



TVORBA DATABÁZY PRE DETEKCIU VNÚTORNÝCH CHÝB DREVA ALGORITMAMI UMELEJ INTELIGENCIE Z 3D CT SKENOV GULATINY

Tomáš Bucha ▪ Radovan Gracovský ▪ Ondrej Vacek ▪ Tomáš Gergel

Bucha, T., Gracovský, R., Vacek, O., Gergel, T.: Creation of a database for detecting of internal wood defects using artificial intelligence algorithms from 3D CT scans. APOL, 2023, vol. 4, no. 1, p. 173–182.

Abstract: Logging and the sale of wood are the most essential revenue-generating activities of enterprises in forestry. The impetus for better valorisation of wood is the deploying of 3D Computer Tomography (3D CT) log scanning technology. This allows objective identification of internal defects in wood and optimises the grading and sawmilling processes. The paper describes creating a training and validation database from 3D CT scans of beech and oak logs to detect internal wood defects using artificial intelligence algorithms (AI). Our approach focuses on the AI technique of Neural Networks, which means the ability of programs to learn specific tasks, without being explicitly programmed to do so. Six fundamental parameters are used in the interpretation of 3D CT scans of wood logs: tone, size, shape, texture, position, and context. The paper describes the most critical defects influencing wood sales: knots divided into healthy and unhealthy groups, rots, cracks and cavities.

Key words: 3D CT scans; beech logs; internal wood defects; knots; rots; cracks; cavities

Úvod a problematika

Hlavným výsledkom desaťročia trvajúcej výchovnej, pestovnej, ale aj ochranárskej lesníckej činnosti, je produkcia drevnej hmoty. Následná ťažbová činnosť a predaj dreva sú najvýznamnejšie tržbonosné aktivity podnikov a spoločností podnikajúcich v lesnom hospodárstve (Kovalčík 2018).

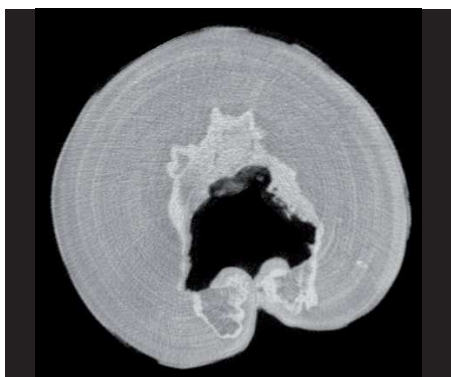
Plánovaniu ťažbovej činnosti a predaju dreva je preto najmä vo väčších podnikoch dlhodobo venovaná náležitá pozornosť. Napríklad Lesy Slovenskej republiky, štátny podnik, majú zavedený systém plánovania lesníckych činností. Aplikračné zázemie pre komplexné plánovanie rozhodujúcich tržbonosných a nákladových procesov poskytuje informačný systém KRPK (Foresta SG, dostupné online). Akronym vystihuje podstatu tohto riadiaceho systému, ktorý umožňuje podniku realizovať kontrolu, riadenie, plánovanie a kalkulovanie výnosov a nákladov. Systém WebLES (Foresta SK, dostupné online) je rozhraním pre komplexné evidovanie výrobných procesov a stavu lesa. Nadstavbu nad nimi tvorí systém PSPD zameraný na priebežné sledovanie pohybov dreva.

V rámci systému PSPD je aktuálne rozvíjaná oblasť spresnenia meraní porastov pred ťažbou a interaktívna tvorba plánu ťažbovej a pestovnej činnosti, reflektujúca potreby obchodu a potreby hospodárenia a starostlivosti o les. Ťažbová činnosť, ako aj predaj dreva, majú svoje lesnícke a obchodné potreby a limity. Potreby sú dané zákazníkmi, zmluvami. Limity sú dané ťažbovými možnosťami, kapacitami spracovateľov, situáciou na trhu, obchodnými vzťahmi. Ambíciou PSPD je efektívnejšie prepojenie potreby ťažby a predaja dreva. Nástrojom by mal byť nový modul PSPD, ktorý umožní vyčísliť potenciál ťažby vo forme reportu produkcie výrezov v m³ členený podľa drevín a sortimentov. Opakovanými interakciami medzi plánom ťažby a plánom predaja dreva je príkladom cyklického plánovania, ktorého výsledkom je optimalizácia možností a potrieb ťažby a predaja dreva (Sámel, osobná komunikácia 2022).

Významným impulzom pre proces optimalizácie ťažby a predaja dreva sú nové technológie 3D skenovania porastov a gulatiny, a prudko sa rozvíjajúce techniky umelej inteligencie na vyhodnotenie rozsiahleho súboru 3D dát. Technológia pozemného mobilného laserového skenera nesená v ruksaku na pleciah taxá-

tora výrazne urýchľuje skenovanie porastov oproti statickým skenerom s potrebou staničenia. V priebehu niekoľkých minút je možné získať údaje využiteľné pre inventarizáciu a sortimentáciu porastov pred ťažbou.

