

RIZIKÁ PRI SPRACOVANÍ A VYUŽÍVANÍ BIOMASY

Recenzovaný zborník
pôvodných vedeckých
prác



Technická univerzita vo Zvolene
Lesnícka fakulta,

Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií
Drevársky kongres Zvolen, člen Zväzu slovenský
vedeckotechnických spoločností



2025

Technická univerzita vo Zvolene
Lesnícka fakulta
Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií

Drevársky kongres Zvolen, člen Zväzu slovenských vedeckotechnických spoločností

Riziká pri spracovaní a využívaní biomasy
Recenzovaný zborník pôvodných vedeckých prác

Vedecký výbor konferencie:

doc. Ing. Miloš Gejdoš, PhD. – Slovakia
doc. Ing. Martin Lieskovský, PhD. – Slovakia
Ing. Tomáš Gergel', PhD. – Slovakia
prof. Ing. Miloš Hitka, PhD. – Slovakia
doc. Ing. Martin Jankovský, PhD. – Czechia
doc. Ing. Rudolf Kampf, Ph.D., MBA – Czechia
prof. Dr. Petar Antov – Bulgaria
doc. Ing. Stanimir Stoilov, PhD. - Bulgaria
prof. Dr. Hab. Ing. Maciej Sydor – Poland

Organizačný výbor konferencie:

Ing. Daniel Tomčík, PhD.
Ing. Mária Vlčková, PhD.
Ing. Katarína Michajlová, PhD.
Ing. Dominik Gretsche, PhD.
Ing. Blanka Giertliová, PhD.

Zodpovedný redaktor a zostavovateľ:

doc. Ing. Miloš Gejdoš, PhD.

Vedeckí recenzenti:

Všetky práce v zborníku boli recenzované štyrmi nezávislými odborníkmi

Redakčné a zostavovateľské práce:

doc. Ing. Miloš Gejdoš, PhD.
Ing. Mária Vlčková, PhD.

Príspevky neprešli jazykovou a redakčnou úpravou. Za obsah a úroveň jednotlivých príspevkov zodpovedajú ich autori.

Vydanie zborníka bolo podporené Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe zmluvy č. APVV-21-0032; APVV-20-0118; APVV-22-0001 a Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou Ministerstva školstva, výskumu, vývoja a mládeže Slovenskej republiky projektom č. KEGA 004TUZ-4/2023.

Dostupné online

Počet strán: 135

ISBN: 978-80-228-3497-1

PREDSLOV

Medzinárodná vedecká konferencia je organizovaná TU vo Zvolene ako pokračovanie konferencie „Biomasa a riziká pri jej spracovaní“, ktorá sa uskutočnila v roku 2012.

Medzi hlavné ciele konferencie možno zaradiť najmä zhodnotenie možnosti pestovania drevín na mechanické, chemické a energetické využitie, analyzovať zdroje drevnej biomasy a možnosti jej spracovania na energetické účely. Poskytnúť tiež dôležité informácie pre legislatívny rámec a ekonomickú efektívnosť variantov produkcie biomasy, od zakladania energetických plantáží a intenzívnych porastov, ich obhospodarovania až po následné spracovanie na rôzne účely.

V rámci hodnotenia technológií chceme poukázať na potenciálne riziká ohrozujúce človeka a environment pri výrobe a spracovaní biomasy na energetické účely a jej následnom skladovaní. Nové metódy precízneho lesníctva v oblasti kvantitatívneho a kvalitatívneho hodnotenia biomasy.

Cieľom konferencie je zároveň prezentovať aj výsledky riešenia projektu APVV 22-0001 Optimalizácia hlavných zdravotných a bezpečnostných rizík pri využívaní lesnej biomasy na energetické účely.

Zvolen, September 2025

doc. Ing. Miloš Gejdoš, PhD.
doc. Ing. Martin Lieskovský, PhD.
Odborní garanti konferencie

OBSAH

PROBLEMATIKA HLUKU PŘI DOBÝVÁNÍ PAŘEZŮ PRO ENERGETICKÉ ÚČELY

Luboš Staněk, Petr Rokoský..... 7

PREHĽAD ZDRAVOTNÝCH A BEZPEČNOSTNÝCH RIZÍK V PROCESE VÝROBY A SKLADOVANIA LESNEJ BIOMASY

Miloš Gejdoš, Martin Lieskovský, Katarína Michajlová, Vladimír Juško..... 14

STRES V PRÁCI MANAŽÉROV ŠTÁTNYCH LESNÍCKYCH PODNIKOV

Miloš Hitka, Maciej Sydor..... 27

KVANTIFIKÁCIA ZDRAVOTNÝCH A EKONOMICKÝCH RIZÍK V PROCESE SKLADOVANIA BIOMASY PRE TEPLÁRENSKÉ ÚČELY

Miloš Gejdoš, Marek Potkány, Katarína Marcineková..... 31

LESNÉ ŠTIEPKY AKO ENERGONOSIČ

Tomáš Gergeľ, Marián Slamka..... 39

TESTOVANIE VÝKONNOSTI AKUMULÁTOROVÝCH PRENOSNÝCH REŤAZOVÝCH PÍL PRI ZBERE BIOMASY

Dominik Gretsche..... 49

HODNOTENIE PRACOVNEJ A ENVIRONMENTÁLNEJ EXPOZÍCIE PRACHOVÝM ČASTICIAM PM10 A PM2.5 PRI SKLADOVANÍ A MANIPULÁCI S BIOMASOU V MESTSKEJ TEPLÁRNI

Daniel Tomčík, Miloš Gejdoš..... 57

LESNÉ PORASTY NA NELESNÝCH POZEMKOCH (BIELE PLOCHY) A MOŽNOSTI ICH OCEŇOVANIA

Ján Merganič, Katarína Merganičová..... 70

HODNOTENIE A METÓDY ODHADU SUCHEJ A ČERSTVEJ HMOTNOSTI DENDROMASY NA PLANTÁŽACH RÝCHLORASTÚCICH DREVÍN

Skladán Michal, Lieskovský Martin, Juliana Chudá, Jozef Vyboštok 78

ZISŤOVANIE POŠKODENIA PRIBLIŽOVACÍCH LINIEK PRI SÚSTREĐOVANÍ DREVA S VYUŽITÍM BLÍZKEJ FOTOGRAMETRIE A LIDARU

Michal Ferenčík, Sebastián Motýľ..... 89

VYUŽITIE NÍZKONÁKLADOVÉHO RUČNÉHO MOBILNÉHO SKENERA V LESNOM HOSPODÁRSTVE

Jozef Vyboštok, Juliána Chudá..... 97

VÝVOJ PODIELU SORTIMENTOV SUROVÉHO DREVA NA SLOVENSKU

Ján Merganič, Miloš Gejdoš, Katarína Merganičová 105

**NEEVIDOVANÝ OBJEM DREVA PRI ŤAŽBE SORTIMENTOVOU ŤAŽBOVOU
METÓDOU**

*Martin Jankovský, Jiří Dvořák, Radim Löwe, Pavel Natov, Monika Löwe,
Michal Allman, Ondřej Nuhlíček, Jan Macků, Martin Duchan..... 111*

**VYUŽITIE DIAEKOVO PILOTOVANÝCH LETECKÝCH SYSTÉMOV PRI
MAPOVANÍ PLÔCH PO VYKONANÍ OBNOVNEJ ŤAŽBY V LESNÝCH
PORASTOCH**

Daniel Čurila, Miroslav Kardoš..... 117

**LIMITY VYUŽITIA KONOPY SIATEJ (CANNABIS SATIVA, L.) PRI PRÍPRAVE
DEGRADOVANÝCH PÔD NA ZALESNENIE**

Blanka Giertliová..... 126

PROBLEMATIKA HLUKU PŘI DOBÝVÁNÍ PAŘEZŮ PRO ENERGETICKÉ ÚČELY

LUBOŠ STANĚK, PETR ROKOSKÝ

The paper addresses the question of how much noise is produced by a new prototype of a stump extraction head, which is used for harvesting stumps for energy purposes. The noise level was measured using a certified sound level meter appropriate for this type of measurement, at distances of 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10, and 15 meters from the noise source (an excavator equipped with the stump extraction head mounted on its boom), and from all sides of the excavator (front, rear, left, and right). The measurements were carried out in accordance with the applicable standards EN ISO 22868 and EN ISO 9612. Among the findings, it was revealed that in almost all cases, the distance from the noise source was the decisive factor. That is, the closer the measurement was taken to the noise source, the higher the recorded noise level.

Klíčová slova: biomasa, hladina hluku, klučící hlavice, měření hluku

Key words: biomass, noise level, noise measurement, stump extraction head

1. ÚVOD

Lesní těžba vytváří uprostřed zapojených porostů četné paseky (Hunter et al. 1999). Na takovýchto pasekách zůstává v lesích spousta tzv. těžebního odpadu, který by mohlo sloužit k energetickým účelům. Po mýtní těžbě zůstává v lese bez přímého užitku 35 až 40 % vyprodukované dendromasy ve formě kůry, pařezů, kořenů, větví, vršku stromů a asimilačních orgánů v podobě těžebního odpadu (Simanov 2008).

Právě pařezy poskytují jeden ze zdrojů lesní biomasy (Laitila et al. 2019) a jsou společně s kořeny získávány klučením v podobě podzemních částí stromů (Neruda et al. 2015). Klučení však donedávna bývalo v České republice obvyklé jen při některých formách obhospodařování lesů, případně v případě odlesňování. Nejobvyklejším způsobem dobývání pařezů v ČR je jejich klučení radlicí buldozeru. Pařezy jsou po vykloučení většinou shrnovány buldozery do valů nebo terénních prohlubní, ve kterých jsou ponechávány přirozenému rozpadu (Neruda et al. 2015). Nevýhodou této metody je nevyužití dřevní hmoty pro další využití.

Přestože v České republice je v současnosti dobývání pařezů pro energetické účely takřka nevyužívaným procesem, který by mohl také snížit náklady na následnou přípravu paseky pro opětovnou obnovu lesního porostu (Eriksson and Gustavsson 2008). Např. ve Finsku je klučení pařezů a kořenů běžné (Kataja-aho et al. 2011) a postupně se od roku 2000 zvyšuje. Pařezy a kořeny jsou při této těžbě vyvráceny z půdy, rozstříhnuty a poté třepány, aby převážně z kořenového systému odpadala zemina a další nežádoucí materiál. Poté jsou uloženy na hromady vedle vývozní linky. Zde jsou vlivem slunce a deště sušeny a čištěny (Laitila et al. 2008). Vyvážecí traktory pak následně přepraví pařezy na uložistiště pařezů, kde jsou uloženy v řadách několik měsíců. Z tohoto místa jsou přepraveny ke koncovým uživatelům v podobě celých pařezů nebo jako štěpka, která vznikne po desintegraci takto uložených pařezů (Asikainen 2010).

Při takovémto zpracování pařezů nastává ovšem několik rizik, mezi které patří mj. vystavení pracovníků vysoké hladině hluku. Právě vystavení hluku je primární příčinou ztráty sluchu (Dobie 2008). Vysoká hladina hluku může negativně ovlivnit sluchovou schopnost pracovníka i při krátké expozici, která způsobí dočasnou nebo trvalou ztrátu citlivosti (Neitzel and Yost 2002). Dalšími negativními faktory způsobenými trvalou expozicí hluku, jsou: závratě, úzkost, podrážděnost, nervozita, zvýšení krevního tlaku, zvýšená frekvence a hloubka dýchání, zrychlení pulzu, svalové křeče, nespavost, snížené libido, stažení cév krví a obtížný tělesný klid (Ganime et al. 2010; Nunes et al. 2011).

Tento příspěvek pojednává o novém prototypu klučící hlavice, který poslouží k získávání této dřevní hmoty a o rizicích hluku, který vzniká při práci této klučící hlavice.

2. METODIKA

V rámci výzkumu bylo provedeno měření hladiny hluku, který je produkován během dobývání pařezů novým prototypem klučící hlavice, která byla aplikována jako adaptér na výložníku pásového bagru JCB JS 220 LC.

Proces dobývání probíhal následovně. Hlavice byla držena na výložníku bagru v jeho upínači, kde docházelo za pomoci dálkového ovládání mezi tělem hlavice a štípacím ramenem ke vzájemnému zapadání těchto dvou komponentů. Tímto procesem byl pařez rozštípnut a po částech vytažen ze země do výšky přibližně jednoho metru. Při následné poloze hlavice nad zemí byly od sebe základna hlavice a štípací rameno postupně vertikálně roztahovány a svírány, čímž docházelo k uvolnění zeminy a kamenů, které se nacházely na rozstřiženém pařezu, případně mezi kořenovým systémem. S pařezem, případně jeho částmi, po rovněž po vytržení z podloží pohybováno tak dlouho, dokud se zemina, skelet, drny a ostatní nežádoucí materiály neoddělil od vytrženého pařezu. Zemina dopadala do prostoru po vytrženém pařezu a za pomoci spodní části těla hlavice byla plocha následně upravena, zarovnána a zhutněna. Následně za pomoci hydraulického výložníku bagru byly pařezy, případně jeho části, ukládány na hromady v dosahu výložníku použitého bagru.

2.1. Lokalita výzkumu

Výzkum probíhal 10. a 11. listopadu 2020 na území České republiky v Jihočeském kraji, okres Prachatice (LČR: LZ Boubín, Polesí Netolice). Půda na této lokalitě byla čerstvě vlhká, hlinitá. Půdní typ kambizem. Na výzkumné ploše byl reliéf terénu svažité. Zastoupení dřeviny na této lokalitě byl výhradně smrk ztepilý (*Picea abies*) a bylo hodnoceno celkem 157 ks pařezů v rozsahu s nejmenším průměrem pařezu 15 cm a největším průměrem pařezu 77 cm. Pro účely měření hladiny hluku při dobývání pařezů klučící hlavicí, byly klučeny pařezy o průměrech v rozmezí 31–51 cm.

2.2. Měření hladiny hluku

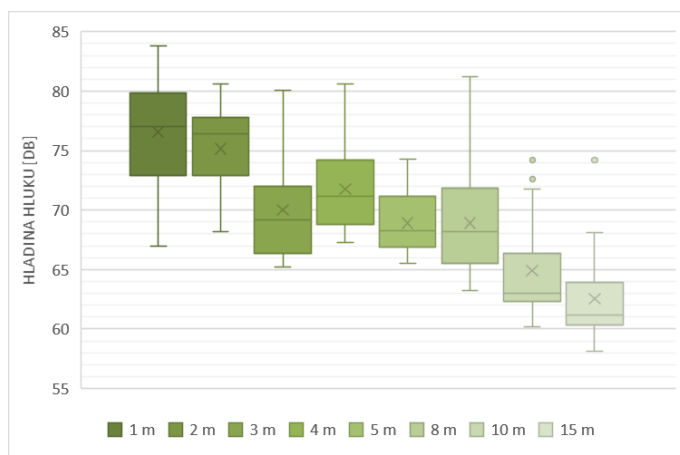
Měření hluku bylo provedeno zejména v souladu s normami EN ISO 22868 a EN ISO 9612 (EN ISO 22868; EN ISO 9612). Pro zaznamenávání hodnot akustického hluku byl využit přístroj CEM DT-8852, který je certifikovaný pro daná měření. Tento hlukoměr měří v rozmezí 30–130 dB s přesností ± 1.4 dB. Interval je zápisu 125 milisekund až 1 sekundy. Disponuje vnitřní integrovanou pamětí pro zápis až do 32 700 naměřených hodnot (CEM 2018). Po zaznamenání dat došlo následně k jejich exportování do PC, kde byla v programu Sound Level Meter zpracována.

Během měření byl mikrofon umístěn ve stojanu ve výšce $1,55 \text{ m} \pm 0,075 \text{ m}$ nad zemí (EN ISO 9612) v přímé vzdálenosti 1, 2, 3, 4, 5, 8, 10 a 15 metrů od bagru s adaptérem klučící hlavice. Měření probíhalo ze čtyř stran, tzn. přední, zadní, levá a pravá strana bagru (Obr. 1), a to ve směru od klučící hlavice. Dále proběhlo měření hladiny hluku v době, kdy motor bagru běžel na tzn. volnoběh. Mezi bagrem s klučící hlavicí a mikrofonem pro zaznamenávání hodnot nebyla v době měření žádná překážka.

3. VÝSLEDKY

Obr. 2 znázorňuje výsledky hodnot hluku produkujících bagrem s adaptérem klučící hlavice z přední strany bagru. Z těchto výsledků je patrné, že nejvyšší hladina hluku byla naměřena ve vzdálenosti 1 m od stroje. Průměrná hodnota hladiny hluku v této vzdálenosti představovala 76, 58 dB. Při srovnání s hodnotou hladiny hluku na tzv. volnoběh (Tab. 1), byla

tato hodnota o 12,18 dB vyšší. Naopak nejnižší hodnota hluku byla zaznamenána ve vzdálenosti 15 m od bagru. Konkrétně se jednalo o hodnotu hladiny hluku 58,1 dB. Z výsledků také vyplývá sestupná tendence průměrných hodnot v jednotlivých vzdálenostech od zdroje hluku. Výjimkou jsou pouze průměrné hodnoty ve vzdálenosti 3 m a 8 m od bagru.

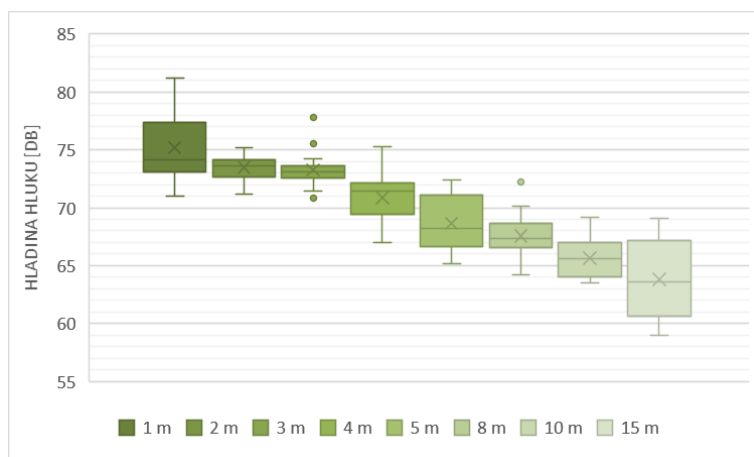


Obr. 2 Hladiny hluku bagru s klučící hlavicí při klučení pařezů – přední strana

Tab.1 Průměrné hladiny hluku bagru s klučící hlavicí při klučení pařezů v chodu na tzv. volnoběh – přední strana

Vzdálenost [m]	1	2	3	4	5	8	10	15
Volnoběh [dB] – průměrná hodnota	64.4	63.15	60.3	59.15	57.45	54.05	53.1	50.1

Z Obr. 3 lze vyčíst hladiny hluku bagru s klučící hlavicí při klučení pařezů, které byly zaznamenány ze zadní strany bagru. Je zde vidět sestupná tendence průměrných hodnot, a to v pořadí od nejvyšší po nejnižší v závislosti na vzdálenosti od zdroje hluku. Přičemž nejvyšší průměrná hodnota je v nejbližší vzdálenosti k bagru. Maximální zaznamenaná hodnota na zadní straně bagru byla ve vzdálenosti 1 m od zdroje hluku a činila 81,2 dB. Jedná se o hodnotu, která je o 13,75 dB vyšší (Tab. 2), než je hladina hluku bagru ve volnoběhu v této vzdálenosti. Naopak nejnižší zaznamenaná hodnota hladiny hluku v této části byla ve vzdálenosti 15 m od bagru a představovala hodnotu 59,2 dB., která je o 3,45 dB nižší než průměrná hodnota hluku zjištěná ve vzdálenosti 15 m od stroje.

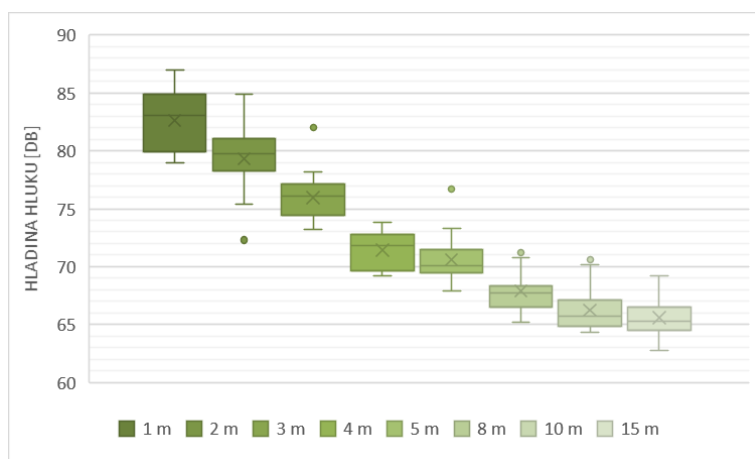


Obr. 3 Hladiny hluku bagru s klučící hlavicí při klučení pařezů – zadní strana

Tab. 2 Průměrné hladiny hluku bagru s klučící hlavicí při klučení pařezů v chodu na tzv. volnoběh – zadní strana

Vzdálenost [m]	1	2	3	4	5	8	10	15
Volnoběh [dB] – průměrná hodnota	67.45	65.95	64.15	62.45	61.4	59.6	57.55	55.75

Nejvyšší hodnota hladiny hluku naměřené z levé strany bagru klučící pařezy byla zaznamenána ve vzdálenosti 1 m od bagru a činila 86,5 dB (Obr. 4). Nejnižší hodnota zaznamenaná z této strany bagru byla ve vzdálenosti 15 m od zdroje hluku. Bylo to hodnota 62,8 dB. I v této vzdálenosti byly zaznamenány průměrné hodnoty hladiny hluku ve volnoběhu stroje (Tab. 3). Při pohledu na Tab. 3 si lze všimnout sestupné tendence průměrných hodnot hladin hluku na volnoběh, a to od nejvyšší, která je u vzdálenosti 1 m od zdroje hluku, až po nejnižší, která byla zaznamenána ve vzdálenosti 15 m a činila hodnotu 59,1 dB. Tato hodnota je o 6,51 dB nižší, než průměrná zaznamenaná hodnota hladiny hluku v této vzdálenosti.

