualizáciu modelov cieľového stavu lesa pri zmene vstupov maticového modelu.

Zdrojový kód softvéru SilvaMod je napísaný v prostredí R. Vstupnými údajmi sú 1) východiskový stav lesa, t. j. početnosti stromov po hrúbkových stupňoch, 2) koeficienty regresných rovníc, 3) ceny dreva na pni podľa kvality kmeňa a hrúbkových stupňov, 4) výška úrokovej miery v %, 5) kód indikujúci zapojenie alebo nezapojenie optimalizátora ťažieb a optimalizátora zalesňovania. Výstup je tabuľka uložená vo formáte csv, ktorá obsahuje údaje o počte, kruhovej základni, objeme a cene živých, vyťažných a odumretých stromov po hrúbkových stupňoch osobitne pre každú simulačnú periódu. Z týchto údajov sa počítajú parametre modelov cieľového stavu lesa.

Súhrn výsledkov riešenia projektu a naplnenia cieľov projektu v anglickom jazyku (max. 20 riadkov)

Objective 1: Analysis of the results of research on primeval forests and preparation of documents for the derivation of basic models of their dynamics.

As part of this goal, extensive databases of existing measurements were processed, and the improvement of growth and reduction of beech mortality was demonstrated, reflected in the trend of natural increase in the representation of this tree species at the expense of other trees over the last 50 years. The share of spruce gradually decreased during the monitored period. We attribute these phenomena to climate change. From the comparison of the diameter distribution of primeval forests with the aimed transformation of the diameter structure during conversion to a mosaic close to nature forest, it emerged that the diameter distribution can be successfully transformed by targeted logging.

Objective 2: Derivation of matrix models of the dynamics of close to nature forests using knowledge from research on primeval forests and data from the National Inventory and Monitoring of Forests SR.

Based on the analysis of the data from the primeval forests, the following regression functions of the sub-models of the ecological part of the matrix model were proposed: For the ingrowth, a Weibull function starting with the zero value y at the basal area of the stand $x = 0$. For the transition to a higher diameter class (increment), multinomial logistic regression, enabling a decade-long transition to a higher, even to the next diameter class. For the probability of mortality, binomial logistic regression with the addition of a quadratic component for the simultaneous expression of competitive mortality in the lowest and physiological mortality in the highest diameter classes. In this form, the final matrix models were parameterized with the data of two NIML SR cycles for the three natural basic forest types of Slovakia. The fourth model, the model of reconstruction of non-native spruce, was parameterized by NIML data and two other projects in the territory of the Western Beskydy Mts.

Objective 3: Integration of the harvest optimizer into matrix models and derivation of the economically optimal target state of the basic types of managed forest close to nature. The algorithm for the matrix optimization solution consists of 1) a set of regression equations for ingrowth, increment, and mortality derived under objective 2, and 2) an integrated Subplex optimizer set to iteratively maximize the forest's net present value (NPV) by different harvest and afforestation regimes, generating different net financial flows (NCF) over time, at different interest rates. The simulations were set for a simulation period of 400

years and a simulation period of 10 years, taking into account the achievement of the equilibrium state of stock, growth and harvest, and computing power.

Objective 4: Creation of a software solution for the automated updating of models of the target state of the forest when the inputs of the matrix model are changed.

The source code of the SilvaMod software is written in the R environment. The input data are 1) the initial state of the forest, i.e. j. number of trees by diameter classes, 2) coefficients of regression equations, 3) prices of wood per stump according to trunk quality and diameter classes, 4) interest rate in %, 5) code indicating engagement or non-engagement of the harvest optimizer and the afforestation optimizer. The output is a table saved in csv format, which contains data on the number, basal area, volume and price of live, harvested and dead trees by diameter class, separately for each simulation period. The parameters of the models of the target state of the forest are calculated from these data.