Statický 3D CT skener (MiROTEC CT Log, dostupné online) je prelomovou technológiou v lesnícko-drevárskom sektore, ktorá umožňuje skenovať guľatinu dreva. Špecifikom linky umiestnenej v Biotechnologickom parku Národného lesníckeho centra je to, že ide o jedinú linku vo svete, ktorá je otvorená pre výskumné, vzdelávacie a aj prevádzkové účely. Otvárajú sa tým možnosti pre užšiu spoluprácu podnikateľského sektora s výskumnými organizáciami a lepšie prepojenie vertikály producent – spracovateľ dreva. 3D CT skenovanie umožní presne určiť objem guľatiny a precízne detegovať vnútorné chyby dreva. Tieto informácie sú následne využité pri priečnom krátení dreva (druhovani) a pri optimalizácii rezného plánu pri pozdĺžnom rezaní, t. j. piliarskom spracovaní dreva. V oboch prípadoch sa dosiahne zvýšenie výťažnosti spracovávanej suroviny. Okrem zvýšenia výnosov zo spracovania dreva, 3D CT skenovanie kmeňov prináša objektivizáciu predaja dreva, zlepšenie dodávateľsko-odberateľských vzťahov, možnosť certifikácie dodávanej guľatiny a sledovania tokov dreva od výrezu po výrobok na báze obrazového rozpoznávania vnútorných znakov dreva zo skenov.



Obrázok 1. Buková guľatina - ukážka chýb dreva na priečných rezoch. Vľavo: Fotografia čela výrezu – identifikovateľné chyby dreva: dutina, tvrdá hniloba po obvode dutiny, zárast na obvo-de guľatiny. Vpravo: Zodpovedajúci priečný rez 3D CT skenu guľatiny s dobre viditeľnou dutinou, hnilobou a zárastom

Figure 1. Beech log - example of wood defects on cross-sections. Left: Photo of the log end - identifiable wood defects: cavity, hard rot around the cavity perimeter, overgrown seams on the log perimeter. Right: Corresponding cross-section of the 3D CT scan of the log with a clearly visible cavity, rot and overgrown seams.

Zásadnou podmienkou pre uplatnenie 3D CT skenera v spracovaní dreva sú dostatočná presnosť a zároveň rýchlosť vyhodnotenia skenov v piliarskej linke spracovateľa. Takúto schopnosť on-line vyhodnotenie jednotlivých chýb dreva majú algoritmy založené na umelej inteligencii. Prehľad najviac využívaných neurónových sietí pre klasifikáciu obrazových záznamov publikoval Vacek (2023).

Cielom príspevku je prezentovať postup tvorby databázy 3D CT skenov bukovej a dubovej guľatiny pre detekciu vnútorných chýb algoritmi umelej inteligencie. Sústreďujeme sa na hlavné defekty dreva, ktoré ovplyvňujú cenu guľatiny: zdravé a nezdravé hrče, hniloba, trhliny a dutiny. Podrobné kvalitatívne členenie guľatiny uvádza napr. norma STN EN 1316-1 (2000).

Materiál a metodika

Charakteristika skenovanej guľatiny a parametre skenovanie

Pre tvorbu databázy bolo zabezpečených 6 výrezov bukovej guľatiny v 4 m dĺžke s rôznymi chybami dreva. Skenovanie prvých 3 výrezov guľatiny sa uskutočnilo v spoločnosti Holz Pichler (Taliansko) v apríli 2022. Naskenovaná guľatina bola prevezená späť na Slovensko. Po inštalácii 3D CT skenera na NLC Zvolen, boli naskenované v júni 2023 ďalšie 3 ks bukovej guľatiny. V oboch prípadoch bola guľatina skenovaná na skeneri CT.LOG X-Ray Computer Tomography od spoločnosti MiCROTEC pri nasledovných parametroch: napätie 225 kVp, prúd v trubici 15 mA, rýchlosť rotácie portálu 20 ot/min (= rpm – revolutions per minute). Pozdĺžne a priečne rozlíšenie je $10 \times 2 \times 2$ mm, t. j. šírka jedného rezu snímania je 10 mm a veľkosť pixelu 2×2 mm. Všetkých 6 ks guľatiny bolo využitých pre tvorbu tréningovej aj validačnej databázy pre detekciu chýb dreva algoritmi umelej inteligencie. Ako príklad porovnania rozdielneho prejavu znakov dreva vo viditeľnej a v röntgenovej časti elektromagnetického žiarenia je na obr. 1 zobrazená farebná fotografia čela bukového výrezu a zodpovedajúci 3D CT sken.

Dubová guľatina v 4 m dĺžke s rôznymi chybami dreva bola získaná z dielca 911 z Lesného celku VŠLP Zvolen a od spoločnosti Valasaha GROUP, a. s. Pre tvorbu databázy bolo v júni 2023 zoskenovaných 6 výrezov na skeneri NLC pri parametroch opísaných pri drevine buk.

Určenie koeficientu absorpcie žiarenia a interpretačné znaky dreva

Pre potreby vzájomného porovnania výsledkov z rôznych typov skenerov alebo rozdielnych parametrov skenovania sú namerané hodnoty útlmu žiarenia normalizované (Freyburger et al. 2009). Hounsfieldove čísla alebo indexy (H) alebo CT sú normalizované voči röntgenovému zoslabeniu vodou podľa nasledovného vzťahu:

$$H = 1\,000 \cdot (\mu_{\text{drevo}} - \mu_{\text{voda}}) / \mu_{\text{drevo}} \quad [1]$$

Kde μ je absorpčný koeficient testovaných materiálov. Každý výrobca komerčných skenerov poskytuje postup kalibrácie spravidla podľa obsahu vody v skenovanom objekte. To vedie k porovnateľným výsledkom s hodnotou $H = 0$ pre objekty s „hustotou vody“ a $H = -1\,000$ pre objekty s „hustotou vzduchu“ bez ohľadu na použitú energiu röntgenového žiarenia.

