

MODELÝ VÝŠKOVÝCH KŘIVEK A VYHODNOCENÍ DAT TRVALÝCH ZKUSNÝCH PLOCH

MODELS OF STAND HEIGHT CURVES AND DATA EVALUATION OF PERMANENT SAMPLE PLOTS

MIROSLAV ZEMAN

Ústav pro hospodářskou úpravu lesů, Brandýs nad Labem; Fakulta lesnická a dřevařská ČZU v Praze

ABSTRACT

Since the 1960s permanent sample plots have been established in forest stands of the Czech Republic. They are an extensive resource of information about the long-term development of the forest stands. Mensurational data, necessary for the calculation of basic stand characteristics, are measured on these sample plots. For this purpose it is necessary to use appropriate mathematic models of the stand height curves. The stand height curve expresses the relationship between the breast-height diameter and the height of the tree. This article describes the calculation methods and procedures for the automation of height stand curves and some related knowledge.

Klíčová slova: trvalá zkusná plocha, výčetní tloušťka, výška, střední výška, horní výška, výšková křivka, lineární regrese, nelineární regrese, Newtonova iterační metoda

Key words: permanent sample plot, breast-height diameter, height, middle height, top height, stand height curve, linear regression, nonlinear regression, Newton iteration method

ÚVOD

Trvalé zkusné plochy (TZP) poskytují rozsáhlý zdroj informací a poznatků o vývoji dendrometrických veličin lesních porostů v České republice. Byly zakládány od 60. let minulého století s cílem zajistit rozsáhlý empirický materiál pro tvorbu růstových modelů a konstrukci růstových tabulek. Zpočátku se jednalo o dvě kategorie výzkumných ploch a to poloprovozní výzkumné plochy (PVP) a trvalé výzkumné plochy (TVP). PVP patřily pod správu Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů (ÚHÚL). TVP s podrobnější evidencí jednotlivých stromů spravovaly výzkumné ústavy a lesnické fakulty. V 70. letech začal ÚHÚL zakládat TZP za účelem monitoringu změn vývoje lesních porostů v souvislosti s imisním poškozením lesů. Postupně došlo ke sjednocení a PVP byly převedeny na TZP. Jejich správou je pověřen ÚHÚL, který v současné době eviduje přes 800 aktivně sledovaných ploch a téměř 2 000 ploch, na kterých již terénní práce nadále nepokračují (BALÍN, VYSLYŠEL, ZEMAN 2008).

Začátkem 90. let použila firma PYRUS (později IFER) výsledků měření na TZP ke konstrukci svého růstového modelu a k tvorbě růstových a taxačních tabulek (ČERNÝ, PAŘEZ, MALÍK 1996), které se staly součástí lesnické legislativy. Podle tehdejších doporučení se předpokládala jejich platnost přibližně do roku 2010.

CÍL

Nutnými dílčími postupy pro vyhodnocování trvalých zkusných ploch jsou výpočty základních taxačních veličin lesních porostů, mezi něž patří dimenze středního a horního kmene, kruhová základna a zásoba.

Na každé zkusné ploše se měří tloušťky všech stromů a výšky jsou zjišťovány pouze u vybraných vzorníků. Výšky ostatních stromů, které je potřeba znát k vyčíslení porostních taxačních charakteristik, je nutno doplnit pomocí vhodných matematických modelů výškových křivek. Cílem tohoto příspěvku je popsat proces automatizace takových modelů při zpracování dat TZP.

Zdroje dat

Primární informace o TZP jsou průběžně získávány z pravidelných terénních inventarizací. Základní složku sledovaných dat tvoří údaje o jednotlivých stromech na vymezené části lesního porostu. Velikost zkusné plochy se pohybuje v rozmezí od 10 do 100 arů, ojediněle až do 150 arů. Průměrná velikost je okolo 25 arů. Perioda opakovaného terénního sběru dat na ploše je zpravidla 5 let.