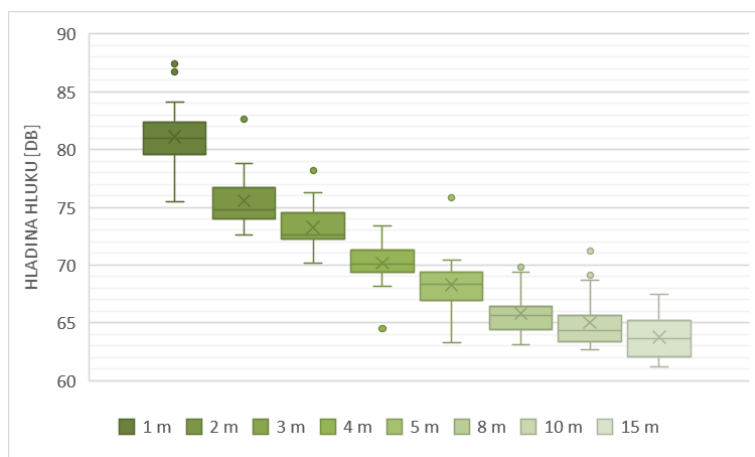


Obr. 4 Hladiny hluku bagru s klučící hlavicí při klučení pařezů – levá strana

Tab. 3 Průměrné hladiny hluku bagru s klučící hlavicí při klučení pařezů v chodu na tzv. volnoběh – levá strana

Vzdálenost [m]	1	2	3	4	5	8	10	15
Volnoběh [dB] – průměrná hodnota	77.2	74.85	71	68.25	65.7	62.95	61.65	59.1

Na Obr. 5 pozorujeme naměřené hladiny hluku způsobené bagrem s klučící hlavicí při klučení bagru, které byly naměřeny z pravé strany bagru. Nejvyšší průměrná hodnota hluku byla naměřena ve vzdálenosti 1 m od zdroje hluku. Lze z Obr. 5 rovněž vyčíst, že jakmile se vzdálenost od bagru vzdalovala, klesala i naměřená průměrná hodnota hluku, přičemž nejnižší průměrná hodnota hluku byla zaznamenána ve vzdálenosti 15 m od bagru. Stejný klesající trend průměrných hodnot hladin hluku má i bagr, který pracoval na volnoběh (Tab. 4).



Obr. 5 Hladiny hluku bagru s klučicí hlavicí při klučení pařezů – pravá strana

Tab. 4 Průměrné hladiny hluku bagru s klučicí hlavicí při klučení pařezů v chodu na tzv. volnoběh – pravá strana

Vzdálenost [m]	1	2	3	4	5	8	10	15
Volnoběh [dB] – průměrná hodnota	69.8	66.55	63.45	61.65	60.55	57.45	55.4	53.2

4. DISKUSE A ZÁVĚR

Pro energetické účely můžeme z lesního hospodářství získat dendromasu ve formě palivového dřeva z lesní těžby, případně jako tzv. těžební odpad, který zůstane v lese po těžbě ve formě větví, odřezků, pařezů či kořenů. Právě pro dobývání pařezů byl v této studii použit nový prototyp klučicí hlavice, jakožto adaptér k pásovému bagru JCB 220X LC.

Jak již bylo zmíněno, v České republice se zpracování pařezů pro energetické účely příliš nevyužívá. Což by se mohlo do budoucna změnit. Důvodem je fakt, že pařezy a jejich silné kořeny se stávají důležitými právě jako zdroj bioenergie kvůli rostoucím obavám o změnu klimatu. Např. ve Švédsku se odhaduje, že těžba pařezů by mohla nahradit 2,5–5% energie, která se v současné době získává z fosilních paliv (Victorsson and Jonsell 2016). Podobného názoru je i Björheden (2006), který tvrdí, že využívání bioenergie pomocí těžebního odpadu, který zůstane na pasece po těžbě stromů, roste kvůli obavám o změnu klimatu a zároveň rostoucí poptávce po bioenergii.

Autoři Fredriksson (2004) and Kärhä (2007) dodávají, že při dobývání větších pařezů je vyžadováno použít těžší stroj s větší stabilitou a silou (stejný názor zastáváme i my na základě dřívějších výzkumů). Zároveň udávají příklad z Finska, kde se pro dobývání pařezů nejčastěji používají stroje o hmotnosti 21 tun. Výhodou velkých bagrů je rovněž i fakt, že mají větší dosah výložníku, což zvyšuje jejich produktivitu, jelikož jsou schopny zpracovávat z jednoho místa více pařezů, a to bez nutnosti pojezdu. Avšak nutno podotknout, že využití bagrů s větším výkonem představuje riziko v produkci vyššího hluku tohoto stroje.

Což naznačuje i zjištění tohoto výzkumu. Bylo zjištěno, že téměř ve všech případech byla rozhodujícím faktorem vzdálenost od zdroje hluku. To znamená, že čím blíže bylo měření provedeno ke zdroji hluku, tím vyšší byla zaznamenaná hladina hluku.

Problematika hluku představuje zdravotní rizika, která se mohou projevit v řádu několika let, nejen pro pracovníky s hlučnými stroji, ale i pro osoby, které se vyskytují v blízkosti takto hlučných strojů.

5. ZDROJE LITERATURY

- ASIKAINEN, A. Simulation of stump crushing and truck transport of chips. *Scand. J. For. Res.* 2010, 25(3):245–250.
- BJÖRHEDEN, R. Drivers behind the development of forest energy in Sweden. *Biomass and Bioenergy*. 2006, 30(4):289-295.
- CEM hlukoměr 2022. Available online: <https://www.cem-instruments.com/en/product-id-934> (accessed on 12 června 2025).
- DOBIE, R.A. The burdens of age-related and occupational noise-induced hearing loss in the United States. *Ear and Hearing*. 2008, 29:565–577.
- EN ISO 9612:2009 Acoustics — Determination of occupational noise exposure — Engineering method.
- EN ISO 22868:2011 Forestry and gardening machinery-Noise test code for portable hand-held machines with internal combustion engine–Engineering method.
- ERIKSSON, L.N, GUSTAVSSON, L. Biofuels from stumps and small roundwood - Costs and CO2 benefits. *Biomass and Bioenergy*. 2008, 32, 897-902.
- FREDRIKSSON, T. Harvesting of stump and root wood is increasing. *Bioenergia*. 2004, 4:4–7.
- GANIME, J. F, SILVA, L. A, ROBAZZI, M. L. C. C., SAUZO, S. V., FALEIRO, S. A. Noise as one of the occupational risks: a literature review. *Enfermería Global*. 2010, 19:1–15.
- HUNTER, M.L. *Maintaining Biodiversity in Forest Ecosystems*, 1st ed.; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1999.
- KATAJA-AHO, S., FRITZE, H., HAIMI, J. Short-term responses of soil decomposer and plant communities to stump harvesting in boreal forests. *For Ecol Manage.* 2011, 262:379–388.
- KÄRHÄ, K. Metsähakkeen tuotantokalusto vuonna 2007 jatulevaisuudessa (Production machinery for forest chips in Finland in 2007 and in the future). *Metsätehon katsaus*. 2007, 28:4.
- LAITILA, J., POIKELA, A., OVASKAINEN, H., VÄÄTÄINEN, K. Novel extracting methods for conifer stumps. *Int. J. Forest. Eng.* 2019, 30:56–65.
- LAITILA, J., RANTA, T., ASIKAINEN, A.. Productivity of stump harvesting for fuel. *Int J Forest Eng.* 2008, 19(2):37–47.
- NEITZEL, R., YOST, M. Task-based assessment of occupational vibration and noise exposure in forestry workers. *AIHA Journal*. 2002, 63:617–627.
- NERUDA, J., SIMANOV, V., KLVAČ, R., SKOUPÝ, A., KADLEC, J., ZEMÁNEK, T., NEVRKLA, P. *Technika a Technologie v Lesnictví 2*. Mendelova Univerzita v Brně: Brno, Czech Republic, 2015.
- NUNES, C. P., ABREU, T. R. M., OLIVEIRA, V. C., ABREU, R. M. Hearing and non-hearing symptoms in workers exposed to noise. *RBSP*. 2011, 35:548–555.
- SIMANOV, V. *Výroba, Zpracování a Využití Biomasy*. SZIF: Přerov, Czech Republic, 2008; p. 33.

VICTORSSON, J., JONSELL, M. Overlooked subterranean saproxylic beetle diversity in clear-cut stumps and its implications for stump extraction, *Forest Ecology and Management*. 2016, 371:59-66.

Ing. Luboš Staněk, Ph.D.: Ústav techniky, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně. Zemědělská 3, 61300 Brno, Česká republika. Email: lubos.stanek@mendelu.cz

Ing. Petr Rokoský: Ústav techniky, Lesnická a dřevařská fakulta, Mendelova univerzita v Brně. Zemědělská 3, 61300 Brno, Česká republika. Email: petr.rokosky@mendelu.cz

PREHĽAD ZDRAVOTNÝCH A BEZPEČNOSTNÝCH RIZÍK V PROCESE VÝROBY A SKLADOVANIA LESNEJ BIOMASY

MILOŠ GEJDOŠ, MARTIN LIESKOVSKÝ, KATARÍNA MICHAJLOVÁ, VLADIMÍR JUŠKO

As the demand for both the quality and quantity of biomass increases—driven by its role as a cornerstone of the knowledge-based economy—greater attention is being paid to occupational safety and health protection. This paper aims to synthesize and present an overview of findings related to health and safety risks associated with forest biomass production across different stages, from cultivation and harvesting, through production and transport, to the safe storage of biomass prior to its use in primary energy generation. The review of identified risks reveals that most research focuses on the technological aspects of biomass storage and usage. Within this phase, a significant portion of studies addresses the health threats posed by spores from phytopathogenic organisms and fungi. Future research should prioritize the development of predictive models to better understand the formation and growth dynamics of these biological risk factors.

Kľúčové slová: lesná biomasa; zdravotné riziká; bezpečnostné riziká; skladovanie biomasy; fytopatogény
Key words: forest biomass; health risks; safety risks; biomass storage; phytopathogens

1. ÚVOD

Lesná biomasa dlhodobo patrí medzi perspektívne a obnoviteľné zdroje energie. Reálne sa využíva ako zdroj na výrobu tepla, elektriny, bioplynu a biopalív (Pan et al. 2013; Teixeira et al. 2018). Biomasa (vrátane biologicky rozložiteľnej časti odpadu) patrí v EÚ nesporne k najvýznamnejším obnoviteľným zdrojom energie. Tvorí 63,3 % celkovej produkcie energie z obnoviteľných zdrojov. Poľnohospodárstvo a lesné hospodárstvo je preto z hľadiska výroby energie z obnoviteľných zdrojov mimoriadne dôležité (Európsky dvor audítorov, 2018).

So stúpajúcimi nárokmi na kvalitu a množstvo vyprodukovanej biomasy sa ako hlavný prvok znalostnej ekonomiky dostáva do popredia človek a otázka bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci. S rozvojom technológií a automatizácie sa zlepšujú pracovné podmienky, ale zároveň zvyšujú nároky kladené na pracovníkov. Aj preto počet pracovných úrazov v lesnom hospodárstve a poľnohospodárstve zásadne neklesá (Potocnik, Poje, 2017).

Potenciálne zdroje pre výrobu biomasy a lesných štiepok z nej predstavujú najmä ťažbový odpad, účelovo pestované plantáže rýchlorastúcich drevín, resp. energetické porasty, tenká hmota z prerezávok a prebierok, resp. korunová časť vyťažených stromov, nevhodná pre výrobu kvalitnejších sortimentov surového dreva (Kozuch et al. 2023). Získavanie štiepok z drevín pestovaných na energetické účely, ale aj z ťažbového odpadu predstavuje zložitý technologický proces a vyžaduje si určité technické vybavenie. Práca je ovplyvňovaná rôznymi faktormi a prináša mnohé zdravotné a bezpečnostné riziká pre pracovníkov (Laitinen et al. 2016).

Cieľom práce je syntéza a prehľad výsledkov analýzy zdravotných a bezpečnostných rizík produkcie lesnej biomasy v rôznych výrobných fázach, počnúc jej pestovaním, cez ťažbovo-výrobný a dopravný proces, až po problematiku jej bezpečného skladovania do doby, pokiaľ nie je zužitkovaná na výrobu primárnej energie. Dôraz je kladený na práce zaoberajúce sa výskumom rizík pri dlhodobom skladovaní lesných štiepok v klimatických podmienkach strednej Európy, ktoré sa v dlhodobom kontexte môžu stať závažným problémom pre ľudské zdravie. Tento problém vyplýva najmä z dôvodu častého umiestňovania skladovaných hromád lesných štiepok priamo v intravilánoch obcí a miest, často v blízkosti ľudských obydľí. Ohrození sú tak nielen pracovníci, ktorí so štiepkami pracujú a manipulujú, ale aj ľudia žijúci v blízkosti skládok.

Syntézu poznatkov tejto práce bude možné využiť na prijatie účinných opatrení na zlepšenie súčasného stavu a minimalizácie vplyvu vybraných rizík pre život a zdravie ľudí.

2. PREHĽAD RIZÍK V PROCESE PRODUKCIE A SKLADOVANIA BIOMASY

Riziká ohrozujúce ľudské zdravie a bezpečnosť pri práci v procese produkcie a skladovania lesnej biomasy môžeme taktiež rozdeliť podľa jednotlivých výrobných fáz: Zakladanie a pestovanie plantáží rýchlorastúcich drevín a intenzívnych porastov; produkcia lesných štiepok z rôznych foriem lesnej biomasy; doprava biomasy; skladovanie lesnej biomasy na energetické účely (Gejdoš, Lieskovský, 2020).

Medzi všeobecné riziká, ktoré hrozia vždy a pri každej fáze produkcie biomasy na energetické účely patria riziká vzniku úrazov, chorôb z povolania, škôd na majetku a všeobecného ohrozenia. Všetky tieto riziká majú spoločného menovateľa, ktorým je ľudský faktor a prístup pracovníkov k realizácii jednotlivých pracovných činností. Všeobecne možno konštatovať, že paušálnym rizikom, ktoré pre ľudské zdravie hrozí v každej produkčnej fáze sú pracovné úrazy. Ľudský faktor je dôležitou premennou, ktorý zásadne ovplyvňuje kvalitu vykonanej práce a bezpečnosť pri nej. Pracovné úrazy sa však často vyskytujú aj v dôsledku nepredvídateľných okolností a preto ich výskyt nemožno úplne eliminovať. Najväčšie riziko vzniku pracovného úrazu sa priamo odvíja od konkrétnej fázy a pracovných činností v nej vykonávaných. Všeobecne je najvyššie riziko vzniku pracovného úrazu v lesnom hospodárstve pri ťažbovom procese. Analýzy a štatistiky výskytu pracovných úrazov v lesnom hospodárstve boli spracované vo viacerých prácach (Salminen 2004; Gejdoš et al. 2019). Tieto práce potvrdzujú, že takmer tretina všetkých pracovných úrazov v lesnom hospodárstve vzniká v procese ťažby dreva, pričom najrizikovejšími dňami v týždni sú pondelok a piatok. Najčastejšie poranenými časťami tela sú ruky a nohy. Druhou najrizikovejšou pracovnou operáciou je sústreďovanie dreva. Teda prvotné fázy produkcie dreva a biomasy na energetické účely sú z pohľadu vzniku pracovných úrazov najrizikovejšie. Štatistiky a analýzy pracovnej úrazovosti sú neustále dopĺňané a umožňujú tak formulovať a prijať účinné opatrenia na zlepšenie v tejto oblasti. Vo väčšine prípadov domácich aj zahraničných, malých a stredných podnikov v oblasti lesníctva, zamestnávateľia nevenujú dostatočnú pozornosť bezpečnosti a ochrane zdravia zamestnancov a nevykonávajú sa pravidelné zdravotné prehliadky osôb pracujúcich v nebezpečných pracovných podmienkach (Jankovský et al. 2019; Thelin, 2002).

Prevládajúcou príčinou väčšiny úrazov v ťažbe dreva je používanie nebezpečných postupov a nerešpektovanie stanovených zakázaných pracovných postupov. Väčšina závažných pracovných úrazov pri práci v lese bola spôsobená nedodržaním bezpečného pracovného alebo technologického postupu.

2.1. Riziká pri zakladaní, pestovaní a ochrane porastov rýchlorastúcich drevín

Pri zakladaní, pestovaní a ochrane kultúr rýchlorastúcich drevín možno okrem skupiny pracovných úrazov možno ako zdravotné riziká charakterizovať aj chemické škodlivé faktory a biologické škodlivé faktory. Chemické prostriedky sa pri pestovaní rýchlorastúcich drevín používajú pomerne často. Pesticídy a insekticídy sa používajú na ničenie škodcov a hmyzu. Herbicídy zase na boj proti burine (obrázok 1).



Obr. 1 Aplikácia pesticídov na plantáži rýchlorastúcich drevín

Používané herbicídy obsahujú fenoxý, glyfosát alebo triazíny. Pri dlhodobom využívaní plôch na plantáže rýchlorastúcich drevín, s opakovaným nasadením glyfosátov, sa prežívanie vysadených jedincov zlepšuje, avšak dochádza k postupnému poklesu produkcie. Všetky používané chemické prostriedky pre boj s burinou majú preukázateľne negatívny vplyv na ľudské zdravie. Herbicídy na báze glyfosátu majú výrazný negatívny vplyv na ľudské zdravie a preukázaný bol aj ich karcinogénny účinok, resp. boli zaradené na zoznam pravdepodobných ľudských karcinogénov Medzinárodnou agentúrou pre výskum rakoviny (Peillex, Pelletier, 2020; Dorlach, Gunasekara, 2023).

Toxicita glyfosátu na ľudské bunky bola potvrdená viacerými štúdiami, niektoré práce konštatujú, že nemožno jednoznačne potvrdiť bezpečnosť používania herbicídnych prípravkov na báze glyfosátov z hľadiska epidemiologických štúdií (Agostini et al. 2020). Potvrdil sa tiež škodlivý vplyv na oči u 70 % pracovníkov, ktorí používali herbicíd Roundup (Acquavella et al. 1999). Taktiež sa potvrdil priamy vplyv na výskyt rakoviny prostaty u pracovníkov, ktorí pravidelne pracovali s herbicídmi. Práca (Alavanja et al. 2003) skúmala na vzorke 55 332 mužov, ktorí používali 45 druhov pesticídov výskyt rakoviny prostaty, pričom identifikovali normalizovaný pomer výskytu rakoviny prostaty 1,14 (95 % interval spoľahlivosti 1,05; 1,24).

Rizikové sú prirodzene aj ďalšie chemické látky. Práca (Dayton et al. 2010) identifikovali, že 6 z 27 chemických látok v používaných pesticídoch mali vplyv na zvýšené riziko infarktu myokardu u žien. Konkrétne išlo o látky: hlorpyrifos, coumaphos, carbofurán, metalaxyl, pendimethalín a trifluralín.

Z uvedeného je zrejmé, že používanie pesticídov predstavuje široké spektrum zdravotných rizík pre ľudí. Okrem toho majú preukázateľne nepriaznivé dopady aj na environment, ekológiu a biodiverzitu v lesných a poľnohospodárskych ekosystémoch (napr. Grung et al. 2015; Meftaul et al. 2020).

Zatiaľ neplatí plošný zákaz používania týchto látok v Európskej únii a prístup sa ponecháva na legislatívu jednotlivých krajín. Väčšina krajín tieto látky bežne používa v boji proti burine.

K biologickým faktorom pri zakladaní plantáží patrí riziko uhryznutia kliešťom obyčajným (*Ixodes ricinus*), ktoré môže spôsobiť závažné ochorenie. Medzi najväčšie ochorenia, ktoré môže spôsobiť uhryznutie kliešťom patria Lymská borelióza a kliešťová encefalitída. Diagnóza boreliózy sa vždy stanovuje na základe klinického obrazu a mikrobiologickej diagnostiky. Kliešťová encefalitída je akútne horúčnaté ochorenie postihujúce centrálny nervový systém (zápal mozgových blán a zápal mozgu), pričom na toto ochorenie existujú očkovacie látky. Chorobnosť na toto ochorenie v Európe od roku 1974 vzrástla o viac ako 400 % (Süss, 2008). Vplyv na túto skutočnosť majú aj globálne zmeny klímy. Údaje ukazujú, že zimná aktivita kliešťov sa zvyšuje, zrýchľuje sa ich životný cyklus, nachádzajú sa vo vyšších a vyšších nadmorských výškach a nachádzajú sa čoraz viac v severnejších regiónoch Európy.

Z uvedeného vyplýva, že aj zdanlivo jednoduché pracovné činnosti v exteriéri môžu viesť k závažnému riziku ohrozenia ľudského zdravia a života. Pri zakladaní plantáží rýchlorastúcich drevín spravidla nedochádza k závažným pracovným úrazom. Zväčša ide len o drobné rezné poranenia horných a dolných končatín. Hlavné rizikové faktory sú teda ovplyvnené biológiou a výskytom kliešťov v danej lokalite. Taktiež používaním chemických prostriedkov pri zakladaní a údržbe plantáže (herbicídov a insekticídov). Pri ich aplikácii by mali byť dodržané všetky bezpečnostné opatrenia a pracovníci by mali byť náležite vybavení osobnými ochrannými pracovnými prostriedkami. Riziká pri zakladaní, pestovaní a ochrane porastov rýchlorastúcich drevín ako zdroja biomasy pre energetické využitie sú zhrnuté v tabuľke 1.

Tab. 1. Riziká pre ľudské zdravie pri zakladaní, pestovaní a ochrane porastov rýchlorastúcich drevín.

<i>Faktor</i>	<i>Riziko</i>
Herbicídy Glyfosáty, Chlorpyrifos, Aldicarb	Rakovinové ochorenia
Hlorpyrifos, Coumaphos, Carbofurán, Metalaxyl, Pendimethalín a trifuralin	infarkt myokardu, respiračné ochorenia, alergie
Heptachlor	Chronická bronchitída
Biologické faktory - Uhryznutie kliešťom	Lymeská borelióza Kliešťová encefalitída

2.2. Riziká pri výrobe biomasy na energetické účely a lesných štiepok

Proces výroby energetického dreva a lesných štiepok môžeme rozdeliť podľa výrobných lokalít a aj podľa zvoleného technologického postupu a technológií. Od toho sa odvíjajú aj potenciálne riziká v tomto technologickom procese. Okrem pracovných úrazov, ktoré sú paušálnym rizikom pri všetkých činnostiach, hrozia pri práci v teréne a v lesnom poraste taktiež aj popísané biologické riziká vyplývajúce z uhryznutia kliešťom. K ďalším faktorom v tejto fáze môžeme pripočítať mechanické rizikové faktory, stres v dôsledku chladu a tepla, expozícia drevným prachom a nečistotami, dlhodobé nadmerné jednostranné zaťaženie končatín a psychosociálne riziká.