Pre približnú kalibráciu skenera na hustotu dreva ρ je možné využiť aproximáciu podľa vzťahu:

$$\rho \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}\text{)} = H + 1\,000 \quad [2]$$

Uvedené vzťahy je možné využiť pri vizuálnej interpretácii jednotlivých znakov a vlastností dreva, a to na základe tónu. Tón ako interpretačný znak reprezentuje rôzne odtiene šede medzi bielou a čiernou. Drevo s vyššou hustotou alebo s vyšším obsahom vlhkosti bude sa na skenoch javiť v svetlejších odtieňoch šedej farby. Naopak, pri dreve s nižšou hustotou a nižším obsahom vody, bude zobrazené v tmavších odtieňoch sivej.

Pri dutinách a trhlínach je možné očakávať zobrazenie až v čiernej farbe, čo zodpovedá objektu s „hustotou vzduchu“. Pre ich vzájomné rozlíšenie je potrebné využiť ďalšie interpretačné znaky, a to tvar a rozmer. Na základe tvaru, rozmeru a textúry dutiny je možné usudzovať na jej pôvod, napr. po rozklade dreva hubami alebo po drevokaznom hmyze.

Pri hnilobe je možné očakávať veľkú variabilitu hodnôt H, resp. digitálnych hodnôt pixelov (DN). Pre ich identifikáciu je potrebné využiť ďalší interpretačný znak, ktorým je textúra, t. j. usporiadanie tmavých zložiek na svetlom podklade alebo naopak. Textúra môže byť opísaná vlastnosťami týchto zložiek, napr. priestorovým rozdelením, tvarom, veľkosťou, kontrastom k okoliu alebo pomocou geometrických obrazcov (napr. bodový, kruhový typ textúry).

V prípade hrčie je nutné ich rozdeliť na hrče zdravé a nezdravé. Pri zdravých hrčiach je predpokladané zobrazenie v šedom odtieni podobnom zdravému drevu. Vzájomné odlišenie na pričnom reze je možné určiť podľa narušenia kruhovej textúry skenu guľatiny menšou kruhovou textúrou hrče zobrazujúcej sa spravidla v tvare kruhu alebo elipsy. Zvýšenie hustoty dreva v hrči alebo okolí hrče sa prejaví svetlo šedým až jasne svetlým odtieňom. Pri nezdravých hrčiach v dôsledku hniloby dochádza k zníženiu hustoty dreva. Vizuálne sa nezdravá hrča bude preto zobrazovať v tmavošedých až tmavých odtieňoch podľa štádia hniloby.

Detekcia a označenie znakov dreva pre algoritmy umelej inteligencie

Pre uplatnenie 3D CT skenera v spracovaní dreva je potrebné dosiahnuť požadovanú presnosť a rýchlosť vyhodnotenia skenov v piliarskej linke. Požadované on-line vyhodnotenie jednotlivých chýb dreva umožňujú dosiahnuť algoritmy založené na umelej inteligencii (AI – Artificial Intelligence). Táto reprezentuje schopnosť počítačových programov napodobňovať ľudskú inteligenciu, zahŕňajúc samoučenie, uvažovanie a auto-korekciu. Jednou z techník AI je strojové učenie (Machine learning), t. j. schopnosť programu naučiť sa riešiť špecifické úlohy bez toho aby bol explicitne na to naprogramovaný.

Z pohľadu skúmanej témy automatickej detekcie chýb v drevnej surovine je sľubnou aplikáciou AI využitie neurónových sietí (NS). Pred samotným tréňovaním siete je nutné získať dostatočné množstvo obrázkov, na ktorých sieť bude tréňovaná a na nich označiť jednotlivé znaky. Samotné označenie bolo realizované dvomi prístupmi:

- Detekcia znakov v skene, kde hodnota 0 značí absenciu znaku a hodnota 1 výskyt znaku.
- Označenie jednotlivých oblastí, na ktorých sa nachádzajú hľadané znaky – t. j. ručné alebo poloautomatické.

zované vyznačenie polygónu a jeho zatriedenie do zvolenej kategórie. Tento proces nazývame sémantickou segmentáciou.

V prvom prístupe pre každú guľatinu a v jej rámci pre každý sken a hodnotený znak je uvedená hodnota 0 alebo 1 v tabuľke Excel. Chyby boli posúdené vizuálne vo voľne dostupnom softvéri pre spracovanie obrazu ImageJ.

V druhom prístupe sa naplňovanie tréningovej a validačnej databázy z 3D CT skenov guľatiny realizovalo podľa predpripraveného projektu v prostredí MATLAB modul Image Labeler (MathWorks®) v nasledovnej postupnosti: 1) ohraničenie obvodu výrezu; 2) ohraničenie plôch s definovanými chybami dreva: hrče – zdravé a nezdravé, hniloba, trhliny a dutiny, v oboch prípadoch na obrazovke počítača; 3) dodanie výstupných súborov v digitálnom tvare pre klasifikáciu v prostredí MATLAB. Segmentovaný bol každý štvrtý sken, z dôvodu veľkej podobnosti nadväzujúcich skenov.

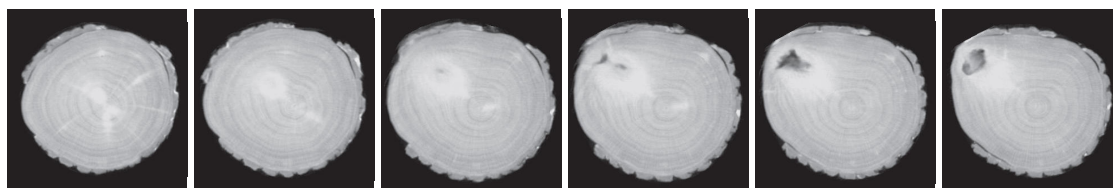
Výsledky a diskusia

Interpretácia chýb dreva z 3D CT skenov

V tabuľke 1 sú uvedené príklady vnútorných chýb dreva na priečných rezoch 3D CT skenov pre drevinu dub a buk. Ku každému obrázku je doplnené grafické zobrazenie, všeobecná definícia vnútornej chyby a opis konkrétnej chyby z CT snímku. Potreba odvodenia interpretačného návodu vychádza z požiadavky zjednotiť a zharmonizovať prístupy detekcie chýb dreva z 3D CT skenov jednotlivými hodnotiteľmi. Pre zabezpečenie úspešnosti klasifikácie metódami neurónových sietí je nevyhnutné získať veľké množstvo tréningových množín, na ktorých sieť bude trénovaná, resp. validovaná.