Základním objektem terénního měření dendrometrických veličin na TZP je strom. Mezi veličiny sledované u každého stromu patří výčetní tloušťka, druh dřeviny a věk. Výška stromů se měří jen na vybraných vzornících volených tak, aby dostatečně pokrývaly celé spektrum výčetních tlouštěk. Jednotlivé stromy jsou číslovány, aby je bylo možné identifikovat v jednotlivých opakovaných měřeních. U PVP je sledovaným objektem tloušťkový stupeň o šířce 1 cm a s údajem o počtu stromů. Stromy nejsou opatřeny identifikačními čísly. Toto účelové zjednodušení metodiky s cílem úspory nákladů způsobuje potíže při vyhodnocování časových posloupností opakovaných měření. To je důvod, proč jsou tyto plochy převedeny na TZP.

Dnes jsou informační soubory dat digitalizovány a uloženy v databázi informačního a datového centra ÚHÚL (IDC) a tak lze úlohy jejich vyhodnocení, ale i kontrol a případných oprav automatizovat.

METODIKA

Výšková křivka vyjadřuje závislost výšky na výčetní tloušťce v porostu. Je užitečná jednak při stanovení střední, popřípadě horní výšky a jednak při odvození vyrovnaných výšek nutných pro stanovení objemů stromů. Jak již bylo zmíněno, na TZP se neměří výšky u všech stromů, ale pouze u vybraných vzorníků. Objem každého jednotlivého stromu je stanoven z objemových tabulek na základě jeho změřené výčetní tloušťky a výšky odvozené z výškové křivky. Stromový inventář plochy TZP byl stratifikován podle dřevin a výšková křivka se konstruovala pro každou dřevinu, která měla alespoň 10 jedinců se změřenou výškou. Vzhledem k druhové homogenitě založených trvalých zkusných ploch došlo v převážné většině případů k vyrovnání výšek pouze u hlavní dřeviny a ostatní přimíšené dřeviny tak zůstaly bez výšek. Proto byla úloha doplněna o vyrovnání všech výšek bez stratifikace a z těchto souhrnných křivek pak byly odvozeny výšky dřevin s nedostatečným počtem vzorníků.

V rámci zpracování dat TZP byly použity typy výškových křivek, které odborná literatura (KORF et al. 1972) doporučuje k vyjádření závislosti výšky na výčetní tloušťce. Použité typy křivek jsou také součástí metodiky vyhodnocení Národní inventarizace lesů (ZACH 2002). Celý postup je algoritmizován v pilotní aplikaci připravené speciálně pro TZP.

Pro zpracování dat TZP byly zvoleny 3 křivky: Neslundova, Levakovičova a Michajlovova.

Neslund:

$$h = \frac{d^2}{(A + B \cdot d)^2} + 1,3 \quad (1)$$

Levakovič:

$$h = A \cdot \left(\frac{d}{1+d} \right)^B + 1,3 \quad (2)$$

Michajlov:

$$h = A \cdot \exp\left(\frac{B}{d}\right) + 1,3 \quad (3)$$

h výška stromu
 d výčetní tloušťka stromu
 A, B parametry křivek

K odhadu parametrů výškových křivek je použita lineární regrese. Nelineární modely jsou linearizovány vhodnými transformacemi měřených výšek a tlouštěk:

Neslund:

$$Y = \frac{d}{\sqrt{h-1,3}}, X = d \quad (4)$$

Levakovič:

$$Y = h(h-1,3), X = \left(\frac{d}{1+d} \right) \quad (5)$$

Michajlov:

$$Y = h(h-1,3), X = \frac{1}{d} \quad (6)$$

X transformovaná nezávisle proměnná
 Y transformovaná závisle proměnná
 d výčetní tloušťka stromu
 h výška stromu

Parametry křivek se odvodí z regresních parametrů lineárních modelů zpětnou transformací.

Neslund:

$$A = a \quad b = b \quad (7)$$

Levakovič:

$$A = e^a \quad B = b \quad (8)$$

Michajlov:

$$A = e^a \quad B = b \quad (9)$$

a, b parametry z lineární regrese
 A, B parametry křivek po zpětné transformaci

Metoda linearizace modelu transformací proměnných není z hlediska kritéria nejmenších čtverců optimální. Proto byla zpracována varianta parametrizace výškových křivek pomocí nelineární regrese, která eliminuje nevyváženost transformovaných dat. Pro vyčíslení parametrů je použita nelineární metoda nejmenších čtverců (REKTORYS et al. 1981). Pro tento účel se ukázala jako zcela vyhovující Newtonova iterační metoda.