K mechanickým rizikovým faktorom v tejto výrobných fáze radíme najmä hluk a vibrácie, ktoré pôsobia na operátorov obsluhujúcich stroje pre výrobu biomasy. Napriek legislatívnej povinnosti pracovníkov používať osobné ochranné pracovné prostriedky, často pracovníci tieto prostriedky nepoužívajú, alebo ich nemenia v predpísaných intervaloch. Aj preto neustále dochádza k vzniku chorôb z povolania. V dôsledku dlhodobého pôsobenia vibrácií dochádza k vazoneuróze, cievny problémom, chronickej bolesti a obmedzenej pohyblivosti končatín. Dlhodobé pôsobenie hluku je spojené najmä s čiastočnou alebo úplnou stratou sluchu, poruchami spánku, psychickými problémami, bolesťou hlavy. Profesionálna traumatická angiopatia (vibration white finger) alebo syndróm postihnutia ciev vzniká ako prvé signálne poškodenie organizmu vibrujúcimi nástrojmi (Voelter-Mahlknecht, 2008).

Pri viacoperačných strojoch na operátorov strojov pôsobia dva druhy vibrácií: vibrácie prenášané z volantu na ruky a vibrácie prenášané zo sedadla stroja na celé telo (Sherwin et al. 2004). Vo väčšine prác nebolo pri moderných strojoch zistené prekročenie povolených limitov stanovených legislatívou (Vlčková et al. 2017). Problematicky sa hodnotí toto dlhodobé (niekoľkoročné) pôsobenie takýchto vibrácií na človeka a vplyv na jeho zdravie.

Rottensteiner et al. (2013) klasifikovali, že vyššiu úroveň vibrácií produkujú sekačky, ktoré sú umiestnené priamo na konštrukcii nákladného auta v porovnaní so sekačkami, ktoré sú umiestnené väčšinou za traktorom na samostatnom prívese. Najvyššia úroveň celotelových vibrácií pritom bola zaznamenaná pri jazde po lesnej ceste k pripravenému materiálu na štiepkovanie a počas štiepkovania. Vyššia úroveň celotelových vibrácií bola zaznamenaná pri štiepkovaní listnatých tvrdých drevín ako pri ihličnatých drevinách. Hygienické úrovne vibrácií stanovené slovenskou legislatívou pri štiepkovaní boli pritom prekročené len druhým producentom štiepok (Jenz) v prípade štiepkovania sekačkou na konštrukcii nákladného auta a to tak pri štiepkovaní ihličnatých aj listnatých drevín (tabuľka 2).

Rozvrhnutie a vplyv zrýchlenia vibrácií na ruky závisí od rozvrhnutia ovládacích prvkov jednotlivých sekačiek, a tiež od pracovnej operácie, ktorá je práve vykonávaná. K zvýšeniu vibrácií môže dôjsť napr. pri zaseknutí materiálu v podávači, ale aj pri štiepkovaní

veľmi hrubých kusov, ktoré je potrebné hydromanipulátorom upravovať (Vlčková et al. 2017). K riziku zvýšených vibrácií pôsobiacich na ruky tak treba tiež pristupovať individuálne v závislosti od technologického procesu pri štiepkovaní (parametre stroja, štiepkovaný materiál a poveternostné podmienky).

Tab. 2. Zrýchlenie celotelových vibrácií producentom Jenz v m.s^{-2} (Zdroj: Rottensteiner et al. 2013)

Pracovná operácia	Dreviny	sekačka za traktorom				sekačka na nákladnom aute			
		Priemer	Sd	Min.	Max.	Priemer	Sd	Min.	Max.
Štiepkovanie (m.s^{-2})	Ihlič.	0,27	0,02	0,23	0,31	0,63	0,02	0,58	0,65
	List	0,31	0,03	0,27	0,35	0,70	0,04	0,65	0,78
Jazda (m.s^{-2})	Ihlič./List.	0,84	0,17	0,53	1,08	0,50	0,12	0,24	0,64
Prestoje (m.s^{-2})	Ihlič./List.	0,05	0,02	0,02	0,08	0,13	0,02	0,10	0,14

Tak ako pri vibráciách aj pri hluku patria medzi najohrozenejších pracovníci s profesiou pilar, pracovníci s fyzickým vekom 56-60 rokov a pracovníci s odpracovanou dobou 26-30 rokov. Poje et al. (2018) hodnotili hluk na bubnových sekačkách Pezzolato PTH 1200/820 a PTH 800/820, ktoré boli umiestnené na konštrukcii nákladného auta, resp. na samostatnom prívese za traktorom. Zistili, že vyšší hluk produkujú sekačky, ktoré sú umiestnené na samostatnom prívese. Zároveň sa potvrdilo, že pri sekačkách, ktoré majú uzavretú kabínu a obsluha je „izolovaná“ nedochádza k prekročeniu akčných a limitných hodnôt expozície hlukom. Zásadné rozdiely v akustickej hladine hluku neboli detegované v závislosti na tom či sa štiepkovali celé kmene stromov alebo len ťažbový odpad a hmota nahrubia. Väčšina moderných strojov s uzavretou kabínou už ponúka moderné ergonomické riešenia, ktoré výrazne obmedzujú negatívne pôsobenie hluku. Problém nastáva pri sekačkách, kde obsluha stojí alebo sedí mimo kabíny a obsluhuje sekačku priamo.

Ako sme už uviedli, škodlivé pôsobenie hluku je v pracovnom procese pomerne ťažké evidovať a hodnotiť bez presného a dlhodobého merania. Pracovníci v prevádzke si často škodlivé úrovne hluku neuvedomujú a ich negatívne účinky sa spravidla prejavujú až po niekoľkých rokoch, pričom často vykonávajú aj viacero pracovných činností na viacerých strojoch. Spätné hodnotenie, ktorý stroj, a v ktorom časovom období pracovnej kariéry mal najväčší podiel na vzniku choroby z povolania.

S vonkajšou prácou pri štiepkovaní sa spája aj riziko s vdychovaním drevného prachu obsluhou sekačky (obrázok 2). Za hygienickú technickú smernú hodnotu pre koncentráciu drevného prachu sa považuje úroveň $5,0 \text{ mg.m}^{-3}$ ovzdušia.



Obr. 2. Vírenie drevného prachu v procese štiepkovania dreva

Vplyv drevného prachu na ľudské zdravie závisí od mnohých faktorov – druhu dreva, jeho chemického zloženia a ďalších faktorov. Popri pôsobení prachu na dýchacie ústrojenstvo, pôsobí negatívne aj na sliznice očí, nosa, úst a hrtana (Bohadana et al. 2000). Výsledkom veľkého pôsobenia drobných čistočiek prachu na sliznice je ich vysušenie, na druhej strane u prachov, ktorých vlhkosť je vyššia, vznikajú podmienky pre kvasenie, vznik chemických reakcií čistočiek prachu s biologickými časticami, ktoré sú obsahom prachu a tvoria tiež nebezpečenstvo vzniku alergií v ľudskom organizme. Drewný prach môže ďalej spôsobovať (Očkajová et al. 2020):

- dermatózy – spôsobené mechanickým podráždením, chemickým podráždením, alergickým pôsobením niektorých zložiek dreva,
- respiračné problémy – ovplyvnené veľkosťou častíc a typom dreva (zápaly slizníc a dýchacích ciest),
- alergické respiračné problémy – alergie na zložky drevného prachu (astma, bronchitída), alergie na plesne a huby v dreve,
- karcinogénne pôsobenie niektorých druhov dreva.

Najväčšie nebezpečenstvo pre dýchacie orgány predstavuje respirabilná (alveo-lárna) zložka s veľkosťou častíc pod 10 μm , ktoré sa respiračnými cestami dostávajú až do pľúc (pľúcneho tkaniva) a pôsobia v ňom ako mechanické, resp. chemické dráždidlo. Väčšina doposiaľ publikovaných prác (Magagnotti et al. 2013) sa zaoberá týmto rizikom najmä z hľadiska koncentrácie drevného prachu v pracovnom prostredí, ale už primárne nerieši jeho zloženie, či ide naozaj o drewný prach, alebo je to prach tvorený aj s prímiesou nečistôt a spórov húb a plesní, ktoré sa bežne na štiepkovanom materiáli vyskytujú. Môžeme teda tvrdiť, že pri štiepkovaní sa netvorí čistý drewný prach, ale obsahuje prímiesu nečistôt.

Ďalším zdravotným ohrozením pracovníkov v procese výroby štiepok je ochorenie z dlhodobého, nadmerného a jednostranného zaťaženia končatín (DNJZ). Ochorenie vzniká v súvislosti s dlhodobou fyzickou námahou pracovníkov a postihuje najmä štruktúry pohybového systému končatín – kosti, kĺby, šľachy, svaly, nervy aj cievy.

V súvislosti s technizáciou prác a čoraz vyšším stupňom automatizácie a robotizácie, aj v lesnom hospodárstve, sa mení charakter práce a čoraz viac sa do popredia dostáva problém neuropsychickej záťaže.

Nadmernej neuropsychickej záťaži sú vystavení predovšetkým operátori viacoperačných strojov. Sú nútení vykonávať krátke pracovné cykly, vnímať a vyhodnocovať veľké množstvo informácií a robiť veľké množstvo rýchlych rozhodnutí. Jankovský et al. 2018 skúmali vplyv vonkajších faktorov na pulzovú frekvenciu operátorov harvestrov a forwardérov. Zistili, že fyzické parametre operátorov, typy strojov, parametre ovládačov, intenzita osvetlenia na pracovisku, ekvivalentný hluk a celotelové vibrácie vplývajú na zvýšenie pulzovej frekvencie približne u 72 % vzorky s nameranou zvýšenou pulzovou frekvenciou. Problematika hodnotenia psychosociálnych faktorov ovplyvňujúcich pracovníkov v lesníctve je veľmi náročná a vyžaduje účasť viacerých odborníkov. Pri súčasnej úrovni využívanej mechanizácie a technológií je však posudzovanie neuropsychickej záťaže nevyhnutnosťou. Je potrebné tento druh rizika implementovať do systémov hodnotenia pracovných rizík a na základe výsledkov navrhovať opatrenia na ich elimináciu, resp. úplné odstránenie. Druhým významným faktorom, ktorý môže vyvolávať stres a následné neuropsychické poruchy sú vzťahy na pracovisku. V práci z roku 2006 (Hyde et al. 2006) vykonali na vzorke viac ako 9 tisíc pracovníkov v lesníctve vo Švédsku a Fínsku výskum vzťahov medzi zvládaním konfliktov na pracovisku a opatreniami, ktoré sám o sebe zaznamená stres, zlé zdravie, vyčerpanie a absencia z dôvodu nadmerného zaťaženia alebo únavy. Najmenšia pravdepodobnosť vzniku a ohlásenia stresu bola detegovaná u pracovníkov, ktorí svoje konflikty riešili diskusiou. Naopak inklinovanie k stresu a následnému zhoršeniu zdravotného

stavu vykazovali pracovníci, ktorí konflikty neriešili vôbec, resp. boli vyriešené autoritatívnym spôsobom.

V tabuľke 3 je uvedený súhrn najväčších rizík, ktoré vznikajú v technologickej fáze výroby biomasy na energetické účely a lesných štiepok. Opätovne prevládajú riziká, ktoré môžu závažne poškodiť ľudské zdravie, najmä ak sú pracovníci vystavení expozičným faktorom dlhodobo (počas niekoľkých rokov). Viaceré riziká súvisia s technologickým procesom dezintegrácie drevnej suroviny (prach, hluk, vibrácie) a sčasti aj s nedostatkom kvalifikovanej pracovnej sily.

Tab. 3. Riziká pre ľudské zdravie pri výrobe biomasy na energetické účely a lesných štiepok.

Faktor	Riziko
Hluk, vibrácie	vazoneuróza Obmedzená pohyblivosť končatín, bolesť hlavy Poškodenie sluchu
Drevný prach	Alergie, dermatózy, dýchacie problémy, rakovina Výbuch, požiar
Dlhodobé jednostranné zaťaženie končatín	Pohybové problémy, carpal tunnel syndrome
Neuropsychická záťaž, zlá pracovná atmosféra	Nadmerné zaťaženie kardiovaskulárneho systému Vyčerpanie, syndróm vyhorenia, psychické problémy

2.3. Riziká v procese skladovania biomasy na energetické účely

S nárastom počtu prevádzok využívajúcich ako zdroj energie lesné štiepky sa čoraz častejšie vyskytujú otázky zdravotných a bezpečnostných rizík pri ich skladovaní. Ako najrizikovejšie faktory pre ľudské zdravie sú z tohto pohľadu hodnotené riziká spojené s aktivitou húb a plesní v hromadách štiepok (obrázok 3) a vdychovanie drevného prachu pri manipulácii so štiepkami (Gejdoš et al. 2015).



Obr. 3. Mycéliá a plodnice húb na skladovanej hromade štiepok

Okamžité využitie a spotreba vyrobených lesných štiepok často z rôznych príčin nie je možné. V teplárnach sú často inštalované technológie, ktoré sú náročné na kvalitu drevných štiepok. Títo producenti tepla požadujú čoraz častejšie kontinuálne dodávky drevných štiepok s vysokou kvalitou. Zameriavajú sa pritom hlavne na obsah vlhkosti a výhrevnosť paliva, ktoré limitujú aj jeho výslednú cenu. Tieto dve základné vlastnosti dokáže zásadne ovplyvniť najmä spôsob a dĺžka skladovania lesných štiepok.

Bolo zistené, že množstvo spór nachádzajúcich sa vo vzduchu klesne pri manipulácii so štiepkou pod hodnotu 1000 CFU.m⁻³ (Colony Forming Unit.m⁻³ – kolónie tvoriace jednotku (KTJ) na meter kubický) až vo vzdialenosti 300 metrov od hromady. Je preto možné považovať tento priestor za ohrozenú zónu, s potenciálnym zdravotným rizikom (Barontini et al. 2014).

Väčšina húb identifikovaných v procese skladovania na štiepkach predstavuje potenciálne nebezpečenstvo pre ľudské zdravie pri ich vdýchnutí človekom. K vdýchnutiu dochádza pomerne často pri manipulácii so štiepkami (nakladanie, vykladanie, dávkovanie do zásobníka a pod.). Huby rodov *Aspergillus sp.* a *Fusarium sp.* zapríčiňujú invazívne mykózy (infekcie), ktoré postihujú vnútorné orgány a orgánové systémy (Alshammari, 2023). Druhy *Aspergillus sp.* môžu zapríčiniť pľúcne ochorenie – aspergilózu formou pľúcneho aspergilómu, ktorá môže spôsobovať až vyše 20 % úmrtnosť. Huby rodov *Mucor sp.* a *Fusarium sp.* sú hrozbou najmä u osôb s oslabenou imunitou. Môžu spôsobiť rôzne infekcie (napr. „mucormycosis“) a sú považované za významné alergény. Produkcia nebezpečných mykotoxínov bola potvrdená aj u rodu *Penicillium sp.* Rovnako vyvolávajú alergické ochorenia u niektorých ľudí. Huby rodu *Trichoderma sp.* vyvolávajú infekcie u imunosupresívnych ľudí (Samuels et al. 2006).

Pri menších hromadách z drevín Buk lesný (*Fagus sylvatica*), Topoľ osikový (*Populus tremula*) a Smrek obyčajný (*Picea abies*) bolo v týchto hromadách identifikovaných 12 rodov, resp. druhov húb a plesní. Štatistické analýzy nepotvrdili významnú závislosť výskytu húb od dreveniny, alebo úrovne v hromade. Najzastúpenejšími druhmi húb a plesní v experimentálnych hromadách boli najmä *Mucor sp.*, *Penicillium sp.*, *Trichoderma sp.* a *Aspergillus fumigatus* (Suchomel et al. 2014).

Riziko to predstavuje aj v prípade, že sa skládka štiepok nachádza v intraviláne v blízkosti domov, alebo bytových domov, čo je v prípade teplární mestského typu úplne bežné. Keďže spóry húb a plesní sa v nebezpečných koncentráciách môžu šíriť až do vzdialenosti 300 m od hromady sú títo obyvatelia potenciálne ohrození týmto zdravotným rizikom bez toho, aby o tom vedeli a boli informovaní.

Počiatkové zahrievanie čerstvých štiepok je spôsobené predovšetkým dýchaním ešte živých parenchymatických buniek. Pri zahriatí štiepok nad 40 °C dochádza k zastaveniu respirácie buniek. Ďalšie zahrievanie hromady je preukázateľne spôsobené metabolizmom húb a baktérií. Huby prežívajú do teploty asi 60 °C, ale termofilné baktérie zvyšujú teplotu štiepok až na hodnotu väčšiu ako 75 až 80 °C, pri ktorej dochádza k zastaveniu ich činnosti. Aj napriek tomu dokáže pri dlhodobom skladovaní biomasa dosiahnuť teploty väčšie ako 100 °C. Nad touto hranicou začínajú procesy termochemickej konverzie a chemickej oxidácie, ktoré môžu viesť k samovznieteniu. Ani pri dosiahnutí teploty viac ako 80 °C nedochádza k dezinfekcii štiepok, pretože mikroorganizmy prečkajú v stave pokoja. Po následnom ochladení začínajú byť aktívne a môže nastať opätovné zvyšovanie teploty hromady. Rýchlosť, akou teplota štiepok narastá závisí od rôznych kritérií, medzi ktoré zaradujeme najmä – obsah vody, štruktúru a hustotu materiálu (veľkosť frakcií), množstvo skladovaného materiálu, typ skladu (krytý/otvorený), nečistoty, klimatické faktory, počiatkové infikovanie štiepkovaného dreva hubami (Jirjis, 2005).

Tieto skutočnosti mimoriadne zvyšujú riziko vzniku požiaru, ktorý môže spôsobiť škody na majetku a ľudskom zdraví. Toto riziko často ešte zvyšuje nesprávne umiestnenie a

priestorové usporiadanie skladu štiepok v prevádzkach (obrázok 4), spolu s nedodržiavaním bezpečnostných predpisov (napr. nesprávne umiestnenie skládky popola, skladovanie veľkého objemu štiepok bez vytvorenia aspoň jednej vnútornej línie, chýbajúca plocha určená na rozhrňanie vznietených štiepok, nedostatočné vybavenie prostriedkami na hasenie požiaru, zabezpečenie proti vstupu nepovolaných osôb a pod.).



Obr. 4. Príklad nevhodného priestorového usporiadania – skladovaná hromada biomasy v blízkosti skládky popola

Veľká pozornosť sa zatiaľ nevenuje hodnoteniu a kvantifikácii množstva drevného prachu, ktoré vzniká pri rôznych typoch skladovania štiepok a manipulácii s nimi. Väčšina doposiaľ publikovaných prác sa zaoberá týmto rizikom najmä v procese štiepkovania dreva, ktorému sme sa venovali v kapitole 2.2. Prác, ktoré by sa zaoberali expozíciou drevným prachom v procese skladovania štiepok je však pomerne málo. Súvisí to pravdepodobne s prístrojovou a časovou náročnosťou takéhoto výskumu, pričom výsledky môže ovplyvniť množstvo ďalších faktorov. Existuje aj práca, kde bol identifikovaný drevný prach zo štiepok ako príčina vzniku explózie, s následkami na ľudskom zdraví a životoch (Hedlund et al. 2014).

V tabuľke 4 je uvedený prehľad rizík a faktorov, ktoré ich spôsobujú v procese skladovania biomasy na energetické účely.

Tab. 4. Riziká pre ľudské zdravie pri výrobe biomasy na energetické účely a lesných štiepok.

Faktor	Riziko
Fytopatógeny	Mykózy Aspergilóza Infekcie, alergie
Drevný prach	Alergie Dermatózy, dýchacie problémy, rakovina Výbuch, požiar
Požiar	Smovznietenie, požiar v dôsledku nesprávneho usporiadania skladu

3. DISKUSIA A ZÁVER

Na základe analyzovaného prehľadu existujúcich rizík pri produkcii a skladovaní biomasy možno konštatovať, že najväčší počet prác je venovaný práve technologickému procesu skladovania a spotreby vyprodukovaných foriem biomasy. Z rizík v tejto fáze je najväčší počet prác venovaný rizikám produkcie spór fytopatogénov a plesní ohrozujúcich

ľudské zdravie (Alakoski et al. 2016). Menšia časť prác je venovaná rizikám samozahrievania biologického materiálu, a s tým súvisiaceho rizika vzniku požiaru. Dôraz na ďalší výskum by mal byť smerovaný práve na tvorbu modelov a modelovania procesu vzniku tohto javu. Najmenej prác v tejto oblasti je venovaná rizikám spojeným s produkciou a ohrozením drevným prachom.

Menšia pozornosť je venovaná rizikám, ktoré ohrozujú ľudské zdravie a majetok v procese samotnej produkcie biomasy na energetické účely. Z časti táto skutočnosť vyplýva z toho, že často je samotná produkcia sortimentov, ktoré slúžia ako zdrojové pre biomasu na energetické účely len podružnou činnosťou lesníckej prevádzky popri produkcii dreva na hodnotnejšie účely spracovania, a tak sa analýze rizík v tejto oblasti venuje len pomerne málo autorov. Najväčšia pozornosť je venovaná ergonomickým parametrom strojov, ktoré vyrábajú lesné štiepky a negatívnemu vplyvu hluku a vibrácií, ktoré pôsobia na operátorov týchto strojov. Vo väčšine prípadov, pokiaľ obsluha pracuje v uzatvorenej bezpečnostnej kabíne stroja, nie sú prípustné ergonomické limity prekročené. Zdravotné riziká existujú v prípadoch ak obsluha nesedí v kabíne a je tak priamo vystavená nepriaznivým vplyvom hluku, vibrácií a drevného prachu. Menej prác sa venuje zdravotným rizikám, ktoré vznikajú v dôsledku dlhodobého pôsobenia pracovného zaťaženia v procese produkcie biomasy (napr. neuropsychickým problémom, chorobám pohybového aparátu z dlhodobého nadmerného zaťaženia a podobne).

Riziká, ktoré vznikajú v procese zakladania intenzívnych porastov a energetických plantáží sú skôr analyzované prostredníctvom prác, ktoré sa venujú poľnohospodárskej produkcii celkovo. Časť zdravotných rizík, ktoré vznikajú napríklad v dôsledku uhryznutia kliešťom sú taktiež analyzované skôr v prácach, ktoré analyzovali inú činnosť v rámci lesných porastov a trvalých trávnatých porastov.

V súčasnosti je problematika analýza rizík v procese produkcie a skladovania lesnej biomasy na energetické účely rozpracovaná najmä pre technologický proces skladovania a spotreby biomasy. Všeobecne známe sú tak riziká aj ich negatívne účinky na ľudské zdravie a hrozby poškodenia majetku.