Vztahové a kontextuálne interpretačné znaky v 3D priestore

Vztahové a kontextuálne znaky vyjadrujú spojitosť objektov. Na obr. 2 je na siedmich skenoch zobrazený priebeh hrče od stržňa po obvod guľatiny. V tomto prípade je hrča identifikovateľná aj pri okulárnom hodnotení guľatiny ako jej vonkajší znak. V prípade, že hrča „nedosiahne“ obvod kmeňa, ide o hrču zarastenú, neidentifikovateľnú pri vonkajšom posudzovaní výrezu. Na obr. 2 je dobre odlišiteľná nielen hrča od ostatného dreva, ale aj jej postupný prechod od zdravej (svetlá farba) k nezdravej hrči v dôsledku hniloby (tmavé sfarbenie hrče). Okrem odtieňov šedej je pre odlišenie hrči od ostatného dreva možné využiť aj zmenu v textúre skenu. Celistvá kruhová textúra daná letokruhmi na priečnom reze (obrázok vľavo) je výrazne narušená na všetkých ďalších obrázkoch s výskytom hrče.



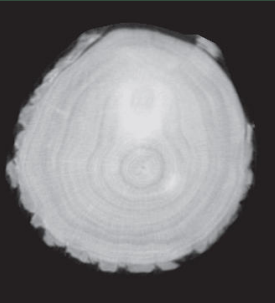
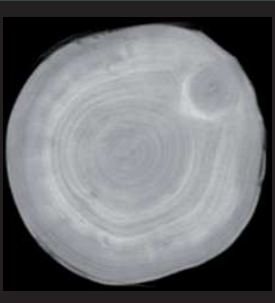
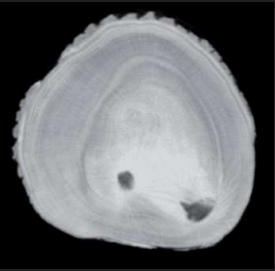
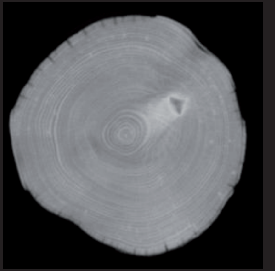
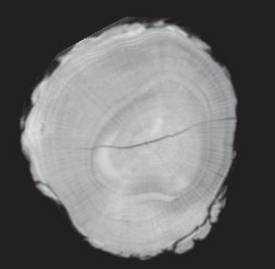
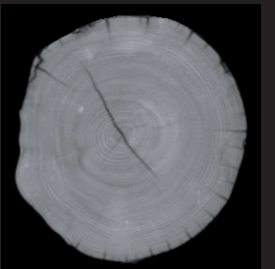
Obrázok 2. Grafické zobrazenie priebehu hrče od stržňa po obvod guľatiny. Dobre odlišiteľná je hrča od ostatného dreva. Zreteľný je aj jej postupný prechod od zdravej (biele sfarbenie) k nezdravej hrči až k dutine (tmavosivé až čierne sfarbenie). To je spôsobené hnilobou, prípadne zarastaním odumretej kôry

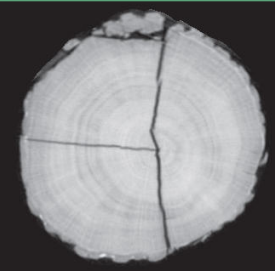
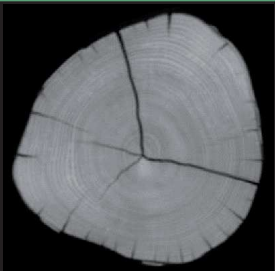
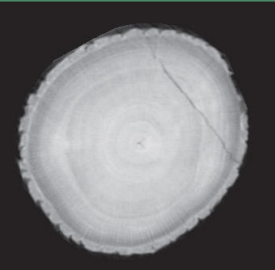
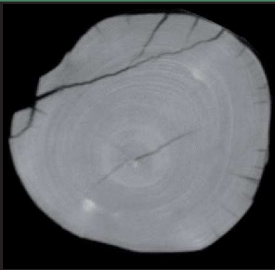
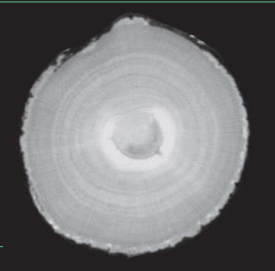
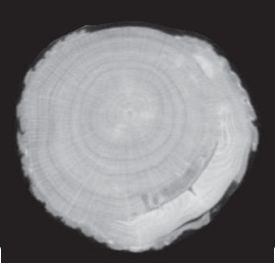
Figure 2. Graphic representation of the course of the knot from the pith to the log's perimeter. The knot is easily distinguishable from other wood. Its gradual transition from a healthy (white colouring) to an unhealthy knot to a cavity (dark grey to black colouring) is also evident. This is caused by rotting or overgrowth of dead bark