Rozvojem funkce výškové křivky do Taylorovy řady s členy do 1. řádu obdržíme následující vztahy:

$$h = f_0 + f_a \cdot \Delta a + f_b \cdot \Delta b \quad (10)$$

kde $\Delta a = a - a_0$, $\Delta b = b - b_0$ a a_0, b_0 jsou počáteční odhady parametrů.

$$f_0 = f(d, a_0, b_0) \quad (11)$$

$$f_a = \frac{\partial f(t, a, b)}{\partial a}, f_b = \frac{\partial f(t, a, b)}{\partial b} \quad (12)$$

Funkce $h = f_0 + f_a \cdot \Delta a + f_b \cdot \Delta b$ je již lineární vzhledem k diferencím parametrů $\Delta a, \Delta b$. Na ni se aplikuje podmínka nejmenších čtverců. Jako počáteční odhady se použijí parametry získané zpětnou transformací z výsledků lineární regrese. Po sestavení normálních rovnic a jejich řešení získáme hodnoty diferencí $\Delta a, \Delta b$, které přičteme k počátečním odhadům. Získáme nové odhady, které jsou vstupem pro další iterační krok.

$$a_i = a_{i-1} + \Delta a, b_i = b_{i-1} + \Delta b \quad (13)$$

Iterace se opakují až je diference parametrů zanedbatelná.

Při použití popsané metody dochází často k výpočetním nesnázím, kdy se kritériální funkce definovaná jako součet čtverců odchylek nesnižuje, ale naopak výrazně roste a metoda kolabuje. Proto byla navržena zobecněná Newtonova metoda, která upravuje výpočet diferencí parametrů s použitím tzv. „tlumícího faktoru“ (KVĚTOŇ, HEBÁK, KUBÁČEK 1979).

$$a_i = a_{i-1} + d \cdot \Delta a, \quad b_i = b_{i-1} + d \cdot \Delta b \quad (14)$$

d tlumící faktor.

Jak již bylo řečeno, databáze TZP obsahuje rozsáhlý soubor ploch s několika opakovanými měřeními a interaktivní parametrizace funkcí pro jednotlivé dřeviny v rámci měření je nereálná. Ukázalo se vhodnější vytvořit samostatnou počítačovou aplikaci, která by v dávkovém režimu zpracovala celou databázi a vyrovnala výšky pro každou významně zastoupenou dřevinu každého měření. Vyčíslené parametry výškových křivek se uloží do samostatné databázové tabulky a tak budou připraveny pro navazující výpočty porostních taxačních charakteristik. Z výškových křivek se odvodí veličiny středního a horního kmene. V metodice zpracování TZP se střední a horní kmen odvozují z průměrné kruhové základny pomocí kvadratického průměru tlouštěk.

Střední kmen

Výčetní tloušťka středního kmene:

$$d_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N d_i^2}{N}} \quad (15)$$

N počet stromů dřeviny

d_i výčetní tloušťka jednotlivého stromu

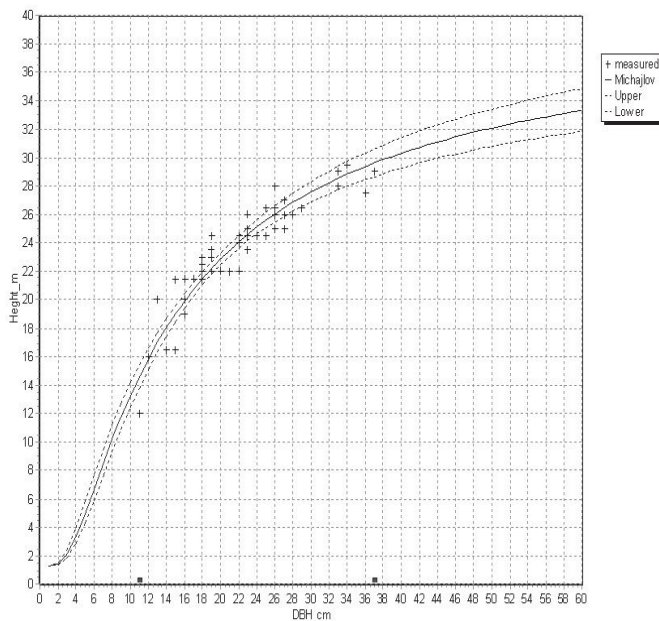
Výška středního kmene se vypočítá z výškového grafikonu dosažením tloušťky středního kmene jako argumentu.

