

MODELOVÁNÍ 3D MIKROSKOPICKÉ STAVBY LISTNATÉHO DŘEVA S KRUHOVITĚ PÓROVITOU STAVBOU

R. Neugebauer, V. Gryc, H. Vavřík

Došlo: 10. června 2009

Abstract

NEUGEBAUER, R., GRYC, V., VAVRČÍK, H.: 3D modelling of microscopic structure of ring-porous wood. Acta univ. agric. et silvic. Mendel. Brun., 2009, LVII, No. 5, pp. 221–228

Nowadays many scientific 3D models of wood are available. These models are suitable only for simulation of physical fields movements in wood but not for educational purposes especially demonstration of microscopic structure of wood.

3D structure of ring-porous hardwood species was created. European ash (*Fraxinus excelsior* L.) was selected due to its relatively simple wood structure than other wood species within ring-porous group. The model was created by manual modelling process in Rhinoceros 4.0 that is a software for visualization and modelling. Microslides were prepared from sample of ash to take micro photos that were used as a visual source for modelling. Beside these pictures made by authors of this paper other microphotos from wood anatomy publications were used. Created 3D model of ash is a VRML object (Virtual Reality Modelling Language). This format is available to viewing and presentation with severe freeware VRML browsers. These VRML browsers are available as a plug-in for standard internet browsers or as standalone VRML browsers. The model is useful for studying and teaching microscopic structure of ring-porous hardwood species. It was created such a way to be as exact copy of original anatomical structure of ash wood as possible. The paper may be used as a cue for other authors to create their own 3D models of different wood kinds.

3D model, microscopic structure of wood, modelling, *Fraxinus excelsior*

Nevyplněnou mezeru v 3D modelování, pomocí modelovacích a vizualizačních softwarů, prozatím tvoří anatomická struktura dřeva. Doposud se žádná práce touto tematikou nezabývala a nebo nebyla publikována. V současnosti se můžeme setkat jen s 3D modely anatomické struktury dřeva jako s výsledky vědeckých prací tvořených pomocí nákladných technologií. Výsledky některých těchto prací, v závislosti na vědeckém záměru, poskytují 3D modely zachycující anatomickou stavbu dřeva, avšak tyto modely byly převážně určeny pouze ke konkrétním vědeckým účelům (Koňas et al., 2009) za účelem modelování pohybu fyzikálních polí. To je důvodem, proč tyto modely sice poměrně věrně modelují interakci mezi dřevem a fyzikálními poli, ale vzhle-

dově příliš neodpovídají reálné morfologii jednotlivých buněk.

Jako zástupce dřeva listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou byl zvolen pro modelování jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.), který je běžným druhem jasanu rostoucím na našem území. Pro tuto skupinu dřev jsou charakteristické makrocévy (průměr 60–120–350 μm^1), které jsou lokalizovány v jarním dřevě. V letním dřevě jsou rozptýleny mikrocévy (průměr 15–50–130 μm^1), které tvoří žádná charakteristická uspořádání. Základní pletivo je tvořeno librifonními vlákny. Dalším typickým znakem pro toto dřevo jsou homogenní dřeňové paprsky (pouze ležaté parenchymatické buňky), které jsou jednovrstevné až čtyřvrstevné. Velmi dobře

1 Pořadí hodnot: minimum – aritmetický průměr – maximum.

zřetelný je podélný dřevní parenchym paratracheální vazicentrický (Jane, 1958; Wagenführ, 1999; Vavřík a Gryc, 2008).

Cílem této práce bylo vytvoření modelu 3D struktury jasanu (*Fraxinus excelsior* L.), jako zástupce dřeva listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou dřeva, pomocí modelovacího a vizualizačního programu. Výsledný model je určen jako interaktivní pomůcka při studiu a výuce mikroskopické stavby dřeva listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou.

MATERIÁL A METODIKA

Modelování struktury dřeva předcházelo zhotovení mikroskopických preparátů ze vzorku dřeva jasanu ztepilého (metodika výroby mikroskopických řezů podle Vavřík a Gryc, 2004) a vytvoření digitálních snímků jeho mikrostruktury jako výchozí materiál pro zhotovení 3D modelu. Kromě těchto snímků byly dále použity i snímky dřeva pořízené z elektronového mikroskopu, ale i další mikroskopické snímky struktury dřeva pro bližší pochopení mikroskopické stavby dřeva jako celku a tvarů jednotlivých anatomických elementů (InsideWood, 2008; Wagenführ, 1999; Butterfield a Meylan, 1980).