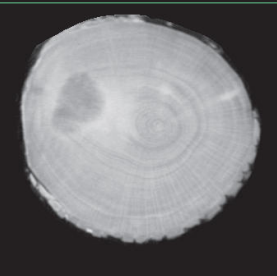

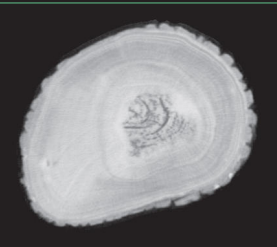
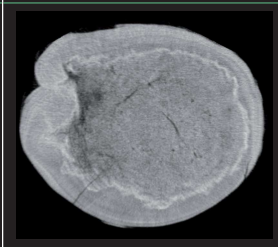
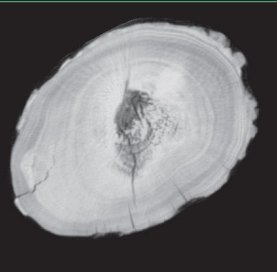

Návrh postup automatizovanej detekcie chýb dreva pomocou neurónovej siete (NS)

Vytvorený interpretačný návod a podľa neho poloautomatizovane segmentované skeny bukovej a dubovej guľatiny sú základom pre automatizovanú detekciu a klasifikáciu chýb dreva založenú na využití NS. V prvom kroku sa databáza rozdelí na dve skupiny, a to 1) Databáza pre tréning a 2) Databáza pre validáciu. Podotýkame, že v bežne uvádzaných príkladoch na použitie NS sa obrázky na overovanie oddelia náhodne. V našom

Tabulka 1. Interpretácia chýb dreva na priečných rezoch 3D CT skenov pre dreviny dub a buk – grafické zobrazenie, definícia a opis chyby
Table 1. Interpretation of wood defects on cross-sections of 3D CT scans for oak and beech - graphic representation, definition and description of the defect

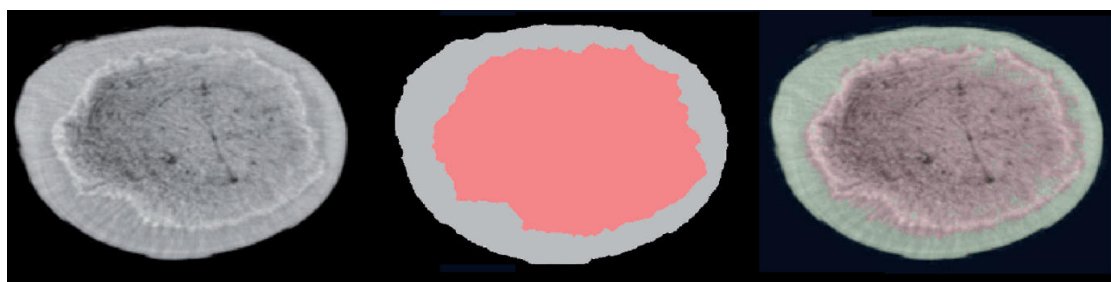
3D CT sken – DUB	3D CT sken – BUK	Všeobecná definícia vnútornej chyby	Opis konkrétnej chyby z CT snímky
		<i>Zdravá hrča:</i> je definovaná ako základ živých konárov, je obrastená drevom, ktorého vlákna v tomto mieste sú mierne vychýlené. Takáto hrča má vlastnú štruktúru a letokruhy, je farebne odlišná (tmavšia), má vyššiu hustotu. Ovplyvňuje mechanické a fyzikálne vlastnosti dreva, je však použiteľná pri opracovaní reziva (stabilizácii). <i>Kôra:</i> morfológický znak pre odlišenie drevín na základe hrúbky, farby a tvaru. Pri dube vytvára pevné širšie obdĺžnikovité útvary s menšími priečnymi trhlinami.	<i>Hrča:</i> CT snímka nám zobrazí toto miesto v tónoch šedi od bieleho, svetlo sivého až k sivému odtieňu, v tvare kruhu alebo elipsy (môže byť aj iný tvar), ktorý býva jemne ohraničený. Každá hrča má svoj priebeh – v linii posunu od stržňa k obvodu sa štruktúra a tón šedi hrče môže meniť. Snímka pri dube ukazuje umiestnenie hrče mimo stržeň, smeruje k belí. Snímka pri buku ukazuje umiestnenie hrče v belí pri obvode kmeňa. <i>Kôra:</i> zrejmy je rozdiel medzi dubom a bukom v zobrazení kôry na CT vyplývajúci z rozdielnej hrúbky borky.
		<i>Nezdravá hrča:</i> prvé štádium začínajúcej hniloby (tvrdá hniloba) je základ odumretých konárov, častokrát zarastená, prekrytá vláknom ktoré je vychýlené (viditeľné tzv. obtekanie). Tento typ hrče má výraznú štruktúru, častokrát časti sú odlupčivé a uvoľnené, pri opracovaní reziva nepoužiteľné. V mieste nezdravej hrče výrazne zmeny farby dreva a vyššej hustoty.	<i>Nezdravá hrča:</i> je identifikovaná podľa výrazného tmavšieho zafarbenia, odtieň svetlo sivej sa stupňuje k tmavým až čiernym odtieňom. CT snímka pri dube zobrazuje vrastenú hrču, na vonkajšom obvode je neviditeľná. Výrazné tmavo sivé tóny šedi indikujú prechod do dvoch nezdravých hŕč, ohraničených svetlo sivým až bielym odtieňom šede, čo je spôsobené vyššou hustotou dreva. Snímka pri buku zobrazuje nezdravú vrastenú hrču v tmavosivom tóne šedi.
		<i>Stredová trhlina – jednoduchá:</i> vzniká pôsobením sily, ktorá vzájomne od seba oddelí vrstvy drevných vlákien – porušenie celistvosti. Závažná chyba znižujúca pevnosť dreva. Tento typ trhliny sa vyskytuje na vyťaženej guľatine, vplyvom klimatických zmien a úbytkom vlhkosti.	CT snímka zobrazuje stredovú trhlinu, ktorá je čiernej farby, výrazne ohraničená svetlými tónmi šede, ktoré zodpovedajú drevu s rôznou vlhkosťou. Trhlina prechádza stredom guľatiny, je priama. Priebeh a dĺžka trhliny je premenlivá.