Ďalší výskum by mal byť prioritne orientovaný do tvorby modelov a modelovania procesov vzniku týchto rizikových faktorov a dynamiky ich rastu. V súčasnosti sa výskum tiež zameriava na možnosti eliminácie, prípadne možnej minimalizácie zdravotných a bezpečnostných rizík v procese skladovania biomasy na energetické účely. Prvé práce s experimentmi zameranými na minimalizáciu produkcie spór fytopatogénov a možnosti znižovania rizika vzniku požiaru boli publikované len nedávno (Dumfort et al. 2023). Faktom tiež, zostáva, že mnohé prevádzky sú o týchto rizikách neinformované, alebo ich podceňujú v odbornej príprave zamestnancov, ako aj v zabezpečovaní osobných ochranných pracovných prostriedkov. Osobitnou oblasťou je vplyv týchto negatívnych faktorov na obyvateľstvo v blízkosti prevádzok. Táto oblasť doposiaľ nie je dostatočne preskúmaná. Ďalší výskum v týchto oblastiach už postupne prebieha a jeho výsledky by mali byť známe v najbližších rokoch.

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektov APVV-22-0001; APVV-21-0032; APVV-20-0118) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202). Táto štúdia bola spolufinancovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence.

ZDROJE LITERATÚRY

ACQUAVELLA, J.F.; WEBER, J.A.; CULLEN, M.R.; CRUZ, O.A.; MARTENS, M.A.; HOLDEN, L.R.; RIORDAN, S.; THOMPSON, M.; FARMER, D. Human ocular effects from self-reported exposures to Roundup (R) herbicides. *Hum. Exp. Toxicol.* 1999, 18(8), 479-486, DOI: 10.1191/096032799678847087.

AGOSTINI, L.P.; DETTOGNI, R.S.; DOS REIS, R.S.; STUR, E.; DOS SANTOS, E.V.W.; VENTORIM, D.P.; GARCIA, F.M.; CARDOSO, R.C.; GRACELLI, J.B.; LOURO, I.D. Effects of glyphosate exposure on human health: Insights from epidemiological and in vitro studies. *Sci. Total Environ.* 2020, 705, 135808, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135808.

ALAKOSKI, E.; JÄMSÉN, M.; AGAR, D.; TAMPIO, E.; WIHERSAARI, M. From wood pellets to wood chips, risks of degradation and emissions from the storage of woody biomass - A short review. *Renew. Sust. Energ. Rev.* 2016, 54, 376-383. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.021.

ALAVANJA, M.C.R.; SAMANIC, C.; DOSEMECI, M.; LUBIN, J.; TARONE, R.; LYNCH, C.F.; KNOTT, C.; THOMAS, K.; HOPPIN, J.A.; BARKER, J., COBLE, J.; SANDLER, D.P.; BLAIR, A. Use of agricultural pesticides and prostate cancer risk in the agricultural health study cohort. *Am. J. Epidemiol.* 2003, 157(9), 800-814, DOI: 10.1093/aje/kwg040.

ALSHAMMARI, N. Mycotoxin source and its exposure causing mycotoxicoses. *Bioinformation* 2023, 19(4), 348-357. DOI: 10.6026/97320630019348.

BARONTINI, M.; CROGNALE, S.; SCARFONE, A.; GALLO, P.; GALLUCCI, F.; PETRUCCIOLI, M.; PESCIAROLLI, L.; PARI, L. Airborne fungi in biofuel wood chip storage sites. *Int. Biodeter. Biodegr.* 2014, 90, 17-22. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.12.020.

BOHADANA, A.B.; MASSIN, N.; WILD, P.; TOAMAIN, J.P.; ENGEL, S.; GOUTET, P. Symptoms, airway responsiveness, and exposure to dust in beech and oak wood workers. *Occup. Environ. Med.* 2000, 57(4), 268-273. DOI: 10.1136/oem.57.4.268.

DAYTON, S.B.; SANDLER, D.P.; BLAIR, A.; ALAVNJA, M.; FREEMAN, L.E.B.; HOPPIN, J.A. Pesticide Use and Myocardial Infarction Incidence Among Farm Women in the Agricultural Health Study. *J. Occup. Environ. Med.* 2010, 52(7), 693-697, DOI: 10.1097/JOM.0b013e3181e66d25.

DORLACH, T.; GUNASEKARA, S. The politics of glyphosate regulation: lessons from Sri Lanka's short-lived ban. *Globalization Health* 2023, 19(1), 84. DOI: 10.1186/s12992-023-00981-2.

DUMFORT, S.; LENZ, H.; ASCHER-JENULL, J.; LONGA, C.M.O.; ZÖHRER, J.; INSAM, H.; PECENKA, R. The effect of calcium hydroxide on the storage behaviour of poplar wood chips in open-air piles. 2023, 177, 106945. DOI: 10.1016/j.biombioe.2023.106945.

European Court of Auditors. Renewable energy for sustainable rural development: significant potential synergies, but mostly unrealized. 2018, pp. 93. European Union, Luxembourg, Luxembourg. Available online: https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR18_05/SR_Renewable_Energy_EN.pdf (accessed on 6 January 2024).

GEJDOŠ, M.; LIESKOVSKÝ, M. Vybrané riziká pri produkcii biomasy na energetické účely [Selected risks in biomass production for energy purposes]. 1st ed.; Technical University in Zvolen: Zvolen, Slovakia, 2020; pp. 88.

- GEJDOŠ, M.; LIESKOVSKÝ, M.; SLANČÍK, M.; NĚMEC, M.; DANIHELOVÁ, Z. Storage and fuel quality of coniferous wood chips. *Bioresources* 2015, 10(3), 5544-5553.
- GEJDOŠ, M.; VLČKOVÁ, M.; ALLMANOVÁ, Z.; BALÁŽOVÁ, Ž. Trends in Workplace Injuries in Slovak Forest Enterprises. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2019, 16(1), 141, DOI: 10.3390/ijerph16010141.
- GRUNG, M.; LIN, Y.; ZHANG, H.; STEEN, A.O.; HUANG, J.; ZHANG, G.; LARSEN, T. Pesticide levels and environmental risk in aquatic environments in China - A review. *Environment International* 2015, 81, 87-97, DOI: 10.1016/j.envint.2015.04.013.
- HEDLUND, F.H.; ASTAD, J.; NICHOLS, J. Inherent hazards, poor reporting and limited learning in the solid biomass energy sector: A case study of a wheel loader igniting wood dust, leading to fatal explosion at wood pellet manufacturer. *Biomass Bioenerg.* 2014, 66, 450-459, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.039>.
- HYDE, M.; JAPPINEN, P.; THEORELL, T.; OXENSTIERNA, G. Workplace conflict resolution and the health of employees in the Swedish and Finnish units of an industrial company. *Soc. Sci. Med.* 2006, 63(8), 2218-2227. DOI: 10.1016/j.socscimed.2006.05.002.
- JANKOVSKÝ, M.; ALLMAN, M.; ALLMANOVÁ, Z.; FERENČÍK, M.; MERGANIČ, J.; MESSINGEROVÁ, V. Is timber haulage safe? A ten year study of occupational accidents. *Safety Sci.* 2019, 113, 154-160, DOI: 10.1016/j.ssci.2018.11.018.
- JANKOVSKÝ, M.; MERGANIČ, J.; ALLMAN, M.; FERENČÍK, M.; MESSINGEROVÁ, V. The cumulative effects of work-related factors increase the heart rate of cabin field machine operators. *Int. J. Ind. Ergonom.* 2018, 65, 173-178. DOI: 10.1016/j.ergon.2017.08.003.
- JIRJIS, R. Effects of particle size and pile height on storage and fuel quality of comminuted *Salix viminalis*. *Biomass Bioenerg.* 2005, 28(2), 193-201. DOI: 10.1016/j.biombioe.2004.08.014.
- KOZUCH, A.; CYWICKA, D.; ADAMOWICZ, K.; WIERUSZEWSKI, M.; WYSOCKA-FIJOREK, E.; KIELBASA P. The Use of Forest Biomass for Energy Purposes in Selected European Countries. *Energies* 2023, 16(15), DOI: 10.3390/en16155776.
- LAITINEN, S.; LAITINEN, J.; FAGERNÄS, L.; KORPIJÄRVI, K.; KORPINEN, L.; OJANEN, K.; AATAMILA, M.; JUMPPONEN, M.; KOPONEN, H.; KOKINIEMI, J. Exposure to biological and chemical agents at biomass power plants. *Biomass Bioenerg.* 2016, 93, 78-86. DOI: 10.1016/j.biombioe.2016.06.025.
- MAGAGNOTTI, N.; NANNICINI, C.; SCIARRA, G.; SPINELLI, R.; VOLPI, D. Determining the Exposure of Chipper Operators to Inhalable Wood Dust. *Ann. Occup. Hyg.* 2013, 57(6), p. 784-792, DOI: 10.1093/annhyg/mes112.
- MEFTAUL, I.M.; VENKATESWARLU, K.; DHARMARAJAN, R.; ANNAMALAI, P.; MEGHARAJ, M. Pesticides in the urban environment: A potential threat that knocks at the door. *Sci. Total Environ.* 2020, 711, 134612, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.134612.
- OČKAJOVÁ, A.; KUČERKA, M.; KMINIAK, R.; KRIŠŤÁK, Ľ.; IGAZ, R.; RÉH, R. Occupational Exposure to Dust Produced when Milling Thermally Modified Wood. *Int. J. Environ. Res. Pub. He.* 2020, 17(5), 1478, DOI: 10.3390/ijerph17051478.
- PAN, Y.D.; BIRDSEY, R.A.; PHILLIPS, O.L.; JACKSON, R.B. The Structure, Distribution, and Biomass of the World's Forests. *Annu. Rev. Ecol. Evol. S.* 2013, 44, 593. DOI: 10.1146/annurev-ecolsys-110512-135914.

PEILLEX, C.; PELLETIER, M. The impact and toxicity of glyphosate and glyphosate-based herbicides on health and immunity. *J. Immunotoxicol.* 2020, 17(1), 163-174. DOI: 10.1080/1547691X.2020.1804492.

POTOCNIK, I.; POJE, A. Forestry Ergonomics and Occupational Safety in High Ranking Scientific Journals from 2005-2016. *Croat. J. For. Eng.* 2017, 38(2), 291-310.

SALMINEN, S. Have young workers more injuries than older ones? An international literature review. *J. Safety Res.* 2004, 35(5), 513-521. DOI: 10.1016/j.jsr.2004.08.005.

SAMUELS, G.J.; DODD, S.; LU, B.; PETRINI, O.; SCHROERS, H.; DRUZHININA, I.S. The *Trichoderma Konigii* Morphological Species. *Stud. Mycol.* 2006, 56, 67-133.

SHERWIN, L.M.; OWENDE, P.M.O.; KANALI, C.L.; LYONS, J.; WARD, S.M. Influence of forest machine function on operator ex-posure to whole-body vibration in a cut-to-length timber harvester. *Ergonomics* 2004, 47(11), 1145-1159, DOI: 10.1080/00140130410001702141.

SUCHOMEL, J.; BELANOVÁ, K.; GEJDOŠ, M.; NĚMEC, M.; DANIHELOVÁ, A.; MAŠKOVÁ, Z. Analysis of fungi in wood chip storage piles. *Bioresources* 2014, 9(3), 4410-4420.

SÜSS, J. Tick-borne encephalitis in Europe and beyond – the epidemiological situation as of 2007. *Eurosurveillance* 2008, 13(26), PMID 18761916.

TEIXEIRA, T.R.; RIBEIRO, C.A.A.S.; DOS SANTOS, A.R.; MARCATTI, G.E.; LORENZON, A.S.; DE CASTRO, N.L.M.; DOMINGUES, G.F.; LEITE, H.G.; DE MENEZES, S.M.D.; MOTA, P.H.S.; TELLES, L.A.D.; VIEIRA, R.D. Forest biomass power plant installation scenarios. *Bio-mass Bioenerg.* 2018, 108, 35-47. DOI: 10.1016/j.biombioe.2017.10.006.

THELIN, A. Fatal accidents in Swedish farming and forestry, 1988-1997. *Safety Sci.* 2002, 40(6), 501-517. DOI: 10.1016/S0925-7535(01)00017-0.

VLČKOVÁ, M.; GEJDOŠ, M.; NĚMEC, M. Analysis of vibration in wood chipping process. *Akustika* 2017, 28, 106-110.

VOELTER-MAHLKNECHT, S.; PRITSCH, M.; GIGIC, B.; LANGER, P.; LOEFFLER, K.I.; DUPUIS, H.; LETZEL, S. Socio-medicinal aspects of vibration-induced white finger disease. *Disabil. Rehabil.* 2008, 30(14), 999-1013. DOI: 10.1080/09638280701443292.

doc. Ing. Miloš Gejdoš, Ph.D.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen. Email: gejdos@tuzvo.sk; Národné lesnícke centrum, Sekcia pre vedu a výskum, T.G. Masaryka 22, Zvolen 960 01. Email: milos.gejdos@nlcsk.org

doc. Ing. Martin Lieskovský, Ph.D.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen. Email: lieskovsky@tuzvo.sk

Ing. Katarína Michajlová, Ph.D.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen. Email: michajlovakatarina@gmail.com

Ing. Vladimír Juško, Ph.D.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen. Email: jusko@tuzvo.sk

STRES V PRÁCI MANAŽÉROV ŠTÁTNYCH LESNÍCKYCH PODNIKOV

MILOŠ HITKA, MACIEJ SYDOR

In this paper, we analyze the stress resulting from the demanding work of managers of state forestry enterprises. Based on a questionnaire, we define the impact of stress on health, burnout syndrome and the impact on private life. Based on the results of the research, it is possible to propose measures to reduce stress in the work environment. As part of improving communication skills, it is possible to introduce regular conversations and open communication with employees. Another option is to strengthen non-financial motivation of employees in the form of thanks for a job well done. To offer employees who experience a long-term state of stress the opportunity to undergo a psychological examination.

Kľúčové slová: stres, manažér, motivácia, pracovný výkon

Key words: stress, manager, motivation, work performance

1. ÚVOD

Problematika stresu je skúmaná už niekoľko desiatok rokov. Stres nás v niektorých situáciách povzbudí, v iných zabrzdí. Vyskytuje sa dennodenne v osobnom, ale aj v pracovnom živote. Manažéri sú jednou z najviac ohrozených skupín, ktorých stres pohlcuje. Vysoké pracovné nároky, tlak, zodpovednosť sú faktory, ktoré prispievajú k vyššej miere stresu (Williamson, Munyon, 2025). Dlhodobý stres spôsobuje znižovanie produktivity práce. Intenzívny stres pôsobí na srdce rovnako nepriaznivo, ako fajčenie alebo vysoká hladina cholesterolu.

Stres je nešpecifická všeobecná reakcia organizmu na akékoľvek požiadavky naň kladené. Z lekárskeho pohľadu je stres chápaný ako fyziologický proces. Psychológovia ho vnímajú ako správanie sa človeka v záťažových situáciách. Z pohľadu manažmentu to je vnútorný tlak závislý na pracovných povinnostiach (Lucini, 2023). Môže pôsobiť ako pozitívny stimul a pomáha dosahovať výsledky a zaznamenať aj úspechy. Ak je úroveň stresu vyššia a dlhodobá, môže stres ovplyvniť výkon.

Na vzniku stresu sa podieľajú stresory. Somatické stresory ako vonkajšie fyzikálne vplyvy prostredia sú chlad, teplo, rôzne druhy žiarenia, zmeny atmosférického tlaku, hluk, vibrácie, hlad, smäd, bolesť, imobilizácia, krvácanie, námaha, chirurgický zákrok. Psychologické stresory ako individuálne vnútorné stresory sú konflikt, frustrácia, nezdravý životný štýl, psychická únava, úzkosť z osobne neznesiteľnej situácie, stresory z choroby, bolesti, starosti, imobilizácia, hospitalizácia, konflikty vo vzťahoch v prostredí rodiny, školy, ale aj sociálne a pracovné stresory ako nedostatočné finančné ohodnotenie, pracovné preťaženie, strata zamestnania, odchod do dôchodku a podobne. (<https://www.prohuman.sk/psychologia/stres-a-zataz-u-ludskeho-jedinca>, 2012).

Práca manažéra je založená na náročných pracovných situáciách (Appelbaum, Steven, 1980). Väčšinu z nich tvoria medziľudské vzťahy v práci, v rodine alebo v kruhu najbližších. Pracovný stres vyplýva z vysokých nárokov na zamestnancov a zo snahy uspieť a kariérne rásť. Okrem vysokých nárokov sú tu aj pracovné termíny, konflikty na pracovisku či neustály tlak na výkon. Toto všetko môže ovplyvniť a psychické a fyzické zdravie. Ku stresu manažérov prispieva aj pracovné preťaženie a vysoké očakávania nadriadených. To môže viesť k syndrómu vyhorenia (Yang, Jing, 2025). Manažéri často čelia vysokým očakávaniam zo strany svojich nadriadených, kolegov, dodávateľov či aj klientov. V práci sa od manažérov očakáva maximálny výkon aj na úkor vlastného času.

2. METODIKA

Cieľom práce je poukázať na spôsob zvládania stresu manažérov štátnych lesníckych podnikov. Využili sme deskriptívny výskum formou dotazníka. Dotazník Gavora (2010) je efektívny nástroj na hromadné dopytovanie sa respondentov. V dotazníku boli použité uzavreté otázky. Výskum bol realizovaný na jar 2025 formou náhodného výberu účastníkov. Zúčastnilo sa ho 54 respondentov, z toho 12 žien 42 mužov.

3. VÝSLEDKY

Dĺžka praxe v rokoch v riadiacej funkcii ovplyvňuje schopnosť zvládania stresu (Tabuľka 1). Taktiež najvyššie dosiahnuté vzdelanie má zásadný vplyv na schopnosť zvládania stresu (Tabuľka 2).

Tab. 1 Dĺžka praxe v rokoch

Dĺžka praxe v rokoch	Absolútna početnosť	Relatívna početnosť
> 1	3	5,6 %
1 – 3	10	18,5 %
4 – 6	15	27,8 %
7 – 10	12	22,2 %
nad 10	14	25,9 %

Zdroj – vlastné spracovanie

Tab. 2 Najvyššie dosiahnuté vzdelanie

Najvyššie dosiahnuté vzdelanie	Absolútna početnosť	Relatívna početnosť
stredoškolské s maturitou	2	3,7 %
vysokoškolského vzdelanie I. stupňa	5	9,3 %
vysokoškolské vzdelanie II. stupňa	43	79,7 %
vysokoškolské vzdelanie III. stupňa	4	7,4 %

Zdroj – vlastné spracovanie

V ďalšej časti sme zisťovali zdroje vytvárajúce stres a to intenzitu stresu, spôsob reakcie na stres a vplyv stresu na výkon zamestnanca riadiacich zamestnancov.

Tab. 3 Intenzita stresu

Intenzita stresu	Absolútna početnosť	Relatívna početnosť
Nikdy	3	5,6 %
Niekedy	36	66,7 %
Často	12	22,2 %
Veľmi často	3	5,6 %

Zdroj – vlastné spracovanie

Z tabuľky 3 vyplýva, že hoci sa stres v pracovnom prostredí objavuje, viacerí zamestnanci ho nepociťujú pravidelne, ale len niekedy. Môže to naznačovať, že pracovné podmienky sú relatívne vyvážené a zamestnanci dokážu stres zvládať, resp. si naň už do určitej miery zvykli.

Tabuľka 4 poukazuje na celkovú úroveň stresu v práci na stupnici 1-5, kde 1 je najnižšia úroveň a 5 je najvyššia úroveň stresu. Z celkového hodnotenia úrovne stresu v práci vyplýva, že väčšina respondentov hodnotí svoju úroveň stresu známku 3, čo naznačuje miernu úroveň

stresu. Možno usúdiť, že zamestnanci vnímajú svoju prácu ako občasne stresujúcu, no vo väčšine prípadov zvládnuteľnú. Vysoká koncentrácia odpovedí v strede škály zároveň naznačuje, že pracovné prostredie nie je extrémne náročné, ale určité stresové faktory sa v ňom vyskytujú.

Tab. 4 Úroveň stresu

Úroveň stresu	Absolútna početnosť	Relatívna početnosť
1	4	7,4 %
2	14	25,9 %
3	28	51,9 %
4	6	11,1 %
5	2	3,7 %

Zdroj – vlastné spracovanie

Tab. 5 Vplyv stresu na zdravie

Vplyv stresu na zdravie	Absolútna početnosť	Relatívna početnosť
Bez vplyvu	20	37,0 %
Psychický vplyv	16	29,6 %
Fyzický vplyv	6	11,1 %
Psychický aj fyzický vplyv	12	22,2 %

Zdroj – vlastné spracovanie

Tabuľka 5 charakterizuje vplyv stresu na fyzické a psychické zdravie manažérov. Z výsledku je viditeľné, že stres vplyva na psychický aj fyzický zdravotný stav manažérov. Tabuľka 6 pojednáva o pocite vyhorenia vyplývajúceho z pracovného stresu. Vplyv stresu na súkromný život je v tabuľke 7.

Tab. 6 Vplyv stresu na syndróm vyhorenia

Vplyv stresu na syndróm vyhorenia	Relatívna početnosť
Áno	31,5%
Nie	46,3 %
Neviem	22,2 %

Zdroj – vlastné spracovanie

Tab. 7 Vplyv stresu na súkromný život

Vplyv stresu na súkromný život	Absolútna početnosť	Relatívna početnosť
Nikdy	8	14,8 %
Zriedkavo	38	70,4 %
Často	7	13,0 %
Veľmi často	1	1,9 %

Zdroj – vlastné spracovanie

Na základe výsledkov výskumu je možné navrhnúť opatrenia na zníženie stresu v pracovnom prostredí. V rámci zlepšovania komunikačných zručností je možnosť zaviesť pravidelné rozhovory otvorenú komunikáciu so zamestnancami. Ďalšou možnosťou je posilnenie nefinančnej motivácie zamestnancov formou poďakovanie za dobre vykonanú

prácu. Zamestnancom, ktorí pociťujú dlhodobý stav stresu, ponúknuť možnosť psychologického vyšetrenia.

4. DISKUSIA A ZÁVER

V práci sme zistili hlavné faktory vzniku stresu manažérov štátnych lesníckych podnikov. Dotazníkového prieskumu sa zúčastnilo 54 respondentov. Pri dotazníkovom prieskume sme zistili, že respondenti pociťujú stres v práci z dôvodov nízkej motivácie a stimulácie, z pocitu nedostatočného ohodnotenia a z fyzicky náročnej práce. Mnohí riadiaci zamestnanci majú pocit nepomeru mzdy a výkonov. Tento nesúlad môže viesť k pocitom nedocenenia a demotivácie a následne k zvýšeniu stresu a frustrácie.

Je potrebné, aby si zamestnávateľa uvedomovali kľúčovú úlohu rovnováhy medzi pracovným a súkromným životom v kontexte celkovej spokojnosti a výkonnosti zamestnancov. Stres je bežnou a prirodzenou súčasťou našej existencie v pracovnom, ale aj v súkromnom živote. Avšak neriešenie stresových problémov zvlášť u riadiacich zamestnancov môže zásadným spôsobom navýšiť finančné náklady v oblasti riadenia ľudských zdrojov.