$$h_g = f(d_g) \quad (16)$$

Horní kmen relativní

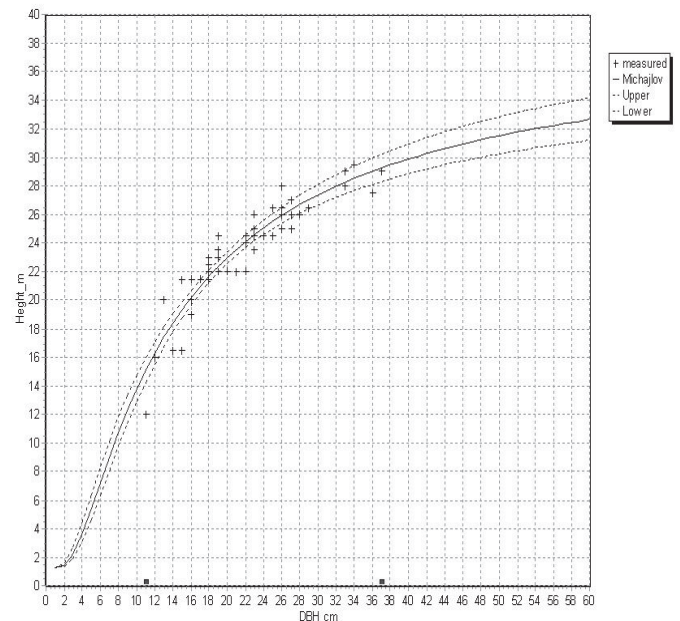
Dimenze horního kmene se počítají stejně jako dimenze středního kmene s tím rozdílem, že do výpočtu vstupuje 10 % stromů s největší výčetní tloušťkou.

$$N_{hr} = 0,1N \quad (17)$$



Obr. 1.

Vyrovnaní výšek Michajlovovou křivkou pomocí lineární regrese
Height smoothing with the Michajlov curve using the linear regression



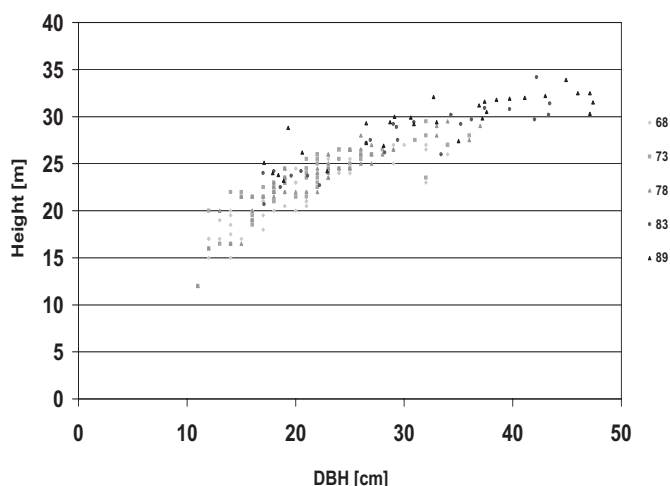
Obr. 2.

Vyrovnaní výšek Michajlovovou křivkou pomocí nelineární regrese
Height smoothing with the Michajlov curve using the nonlinear regression

Tab. 1.

Porovnání parametrů Michajlovovy křivky a reziduálního součtu čtverců (RSS) z lineární a nelineární regrese
Comparison of Michajlov curve parameters and residual sum of squares (RSS) from linear and nonlinear regression