3D CT sken – DUB	3D CT sken – BUK	Všeobecná definícia vnútornej chyby	Opis konkrétnej chyby z CT snímky
		<i>Stredová trhlina – krížová:</i> vzniká pôsobením sily, ktorá vzájomne od seba oddelí vrstvy drevných vlákien – porušenie celistvosti. Závažná chyba znižujúca pevnosť dreva. Vyskytuje sa na vytaženej gulatine na čelách výrezov – tzv. výsušná trhlina vzniknutá vplyvom úbytku viazanej vlhkosti.	Krížová stredová trhlina v tvare línií je zobrazená čiernou farbou, výrazne ohraničená svetlými tónmi šede, ktoré zodpovedajú drevu s rôznou vlhkosťou. Trhlina vychádza zo stredu – od stržňa smerom do strán k belí, vytvára krížom na seba kolmé línie, ktoré sa v celom svojom priebehu menia.
		<i>Výrobná trhlina:</i> preniká mimo stred gulatiny, resp. výrezu – tzv. bočná trhlina. Vzniká v procese ťažby pôsobením vnútorných síl – pnutí drevných vlákien, manipulácie s výrezom, prudkým nárazom a pod.	Výrobná trhlina sa zobrazuje výrazne tmavo sivo až čierne, t. j. identicky ako pri stredovej trhlíne. V tomto prípade je mimo stred výrezu, častokrát je trhlina výrazná – väčší šírkový rozmer, trhlina sa ťahá na prieč prierezu – rozdeľuje výrez na dve časti.
	Nevyskytuje sa	<i>Stredová trhlina – čiastočne odlupčivá:</i> vzniká pôsobením sily, ktorá vzájomne od seba oddelí vrstvy drevných vlákien. Vzniká medzi letokruhmi, ide o vnútornú trhlinu, ktorá môže mať tvar oblúku alebo celého kruhu. Odlupčivá trhlina častokrát vzniká aj pri silných mrazoch.	CT snímka odlupčivej trhliny je zobrazená výrazným ohraničením, od stredu – stržňa výrezu výrazne tmavou sivou až čiernou farbou. Vytvára tak polkruhový alebo kruhový líniu okolo stredu výrezu. Od vonkajšej strany – od bele je ohraničenie v svetlo sivých tónoch šede. Biela farba nám zobrazuje zmenu hustoty dreva, vyššia vlhkosť a pod.
	Nevyskytuje sa	<i>Obvodová odlupčivá trhlina:</i> vzniká pôsobením sily, ktorá vzájomne od seba oddelí vrstvy drevných vlákien. Vzniká medzi letokruhmi, najmä medzi jadrovým drevom a belou. Vzniká čiastočná oblúčková prípadne po celom obvode.	Odlupčivá trhlina medzi letokruhmi je zobrazená z vnútornej strany v tvare polkruhu tmavou sivou až čiernou farbou. Bel tvorí hranicu z vonkajšej strany. Výrazné svetlé tóny šede beli definujú zmenu štruktúry a textúry a vyšší obsah vlhkosti a zmenu hustoty dreva.