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektov APVV-22-0001; APVV-20-0004) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202).

ZDROJE LITERATÚRY

APPELBAUM, STEVEN, H. (1980). Managerial/Organizational Stress: Identification Of Factors And Symptoms. *Health Care Management Review* 1980, 5(1):P 7-16, Winter 1980. Doi:10.1097/00004010-198024000-00002

GAVORA, P. et al. *Elektronická Učebnica Pedagogického Výskumu*. Bratislava : Univerzita Komenského, 2010. Isbn 978-80-223-2951-4.

LUCINI D, PAGANI E, CAPRIA F, GALIANO M, MARCHESE M, CRIBELLATI S, PARATI G. Age Influences On Lifestyle And Stress Perception In The Working Population. *Nutrients* 2023, 12;15(2):399. Doi: 10.3390/Nu15020399. Pmid: 36678269; Pmcid: Pmc9865201.

WILLIAMSON, G., MUNYON, T. Financial Security Spirals At Work: A Review, Integration, and Agenda for Intervention. 2025, *Human Resource Management Review* 35(3), 101086. 10.1016/J.Hrmr.2025.101086.

YANG, P., JING, L. Differentiated Behavioural Consequences Of Illegitimate Tasks: The Role Of Work Motivation And Stressor Appraisals. *Asian Journal Of Social Psychology* 2025, 28(1), . 70005. Doi: 10.1111/Ajsp.70005.

<https://www.prohuman.sk/psychologia/symptomy-psychopatologie-a-ich-suvislos-s-psychologickou-imunitou-u-studentov-zdravotnickych-odborov> issn 1338-1415.

Adresa autorov:

prof. Ing. Miloš Hitka, PhD.: Katedra podnikového hospodárstva, drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, 96001, Slovenská republika

doc. Dr. Maciej Sydor, PhD.: Institute of Safety and Quality Engineering, Faculty of Engineering Management, Poznań University of Technology, 60-965 Poznań, Poland

KVANTIFIKÁCIA ZDRAVOTNÝCH A EKONOMICKÝCH RIZÍK V PROCESE SKLADOVANIA BIOMASY PRE TEPLÁRENSKÉ ÚČELY

MILOŠ GEJDOŠ, MAREK POTKÁNY, KATARÍNA MARCINEKOVÁ

The aim of this study is to analyze and economically quantify health and safety risks associated with the storage of forest biomass used for heat production, with a focus on occupational diseases and their financial impact. The research was conducted in three urban heating plants in the Banská Bystrica region, where biomass is stored in large-capacity piles near residential areas. Between 2019 and 2023, samples were collected from both surface and deeper layers of the piles and analyzed for the presence of phytopathogenic microorganisms. In winter 2023, dust concentration was measured using a CEM DT-9880 device. The results confirmed the presence of fungal genera such as *Aspergillus*, *Penicillium*, and *Mucor*, which may cause respiratory diseases, allergies, and infections. From an economic perspective, the study assessed the potential occurrence of occupational diseases such as lung cancer, respiratory allergies, hearing disorders, vibration-related illnesses, and musculoskeletal conditions. Data from the Statistical Office of the Slovak Republic, the National Health Information Center, and relevant legislation were used for quantification. A surcharge-based cost allocation model was proposed, incorporating risks related to severance payments and compensation. The model showed that including these risks would increase overhead costs by 4.25%, profit margin by 0.177%, and product price by 2.83%. These findings highlight the need for legislative improvements, enhanced safety standards, and greater awareness among workers in the biomass energy sector.

Kľúčové slová: biomasa, riziká zdravia, ekonomický dopad, drewná štiepka, fytopatogénne huby

Key words: biomass, occupational health risks, economic impact, wood chips, phytopathogenic fungi

1. ÚVOD

V posledných rokoch sa obnoviteľné zdroje energie stali prioritou energetickej politiky EÚ. Do roku 2030 sa očakáva, že ich podiel na celkovej spotrebe energie dosiahne 32 %, pričom biomasa – vrátane biologicky rozložiteľného odpadu – tvorí viac než 63 % produkcie z obnoviteľných zdrojov. Sektory poľnohospodárstva, lesného hospodárstva a spracovania dreva tak zohrávajú kľúčovú úlohu pri plnení klimatických a energetických cieľov (Auditorský tím EÚ, 2018).

Rastúci dopyt po lesnej biomase zvyšuje nároky na technológie, materiálne zabezpečenie aj kvalifikovanú pracovnú silu. Nedostatok pracovníkov, fyzická náročnosť práce a nízke mzdy vedú k poklesu záujmu o tieto profesie. Od roku 2008 klesol počet zamestnancov v lesníctve na Slovensku o viac než 15 000, pričom mnohí prešli do súkromného sektora, kde sa bezpečnosť práce často zanedbáva. Celý reťazec – od ťažby po skladovanie a spaľovanie biomasy – prináša zdravotné a prevádzkové riziká. Najmä dlhodobé skladovanie štiepky vo veľkokapacitných hromadách v blízkosti obytných zón predstavuje zdravotné riziko pre pracovníkov aj obyvateľov. Mikrobiologické faktory, ako fytopatogény a drewný prach, môžu spôsobovať respiračné ochorenia a iné zdravotné komplikácie.

Cieľom článku je analyzovať a ekonomicky kvantifikovať riziká spojené so skladovaním lesnej biomasy, s dôrazom na zdravotné riziká a potenciálne ekonomické škody spôsobené chorobami z povolania. Výsledky môžu slúžiť ako podklad pre optimalizáciu procesov a zlepšenie bezpečnostných štandardov v oblasti energetického využitia biomasy.

2. METODIKA

Na účely dlhodobého sledovania boli vybrané tri mestské teplárne situované v rámci Banskobystrického samosprávneho kraja. Všetky tieto prevádzky patria pod jednu spoločnosť a využívajú na výrobu tepla lesnú biomasu vo forme štiepok, ktoré sú uskladňované vo veľkokapacitných hromadách priamo v areáloch teplární. Tieto zariadenia sa nachádzajú v zastavaných oblastiach miest, v bezprostrednej blízkosti obytných zón. Zber vzoriek prebiehal

v období rokov 2019 až 2023. Z každej teplárne bolo odobratých päť vzoriek – tri z povrchovej vrstvy hromád a dve z hĺbky približne 0,5 metra. Všetky vzorky boli následne analyzované v akreditovanom mikrobiologickom laboratóriu Regionálneho úradu verejného zdravotníctva v Poprade, pričom cieľom bolo identifikovať prítomnosť fytopatogénnych mikroorganizmov. V zimnom období roku 2023 sa v jednej z prevádzok uskutočnilo aj meranie prašnosti prostredia. Na tento účel bol použitý prístroj typu CEM DT-9880. Hodnotenie prašnosti vychádzalo z technickej smernej hodnoty pre respirabilnú frakciu drevného prachu, ktorá je podľa Nariadenia vlády SR č. 356/2006 Z.z. stanovená na úrovni 3 mg/m³. V prípade expozície fytopatogénom však legislatíva zatiaľ neuvádza limitnú hodnotu. Podľa odporúčaní Svetovej zdravotníckej organizácie z roku 2021 by denná priemerná koncentrácia prachových častíc PM_{2.5} nemala prekročiť 15 µg/m³ (Pai et al., 2022), aby bolo ovzdušie považované za zdravotne nezávadné.

Z ekonomického hľadiska bola analyzovaná možnosť vzniku chorôb z povolania v súvislosti s manipuláciou a skladovaním lesnej biomasy, vrátane povinnosti platenia odstupného. Medzi najčastejšie identifikované ochorenia patria: rakovina pľúc a dýchacích ciest, alergické respiračné ochorenia, poruchy sluchu vrátane profesionálnej hluchoty, ochorenia spôsobené vibráciami, ako aj muskuloskeletálne poruchy horných a dolných končatín vyplývajúce z dlhodobého jednostranného zaťaženia.

Na ekonomickú klasifikáciu týchto ochorení bola použitá platná legislatíva, konkrétne zákon č. 437/2004 Z.z., údaje z Národného centra zdravotníckych informácií (NCZI) a predpisy Sociálnej poisťovne. Zákony č. 461/2003 a č. 311/2001 boli aplikované na určenie postupov a výšky finančných kompenzácií za uznané choroby z povolania. Na kvantifikáciu ekonomických rizík boli využité aj štatistické údaje zo Štatistického úradu Slovenskej republiky.

V rámci štúdie bol navrhnutý model alokácie režijných nákladov prostredníctvom tradičnej metódy prirážkovej kalkulácie, ktorý zohľadňuje aj riziko vzniku nákladov spojených s finančnou kompenzáciou za choroby z povolania. Na výpočet rozdielu v prirážke režijných nákladov (ΔPRN) bol použitý vzťah (1):

$$\Delta PRN = \text{kvantifikované kalkulačné riziká} / \text{rozvrhová základňa} \times 100 (\%) \quad (1)$$

3. VÝSLEDKY

3.1. Identifikácia fytopatogénov v mestských teplárňach

Ako ukazuje Tabuľka 1, v období rokov 2019 – 2024 sa v mestských teplárňach pravidelne vyskytovalo 6 až 7 druhov fytopatogénnych mikroorganizmov ročne. Najčastejšie boli identifikované rody *Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor* a rôzne kvasinky, ktoré môžu pri dlhodobej expozícii spôsobiť alergie, respiračné ochorenia či závažné infekcie ako aspergilóza alebo mucormykóza. Niektoré druhy navyše produkujú mykotoxíny s karcinogénnym účinkom. Týmto rizikám sa vo svojich štúdiách venovali González-García et al. (2022), Steinbrink a Miceli (2021) a Otero et al., (2020).

Tab.1 Počet druhov identifikovaných fytopatogénov v 4 mestských teplárňach v rokoch 2019-2024

Rok	Sklad č. 1	Sklad č. 2	Sklad č. 3
2019	7	6	8
2020	10	7	6
2021	5	6	5
2022	7	7	6
2023	6	5	5

Výskum potvrdil, že tieto mikroorganizmy sa v hromadách štiepky vyskytujú trvalo, bez ohľadu na pravidelný pohyb materiálu. Riziko pre pracovníkov a obyvateľov v okolí tak pretrváva počas celého obdobia skladovania. Koncentrácia spór môže pri manipulácii presiahnuť 1000 CFU/m³ a klesá až vo vzdialenosti 300 metrov od zdroja, čo definuje rizikovú zónu (Barontini et al., 2014). Vzhľadom na absenciu legislatívnych noriem pre biologické riziká pri skladovaní biomasy a nedostatočné informovanie verejnosti aj prevádzkovateľov, je potrebné venovať tejto problematike zvýšenú pozornosť. Výskumy potvrdzujú súvislosť medzi expozíciou a vznikom ochorení, čo poukazuje na potrebu legislatívnych úprav v oblasti ochrany zdravia pri práci s biomasou.

3.2 Hodnotenie prašnosti pracovného prostredia v mestských teplárňach

V posledných rokoch sa kvalita ovzdušia v mestských oblastiach zhoršila, čo je spôsobené najmä nárastom dopravy a zvýšeným využívaním biomasy na vykurovanie. Teplárne spaľujúce biomasu predstavujú viacero zdrojov prašnosti – od samotných skládok štiepky, ktoré uvoľňujú spóry fytopatogénov a prach z kontaminovaného dreva, až po manipuláciu s materiálom a samotný proces spaľovania, pri ktorom vznikajú pevné prachové častice.

Tieto zdroje prispievajú k zvýšenej expozícii pracovníkov aj obyvateľov v okolí, najmä časticami PM_{2.5} a PM₁₀. Pri hodnotení prašnosti je potrebné rozlišovať medzi pracovnou (krátkodobou) a environmentálnou (dlhodobou) expozíciou – pričom pracovnú možno hodnotiť dvojhodinovým meraním, zatiaľ čo environmentálna vyžaduje minimálne 24-hodinové sledovanie. Dňa 22. novembra 2023 a 10. januára 2024 sa uskutočnili úvodné merania prašnosti v areáli mestského typu teplárne pomocou mobilného analyzátoru CEM DT-9880. Merania prebehli za podobných klimatických podmienok (priemerná teplota 4 °C, vlhkosť 73,4 %, západný vietor 20 km/h) a boli realizované v súlade s normami STN EN 689+AC a STN EN 482 pre pracovnú expozíciu chemickým faktorom.

Výsledky ukázali, že koncentrácie častíc PM_{2.5} až PM₁₀ boli relatívne nízke a neprekročili legislatívne limity pre drevný prach (3 mg/m³). Vyššie hodnoty sa však zaznamenali pri menších časticách (PM_{0.3} až PM₁), pričom výrazný vplyv na koncentráciu mal vietor – najmä počas prvého merania medzi 11:00 a 12:00, keď došlo k prudkému nárastu prašnosti.

3.3. Ekonomické riziká z poškodenia zdravia pri produkcii a skladovaní biomasy

Logistický reťazec pri výrobe a skladovaní biomasy možno rozdeliť do troch hlavných etáp: zakladanie a starostlivosť o porasty – výsadba, pestovanie a ochrana rýchlorastúcich drevín, výroba biomasy – ťažba a spracovanie na lesné štiepky, skladovanie a energetické využitie – uskladnenie a spaľovanie biomasy (Gejdoš, Lieskovský, 2024). V každej z týchto fáz sa môžu súčasne vyskytovať rôzne zdravotné a bezpečnostné riziká. Okrem najvážnejšieho rizika – straty života – predstavujú záťaž aj choroby z povolania či vážne poškodenia zdravia, ktoré môžu viesť k súdnym sporom, náhradám škody alebo vyplateniu odstupného.

Podľa § 195 Zákonníka práce je choroba z povolania taká, ktorú uzná zdravotnícke zariadenie a je zaradená do oficiálneho zoznamu (Zákon č. 461/2003 Z.z.). Ak je zamestnancovi takáto choroba potvrdená, zamestnávateľ má tieto povinnosti:

- preradiť zamestnanca na vhodnejšiu pozíciu vzhľadom na jeho zdravotný stav,
- vyplatiť odstupné (minimálne 10-násobok priemernej mzdy), ak zamestnanec musí ukončiť pracovný pomer,
- nahradiť škodu, ak to určí súd (ináč ju hradí Sociálna poisťovňa).

Na základe identifikovaných rizík v celom procese sme podľa národnej klasifikácie vybrali tieto ochorenia, ktoré môžu vzniknúť: *rakovina pľúc a dýchacích ciest, alergie*

dýchacích ciest, choroby z jednostranného preťaženia končatín, jednostranná a obojstranná nedoslýchavosť/hluchota, ochorenia z vibrácií, profesionálne dermatózy.

Každé z uvedených ochorení má podľa slovenskej legislatívy (Zákon č. 437/2004 Z.z. v znení neskorších predpisov) pridelené bodové ohodnotenie v stanovenom rozsahu. Na účely ekonomickej analýzy bola zvolená vždy najvyššia možná hodnota. Hodnota jedného bodu sa určuje na základe priemernej mzdy v národnom hospodárstve – v roku 2023 predstavovala hodnota jedného bodu 26,08 €. Prehľad bodových hodnôt jednotlivých ochorení a ich finančné vyčíslenie je uvedený v tabuľke 2.

Tabuľka 3 zachytáva počet priznaných chorôb z povolania v odvetviach poľnohospodárstva, lesníctva a spracovania dreva v rokoch 2016 až 2022. Z údajov vyplýva, že nie všetky ochorenia identifikované ako potenciálne rizikové pri výrobe a využití biomasy boli v praxi aj oficiálne zaznamenané. Najčastejšie sa vyskytovali ochorenia spôsobené vibráciami a dlhodobým jednostranným zaťažením končatín. Alergické ochorenia a dermatózy boli počas sledovaného obdobia evidované spolu deväťkrát.

Zároveň sa ukazuje, že hoci medzinárodné výskumy potvrdzujú súvislosť medzi dlhodobým vystavením prašnému prostrediu a fytopatogénom a vznikom rakoviny dýchacích ciest, v slovenskom zdravotnom systéme zatiaľ takáto príčinná súvislosť nebola jednoznačne preukázaná. Dôvodom je najmä náročnosť dlhodobého monitorovania a nízka preukázateľnosť týchto vplyvov.

Tab. 2 Ekonomické hodnoty vybraných ochorení a úrazov z povolania podľa národnej legislatívy

Ochorenie	Bodová hodnota	Ekonomická hodnota (€)
Rakovina pľúc a dýchacích ciest (A)	1000	26 080
Alergie dýchacích ciest (B)	800	20 864
Choroby z jednostranného preťaženia končatín (C)	150	3 912
Jednostranná a obojstranná nedoslýchavosť (D - E)	120	3 129,6
Jednostranná a obojstranná hluchota (F - G)	500	13 040
Ochorenia z vibrácií (H)	400	10 432
Profesionálne dermatózy (I)	1000	26 080
Alergie dýchacích ciest (J)	1000	26 080
Choroby z jednostranného preťaženia končatín (K)	1700	44 336

Tab. 3 Evidované ochorenia v SR v sektore poľnohospodárstva, lesníctva a spracovania dreva v rokoch 2016-2022 a ich ekonomická hodnota v €

Rok/chor.	2022	2021	2020	2019	2018	2017	2016	Spolu	Náklady v €
B				2	2	1	2	7	146 048
C	5	12	14	15	11	15	7	79	309 048
E	1	1	5	1	2	2	2	14	182 560
H	1	5	4	16	15	15	9	65	1 695 200
I			1	1				2	88 672
Spolu	7	18	24	35	30	33	20	167	2 421 528

Z pohľadu ekonomickej záťaže pre sociálny systém predstavuje najvýraznejšie riziko ochorenia z vibrácií, ktorá sa podieľa až 70 % na celkových nákladoch spojených s uznanými chorobami z povolania v sektore. Naopak, ochorenia z dlhodobého jednostranného

preťaženia končatin, hoci patria medzi najčastejšie evidované, majú nižšie bodové ohodnotenie, a teda aj nižší ekonomický dopad – približne 12,7 % z celkových nákladov.

Treba však zdôrazniť, že tieto výpočty zohľadňujú len priame náklady spojené s odškodnením oficiálne uznaných chorôb z povolania. Nepriame náklady, ako sú výdavky na zdravotnú starostlivosť, dlhodobú liečbu či sociálne služby, nie je možné presne vyčíslieť, no predstavujú významnú dodatočnú záťaž. Okrem toho existuje aj skrytá ekonomická strata spôsobená prípadmi, keď pracovníci o uznanie choroby z povolania nepožiadali, alebo nebola preukázaná príčinná súvislosť s pracovným prostredím, čo je časté najmä pri onkologických ochoreniach.

Z pohľadu podnikov je dôležité, aby pri kalkulácii nákladov zohľadnili aj riziká spojené s vyplácaním odstupného a náhrad škody. Ak sú tieto riziká kryté poistením, premietajú sa do reálnych nákladov ako „poistné náklady“. V opačnom prípade však vzniká otázka: ako tieto riziká kvantifikovať a zahrnúť do cien produktov? Táto otázka tvorí aj jadro výskumu v našej štúdii. Navrhujeme preto zaviesť samostatnú nákladovú položku s názvom „kalkulačné riziká“, ktorá by zohľadňovala potenciálne výdavky na odstupné (tabuľka 4) a náhrady škody (tabuľka 5). Na ich výpočet boli použité údaje zo ŠÚSR a NCZI. Pri tvorbe výpočtových vzťahov a štruktúre kalkulácie sme vychádzali z odporúčaných metodických prístupov publikovaných v štúdiách: Král et al. (2018), Popesko, Papadaki (2015) a Potkány, Krajčírová (2015).

Tab. 4 Kvantifikácia kalkulačných rizík v prípade platenia odstupného

Počet uznaných chorôb z povolania v roku 2022	525 prípadov
Počet zamestnancov v národnom hospodárstve v roku 2022	2 580 000 zamestn.
Počet zamestnancov v priemyselnom sektore v roku 2022	516 616 zamestn.
Priemerná mzda v priemyselnom sektore v roku 2022	1 430 €/zamestnanca
<u>Argumenty pre kalkuláciu nákladovej položky "kalkulačné riziká":</u>	
- Podiel chorôb z povolania v národnom hospodárstve:	0,02%
- Podiel chorôb z povolania v odvetví priemyslu:	0,10%
<u>Návrh kvantifikácie nákladovej položky "kalkulačné riziká (KR_{odst})":</u>	
$KR_{odst} = (\text{počet zamestnancov v prevádzke} / 1000) \times 1\,430\,€ \times 10 \text{ mesiacov} \times 1,362^{**}$	
* pri počte 100 zamest. v prevádzke je kalkulačné riziko odstupného za rok sumu 1 950 €	
**príspevky zamestnávateľa do sociálnej a zdravotnej poisťovne	

Tab. 5 Kvantifikácia kalkulačných rizík v prípade vyplácania náhrady škody

Priemerný počet uznaných chorôb z povolania (2016-2022*)	3 962 prípadov
Celkový počet uznaných chorôb z povolania (2016-2022**)	167 prípadov
Ekonomická hodnota evidovaných ochorení (2016-2022*)	57 450 000 €
Ekonomická hodnota evidovaných ochorení (2016-2022**)	2 421 528 €
<u>Argumenty pre kalkuláciu nákladovej položky "kalkulačné riziká":</u>	
- Priemerný pomer ekonomickej hodnoty choroby z povolania na 1 prípad v národ. hospodárs. a v sektore poľnohospodárstva, lesníctva a drevospracujúceho priemyslu: 14 500 €/prípad	
<u>Návrh kvantifikácie nákladovej položky "kalkulačné riziká (KR_{CHP})":</u>	
$KR_{CHP} = (\text{počet zamestnancov v prevádzke} / 1000) \times 14\,500\,€^{***}$	
* v národnom hospodárstve ** v sektore poľnohospodárstvo, lesníctvo, spracovanie dreva	
*** pri počte 100 zamestnancov v prevádzke predstavuje kalkulačné riziko platenia chorôb z povolania/rok 1 450 €	

Je zrejmé, že výskyt chorôb z povolania a s tým spojené riziko finančnej náhrady sa bude v jednotlivých podnikoch líšiť. Preto sa naše modelové hodnoty, prepočítané na 100 zamestnancov (KR_{odst} : 1 950 €/rok, KR_{CHP} : 1 450 €/rok), nemusia zhodovať s reálnou situáciou v konkrétnych firmách. Z nášho pohľadu je však vhodnejšie kalkulovať s maximálnou možnou výškou rizika ako s rezervou na potenciálne budúce výdavky. V tomto prípade ide o sumy KR_{odst} : 19 500 €/rok a KR_{CHP} : 14 500 €/rok, spolu teda 34 000 € ročne.