Pro modelování 3D struktury dřeva byl zvolen profesionální modelovací program Rhinoceros 4.0 firmy Robert McNeel & Associates. Tento modelovací program využívající geometrie NURBS je vhodný jak pro běžné modelování objektů a scén, tak i právě pro modelování organických tvarů a struktur. Díky své široké škále možností modelování z 2D křivek nebo z 3D primitiv a schopnosti transformovat a deformovat objekty do požadovaných tvarů a rozměrů uživatelsky příjemným způsobem byl tento program vhodným nástrojem pro modelování 3D struktury dřeva na mikroskopické úrovni.

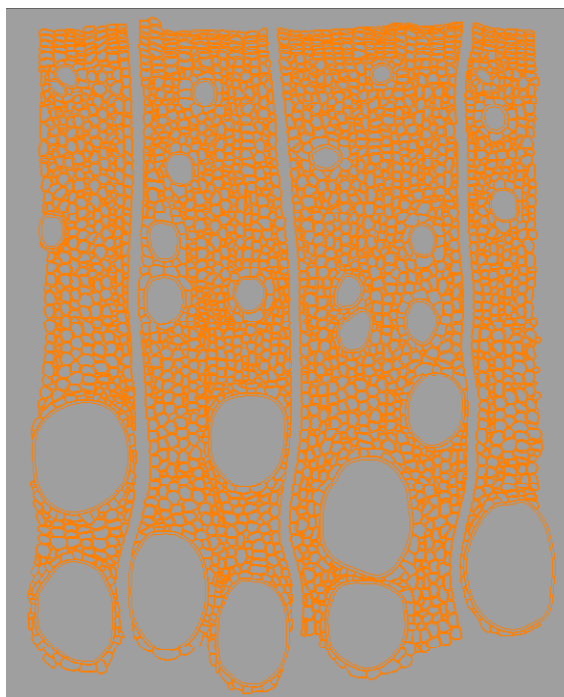
Modelování celé struktury dřeva proběhlo po částech dle jednotlivých anatomických elementů. Tento postup byl zvolen z toho důvodu, že kdyby byly všechny anatomické elementy modelovány společně, velikost souboru a množství ploch by neustále rostly, čímž by docházelo k nadměrnému zatěžování počítače a zpomalování procesu tvorby vůči právě modelovanému elementu. Jednotlivé skupiny elementů, po jejich konečném vymodelování, byly ukládány do souborů. Protože originální formát programu Rhinoceros 3DM souboru pro ukládání modelů v sobě zachovává příliš mnoho irrelevantních informací a výsledné soubory s modely by měly příliš velkou kapacitu souboru, nebyl by tento formát pro budoucí účely praktický. Z tohoto důvodu byl zvolen formát VRML (Virtual Reality Modelling Language). Poté, co byly všechny modely elementů hotovy a uloženy, byly složeny tak, aby na sebe správně navazovaly a vytvořily kompletní 3D model struktury dřeva. Ten byl znovu uložen ve formátu VRML z důvodu jeho zobrazování a prohlížení buď v modelovacích programech, jejíž většina formát VRML podporuje, nebo pomocí jedno-

duchých zdarma stažitelných VRML prohlížečů. Ty jsou dostupné buďto jako plug-in software (nastavbový software) pro webové prohlížeče nebo jako samostatně stojící prohlížeče formátů VRML.

VÝSLEDKY

Tvorba příčného řezu dřeva

Při tvorbě příčného řezu v modelovacím programu byl použit jako předloha snímek příčného řezu. Tento příčný řez byl využit jako podkladová šablona pro překreslení jeho struktury pomocí 2D křivky „křivka: interpolovat body“, v pohledu shora (Obr. 1). Jednotlivé elementy byly pomocí této křivky obkresleny a po zhotovení celého příčného řezu v programu byla použita funkce pro upravování křivek „odsadit křivku“ a podle potřeby byla každá uzavřená křivka odsazena dovnitř nebo ven o požadovanou hodnotu. Tato část tvorby 3D modelu struktury dřeva byla velmi důležitá a zásadní pro zhotovení celého modelu, protože z ní prostoro- a tvarově vycházejí veškeré elementy.