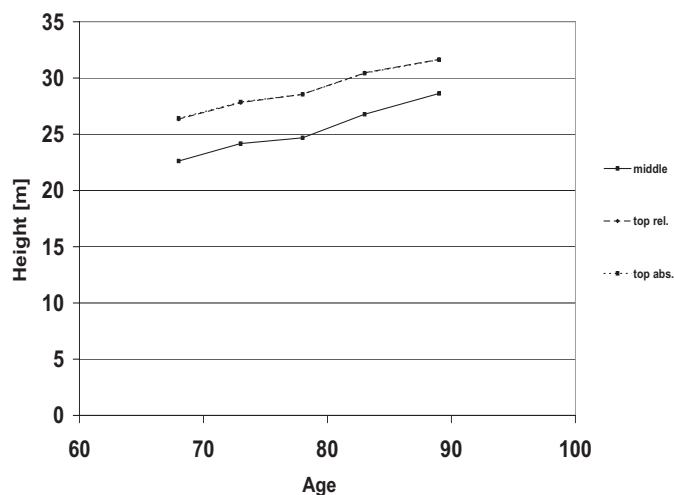
Regrese	Parametr A	Parametr B	RSS
lineární	39,02	-11,85	81,83
nelineární	37,71	-11,07	79,55



Obr. 3.

Měřené tloušťky a výšky vzorníků použitých pro konstrukci výškových křivek na obrázku 4

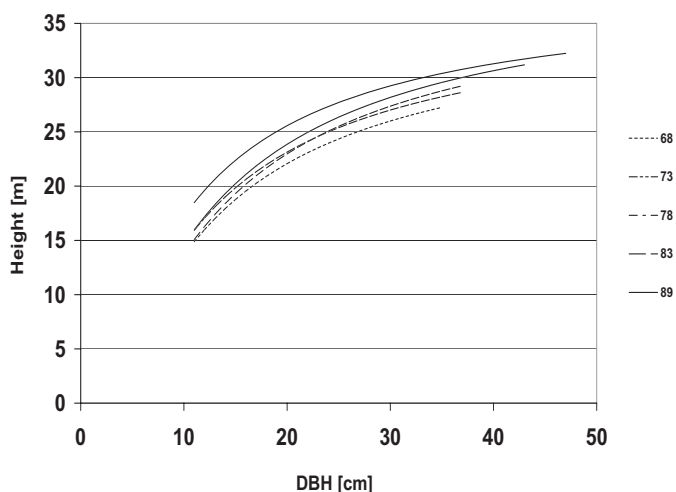
Measured diameters and heights of sample trees used for construction of stand height curves in Figure 4



Obr. 5.

Vývojová řada střední a horní výšky – smrk - 1984

Developmental series of middle and top height – spruce - 1984



Obr. 4.

Posloupnost výškových křivek podle věku
The sequence of stand height curves by age

Horní kmen absolutní

Do výpočtu se zahrnuje počet stromů odpovídající 100 kusů na ha.

$$N_{\#} = P \frac{N}{N_c} 100 \quad (18)$$

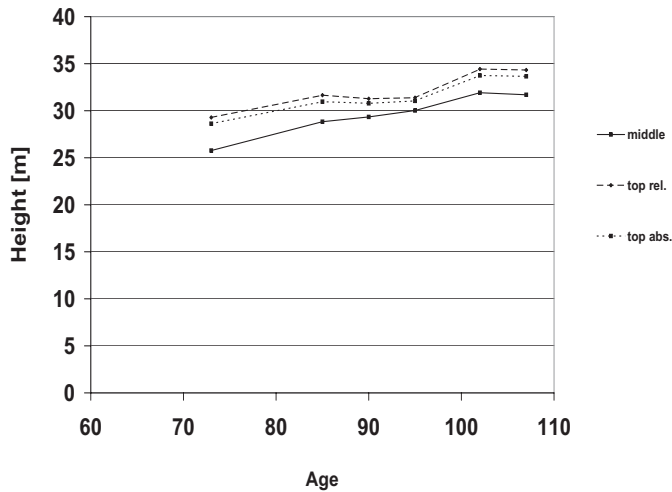
P	výměra zkusné plochy
N	počet stromů dřeviny
N_c	celkový počet stromů všech dřevin