3D CT sken – DUB	3D CT sken – BUK	Všeobecná definícia vnútornej chyby	Opis konkrétnej chyby z CT snímky
		<p><i>Nepravé jadro:</i> začína sa tvoriť, keď vzduch preniká do zrelého dreva. Oxidáciou rozpustných karbohydrátov a škrobu obsiahnutých v bunkách vzniknú polyfenolické zlúčeniny, ktoré spôsobia zmenu sfarbenia a odumieranie parenchymatických buniek jadrového dreva (Račko & Čunderlík 2010). Huby nie sú v tomto procese prítomné. Nepravé jadro nemá vplyv na mechanické vlastnosti dreva, znižuje však napr. účinnosť impregnácie a hodnotu gulatiny. Neskôr sú takéto kmene ľahšie napádané hubami.</p>	<p>Poznámka: Snímka vľavo reprezentuje čiernobielu fotografiu čela bukoveho výrezu zhodnú s CT skenom vpravo. CT snímka vpravo zobrazuje nepravé jadro buka v kruhovo-plamencovom tvare v sivých až svetlosivých tónoch šede. Zrejmy je rozdiel medzi snímkami, keď vo viditeľnej časti spektra sa nepravé jadro zobrazuje tmavošede (vo farbe je hnedé). Svetlé odtiene sivej farby na obvodě nepravého jadra na CT skene indikujú prítomnosť vody a zmenu hustoty.</p>
		<p><i>Tvrdá hniloba:</i> vzniká pôsobením parazitických húb, ktorých začiatok pôsobenia je od koreňa stromu. Tento typ hniloby je v prvej fáze, vyznačuje sa len zmenou farby dreva a zmenou hustoty. Aj tieto zmeny dokážu negatívne vplyvať na jeho mechanické a fyzikálne vlastnosti.</p>	<p>CT snímka tvrdej hniloby je zobrazená ako nepravidelný útvar v rôznych tónoch šedi podľa intenzity poškodenia v danom mieste. Pri dube je hniloba ohraničená svetlo sivými až bielymi odtieňmi šedi. Biely odtieň definuje zmenu k vyššej hustote dreva a zvýšenú vlhkosť. Svetlé tóny šede zobrazujú drevo bez výrazných poškodení a zmien. Pri buku je tvrdá hniloba zobrazená v svetlosivých až bielych odtieňoch šede indikujúcich prvé štádium hniloby.</p>
		<p><i>Mäkká hniloba:</i> existujú spôsoby napadnutia zvrchu, vtedy sa stromy v týchto častiach lámu – v mieste poškodenia. Tento typ hniloby je v pokročilej fáze, kde výraznejšie pôsobia parazitické huby, nastáva rozklad drevného vlákna, zmena štruktúry a výrazná strata mechanických a fyzikálnych vlastností.</p>	<p>DUB: CT snímka mäkkej hniloby sa zobrazuje ako texturálne výrazný odlišiteľný útvar. Svetlé odtiene sivej v tomto útvare zobrazujú prítomnosť vody a zmenu hustoty, vytvorené čierne línie zobrazujú výrazné poškodenie, s nábehom na chýbajúcu štruktúru dreva. BUK: mäkká hniloba vytvára výrazný útvar s jemnou tónovou premenlivosťou (rozložením šede) ohraničenou po obvodě svetlosivým pásom indikujúcim vyššiu vlhkosť.</p>
		<p><i>Hniloba s dutinou:</i> je posledná fáza pôsobenia parazitických húb, kde vzniká miesto s výrazne poškodenou štruktúrou, výrazný úbytok drevného vlákna, zvýšená vlhkosť.</p>	<p>DUB: CT snímka hniloby so vzniknutou dutinou, je ohraničená odtieňmi sivej a bielej. Biela farba indikuje prítomnosť zvýšenej vlhkosti a zmenu hustoty. Útvar zobrazujúci hnilobu má premenlivú textúru. Výrazné čierne zafarbenie ukazuje chýbajúcu drevnú hmotu v danom mieste. BUK: CT snímka zobrazuje dutinu ohraničenú hnilobou. Svetlé tóny šede indikujú vyššiu vlhkosť dreva.</p>

prípade to nie je vhodné, pretože jednotlivé za sebou idúce rezy kmeňa sa budú odlišovať len málo a mohla by nám uniknúť nedostatočná prispôbivosť algoritmu. Jednotlivé kmene, ktoré sa nachádzajú v tréningovej sade, musia byť preto striktné oddelené od kmeňov vo validačnej sade.

Návrh samotnej neurónovej siete môže byť s miernymi modifikáciami prevzatý z preverených vzorov v oblastiach riešiacich štrukturálne analogické problémy, ako je napríklad analýza medicínskych obrázkov. Jedna z možností je sieť U-net (Ronneberg et al. 2015), ktorej design je dostupný v prostredí MatLab, navyše s možnosťou zvoliť vstupné rozlíšenie. V takto získanom návrhu postačuje zmeniť parametre poslednej segmentačnej vrstvy a sieť dotréňovať. Na obr. 3 je demonštrovaný príklad postupu klasifikácie chýb dreva pomocou neurónových sietí.



Obrázok 3. Ukážka klasifikácie hniloby bukovej guľatiny na testovacej neurónovej sieti s nízkym rozlíšením a malou databázou. Vľavo: 3D CT sken bukového výrezu v priečnom reze s vnútornou hnilobou. V strede: Výsledok sémantickej poloautomatizovanej segmentácie skenu – vstup pre automatizovanú klasifikáciu. Vpravo: Výsledok klasifikácie metódou neurónovej siete

Figure 3. Demonstration of rots classification on a test neural network with low resolution and a small database. Left: Cross-section of a 3D CT scan of a beech log with internal rot. Middle: Result of semantic semi-automated segmentation on CT slice - input for classification. Right: Result of classification using neural networks

Poznamenávame, že siete ako U-net sú určené na klasifikáciu dvojrozmerných obrázkov. Navrhnutý postup a vytvorenú databázu však bude možné v budúcnosti použiť ako základ aj v procese tréningu oveľa komplikovanejších 3D-CNN sietí, ako je napríklad ONNX (Hofmanninger et al. 2020), ktoré berú do úvahy aj postupnosť rezov, napr. kontextuálne informácie o zmene pozície hrče na sekvencii skenov dokumentované na obr. 3.

Aktuálny rozsah databázy je daný počtom skenovanej guľatiny, 6 výrezov buka a 6 výrezov duba, a výberom každého 4 skenu pre sémantickú segmentáciu, t. j. cca 600 tréningových množín pre každú drevinu. V prípade prístupu zameranom len na detekcia znakov, je pre každý sken a hodnotený znak uvedená hodnota 0 alebo 1 v tabuľke Excel. Rozsah tréningovej množiny je cca 2 400 pre každú drevinu. Uvedené vyplýva z dĺžky guľatiny cca 4 m a pozdĺžneho 10 mm rozlíšenie skenovania. Ďalšie zvýšenie počtu tréningových množín bude závisieť od dosiahnutej správnosti klasifikácie chýb dreva metódou NS.