1: Příčný řez dřevem jasanu převedený do programu Rhinoceros 4.0 pomocí 2D křivek

Tvorba 3D modelů jednotlivých anatomických elementů

Makrocévy a mikrocévy

Jako základ pro vytvoření modelů makrocév a mikrocév byl použit již hotový příčný řez, jehož druhá kopie vytvořila s původním příčným řezem horní a spodní mez celého modelu. Výchozí křivka kopírující příčný tvar cévy byla postupně v podélném

směru shora dolů duplikována tak, aby tyto jednotlivé profily cévy vytvářely plášť cévních článků. Poté, co byly všechny jednotlivé 2D profily na svém místě a patřičně upraveny, byla na ně aplikována právě funkce „potáhnout“, která profily převedla na plochy. Tyto plochy nemají žádný tloušťkový rozměr své stěny, proto na ně byla aplikována další funkce pro práci s plochami, a to „odsadit plochu“. Pomocí této funkce se po nastavení potřebné vzdálenosti odsazení, směru odsazení a parametru, aby se po odsazení vytvořilo těleso, vytvořila stěna o dané tloušťce a céva byla hotová. Tento postup byl opakován na všech cévách modelu a na závěr pomocí „nástroje pro tělesa, booleovský rozdíl“ byla oddělena jejich část, která přesahovala za hranice modelu (Obr. 2 A). Jako předlohy pro dosažení požadovaného tvaru cévních článků bylo použito pořízených snímků podélných řezů struktury dřeva.

Axiální dřevní parenchym

Model axiálního dřevního parenchymu byl vytvořen metodou velice podobnou tvorbě cév. Základ pro jeho tvorbu znovu poskytl příčný řez a taktéž již hotové 3D modely cév. Ve dřevě jasanu se hlavně vyskytuje axiální dřevní parenchym paratracheální vazicentrický, jehož polohu na příčných řezech (horním a spodním) určuje překreslený příčný řez (okolí cév). Na podélných řezech musela být poloha a tvar axiálního parenchymu teprve vytvořena. Pro jeho tvorbu byly použity podélné řezy (předloha) a pomocí křivky „křivka: interpolovat body“ byly jednotlivě vytvářeny profily axiálního parenchymu v okolí cév. Poté, co byly všechny profily buněk hotovy, se mohlo začít s definováním jejich hloubky a směru. Výchozí profily buněk byly postupně třikrát zkopírovány kolmo na směr, ve kterém byly uloženy, směrem dovnitř modelu, čímž jim byla udána jejich hloubka, a vytvořil se tak jejich plášť. A protože parenchymatické buňky jsou na koncích uzavřené, do každé buňky byl umístěn do jejího dna bod, jako místo, kde se budou profily scházet. Poté

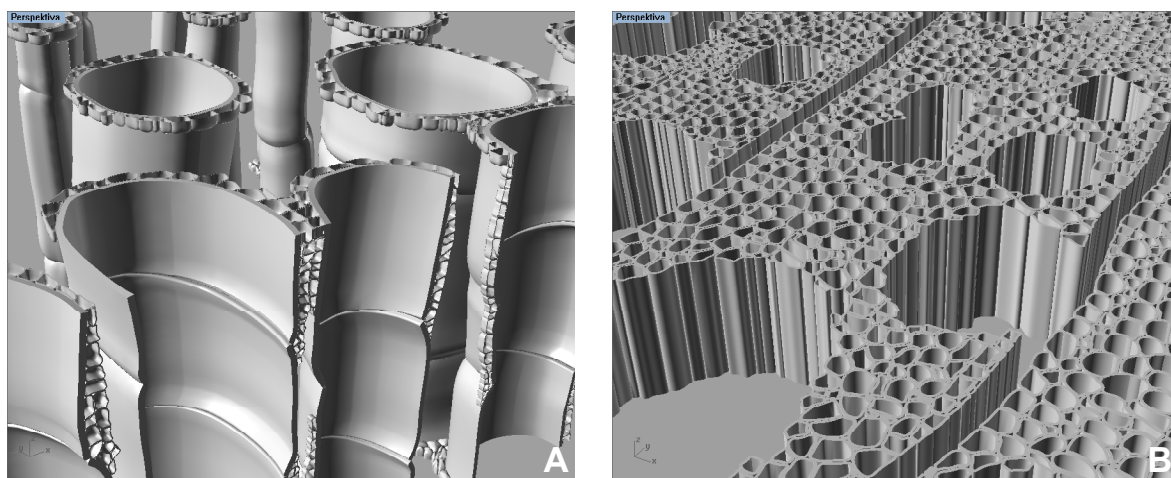
byly jednotlivé profily upraveny tak, aby se modely parenchymtických buněk neprotínaly s modely cév. Na takto vytvořené pláště z profilů byla následně aplikována funkce pro tvorbu ploch „potáhnout“. A protože vytvořené plochy neměly žádný tloušťkový rozměr, byla na ně aplikována funkce pro úpravu ploch „odsadit plochu“ (Obr. 2 A).