VÝSLEDKY

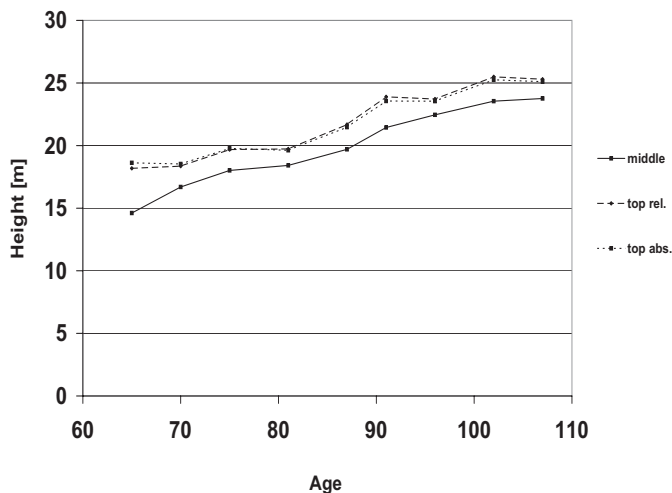
Tabulka 1 spolu s grafy na obrázcích 1 a 2 prezentují ukázkou vyrovnání výšek Michajlovovou křivkou a to jak lineární, tak i nelineární regresí. Ukázkou je ze zkusné plochy 78 let starého smrkového porostu, měřené v roce 1994 a založené v roce 1974. Obrázky 3 a 4 ukazují průběh časové posloupnosti bodových polí měřených výšek a vyrovnaných výškových křivek na téže ploše. Výškové křivky umožnily stanovit výšku středního a horního kmene odvozením z kruhové základny. Průběhy vývoje střední a horních výšek (relativní a absolutní) na třech vybraných zkusných plochách jsou na obrázcích 5, 6 a 7. Na obrázku 5 je smrková plocha založená v roce 1974 ve věku 68 let, na obrázku 6 smrková plocha založená 1974 ve věku 73 let a na obrázku 7 dubová plocha založená roku 1971 ve věku 65 let. Popsané algoritmy jsou implementovány v softwarové aplikaci vyvíjené autorem článku a používané v ÚHÚL. Výsledky jsou vstupem pro další analýzy vývoje porostních veličin včetně průzkumové analýzy a konstrukce růstových modelů.

DISKUSE

V citované literatuře (KORF et al. 1972, ZACH 2002) je v souvislosti s výškovými křivkami uváděna ještě tříparametrická lomená funkce, která je doporučována pro věkově nehomogenní porosty. Stávající trvalé zkusné plochy reprezentují stejnověkové porosty s jednoduchou strukturou a tudíž výhody této funkce by se neprojevily a navíc jejím použitím může v ojedinělých případech docházet k jevům odporujícím logice, jako je pokles výšky se stoupající výčetní tloušťkou nebo výskyt extrémů výškové křivky. Tyto případy se mohou při dávkovém režimu počítačového zpracování projevit skrytě a tak negativně ovlivnit výsledky navazujících analýz. Proto nebyla tato funkce v projektu TZP použita.



Obr. 6.
Vývojová řada střední a horní výšky – smrk - 1974
Developmental series of middle and top height – spruce - 1974



Obr. 7.
Vývojová řada střední a horní výšky – dub - 1971
Developmental series of middle and top height – oak - 1971

Nelineární regresní modely na rozdíl od lineárních nemají obecně jednoznačné řešení a při jejich užití se postupuje různými metodami nebo jejich kombinacemi. Z těchto důvodů bývá algoritmy dávákové výpočtu obtížné. V případě zde uvedených výškových funkcí se postupovalo tak, že se v první fázi počítaly regresní parametry z transformovaného lineárního modelu a ty se použily jako počáteční odhady pro nelineární regresi. Z grafu v ukázce (obr. 1 a 2) a tabulky 1 je patrné, že rozdíly mezi výsledky lineární a nelineární regrese nejsou nijak výrazné. Podobné nevýznamné rozdíly se projevují i u ostatních zkoumaných ploch.

V časových řadách středních a horních výšek je v některých případech (obr. 6 a 7) patrná větší nevyrovnanost u horní výšky než u střední, která neodpovídá teoretickým předpokladům, kdy se

běžně očekává, že horní výška má vyrovnanější průběh než střední. To může mít příčinu v tom, že při horní hranici oboru tlouštěk, odkud se horní výška odvozuje, bývá konfidenční pás obvykle širší a horní výška má také vyšší variabilitu. Navíc výchovné zásahy na plochách ve stadiu kmenovin nebývají natolik intenzivní, aby výrazně narušovaly časovou posloupnost dimenzí středního kmene, který se v tomto případě projevuje jako vyrovnanější reprezentant vývoje lesního porostu než horní kmen. V některých případech může jít o chyby v datech, které nelze vyloučit. Také výběr vzorníků výšek nemusí být dostatečně reprezentativní zejména v okolí tloušťky horního kmene. V úvahu přichází také možnost silného zásahu v nadúrovni.