Túto skutočnosť je potrebné zohľadniť pri tvorbe kalkulácie režijných nákladov. Využívame preto modelovú štruktúru nákladov, ktorá odráža reálne podmienky vybraného podniku v odvetví: priame náklady vo výške 800 000 € (plní aj funkciu rozvrhovej základne), režijné náklady 400 000 €, zisk 50 000 €, zisková prirážka (ROC) 4,17 % a prirážka režijných nákladov (PRN) 50 %. Na kvantifikáciu vplyvu ekonomických rizík na kalkuláciu finálnych produktov bol použitý všeobecný kalkulačný vzorec. Na výpočet rozdielu v prirážke režijných nákladov sme aplikovali vzorec 1.

$$\Delta PRN = (34\,000\,€ / 800\,000\,€) \times 100 = 4,25\,\%$$

Daná diferencia bude mať následne vplyv aj na diferenciu ziskovej marže ΔZM (2) a obe zmeny budú vzájomne vplývať na možnú zmenu predajnej ceny ΔPC (3):

$$\Delta ZM = \Delta PRN \times ROC / 100 \quad (2)$$

$$\Delta PC = \frac{\frac{\Delta PRN + \Delta ZM}{100} \times \text{rozvrhová základňa}}{\text{predajná cena}} \times 100 \quad (3)$$

Schematické znázornenie kalkulačného vzorca, ktorý alokuje potenciálne riziká vzniku chorôb z povolania, vychádza z tradičného princípu prirážkovej kalkulácie. Jeho postup aplikácie je nasledovný:

1. *Priame náklady (priamy materiál, mzdy, ostatné priame náklady)*
2. *+ Režijné náklady (% prirážky so započítaním ΔPRN)*
3. *= Celkové vlastné náklady*
4. *+ Zisková marža (so započítaním % PRN a ΔZM)*
5. *= predajná cena bez DPH (s určením ΔPC)*

Pri aplikácii modelových finančných údajov by započítanie týchto rizík viedlo k: zvýšeniu prirážky režijných nákladov (ΔPRN) o 4,25 %, nárastu ziskovej marže (ΔZM) o 0,177 % a k zmene predajnej ceny (ΔPC) o 2,83 %. To znamená, že v rámci kalkulácie je potrebné pripočítať 0.0283 eurocent na každé 1€ pôvodnej predajnej ceny. Treba však zdôrazniť, že kvantifikácia týchto ekonomických rizík je náročná a závisí od viacerých individuálnych faktorov – napríklad stupňa poškodenia zdravia, veku zamestnanca, jeho príjmu či dĺžky pracovného pomeru. Preto je potrebné chápať naše výpočty predovšetkým ako metodický návrh, ktorý je potrebné prispôbiť konkrétnym podmienkam jednotlivých podnikov.

4. ZÁVER A DISKUSIA

Efektívne hodnotenie a znižovanie rizík pre pracovníkov v sektore výroby a spracovania biomasy si vyžaduje dôkladné porozumenie vykonávaným činnostiam, identifikáciu súvisiacich rizík, analýzu pracovného režimu, správania zamestnancov a úrovne zabezpečenia ochrany zdravia a bezpečnosti pri práci. V oblasti výroby lesných štiepok je ochrana pred rizikami často nedostatočná, čo súvisí najmä s obmedzenými finančnými zdrojmi v lesníctve a nedostatkom kvalifikovanej pracovnej sily. Bezpečnostné predpisy a technologické normy sú v praxi často porušované – vedome aj nevedome. Závažným problémom je aj presun rizík z veľkých organizácií na dodávateľské firmy, pričom choroby z povolania môžu byť oficiálne priznané len zamestnancom. Osoby samostatne zárobkovo činné sú tak v tomto ohľade

legislatívne znevýhodnené. Nedostatočné personálne a finančné kapacity kontrolných orgánov navyše výrazne obmedzujú ich schopnosť vykonávať účinný dohľad. Zvýšenie bezpečnosti a ochrany zdravia pri práci si preto vyžaduje aj posilnenie informovanosti a motivácie samotných pracovníkov, aby aktívne dodržiavali predpisy a používali osobné ochranné pracovné prostriedky. V oblasti teplární na biomasu sa ukazuje, že technické predpisy pre ich výstavbu a prevádzku sú neúplné. Mnohé riziká spojené s ich fungovaním nie sú dostatočne známe ani samotným prevádzkovateľom, čo poukazuje na potrebu legislatívnych a systémových zmien. Na základe zistení tejto práce navrhujeme nasledovné odporúčania:

- Aktualizácia legislatívy: Revízia a doplnenie právnych predpisov týkajúcich sa výstavby a prevádzky teplární na biomasu s cieľom zabezpečiť, aby technické normy zodpovedali aktuálnym rizikám.
- Posilnenie kontrolných mechanizmov: Zvýšenie investícií do personálneho a finančného zabezpečenia kontrolných orgánov, čo umožní častejšie a efektívnejšie kontroly.
- Zvýšenie informovanosti a vzdelávania: Cílené vzdelávacie aktivity pre všetky zainteresované strany, zamerané na prevenciu a zvládanie rizík.
- Zavedenie systému výmeny informácií: Vytvorenie platformy na zber a zdieľanie informácií medzi prevádzkovateľmi, kontrolnými orgánmi a odbornou verejnosťou, ktorá by umožnila rýchlejšiu reakciu na nové výzvy.
- Podpora výskumu a inovácií: Investície do vývoja nových technológií a bezpečnostných riešení, ktoré by mohli zvýšiť efektivitu a bezpečnosť prevádzky teplární na biomasu.

Dané odporúčania môžu zvýšiť bezpečnosť, efektivitu a udržateľnosť v oblasti výroby a využitia biomasy, a zároveň k zodpovednejšiemu prístupu k ochrane zdravia pracovníkov.

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektov APVV-22-0001; APVV-21-0032; APVV-20-0118) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202). Táto štúdia bola spolufinancovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence.

ZDROJE LITERATÚRY

Act. No. 437/2004 The Act on Compensation for Pain and Compensation for Impairment of Social Performance and on the Amendment. Slovak Republic.

Act. No. 461/2003 The Act on Social Insurance.

Act. No. 311/2001 The Labour Code.

BARONTINI, M.; CROGNALE, S.; SCARFONE, A.; GALLO, P.; GALLUCCI, F.; PETRUCCIOLI, M., PESCIAROLI, L., PARI, L. Airborne fungi in biofuel wood chip storage sites. In: International Biodeterioration and Biodegradation 2014, 90, 17-22. DOI: 10.1016/j.ibiod.2013.12.020.

European Court of Auditors. (2018). Renewable energy for sustainable rural development: significant potential synergies, but mostly unrealized. Official Journal of the European Union, Special Report No 5/2018, Luxembourg, 102 p. URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018SA0005\(01\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52018SA0005(01)).

GEJDOŠ, M.; LIESKOVSKÝ, M. Overview of Health and Safety Risks in the Process of Production and Storage of Forest Biomass for Energy Purposes—A Review Energies, 2024, 17, 1064. DOI: 10.3390/en17051064.

GONZÁLEZ-GARCÍA, P.; ALONSO-SARDÓN, M.; RODRÍGUEZ-ALONSO, B.; ALMEIDA, H.; ROMERO-ALEGRÍA, A.; VEGA-RODRÍGUEZ, V.J.; LÓPEZ-BERNÚS, A.; MUÑOZ-BELLIDO, J.L.; MURO, A.; PARDO-LLEDÍAS, J.; BELHASSEN-GARCÍA, M. How Has the Aspergillosis Case Fatality Rate Changed over the Last Two Decades in Spain? In: Journal of Fungi 2022, 8(6): p.576. DOI: 10.3390/jof8060576.

Nariadenie vlády č. 356/2006 Z.z. o ochrane zdravia zamestnancov pred rizikami súvisiacimi s expozíciou karcinogénnym a mutagénnym faktorom pri práci.

Národné centrum zdravotníckych informácií. (2023): Choroby z povolania alebo ohrozenia chorobou z povolania v Slovenskej republike. URL: https://www.nczisk.sk/statisticke_vystupy/tematicke_statisticke_vystupy/choroby_povolania_alebo_ohrozenia_chorobou_povolania/Pages/default.aspx.

OTERO, C.; ARREDONDO, C.; ECHEVERRÍA-VEGA, A.; GORDILLO-FUENZALIDA, F. Penicillium spp. mycotoxins found in food and feed and their health effects. World Mycotoxin Journal 2020, 13(3), 323-343. DOI: 10.3920/WMJ2019.2556.

PAI, S.J.; CARTER, T.S.; HEALD, C.L.; KROLL, J.H. Updated World Health Organization Air Quality Guidelines Highlight the Importance of Non-antropogenic PM2.5. Environmental Science & Technology Letters 2022, 9, 501–506. <https://doi.org/10.1021/acs.estle.2c00203>.

Statistical Office of the Slovak Republic. Yearbook of industry of the SR 2022 Headquarters Bratislava. <https://slovak.statistics.sk/>

STEINBRINK, J.M.; MICELI, M.H. Mucormycosis. Infectious Disease Clinics of North America 2021, 35(2), 435-452. DOI: 10.1016/j.idc.2021.03.009.

doc. Ing. Miloš Gejdoš, PhD.: Katedre lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika, Email: gejdos@tuzvo.sk

prof. Ing. Marek Potkány, PhD.: Katedra ekonomiky, manažmentu a podnikania, Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika, Email: potkany@tuzvo.sk

Ing. Katarína Marcinek, PhD.: Katedra ekonomiky, manažmentu a podnikania, Drevárska fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika, Email: xmarcinekova@tuzvo.sk

LESNÉ ŠTIEPKY AKO ENERAGONOSIČ

TOMÁŠ GERGEL, MARIÁN SLAMKA

V príspevku sa zaoberáme energetickým zhodnotením lesnej dendromasy produkovanej vo forme palivových štiepok. Na ich efektívne využívanie vplýva viacero faktorov, predovšetkým vlhkosť. Aktuálne poznatky v danej problematike sme spracovali s využitím dostupnej odbornej literatúry. Tieto sú podkladom k ďalšiemu výskumu, ktorý realizujeme na pásovej sušiarňi typu KBD 3-4. Pozornosť je potrebné zamerať predovšetkým na oblasť skladovania štiepok, ktoré je kľúčové s pohľadom logistiky zásobovania a súvisiacich zdravotných rizík.

The paper deal with the energy recovery of forest dendromass produced in the form of fuel chips. Their effective use is influenced by several factors, especially humidity. We have processed current knowledge in this area using available literature. These are the basis for further research, which we are carrying out on a belt dryer type KBD 3-4. Attention should be focused primarily on the area of chip storage, which is crucial from the point of view of supply logistics and related health risks.

Kľúčové slová: štiepka, frakcia, sušenie, energia, dendromasa, skladovanie, riziká
Key words: chip, fraction, drying, energy, dendromass, storage, risks

1. ÚVOD

Drevná surovina je najvýznamnejšou obnoviteľnou surovinou na Slovensku. Vzhľadom na veľkú lesnatosť štátu, súčasne a predpokladané ťažbové možnosti dreva má domáca produkcia, spracovanie a využitie dreva veľký význam v oblasti ekológie, ekonomiky, zamestnanosti a rozvoja vidieckych oblastí. Vplyvom klimatickej zmeny a zmien v spôsobe obhospodarovania lesov, napr. nárast podielu prirodzenej obnovy, dochádza k postupnej zmene druhovej a kvalitatívnej štruktúry lesných porastov. V budúcom období sa predpokladá pokles podielu ihličnanov a tiež produkcie guľatinových sortimentov. V drevinovom zložení a sortimentovej štruktúre sa predpokladá rast disponibilných zdrojov energetického dreva na lesných pozemkoch. Zásoba a rozloha porastov drevín sa zvyšuje aj na nelesných pozemkoch. Z právneho hľadiska nie je jasná perspektíva ich budúceho využitia. Predpokladá sa rast domácich drevo-spracovateľských kapacít a tiež zvýšenie miery kaskádového využitia dreva.

Efektívne energetické využívanie drevných štiepok úzko súvisí s obsahom ich vlhkosti, ktorá negatívne ovplyvňuje ich výhrevnosť. Napríklad pri 60%-tnej vlhkosti sa výhrevnosť pohybuje na úrovni cca 6 MJ/kg, oproti tomu, po vysušení na 20 %-tnú vlhkosť je výhrevnosť približne 14 MJ/kg. Sušením drevnej štiepky tak môžeme zvýšiť jej výhrevnosť o viac ako 50 %. Účelom procesu sušenia je odstrániť voľnú a viazanú vodu v dreve. Pretože voda má vysoké hodnoty skupenského tepla (2250 kJ/kg), je jej odstránenie z dôvodu zvýšenie výhrevnosti paliva zásadné. Molekulárnu vodu pri bežnom sušení nie je možné odstrániť. Okrem prirodzeného sušenia sa na zníženie vlhkosti štiepok využívajú aj technologické zariadenia - sušiarne (Slamka a kol. 2021). Vstupom do procesu je drevná hmota s definovanou frakciou zvyčajne G30, G50, G100 (ISO 17225-4:2014). Samotné zloženie štiepky nemusí byť presne definované, môže byť z rôznych druhov drevín. Niektorí výrobcovia sušiarňí však vyžadujú, aby sušená štiepka neobsahovala prachové častice alebo piliny. Obvyklá vlhkosť čerstvej drevnej štiepky je od 50 % do 75 % v závislosti od dreviny, ročného obdobia a tiež spôsobu predchádzajúceho skladovania.

2. PALIVOVÁ LESNÁ ŠTIEPKA

Palivová lesná štiepka je druh biomasy, ktorá sa využíva ako ekologické tuhé palivo na energetické účely. Vyrába sa mechanickým spracovaním drevnej hmoty, najčastejšie z odpadového dreva pochádzajúceho z lesných prebierok, čistenia vodných tokov, zostatkov po

ťažbe či odpadu z drevospracujúceho priemyslu. Tento materiál zahŕňa aj kôru, listy a ihličie, čím sa odlišuje od tzv. bielej štiepky, ktorá je vyrobená z odkôrneného dreva.

Lesná štieпка sa vyrába pomocou špeciálnych strojov – štiepkovačov, skonštruovaných na štiepkovanie dreva. Sú určené na štiepkovanie celých stromov, alebo ich častí (ISO 6814:2000). Štiepkovače sa vyrábajú v rôznych prevedeniach a možno ich deliť podľa kategórie vozidla (napr. pracovný stroj nesený P_N), podľa maximálneho priemeru štiepkovaného dreva, podľa potrebného výkonu na výkon sekacieho ústrojenstva, alebo podľa prevedenia (diskové, bubnové).

Štieпка sa vyrába v rôznych frakciách, najčastejšie s rozmermi od 5 do 50 mm v dĺžke, šírke 5–30 mm a hrúbke 5–15 mm. Podľa normy ISO 17225-4:2014 sa rozlišujú triedy ako P16S, P31S, G30, G50. Tie sa následne používajú ako palivo v automatizovaných kotloch, ktoré umožňujú efektívne a čisté spaľovanie. Výhrevnosť štiepky závisí najmä od jej vlhkosti – suchá štieпка (do 30 % vlhkosti) má vyššiu energetickú hodnotu a je vhodná pre bežné kotly, zatiaľ čo mokrá štieпка (nad 30 %) sa využíva skôr v priemyselných zariadeniach.

Výhrevnosť štiepky závisí priamo od jej vlhkosti. Pri nulovej vlhkosti dosahuje až 18,5 GJ/t, pri 30 % vlhkosti je to približne 12,2 GJ/t, a pri 60 % vlhkosti len 6 GJ/t. Optimálna výhrevnosť pre spaľovanie je dosahovaná pri vlhkosti okolo 30 %, čo zodpovedá približne 12,8 MJ/kg.

Palivová lesná štieпка sa spaľuje v rôznych typoch zariadení – od malých automatických kotlov pre domácnosti až po veľké centrálné kotolne a biomasové elektrárne. Bežné technológie zahŕňajú:

- Spaľovanie na rošte – vhodné pre menšie výkony.
- Spaľovanie so spodným prívodom paliva – využívané v stredných výkonoch.
- Fluidné spaľovanie – používané vo veľkých priemyselných zariadeniach. Príkladom zariadení sú kotly HAMECH s výkonom od 50 kW do 1000 kW, ktoré dokážu spaľovať štieпку s vlhkosťou až do 55 % a zrnitosťou do 30 mm

Výhodou palivovej lesnej štiepky je jej ekologickosť – ide o obnoviteľný zdroj energie, ktorého výroba nevyžaduje dodatočnú energiu na lisovanie či sušenie. Navyše, spaľovanie štiepky je CO_2 neutrálne, keďže dreveniny počas rastu absorbujú rovnaké množstvo oxidu uhličitého, aké sa uvoľní pri ich spaľovaní. Vďaka tomu je lesná štieпка považovaná za udržateľnú alternatívu k fosílnym palivám.

3. SUŠENIE ŠTIEPKY

Metóda prirodzeného sušenia dendromasy, ktorá bola použitá vo väčšine uvádzaných prác, je z hľadiska zvýšenia energetickej účinnosti podľa Röser et al. (2011) dostatočná. Hoci Bennett (2011) a tiež Afzal et al. (2010) poukazujú na potrebu výberu vhodného ročného obdobia pre ťažbu a následné skladovanie, Filbakk et al. (2011) dosiahli uspokojivé výsledky aj vo vlhkých oblastiach Nórska, kde je väčšina malých teplární konštruovaná na spaľovanie drevených štiepok s obsahom vlhkosti do 35 %.

Okrem prirodzeného sušenia sa na zníženie vlhkosti štiepok využívajú aj technologické zariadenia – sušičky. Z hľadiska prevedenia môžu byť konvenčné sušičky bubnové rotačné, s fluidným lôžkom, vzduchové, kombinované bubnové a sušičky s pevným, alebo pohyblivým lôžkom (Yi a kol. 2020). Sušiacim médiom môže byť horúci vzduch, horúci vzduch zmiešaný s parou, alebo prehriata para (Haque a Somerville 2013). Napríklad pri pásových sušičkách sa ako médium zvyčajne využíva horúci vzduch s teplotou od 100 do 110 °C (Myllymaa a kol. 2018). Zvýšenie teploty média môže podľa výsledkov Haque a Somerville (2013) znížiť čas sušenia a zvýšiť jeho výkon, ale nie nevyhnutne aj náklady na sušenie. Vývoj rôznych typov

zariadení sa realizuje s cieľom znížiť energetickú náročnosť sušenia. Ekonomická výhodnosť pri použití sušičiek sa podľa Matiska (2014) dosahuje predovšetkým v systémoch, ktoré využívajú ako zdroj energie odpadové teplo z iného priemyselného procesu. Toto potvrdzujú aj Myllymaa a kol. (2018), výsledky ktorých naznačujú, že cena tepla má pozoruhodný vplyv na ekonomiku sušenia. Proces sušenia štiepok na novom prototypu rotačnej sušičky analyzovali Del Giudice a kol. 2019. Rotačné sušičky majú podľa autorov nízke náklady na údržbu a potrebujú až o 30 % menej špecifickej energie na tento proces. Na konci procesu sušenia zistili 17 %-tné zníženie vlhkosti pri štiepkach z topoľového dreva a 31 % pri agáte.

3. 1. Technológia sušenia štiepky

Vstupom do procesu sušenia je drevná hmota s definovanou frakciou, podľa normy ISO zvyčajne G30, G50, G100 (ISO 17225-4:2014). Samotné zloženie štiepky nemusí byť presne definované a obsahuje štiepku z rôznych druhov drevín. Výrobcovia sušičiek drevnej štiepky vyžadujú aby sušená štiepka neobsahovala prachové častice alebo piliny. Vlhkosť čerstvej drevnej štiepky je od 50 % do 75 % v závislosti od dreviny a ročného obdobia a spôsobu skladovania. Účelom procesu sušenia drevnej štiepky je odstrániť voľnú a viazanú vodu v dreve. Molekulárnu vodu pri bežnom sušení nie je možné odstrániť. Pretože voda má vysoké hodnoty skupenského tepla 2250 kJ/kg je odstránenie vody v palive zásadné, pre zvýšenie jeho výhrevnosti.

Hlavnou motiváciou sušenia dreva alebo štiepky je zvýšenie výhrevnosti a zlepšenie samotného procesu horenia. Vlhkosť štiepky alebo všeobecne dreva má na výhrevnosť zásadný vplyv. Pri vlhkosti 60% sa výhrevnosť pohybuje cca 6MJ/kg, oproti tomu, po vysušení na 20 % vlhkosť je výhrevnosť dreva cca 14MJ/kg. Pre porovnanie, výhrevnosť absolútne suchého dreva je v rozmedzí 17-20MJ/kg podľa druhu dreviny. Môžeme konštatovať, že po vysušení drevnej štiepky môžeme zvýšiť jej výhrevnosť o viac ako 50 %. Pri využití odpadového tepla alebo pary (ako vedľajší produkt teplárni, elektrárni, bioplynových staníc) s teplotu 60 °C až 90 °C ide o efektívne zhodnotenie, ktoré zvyšuje efektívnosť priemyslu.

3.2 Sušiareň Katres KBD 3-4

V rámci výskumnej témy Energetické využitie biomasy infraštruktúrneho projektu Centrum excelentnosti lesnícko-drevárskeho komplexu LignoSilva, bolo predmetom technologického riešenia aj vybudovanie sušiarne drevených štiepok na BTP Stráž. Výsledným riešením je pásová sušiareň Katres KBD 3-4 (Obr.1).



Obr. 1. Pásová sušiareň Katres KBD 3-4 vybudovaná v rámci BTP Stráž (Gergel' 2024)

Pásová sušiareň Katres KBD 3-4 je určená na sušenie pilín, alebo drevnej štiepky. Skladá sa zo vstupnej sekcie pre surovinu, sušiaceho tunela s pásom, podtlakového systému vzduchu, pohonu, zariadenia na napínanie pásu a zariadenia pre výstup usušeného materiálu. K základným dielom patrí tiež systém riadenia a protipožiarneho zabezpečenia, vrátane radiaceho velínu s rozvodnou radiacou skriňou. Systém je možné ovládať na diaľku cez osobný počítač (Obr.2). Príslušenstvom sušiarne KBD 3-4 je zásobník sušeného materiálu, šnekový dopravník zabezpečujúci prísun materiálu do vstupnej sekcie sušiarne a šnekový dopravník odoberajúci vysušený materiál zo zariadenia pre výstup materiálu. Zdrojom tepla na sušenia je ohriata kvapalina (glycol), ktorá sa pripravuje v plynovom kotly. Primárnym zdrojom energie bude skvapaľnený zemný plyn – propán. Štiepka pripravená na sušenie sa do zásobníka naplní pomocou šmykového nakladača. Vysušená drevná štiepka sa zhromažďuje v oceľovom kontajneri, ktorý sa odváža pomocou nákladného automobilu. Príslušenstvom sušiarne KBD 3-4 je zásobník sušeného materiálu, šnekový dopravník zabezpečujúci prísun materiálu do vstupnej sekcie sušiarne a šnekový dopravník odoberajúci vysušený materiál zo zariadenia pre výstup materiálu. Zdrojom tepla na sušenia je ohriata kvapalina (glycol), ktorá sa pripravuje v plynovom kotly. Primárnym zdrojom energie je skvapaľnený zemný plyn – propán.