Libriformní vlákna

Libriformní vlákna tvoří v celém 3D modelu převážnou většinu ze všech anatomických elementů. Proto byla libriformní vlákna rozdělena na dvě pracovní kategorie: a) libriform vnitřní, b) libriform vnější. Libriform vnitřní jsou ty elementy, které můžeme pozorovat jen na příčném řezu (horním a spodním) a zbytek jejich stavby je ukryt uvnitř modelu, kde tvoří v podstatě neefektivní plochy, které by jen zbytečně model zatěžovaly, jak při vykreslování těchto ploch, tak by i zvětšovaly celkovou velikost souboru modelu. Proto libriform vnitřní tvoří jen zkrácené modely libriformních vláken. Libriform vnější tvoří elementy, které můžeme pozorovat na příčném řezu, ale hlavně na řezech podélných, to znamená, že jejich tvar je viditelný po celé jejich délce a byly vymodelovány tak, aby co nejvíce napodobovaly skutečnost.

Při tvorbě vnitřního libriformu byly použity pouze křivky z příčného řezu a funkce pro vytváření těles „vytáhnout rovinné křivky přímo“. Zadaním délkového parametru, který tvořil přibližně $\frac{1}{4}$ hloubky 3D modelu, byl libriform vnitřní hotov (Obr. 2 B).

Tvorba libriformu vnějšího vycházela ze skutečného tvaru a uspořádání libriformních vláken tak, aby jednotlivá vlákna na sebe navazovala a neprotínala se s jinými vlákny nebo anatomickými elementy v modelu. Jako předlohy byly použity snímky podélných řezů dřeva jasanu. Výchozí tvar jednotlivých libriformních vláken udávaly křivky na příčném řezu, které byly pomocí funkce „vytáhnout rovinné křivky přímo“ vytaženy do požadované



2: 3D model jednotlivých anatomických elementů; A – cévní články makrocév a axiální dřevní parenchym, B – libriformní vlákna (libriform vnitřní)

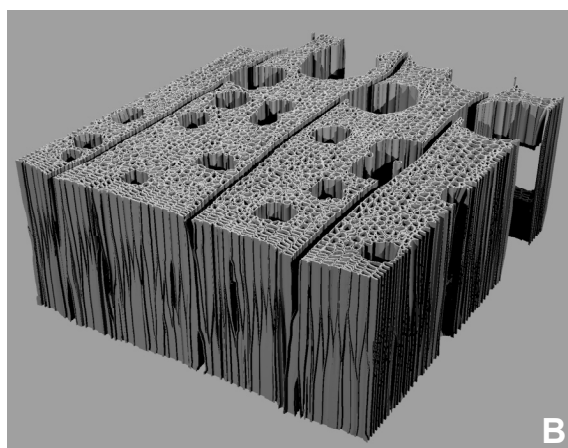
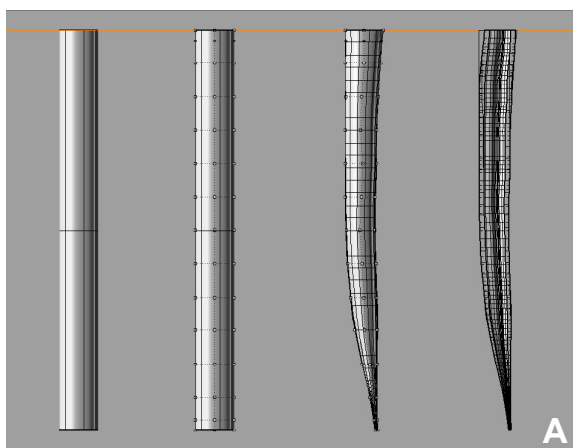
vzdálenosti směrem do modelu. Na takto vytvořený model byla následovně aplikována funkce pro transformaci těles „editovat pomocí klece, editovat klec“. Touto funkcí se kolem modelu vytvořila klec s požadovaným množstvím bodů ve všech osách (Obr. 3 A). Pohybem jednotlivými body nebo skupinami bodů byl model libriformního vlákna upravován do požadovaného tvaru a rozměrů. Na tangenciálních řezech a na jednom řezu radiálním byly tvary vláken přizpůsobeny tak, aby vytvořily prostor pro průchod ještě nevytvořených dřeňových paprsků (Obr. 3 B). Tímto způsobem byly vytvořeny všechny libriformní vlákna libriformu vnějšího a na závěr pomocí „nástroje pro tělesa, booleovský rozdíl“ byla oddělena jejich část, která přesahovala z modelu ven, čímž byly modely libriformních vláken hotovy (Obr. 7).