Pri tvorbe databázy boli využité časovo efektívne a zároveň dostatočne presné algoritmy poloautomatizovanej segmentácie s využitím modulu Image Labeler prostredie MATLAB. Ide o profesionálne prostredie, ktoré je však dostupné len na základe zakúpenej licencie. Vybrané bolo vzhľadom na zámer ďalšieho spracovania databázy a následnej automatizovanej klasifikácie chýb dreva v tomto prostredí. Overené, ale v príspevku nepublikované, boli aj voľne dostupné softvérové aplikácie pre odlišenie pozadia skenu, napr. Clipdrop, GiMP, RemoveBG. Nevýhodou je, že nástroje nie sú naprogramované pre sémantickú segmentáciu viacerých kategórií. Špecifickým testovaným nástrojom pre poloautomatizovanú a automatizovanú segmentáciu bol softvér NaturaSat vyvinutý pre segmentáciu satelitných snímok (Mikula et al. 2021). Výsledky boli porovnateľné s výstupmi s Image Labeler, avšak softvér ponúka širšiu paletu algoritmov a nastaviteľných parametrov pre nájdenie optimálneho postupu segmentácie. Problémom uvedenej softvérovej aplikácie je nutnosť importu a exportu a súvisiaca časová náročnosť, predspracovanie vstupov a post spracovania výstupov do softvérov pre klasifikáciu skenov.

Záver

Implementácia nových technológií akou je 3D CT skenovania dreva je príkladom digitalizácie lesnícko-drevárskeho sektora, ktorá vedie k zvýšeniu jeho konkurencieschopnosti a zabezpečeniu jeho ekonomickej a sociálnej udržateľnosti. V príspevku prezentujeme progres v tvorbe tréningovej a validačnej databázy pre potreby automatizovanej klasifikácie chýb dreva listnatej guľatiny so zameraním na dreviny dub a buk. Vytvorený bol základný interpretačný návod hlavných defektov dreva ovplyvňujúcich cenu guľatiny: zdravé a nezdravé hrče, hniloba, trhliny a dutiny. Pri poloautomatizovanej segmentácii chýb dreva bolo využité prostredie MATLAB vzhľadom na zámer ďalšieho spracovania databázy a následnej automatizovanej klasifikácie chýb dreva v tomto prostredí technikami neurónových sietí.

PodĎakovanie

Táto práca bola podporená Agentúrou na výskum a vývoj v rámci projektu APVV-20-118 „Detekcia 3D CT a optimalizácia výťažnosti bukovej guľatiny“ a Ministerstvom pôdohospodárstva a rozvoja vidieka SR v rámci projektu výskumného zámeru NLC na roky 2022 – 2026 „Digitálne technológie pri zvyšovaní pridanej hodnoty v sortimentácii, druhovaní a spracovaní dreva“.

Literatúra

- Freyburger, C., Longuetaud, F., Mothe, F., Constant, T., Leban, J-N., 2009: Measuring wood density by means of X-ray computer tomography. *Annals of Forest Science*, 66:804.
- Hofmanninger, J., Prayer, F., Pan, J., Röhrich, S., Prosch, H., Langs, G., 2020: Automatic Lung Segmentation in Routine Imaging Is Primarily a Data Diversity Problem, Not a Methodology Problem. *European Radiology Experimental*, 4:50.
- Kovalčík, M., 2018: Význam lesnícko-drevárskeho sektora. Štúdia. Zvolen, Národné lesnícke centrum, 21 s. Dostupné na <https://www.mpsr.sk/vyznam-lesnicko-drevarskeho-sektora-studia-narodneho-lesnicko-ehocentra-vo-zvolene/913-37-913-14117/>
- Mikula, K., Šibíková, M., Ambroz, M., Kollár, M., Ožvat, A. A., Urbán, J., Jarolímek, I., Šibík, J., 2021: NaturaSat – A Software Tool for Identification, Monitoring and Evaluation of Habitats by Remote Sensing Techniques. *Remote Sensing*, 13:3381.
- Račko, V., Čunderlík, I., 2010: Zrelé drevo ako limitujúci faktor vzniku nepravého jadra buka (*Fagus sylvatica* L.). *Acta Facultatis Xylologiae Zvolen*, 52:15–24.
- Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T., 2015: U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, 9351:234–241.
- Vacek, O., 2023: Možnosti využitia umelej inteligencie pri vyhodnocovaní 3D CT skenov drevnej suroviny. In: Bucha, T., Gergel, T., Gracovský, R. (eds.): Zborník odborných referátov z konferencie – LignoSilva 2023. Zvolen, Národné lesnícke centrum, s. 81–86.
- STN EN 1316-1 9 Listnatá guľatina. Kvalitatívne triedenie. Časť 1: Dub a buk. 2000.
- Internetové zdroje*
- Foresta SG: KRPK. Dostupné na <https://www.foresta.cz/produkty-a-sluzby/lesni-hospodarstvi/aplikace-krpk/>. Získané 28.8.2023.
- Foresta SK: WebLES 3 – Komplexný lesnícky informačný systém. Dostupné na <https://foresta.sk/webles-3/>. Získané 28.8.2023.
- MiROTEC: CT Log. Dostupné na <https://www.microtec.eu/en/products/ct-log>. Získané 30.8.2023.

Osobná komunikácia

Sámel, J., LESY SR, štátny podnik, Nám. SNP 8, 975 66 Banská Bystrica. *Implementácia PSDS v Lesoch SR*, š. p. Osobná komunikácia, 2. december 2022.

ADRESA

Dr. Ing. Tomáš Bucha, Ing. Radovan Gracovský, PhD., RNDr. Ondrej Vacek, PhD.,
Ing. Tomáš Gergeľ, PhD..
Národné lesnícke centrum – Lesnícky výskumný ústav Zvolen
T. G. Masaryka 2175/22
SK–960 01 Zvolen
e-mail: tomas.bucha@nlcsk.org