ZÁVĚR

ÚHÚL má k dispozici softwarový nástroj pro zpracování primárně získaných dendrometrických dat, jehož výstupem jsou porostní taxační charakteristiky. Porostní zásoby a dimenze středních a horních kmenů se ukládají do databáze ve formě uchopitelné pro následnou průzkumovou analýzu a pro analýzy časových řad jednotlivých TZP nebo jejich skupin s cílem tvorby růstových modelů.

Ukázalo se, že kombinace lineárního a nelineárního postupu při konstrukci výškových grafikonů, kdy parametry vypočítané lineární regresi poslouží jako počáteční odhady pro nelineární regresi, je stabilní a pro dávkové zpracování celého datového souboru zcela použitelná. Přesto nelineární metoda není nezbytná, neboť se potvrdilo, že pro praktické účely je postup vyrovnání výšek pouze lineární regresi s transformací proměnných zcela dostačující.

Při používání horní výšky je potřeba analyzovat její průběh jednotlivě na každé ploše a hledat příčiny nevyrovnaného vývoje. Je nutno rozlišovat, zda se jedná o následek silného úrovněového nebo nadúrovněového zásahu, zda je výběr vzorníků dostatečně reprezentativní nebo zda jde o chyby v datech.

Poznámka:

Příspěvek byl zpracován s podporou projektu NAZV č. QH 71296 „Systém hodnocení společenské sociálně-ekonomické významnosti funkcí lesů včetně kritérií a indikátorů polyfunkčního obhospodařování lesů“.

LITERATURA

- BALÍN D., VYSLYŠEL K., ZEMAN M. 2008. Trvalé zkušné plochy a jejich využití v hospodářské úpravě lesů. In: Současná role a pozice současné hospodářské úpravy lesů v českém a slovenském LH. Kostelec nad Č. lesy, FLD ČZU.
- ČERNÝ M., PAŘEZ J., MALÍK Z. 1996. Růstové a taxační tabulky hlavních dřevin České republiky. Jilové u Prahy, IFER.
- KORF V. et al. 1972. Dendrometrie. Praha, SZN.
- KVĚTOŇ K., HEBÁK P., KUBÁČEK L. 1979. Tvorba empirických modelů metodami regresní analýzy. Praha, ČSVTS-FEL-ČVUT.
- REKTORYS K. et al. 1981. Přehled užití matematiky. Praha, SNTL.
- ZACH J. 2002. Inventarizace lesů v České republice – Soubor matematicko-statistických vyhodnocovacích metod. Dokumentace projektu NIL. Brandýs nad Labem, ÚHÚL.

MODELS OF STAND HEIGHT CURVES AND DATA EVALUATION OF PERMANENT SAMPLE PLOTS

SUMMARY

Forest Management Institute disposes of a software tool for processing of primarily obtained measurational data, its output is measurational stand characteristics. Stand volumes and dimensions of middle and upper stems are stored in the database in the sizable form for follow-up exploratory data analysis and time series analysis of individual permanent sample plots or their groups with the aim to construct yield models. It proved that the combination of linear and non-linear process in the stand height curves construction, when parameters computed by linear regression will be used as initial estimates for non-linear regression, is stable and fully applicable for batch processing of the whole dataset. Nevertheless, the non-linear method is not necessary, because it was proved that the height smoothing procedure using only linear regression with transformation of variables is entirely sufficient for practical purposes. When using the top height it is needed to analyze its trend individually in each plot and search for the causes of uneven development. It is necessary to distinguish if this is the effect of the heavy dominant or predominant tree thinning, if the selection of sample trees is sufficiently representative or if this is an error in the data.

Recenzováno

ADRESA AUTORA/CORRESPONDING AUTHOR:

Ing. Miroslav Zeman, Ústav pro hospodářskou úpravu lesů
Nábřežní 1326, 250 01 Brandýs nad Labem, Česká republika
tel.: 724 891 056; e-mail: zeman.miroslav@uhul.cz