Dřeňové paprsky

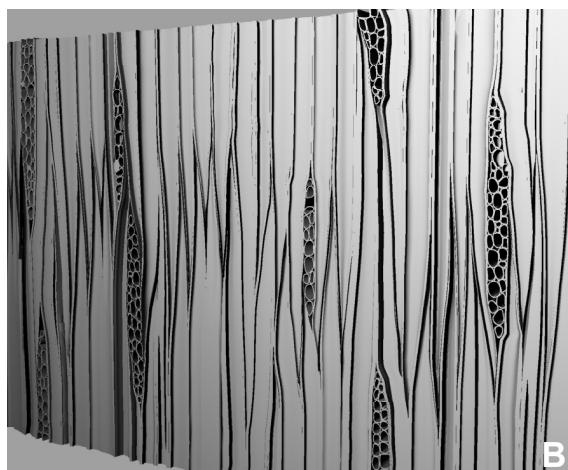
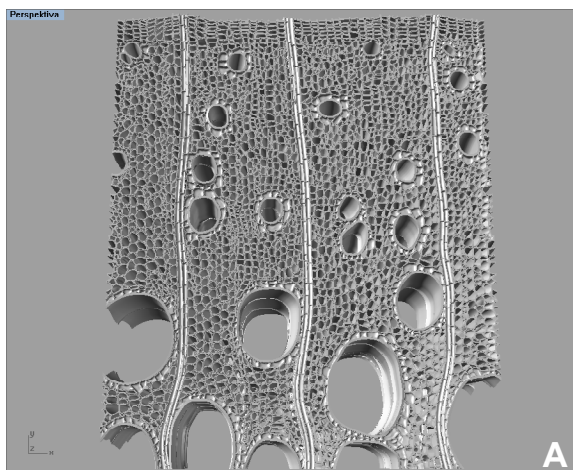
Dřeňové paprsky se vyskytují v celém 3D modelu dřeva jasanu na všech řezech, a proto se tvorba 3D modelů dřeňových paprsků liší v závislosti na směru řezu dřevem jasanu. Na příčném řezu byly použity tvary parenchymatických buněk vycházející z pře-

kresleného příčného řezu pomocí 2D křivek. Jejich tvary a rozměry byly vyjmuty a mimo model byly pomocí funkce pro úpravu křivek „napřímít“ napříměny podle přímky. Tato přímka tvořila osu všech parenchymatických buněk a rozdělila je na poloviny. Pomocí „křivka: interpolovat body“ byl nakreslen pro každou buňku její příčný řez a poté se již mohla aplikovat funkce pro tvorbu ploch „rotovat po trase“. Jako profilová křivka byla použita polovina podélného tvaru parenchymatické buňky, jako trasa její příčný řez a osu tvořila napřimovací přímka. Takto vytvořená uzavřená plocha byla pomocí funkce pro upravování ploch „odsadit plochu“ odsazena o požadovanou hodnotu tak, aby vzniklo těleso. Tento postup byl aplikován na každou parenchymatickou buňku a na závěr pomocí „nástroje pro tělesa, booleovský rozdíl“ byla oddělena jejich část, která přesahovala z modelu ven. 3D modely parenchymatických buněk byly pomocí funkce pro transformaci těles „deformovat podle křivky“ transformovány do tvaru, který zapadá do celkového 3D modelu (Obr. 4 A).