3.3 Hlavné technické parametre

V nasledujúcej Tab 1. sú uvedené technické parametre inštalovanej pasovej sušiarne. Produkt určený na sušenie: drevná štiepka (voľne ložená, nepremrznutá, bez prachu a hrubých častíc)

Tab. 1. Hlavné technické parametre sušiarne KBD 3-4 od spoločnosti Katres

Vstupná vlhkosť materiálu	50 % obsah vody
Výstupná vlhkosť materiálu	15 % obsah vody
Elektrický príkon	celkom cca. 15 kW
Sypná hmotnosť materiálu	ca. 248 kg/m ³ (vlhký substrát)
Parametre vonkajšieho vzduchu	Teplota -10° C, rel. vlhkosť 70 %, bez prachu
Typ výmeníka voda-vzduch	Lamelový - nepriamy
Tepelné médium	Voda
Menovitý tepelný výkon zdroja	260 kW, -10°C
Sušiacia teplota vzduchu	max. 70° C
Predĺženie materiálu na páse	Rozsah doby zdržania 20 až 50 minút
Tlakový vzduch pre mokré čistenie	nie
Voda pre mokré čistenie	ne

Sušiareň KBD 3-4 je vybavená rôznymi vstupnými a výstupnými otvormi, ktoré sú vybavené pevnými uzávermi a oknami, ktoré slúžia k prevádzaniu kontroly a údržby. Potrebná rýchlosť sušiaceho pásu, resp. otáčok prevodového elektromeru sa regulujú pomocou frekvenčného meniča. Nastaviteľnými otáčkami sa tak reguluje doba priechodu sušeného materiálu sušiarňou a tým sa ovplyvňuje aj konečný obsah vody vo vystupujúcom materiáli. Konečný obsah vody stanovuje kontrolné zariadenie, vlhkomer, vo výstupe usušeného materiálu. Ohrev vzduchu sa zabezpečuje tepelnými výmenníkmi „vzduch-voda“, ktoré sú umiestnené v hornej časti sušiarne.

4. SKLADOVANIE ŠTIEPKY

Dendromasa na energiu sa skladuje ako bežná zásoba paliva na určité obdobie, alebo väčšia zásoba z dôvodu znižovania jej vlhkosti. Vlhkosť paliva je jedným z hlavných faktorov, ktoré rozhodujú o výhrevnosti. So stúpajúcou vlhkosťou výhrevnosť štiepok klesá a naopak rastie objem spalín (Trenčiansky a kol. 2007). Pri výskume v tejto oblasti autori hodnotili a analyzovali rôzne spôsoby skladovania na otvorených, alebo krytých skládkach a to v závislosti od objemov hromád, druhu dreveniny a časti stromu, z ktorej boli štiepky vyrobené, vlhkosti, veľkosti a vhodnosti jednotlivých frakcií, dĺžky skladovania, ročného obdobia a v neposlednom rade od klimatických podmienok v oblastiach konkrétnych prevádzok. Niektorí autori, ako napr. Suchomel a kol. (2014) sa zaoberali hodnotením súvisiacich zdravotných a bezpečnostných rizík pre človeka.

Manzone a Balsari (2016) hodnotili kvalitu skladovaných štiepok vyrobených z topola. Pri hodnotení dynamiky skladovania sa zisťoval obsah vlhkosti a strata sušiny. Obsah vlhkosti 18 % a priemerné straty sušiny 10 % na konci skladovacieho obdobia vo všetkých objemoch (35 a 70 m³), tvaroch (kužeľový, lichobežníkový) a hustote hromád naznačili, že skladovací systém je možné prispôbiť rôznym potrebám tepelných staníc. Experiment však prebiehal v optimálnych podmienkach pre sušenie. Hofmann a kol. (2018) odporúčajú z dôvodu zníženia kvality štiepok v podmienkach strednej Európy využívať najmä v zimnom období kryté skládky, alebo znížiť dobu skladovania na minimum. Skladovanie nezoštiepkovaných smrekových poťažbových zvyškov, ktoré boli v rámci experimentu tiež hodnotené, sa neukázalo z hľadiska zachovania energetického potenciálu ako výhodné, no prejavilo sa znížením obsahu popola. Vo všeobecnosti sa však hmota určená na štiepkovanie odporúča najprv ponechať na prirodzené sušenie od troch do šiestich mesiacov (Simanov 1995, Trenčiansky a kol 2007).

Fyzikálno-chemické vlastnosti troch frakcií štiepok (veľké, stredné, jemné) počas siedmich mesiacov skladovania na voľných skládkach hodnotili Pecenka a kol. (2018). Najlepšie vlastnosti pri energetickom použití vykazovala stredná frakcia s obsahom vlhkosti 26 % a stratami sušiny iba 17 %. Jemná frakcia vykazovala z hľadiska energetického využitia najhoršie vlastnosti. Diskutuje sa o možnostiach využívania jemných frakcií štiepok ako suroviny vhodnej do rastlinných substrátov. V našich podmienkach sa energetické štiepky dodávajú v dvoch triedach zrnitosti (jemnozrnné, hrubozrnné), pričom by podiel častíc menších ako 5 mm v oboch triedach nemal presiahnuť 20 % (Trenčiansky a kol. 2007). Facello a kol (2013) zistili, že zvýšený výskyt malých (8 – 3 mm) a jemných (menej ako 3 mm) frakcií a paralelné zníženie výskytu veľkých (45 – 9 mm) frakcií štiepok pri ich výrobe z agátového a gaštanového dreva spôsobilo opotrebovanie nožov sekačky. Opotrebovanie sa súčasne prejavilo aj na 1,4 – 2,8-násobnej spotrebe paliva bazového stroja.

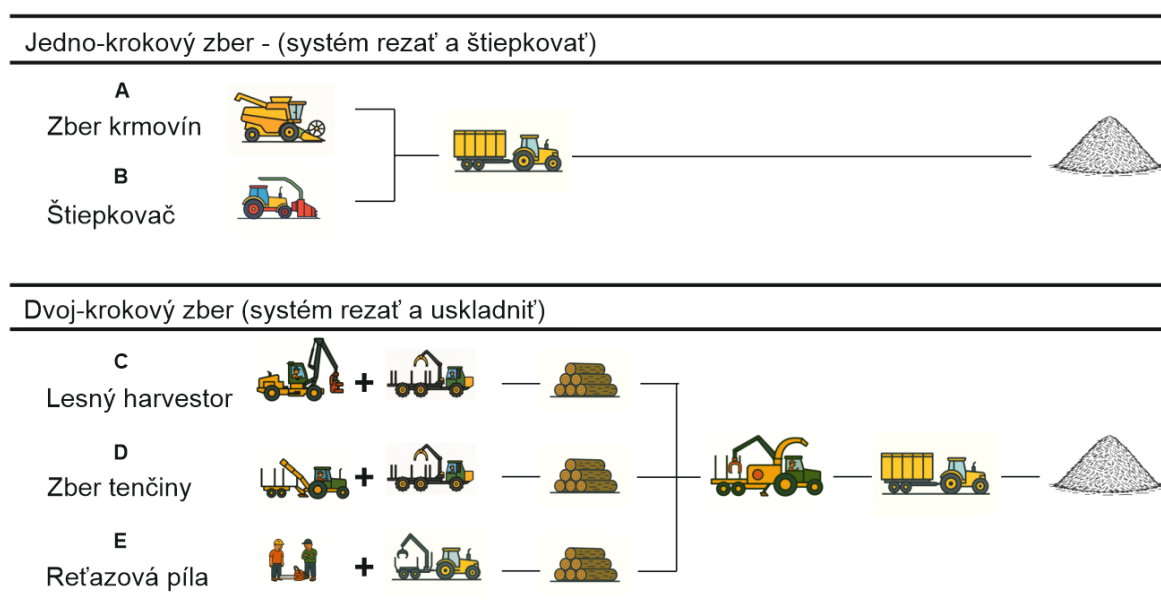
Vplyv skladovania na kvalitu vrbových štiepok z energetických plantáží skúmali Krzyżaniak a kol. (2016). Skladovanie prebiehalo s využitím rôznych druhov krytov (krytá skládka, priepustné fólie), kontrolná plocha bola nekrytá. Energetický potenciál paliva sa po roku skladovania zvýšil v priemere o 10 %, pričom najhoršie parametre boli zaznamenané pri nekrytej hromade. Hlavnou hnacou silou sušenia je podľa Pari a kol. (2017) teplota vzduchu. Častou otázkou je aj optimálna dĺžka skladovania. Výsledky štúdie Pari a kol. (2017), ktorí sa zaoberali skladovaním štiepok pochádzajúcich z priemyselných topoľových plantáží naznačujú, že dlhodobé skladovanie topoľových štiepok nie je vhodné bez ohľadu na to, o ktorú časť stromu sa jedná (kmeň, konáre, koruna). V najhorších prípadoch sa zaznamenala strata sušiny až 50 %. Je potrebné upozorniť na skutočnosť, že tento konkrétny výskum prebiehal v mediteránnej oblasti. Vplyv dlhodobého skladovania (15 mesiacov) na kvalitu smrekových a jedľových štiepok uložených v nekrytých hromadách s výškou 4 m sledovali v podmienkach stredného Slovenska Gejdoš a kol. (2015). Najvýznamnejšie zníženie vlhkosti a zvýšenie

výhrevnosti od začiatku sledovania zistili vo výške 1 m. Vzorky odobraté z výšky 3 m vykazovali po 15 mesiacoch nárast obsahu vlhkosti, pokles výhrevnosti a nárast obsahu popola. Burrati a kol. (2019) zisťovali počas šiestich mesiacov chemické a fyzikálne vlastnosti štiepok vyrobených z borovicového dreva, pričom sa analyzoval vplyv rôznych krytov (paropriepustný, vodotesný, drevený). Výsledky štúdie ukázali, že nekryté skladovanie je z dôvodu nárastu obsahu popola vhodné len ako krátkodobé (max. 2 mesiace) a na dlhodobejšie je možné využiť paro-priepustné fólie.

Hudák a kol. (2016) za účelom stanovenie relatívnej vlhkosti dendromasy, spaľného tepla, výhrevnosti a obsahu popola hodnotili tri druhy drevín (*Salix viminalis* a 2 klony topoľa) vypestovaných na plantážach RRD. Uvádzajú, že na základe empiricky stanovených hodnôt bol najnižší obsah popola u vrby, pričom priemerná hodnota nespáliteľných častí predstavovala 1,58%. Vyššiu popolnatosť energetických štiepok analyzovaných klonov vrb a topoľov podľa autorov spôsoboval zvýšený podiel juvenilnej kôry.

Lenz a kol. (2015) hodnotili počas deviatich mesiacov palivové topoľové štiepky uskladnené v hromadách s výškou 3,5 m. V porovnaní jemnozrnnej a hrubozrnnej frakcie zistili priaznivejšie vlastnosti pri hrubozrnných štiepkach, ktoré dosiahli maximálny povolený obsah vlhkosti (40%) už po 3,5 mesiaci skladovania (jemnozrnné po 6,5 mesiacoch). Autori považujú pestovanie RRD na poľnohospodárskej pôde po ekonomickej a environmentálnej stránke za perspektívnu možnosť produkcie bioenergie. Tri hromady štiepok s rôznou frakciou (malé, stredné a veľké) počas siedmich mesiacov skladovania, porovnávali z hľadiska skladovacích vlastností a fyzikálno-chemických parametrov Pecenka a kol. (2018). Z hľadiska energetického využitia vykazovali najhoršie vlastnosti malé štiepky s vlhkosťou 34% a stratami sušiny 19%.

Veľkosť frakcie, ale aj ďalšie vlastnosti štiepok možno ovplyvniť použitím rôznych technológií ich výroby. Pri ťažbe sa využívajú dva spôsoby, pričom je rozdiel v tom, či sú stromy štiepkované priamo pri ťažbe, ale sa ponechajú v celku na prirodzené sušenie (Obr. 2). Podľa Pecenka a kol. (2020) sa pri štiepkovaní suchých, prípadne zamrznutých stromov zvyšuje energetická náročnosť výrobného procesu.



Obr. 2. Rôzne postupy výroby palivových drevných štiepok podľa Pecenka a kol. (2020)

Skladovanie topoľových štiepok z plantáže RRD s využitím riadenej ventilácie so studeným vzduchom testovali Lühr a kol. (2021). Experiment dokázal, že riadená ventilácia zo

studeným vzduchom umožňuje sušenie v jarnom období s nízkymi stratami a zabraňuje nárastu teploty v hromade. Strata sušiny sa obmedzila na 11 % a zisk z vyrobenej tepelnej energie predstavoval viac ako 6-násobok elektrickej energie potrebnej na prevádzku dúchadla. Modelovaním a simulovaním sušenia vrbových palivových štiepok s využitím umelých neurónových siet sa zaoberali Francik a kol. (2018). Výsledkom práce boli modely popisujúce zmeny obsahu vody, teploty a hmotnosti štiepok a tieto boli následne využité na simuláciu procesu sušenia. Metóda podľa autorov umožňuje definovať optimálne parametre sušenia štiepok (v uvedenom prípade vrbových) charakterizovaných rôznym obsahom vlhkosti.

V súvislosti so skladovaním palivových štiepok sa skúmali aj súvisiace zdravotné a bezpečnostné riziká pre človeka. Podľa Suchomel a kol. 2014 huby, ktoré sa tvoria na uskladnených hromadách predstavujú pre zdravie človeka vysoké potencionálne riziko. Na hromadách bukových, osikových a smrekových štiepok so základňou 4 x 4 m sa vo výške 0,5 m, 1 m a 1,5 m nad zemou zbierali údaje o teplote, relatívnej vlhkosti a počte kolónií mikroskopických húb. Vo vzorkách bolo celkovo zistených 5 druhov a 8 rodov húb. Až 34 druhov mikroskopických húb na dlhodobo skladovaných hromadách palivových drevných štiepok zistili Lieskovský a kol. 2017. Podľa autorov 33 z nich môže predstavovať riziko pre človeka. Podľa autorov výskum potvrdil, že ak je doba skladovania dlhšia ako 1 rok, riziká pre zdravie človeka sa vplyvom spóro-tvorných patogénov húb zvyšujú. Alakoski a kol. (2016) upozorňujú na produkciu plyných emisií, skleníkových plynov, ktoré sa počas uvedených procesov produkujú. Z hľadiska ľudského zdravia preto môže byť nebezpečné aj skladovania v uzavretých priestoroch.

5. DISKUSIA

Výsledky prezentované v článku potvrdzujú, že palivová lesná štieпка predstavuje významný obnoviteľný zdroj energie, ktorého efektívne využitie závisí najmä od správneho manažmentu vlhkosti, frakcie a skladovania. V súlade s literatúrou (napr. Dzurenda et al 2021; Bond et al, 2016; Slamka a kol. 2021; Garaba 2020) sa ukazuje, že sušením štiepy možno dosiahnuť výrazné zvýšenie výhrevnosti – až o viac ako 50 %, čo má zásadný vplyv na energetickú efektívnosť spaľovacích zariadení.

Diskutované technológie sušenia, ako napríklad pásová sušiareň Katres KBD 3-4, predstavujú moderné riešenia, ktoré umožňujú zníženie vlhkosti štiepy na požadovanú úroveň (cca 15 %), čím sa zvyšuje jej výhrevnosť a zároveň znižuje objem spalín. Využitie odpadového tepla z priemyselných procesov ako zdroja energie pre sušiarne je ekonomicky výhodné a zároveň ekologicky udržateľné, čo potvrdzujú aj štúdie Matiska (2014) a Myllymaa a kol. (2018).

Z hľadiska skladovania sa ukazuje, že frakcia štiepy má významný vplyv na kvalitu paliva počas skladovania. Stredná frakcia vykazuje najlepšie parametre z hľadiska vlhkosti a straty sušiny (Pecenka a kol. 2018), zatiaľ čo jemná frakcia je najmenej vhodná pre energetické využitie. Výskumy zároveň upozorňujú na zdravotné riziká spojené s dlhodobým skladovaním, najmä v dôsledku tvorby mikroskopických húb (Suchomel a kol. 2014; Lieskovský a kol. 2017), čo je dôležité z pohľadu bezpečnosti práce a ochrany zdravia.

Vzhľadom na klimatické podmienky Slovenska je vhodné preferovať kryté skládky alebo minimalizovať dobu skladovania, najmä počas zimného obdobia (Hofmann a kol. 2018). Experimenty s riadenou ventiláciou (Lühr a kol. 2021) ukazujú potenciál pre optimalizáciu skladovacích procesov s nízkymi stratami sušiny.

Je možné konštatovať, že efektívne využitie palivovej lesnej štiepy si vyžaduje komplexný prístup zahŕňajúci správnu voľbu frakcie, technológiu sušenia, spôsob skladovania a zohľadnenie zdravotných rizík. Ďalší výskum by sa mal zamerať na optimalizáciu týchto

procesov v podmienkach strednej Európy, ako aj na vývoj nízkoenergetických sušiacich technológií a bezpečnostných štandardov pre skladovanie biomasy.

6. ZÁVER

Výroba palivových drevných štiepok pozostáva z radu pracovných operácií a procesov, do ktorých patrí stínka stromov, približovanie dreva, štiepkovanie, doprava, skladovanie a sušenie (Oravec a Slamka 2018). Účelom procesu sušenia je odstrániť voľnú a viazanú vodu v dreve, pretože efektívne energetické využívanie drevných štiepok úzko súvisí s obsahom ich vlhkosti. Vlhkosť významne ovplyvňuje ich výhrevnosť, pričom sušením ju môžeme zvýšiť až o viac ako 50 %. Dôležité je poukázať aj na ďalšiu pridanú hodnotu sušenia vplývajúcu na možnosť dlhodobého skladovania drevných štiepok. Ekonomickú efektívnosť procesu sušenia možno dosiahnuť využitím odpadového tepla.

Dendromasa na energetické využitie býva najčastejšie upravená vo forme energetických štiepok. Tieto majú oproti drevu v klasickom stave tú výhodu, že rýchlejšie schnú a sú vhodné aj pre automatickú prevádzku. Naopak, za nevýhodu môžeme považovať ich relatívne krátkodobú skladovateľnosť, pretože jedným z typických znakov skladovania je napríklad v dôsledku pôsobenia vonkajších vplyvov prostredia alebo mikroorganizmov zníženie ich energetického potenciálu. V súčasnosti sa na zabezpečenie efektívneho využívania tejto obnoviteľnej suroviny skúmajú a testujú rôzne metódy sušenia. V súvislosti so skladovaním palivových štiepok je potrebné brať do úvahy aj potenciálne riziká pre zdravie človeka.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená z kontraktu NLC s MPRV SR v rámci projektu výskumného zámeru NLC 2022-2026 Digiwood. Táto štúdia bola spolufinancovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence.

ZDROJE LITERATURY

AFZAL, M., BEDANE, A., SOKHASANJ, S., & MAHMOOD, W. Storage of comminuted and uncomminuted forest biomass and its effect on fuel quality. *Bioresources* 2010, 5, 55–69.

ALAKOSKI, E., JÄMSÉN, M., AGAR, D., TAMPIO, E., & WIHERSAARI, M. From wood pellets to wood chips: Risks of degradation and emissions from the storage of woody biomass – A short review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2016, 54, 376–383. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.021>

BENNETT, F. Energy efficient air drying of biomass (woodchips, bark, saw dust, forest waste, & bagasse). TAPPI BIOPRO Conference. 2011. Retrieved from <https://www.tappi.org/content/Events/11BIOPRO/24.4Bennet.pdf>

BOND, B. H., & ESPINOZA, O. A decade of improved lumber drying technology. *Current Forestry Reports* 2016, 2(2), 106–118. <https://doi.org/10.1007/s40725-016-0034-z>

BURRATI, C., ORESTANO, F. C., COTANA, F., QUAGLIETTA, P., ANTONELLI, P., & BARBANERA, M. Impact of storage on energy performance of lario pine wood chips: A case study in Italy. *Industrial Crops and Products* 2019, 131, 301–306.

DEL GUIDICE, A., ACAMPORA, A., SANTANGELO, E., PARI, L., BERGONZOLI, S., GUERRIERO, E., PETRACCHINI, F., TORRE, M., PAOLINI, V., & GALLUCI, F. Wood chips drying through the using of a mobile rotary dryer. *Energies* 2019, 12(9), 1590.

DZURENDA, L., KONOPKA, A., BARAŃSKI, J., ORŁOWSKI, K. A., & MIKIELEWICZ, D. Mathematical model of the energy consumption calculation during the pine sawn wood drying process. *Wood Science and Technology* 2021, 55(4), 741–755. <https://doi.org/10.1007/s00226-021-01276-8>

FACELLO, A., CAVALLO, E., MAGAGNOTTI, N., PALETTO, G., & SPINELLI, R. The effect of knife wear on chip quality and processing cost of chestnut and locust fuel wood. *Biomass and Bioenergy* 2013, 59, 468–476.

FILBAKK, T. Air drying of wood chips: The influence of chip size, ambient temperature and air velocity on drying performance. *Silva Fennica* 2011, 45(1), 1–14. <https://doi.org/10.14214/sf.5659>

FRANCIK, S., ŁAPCZYŃSKA-KORDON, B., FRANCIK, R., & WÓJCIK, A. Modeling and Simulation of Biomass Drying Using Artificial Neural Networks. In Mudryk, K., & Werle, S. (Eds.), *Renewable Energy Sources: Engineering, Technology, Innovation* 2018, pp. 561–568. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-72371-6_56

GARBA, M. U. Physical conversion of biomass: Dewatering, drying, size reduction, densification. In *Handbook of Biomass Conversion*, 2020. Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-6772-6_37-1

GEJDOŠ, M., LIESKOVSKÝ, M., SLANČÍK, M., NĚMEC, M., & DANIHELOVÁ, Z. Storage and fuel quality of wood chips. *BioResources* 2015, 10(3), 5544–5553.

HAQUE, N., & SOMERVILLE, M. Techno-Economic and Environmental Evaluation of Biomass Dryer. *Procedia Engineering*, 2013, 56, 650–655.