Na řezu radiálním byly použity již hotové nedeformované parenchymatické buňky z řezu příčného.



3: 3D model jednotlivých anatomických elementů; A – modelování libriformního vlákna pomocí klece (libriform vnitřní), B – výsledný 3D model libriformních vláken



4: 3D model dřeňových paprsků; A – příčný řez, B – tangenciální řez

Ty byly pouze otočeny do radiálního směru a poskládány vedle sebe, aby vytvořily tzv. zrcátko. Poté na ně byla aplikována funkce pro transformaci těles „deformovat podle křivky“, která část dřevného paprsku zdeformovala tak, aby po umístění na radiální řez vypadal jeho průběh co nejrealističtěji.

Na řezu tangenciálním se vyplnily připravené otvory mezi libriformními vlákny (Obr. 4 B), pomocí „křivka, interpolovat body“, tvary jednotlivých parenchymatických buněk. Ty byly pomocí funkce pro úpravu křivek „odsadit křivku“ odsazeny o požadovanou hodnotu, čímž jim byla vytvořena stěna, a poté pomocí funkce pro tvorbu těles „vytáhnout rovinou křivku podél křivky“ byly takto připravené dřevné paprsky vytaženy podél křivky tak, aby se neprotínaly s ostatními modely elementů (Obr. 3 B). Ta část dřevných paprsků, která procházela středem modelu a tvořila tak neefektivní neviditelné plochy, byla odstraněna pomocí „nástroje pro tělesa, booleovský rozdíl“, aby model zbytečně nezatežoval.

Tvorba celkového 3D modelu

Závěrem byly jednotlivé modely cév, axiálního parenchymy, libriformních vláken (libriform vnitřní a vnější) a dřevných paprsků poskládány v modelovacím programu dohromady tak, aby na sebe navazovaly a neprotínaly se a vytvořily tak celkový 3D model dřeva jasanu (Obr. 5).

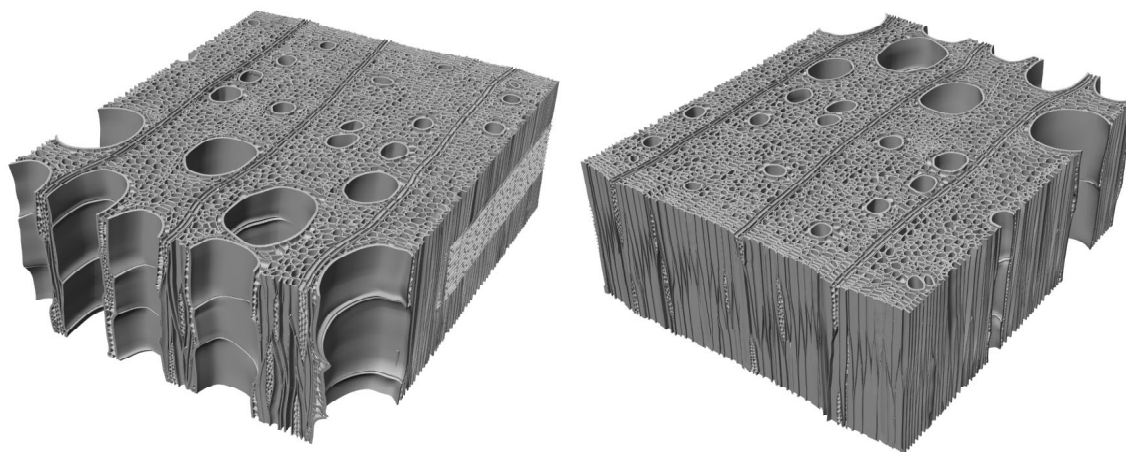
DISKUSE

Při pohledu na současný stav řešené problematiky tvorby 3D modelů struktury dřeva, za účelem studia a výuky mikroskopické stavby dřeva, tato oblast nedisponuje téměř žádnými, pro tento účel vhodnými modely. Většina 3D modelů anatomické struktury dřeva je zaměřena na tvorbu analýz mechanických a fyzikálních vlastností pomocí matematických modelů nebo na detailní zobrazení mikroskopické struktury s využitím nákladných technologií.

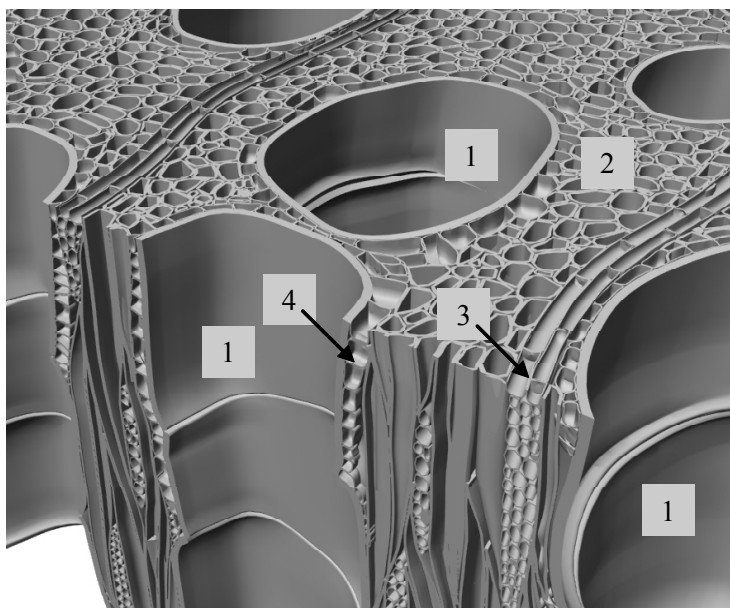
Základ tvorby těchto modelů spočívá ve zhotovení série po sobě jdoucích řezů struktury dřeva za použití, buďto destruktivních metod zhotovení řezů (pomocí např. mikrotomu), jak uvádějí ve své práci Koňas et al. (2008), či metodami nedestruktivními pomocí mikrotomografie (mikro CT), které uvádí Steppe (2004). Následné zpracování řezů v podobě 2D snímků již má za úkol software, příslušný dané metodě, a tvorba 3D modelu je tak do určité míry automatickou záležitostí.

Odlišnost modelování 3D struktury dřeva pomocí modelovacího softwaru spočívá již ve zhotovení podkladů pro tvorbu modelu v podobě snímků mikroskopické struktury dřeva. Těch bylo teoreticky potřeba jen šest, vždy dva ze základního směru P, R, T, které by charakterizovaly krajní stěny modelu. Pro modelování bylo však využito snímků mikroskopické struktury mnohem více. Jak 2D snímků, tak i snímků pořízených elektronovým mikroskopem, které zachycují tuto strukturu velmi detailně a v perspektivě. Tyto snímky poskytly nástroj pro správné pochopení stavby dřeva, tvaru a průběhu jednotlivých elementů, které v předchozích pracích vznikaly automaticky. Druhý rozdíl při tvorbě 3D modelu spočíval v samotném modelování struktury dřeva, které bylo zcela manuálně provedené pomocí nástrojů modelovacího softwaru. Vytahování a rotace 2D profilů jednotlivých anatomických elementů do objektů a jejich následné deformace a transformace do požadovaných rozměrů a tvarů, co nejvíce napodobují reálnou strukturu dřeva.

Tento postup byl zejména časově náročný, kdy manuální modelování vyžaduje dostatečnou znalost, zkušenosti a šití se s modelovacím softwarem. V druhé řadě rozsáhlost modelované struktury dřeva, která zahrnuje všechny elementy vyskytující se v šířce jednoho letokruhu, významně zatěžuje hardwarové vybavení počítače, což ovlivňuje metody tvorby jednotlivých elementů tvořených vždy odděleně pro daný druh. Detailnost modelu byla taktéž těmito faktory ovlivněna a odpovídá možnostem běžného domácího počítačového vybavení. Po-



5: Výsledný 3D model dřeva jasanu



6: Detail 3D modelu dřeva jasanu; 1 – makrocéva, 2 – libriformní vlákna, 3 – dřevový paprsek, 4 – axiální dřevní parenchym paratracheální vazicentrický

užitý formát VRML byl zvolen s ohledy na tyto faktory a také s možnostmi jeho širšího interaktivního využití ve výuce.

Diskutované dosavadní práce (Koňas et al., 2008, Steppe, 2004) byly vytvořeny za účelem čistě vědeckých analýz, jako výsledky zkoumání funkcí probíhajících ve dřevě nebo pro detailní zobrazení jeho struktury. Svojí specializací a formou nebyly určeny ke studiu a výuce mikroskopické stavby dřeva.

I přesto, že model již v současnosti velmi realisticky popisuje strukturu dřeva jasanu, bude nutné provést další zpřesnění. Jedná se především o zvětšení celkových rozměrů modelu a doplnění jednotlivých typů ztenčenin u jednotlivých anatomických elementů.

SOUHRN

Cílem této práce bylo vytvoření 3D struktury vybraného dřeva listnatých dřevin s kruhovitě pórovitou stavbou. Pro modelování byl vybrán jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior* L.), který má jednodušší strukturu v porovnání s ostatními druhy dřev v rámci této skupiny. Model byl zhotoven manuálními modelovacími postupy ve vizualizačním a modelovacím programu Rhinoceros 4.0 za pomoci běžné domácí počítačové techniky. Model vychází ze snímků základních řezů zobrazujících anatomickou stavbu dřeva jasanu. Mimo tyto snímky bylo využíváno i jiných 2D snímků a snímků z elektronového mikroskopu dostupných v literatuře.

Práce zachycuje postupy a metody zhotovení snímků anatomické stavby dřeva jasanu a modelování a kompletaci jednotlivých anatomických elementů do výsledného modelu. Model byl posléze uložen do formátu VRML (**Virtual Reality Modeling Language**). Tento formát je vhodný pro jeho prohlížení a prezentaci pomocí volně stažitelných VRML prohlížečů, které jsou buď součástí internetových prohlížečů jako plug-in software nebo jako samostatně stojící prohlížeče.

Model byl určen jako studijní pomůcka při studiu a výuce anatomické stavby dřeva listnáčů s kruhovitě pórovitou stavbou, jako jeho obecného zástupce, tak i přímo pro studium jasanu ztepilého. Byl vytvořen tak, aby co nejvěrněji napodoboval skutečnou anatomickou strukturu dřeva jasanu.

3D model, mikroskopická stavba dřeva, modelování, *Fraxinus excelsior*

Práce vznikla za finanční podpory výzkumného záměru MSM 6215648902 – Les a dřevo – podpora funkčně integrovaného lesního hospodářství.

LITERATURA

- BUTTERFIELD, B. G., MEYLAN, B. A., 1980: *Three-dimensional structure of wood*, Second edition London: Chapman and Hall, 103 s.
- InsideWood. 2004-onwards. Published on the Internet. <http://insidewood.lib.ncsu.edu/search> [10. 6. 2009].
- JANE, F. W., 1958: *The structure of wood*, London: Adam & Charles Black, 478 s.
- KOŇAS, P., GRYC, V., VAVRČÍK, H. 2009: *3D visualization and finite element mesh formation from wood anatomy samples, Part I – Theoretical approach*. Acta Universitatis agriculturae et silviculturae Mendelianae Brunensis, LVII, 1, s. 71–78.
- STEPPE, K., 2004: Diurnal dynamics of water flow through trees: design and validation of a mathematical flow and storage model. Disertaní práce. Univerzita Gent, 292 s.
- VAVRČÍK, H., GRYC, V., 2004: *Metodika výroby mikroskopických preparátů ze vzorků dřeva*. Acta Universitatis agriculturae et silviculturae Mendelianae Brunensis, LII, 4, s. 169–175.
- VAVRČÍK, H., GRYC, V., 2008: Wood anatomy – multimedial tutorial texts, 2.0 [CD-ROM]. Brno.
- WAGENFÜHR, R., 1999: *Anatomie des Holzes, Strukturanalytik – Identifizierung – Nomenklatur – Mikrotechnologie*. Leipzig: DRW – Verlag, 188 s.

Adresa

Bc. R. Neugebauer, Ing. Vladimír Gryc, Ph.D., Ing. Hanuš Vavrčík, Ph.D., Ústav nauky o dřevě, Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, Zemědělská 1, 613 00 Brno, Česká republika, gryc@mendelu.cz