HOFMANN, N., MENDEL, T., SCHULMEYER, F., KUPTZ, D., BORCHERT, H., & HARTMANN, H. Drying effects and dry matter losses during seasonal storage of spruce wood chips under practical conditions. *Biomass and Bioenergy* 2018, 111, 196–205. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.03.022>

HUDÁK, M., LIESKOVSKÝ, M., & GEJDOŠ, M. Možnosti pestovania rýchlorastúcich drevín v podmienkach Liptova. *Acta Facultatis Forestalis* 2016, 58(1), 101–108.

International Organization for Standardization. ISO 17225-4: Solid biofuels — Fuel specifications and classes — Part 4: Graded wood chips. 2014

KRZYŻANIAK, M., STOLARSKI, M. J., NIKSA, D., TWORKOWSKI, J., & SZCZUKOWSKI, S. Effect of storage methods on willow chips quality. *Biomass and Bioenergy* 2016, 92, 61–69.

LENZ, H., IDLER, CH., HARTUNG, E., & PECENKA, R. Open-air storage of fine and coarse wood chips of poplar from short rotation coppice in covered piles. *Biomass and Bioenergy* 2015, 83, 269–277.

LIESKOVSKÝ, M., GEJDOŠ, M., MESSINGEROVÁ, V., NĚMEC, M., DANIHELOVÁ, Z., & MORAVČÍKOVÁ, V. Biological risk from long-term storage of wood chips. *Polish Journal of Environmental Studies* 2017, 26(6), 2633–2641.

LÜHR, C., PECENKA, R., LENZ, H., & HOFFMANN, T. Cold air ventilation for cooling and drying of poplar wood chips from short rotation coppice in outdoor storage piles in Germany. *Biomass and Bioenergy* 2021, 146, 105976.

MANZONE, M., & BALSARI, P. Poplar woodchip storage in small and medium piles with different forms, densities and volumes. *Biomass and Bioenergy* 2016, 87, 162–168.

MATISKO, P. Sušičky dřevní štěpky. Dostupné na: www.cyberma.cz/susicky-drevnistepky. 2014. [Posledný prístup: 15.5.2014].

MYLLYMAA, T., HOLMBERG, H., & ATHILA, P. Techno-economic evaluation of biomass drying in moving beds: The effect of drying kinetics on drying costs. *Drying Technology*, 2018, 37(10), 1201–1214.

PARI, L., SCARFONE, A., SANTANGELO, E., GALLUCI, F., SPINELLI, R., JIRJIS, R., DEL GIUDICE, A., BARONTINI, M. Long term storage of poplar chips in Mediterranean environment. *Biomass and Bioenergy* 2017, 107, 1–7.

PECENKA, R., LENZ, H., & IDLER, CH. Influence of the chip format on the development of mass loss, moisture content and chemical composition of poplar chips during storage and drying in open-air piles. *Biomass and Bioenergy* 2018, 116, 140–150.

RÖSER, D., MOLA-YUDEGO, B., SIKANEN, L., PRINZ, R., GRITTEN, D., EMER, B., VÄÄTÄINEN, K., & ERKKILÄ, A. Natural drying treatments during seasonal storage of wood for bioenergy in different European locations. *Biomass and Bioenergy* 2011, 35(10), 4238–4247.

SLAMKA, M., GERGEL, T., ORAVEC, M., & SCHWARZ, M. Technologické zariadenia na sušenie palivových drevných štiepok. In *Aktuálne otázky politiky a ekonomiky lesného hospodárstva*, 2021, pp. 141–147. Zborník z vedeckej konferencie, Zvolen.

SIMANOV, V. Energetické využívaní dříví. Olomouc: Terrapolis. 1995.

TRENČIANSKY, M., & LIESKOVSKÝ, M., & ORAVEC, M. Energetické zhodnotenie biomasy. NLC Zvolen. 2007.

YI, J., LI, X., HE, J., & DUAN, X. Drying efficiency and product quality of biomass drying: A review. *Drying Technology* 2020, 38(15), 2039–2054.

Ing. Tomáš Gergel, PhD.: Národné lesnícke centrum, Sekcia pre vedu a výskum, T.G. Masaryka 22, Zvolen 960 01. Email: tomas.gergel@nlcsk.org

Ing. Marián Slamka, PhD.: Národné lesnícke centrum, Sekcia pre vedu a výskum, T.G. Masaryka 22, Zvolen 960 01. Email: marian.slamka@nlcsk.org

TESTOVANIE VÝKONNOSTI AKUMULÁTOROVÝCH PRENOSNÝCH REŤAZOVÝCH PÍL PRI ZBERE BIOMASY

DOMINIK GRETSCH

The article deals with testing the performance of two accumulator portable chainsaws (Husqvarna 536 Li xp and Stihl MSA 220 c-bq) in biomass harvesting. The cross-sectional area (cm²) and the maximum sawing time (s.) were evaluated, per fully charged accumulator. Performance testing was carried out on the area of a clone archive of fast-growing poplars. Time-lapse photography was provided by two cameras. Thicknesses at the cut points were measured simultaneously with sawing and subsequently converted to the cross-sectional area. Due to the difference in the capacity of the tested accumulators, the performance was also converted to 1 Ah of accumulator capacity to objectify the results. The results showed significant differences in the performance of individual accumulator chainsaws. Despite these differences, both chainsaws extracted almost the same amount of biomass, namely approximately 2.9 tons.

Kľúčové slová: akumulátorová prenosná reťazová píla, akumulátor, klon, výkonnosť

Key words: accumulator portable chainsaw, accumulator, clone, performance

1. ÚVOD

Prenosné reťazové píly (PRP) sú stále najbežnejšie používaným nástrojom pri ťažbe a spracovaní stromov v mnohých oblastiach sveta (Neri et al. 2022). Je to spôsobené najmä vďaka ich relatívne nízkym prevádzkovým nákladom a možnosťou práce aj v ťažko dostupnom teréne (Rukat et al. 2020). Práca s PRP je fyzicky náročná činnosť. Z pohľadu ohrozenia bezpečnosti a zdravia obsluhy v lesníckom sektore, patria medzi najrizikovejšie práce práve operácie súvisiace s ťažbou dreva (Suchomel et al. 2011 (a)).

V osobitných podmienkach lesníctva v Slovenskej republike (terénne, ekonomické, sociálne podmienky a kvalifikačné predpoklady) sa 85 % lesnej ťažby vykonáva pomocou PRP (Gejdoš et al. 2022). PRP však nachádzajú svoje využitie aj pri zbere úrody z energetických porastov a plantáží rýchlorastúcich drevín, najmä v polomechanizovaných systémoch (Latterini et al. 2022).

V súčasnosti sa okrem tradičných spaľovacích motorov používajú v PRP aj iné typy pohonných jednotiek ako sú napríklad elektrické, vrátane akumulátorových alebo pneumatické (Dabrowski 2020). Elektrické PRP sú konštrukčne jednoduchšie, tichšie a majú nižšiu poruchovosť (Suchomel et al. 2011 (b)). Na druhej strane je organizácia práce s nimi o niečo náročnejšia (Simanov, Bernacký 2018). Rozdielny systém štartovania medzi spaľovacími a elektrickými motormi umožňuje bezpečnejšie a pohodlnejšie používanie elektrických variant (Neri et al. 2018).

Okolo roku 2010 sa začali na našom trhu objavovať akumulátorové PRP (Simanov, Bernacký 2018), ktoré využívajú pre svoj pohon elektrickú energiu uloženú v akumulátoroch (Túma 2017). V súčasnosti je veľkým trendom používanie akumulátorových PRP najmä v oblasti správy mestskej zelene, kvôli ochrane životného prostredia a zdravia pracovníkov. Akumulátorové PRP sú schopné znížiť množstvo špecifických rizík vznikajúcich pre ich obsluhu, vďaka čomu by boli vhodné na používanie aj v lesníctve, kde sú riziká pri práci vysoké a je dôležité ich minimalizovať (Colantoni et al. 2016).

Najhlavnejšie rozdiely medzi PRP so spaľovacím motorom a akumulátorovými sú, že akumulátorová PRP má pri takom istom výkone vyšší krútiaci moment, hladina vibrácií a hluku je nižšia, nevytvára výfukové splodiny a preto je s ňou možné píliť aj v uzavretých priestoroch (Túma 2017). Medzi nevýhody akumulátorových PRP naopak patrí potreba častejšej výmeny akumulátorov, vyššia nákupná cena, nevyhnutnosť nabíjania akumulátorov prostredníctvom nabíjačky, menšia odolnosť voči vode a nutnosť dokúpenia príslušenstva (Chramec 2018).

V súčasnosti sú vďaka napredujúcemu vývoju technológií deklarované hodnoty výkonu akumulátorových PRP porovnateľné s ich ľahkými benzínovými náprotivkami (Neri et al. 2018, Neri et al. 2022). Samotná technológia batérií je však značným nedostatkom najmä pri práci na pracoviská, ktoré sú vzdialené od zdroja elektrickej siete (Huber et al. 2021).

Tento článok sa zaoberá testovaním výkonnosti dvoch typov akumulátorových PRP pri vykonávaní zberu biomasy z klonového archívu rýchlorastúcich topoľov.

2. METODIKA

Testovaniu výkonnosti boli podrobené Stihl MSA 220 c-bq s akumulátorom AP 300S a Husqvarna 536 Li xp s akumulátorom BLi 300. Obe akumulátorové PRP spadajú do kategórie ľahkých PRP, s výkonom motora do 2,3 kW. Testovanie výkonnosti bolo vykonané ako súčasť zberu biomasy z klonového archívu rýchlorastúcich topoľov, ktorý patrí Technickej univerzite vo Zvolene. Pestované topole dosahovali požadované dimenzie a pre dodržanie stanovenej doby rotácie ich bolo nutné vyťažiť.

Výkonnosť akumulátorových píl bola hodnotená prostredníctvom maximálneho času pílenia (s.) a plochy prepílených pričných prierezov (cm²) na plne nabitý akumulátor. Technické parametre testovaných akumulátorových PRP a príslušných akumulátorov zobrazuje tabuľka 1.

Tab. 1. Technické parametre testovaných akumulátorových píl a akumulátorov

Technické parametre	Stihl MSA 220 c-bq	Husqvarna 536 Li xp
Výkon motora (kW)	2,1	1,4
Dĺžka vodiacej lišty (cm/“)	35/14	35/14
Delenie reťaze (‘‘)	3/8	3/8
Obehová rýchlosť reťaze (m/s)	24	20
Typ akumulátora	AP 300S (Li-ion)	BLi 300 (Li-ion)
Napätie (V)	36	36
Kapacita (Ah)	7,8	9,4

2.1. Lokalita výskumu – klonový archív Budča

Klonový archív na lokalite Budča bol založený v apríli roku 2018. Na ploche klonového archívu bolo vysadených 19 hybridných topoľových klonov, ktoré sú uznané pre zakladanie porastov rýchlorastúcich drevín. Zo Sekcie Aigeiros (topoľ čierny) boli vysadené napríklad klony Blanc du Poitou, I-476, Dolomiten, Gelrica, Spreewald a ďalšie. Sekcia Tacamahaca (balzamové topole) je v klonovom archíve zastúpená klonmi Oxford, Androscoggin, NE-42 a Fritz Pauley. Zastúpené sú tu aj japonské klony topoľa, konkrétne MAXI 1 až MAXI 5.

Okrem topoľov je na ploche vysadených aj 8 klonov rýchlorastúcich vrb pre produkciu energetických štiepok. Medzi ne patria klony S715, S218, S337 a tiež takzvané "švédske" odrody vrby Orm, Ulv a Rapp (Lieskovský 2019).

2.2. Priebeh testovania

Zber biomasy z klonového archívu prebiehal dňa 17.10.2022. Atmosférické podmienky boli priaznivé, bolo slnečno a teplota sa pohybovala v rozmedzí 12-14°C. Pred začatím testovania bol do každej z akumulátorových PRP založený plne nabitý akumulátor.

Ťažba prebiehala až do úplného vybitia daného akumulátora. Topoľové klony boli ťažené v radoch. Vždy po vypílení celého radu, sme pomocou digitálneho posuvného meradla zmerali hrúbku d_0 , teda hrúbku v mieste vykonania rezu. Celý priebeh ťažby bol zaznamenávaný pomocou dvoch kamier a všetky merané hodnoty boli zaznačené do terénneho zápisníka. Z kamerového záznamu bol pomocou stopiek zmeraný čas každého rezu, vykonaného danou akumulátorovou PRP. Sčítaním všetkých časov pílenia, od začiatku používania akumulátora až po jeho vybitie, sme dostali hodnotu výkonnosti vyjadrenú maximálnym časom pílenia v sekundách. Namerané hrúbky priečných prierezu boli prerátané na kruhovú základňu priečného prierezu g , pomocou nasledovného vzorca:

$$g = \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{cm}^2)$$

g – kruhová základňa (cm^2)

π – Ludolfovo číslo (konštanta 3,14...)

d – hrúbka priečného prierezu (cm)

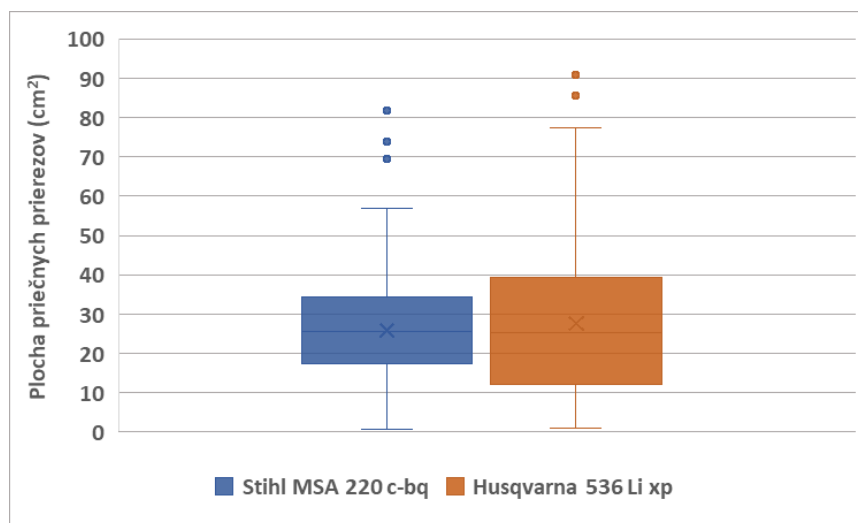
Sčítaním hodnôt kruhových základní jednotlivých stromov vypílených od začiatku používania akumulátora až po jeho vybitie, sme dostali hodnotu výkonnosti vyjadrenú plochou prepílených priečných prierezu v cm^2 .

Ako doplnkové ukazovatele výkonnosti akumulátorových PRP sme zisťovali počet vytŕažených jedincov a ich priemernú hmotnosť. Hmotnosť sa zisťovala priamym meraním vždy na výberovej vzorke 6 jedincov z každého klonu.

Namerané hodnoty výkonnosti boli následne medzi sebou porovnané. Vzhľadom na rozdiely v kapacite testovaných akumulátorov, bol vykonaný aj prepočet výkonnosti na 1 Ah kapacity akumulátora. Pre elimináciu možnosti ovplyvnenia výsledkov terénnych meraní boli hoblňovacie reťaze oboch akumulátorových PRP pred začatím meraní odborne strojovo nabrúsené a obsluhu PRP vykonávala výlučne jedna osoba.

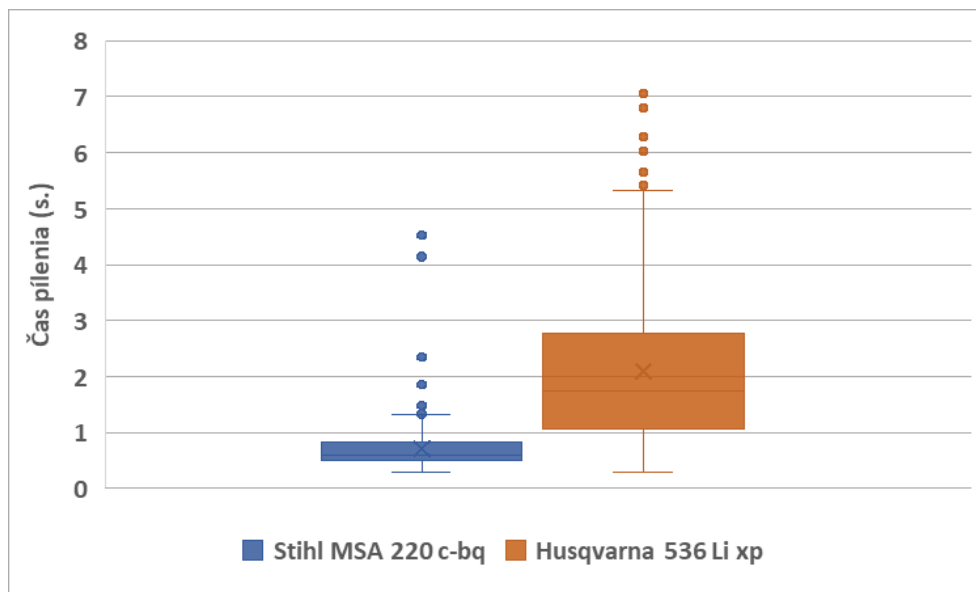
3. VÝSLEDKY

Obrázok 1 zobrazuje štatistický prehľad plôch priečných prierezu v závislosti od testovanej PRP. Hrúbka spiľovaných jedincov a teda aj plocha prepílených priečných prierezu sa pri jednotlivých klonoch značne menila. Viditeľne väčší rozsah plôch bol zaznamenaný pri práci s Husqvarnou, avšak priemerné hodnoty prepílených plôch dosiahli v oboch prípadoch dosť podobnú hodnotu, konkrétne $25,91 \text{ cm}^2$ pri Stihl a $27,6 \text{ cm}^2$ pri Husqvarne.



Obr. 1. Štatistický prehľad plôch priečných prierezu v závislosti od testovaného typu PRP

Krabicové grafy na obrázku 2 zobrazujú štatistický prehľad časov pílenia jedného priečného prierezu v závislosti od testovanej PRP. Čas pílenia priečného prierezu je priamo závislý od jeho hrúbky, v resp. plochy, čoho dôkazom je aj opäť zaznamenaný väčší rozsah hodnôt v prípade Husqvarny. Priemerné hodnoty sa však v prípade času pílenia výrazne odlišujú (rozdiel až 1,39s), čo môže byť spôsobené vyšším výkonom motora a väčšou obehovou rýchlosťou reťaze v prípade akumulátorovej PRP Stihl.



Obr. 2. Štatistický prehľad časov pílenia jedného priečného prierezu v závislosti od testovaného typu **PRP**

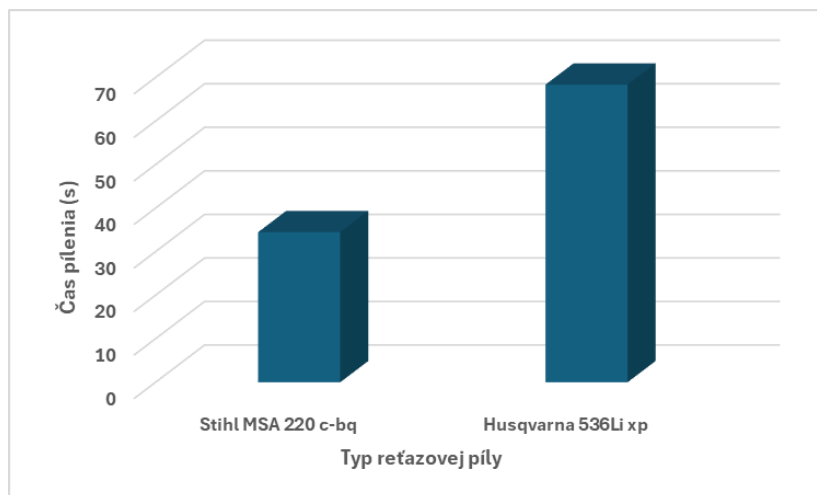
V tabuľke 2 sú zobrazené výsledné výkonnosti vyjadrené celkovou plochou priečných prierezov a maximálnym časom pílenia na jeden akumulátor. Tabuľka obsahuje aj údaj o ploche prepílenej za sekundu, ktorý zlučuje sledované výkonnosti do jedného komplexného parametra, ako ukazovateľa efektivity práce. Tento parameter je však do veľkej miery ovplyvnený parametrami testovanej PRP.

Tab. 2 Namerané hodnoty výkonnosti na akumulátor

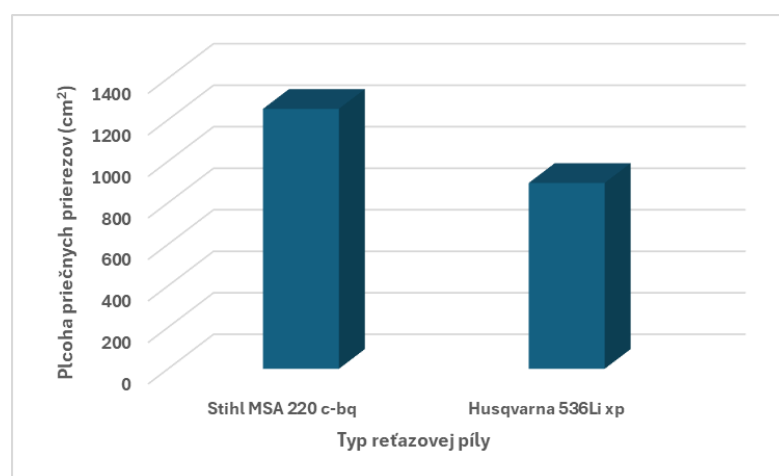
Typ reťazovej pily/akumulátor	Maximálny čas pílenia (s)	Plocha priečných prierezov (cm ²)	Plocha prepílená za sekundu (cm ² /s)
Stihl MSA 220 c-bq / AP 300 S	269,02	9769,16	36,31
Husqvarna 536 Li xp / BLi 300	642,70	8416,95	13,10

Z tabuľky je zrejmé, že akumulátorová píla Husqvarna dosiahla o 138 % dlhší čas pílenia v porovnaní so Stihl (rozdiel 373,68s). Avšak čo sa týka prepílenej plochy priečných prierezov, rozdiel medzi testovanými pilami nie je tak výrazný a naopak o 16 % vyššiu výkonnosť dosiahla píla značky Stihl (rozdiel 1352,21 cm²). Z hľadiska efektivity práce je podľa plochy prepílenej za sekundu výrazne efektívnejšia práca so Stihl MSA 220 c-bq pretože za rovnaký čas dokáže vykonať značne väčšie množstvo práce.

Výkonnosť testovaných akumulátorových PRP po prepočte na 1 Ah kapacity akumulátora je zobrazená na obrázkoch 3 a 4.



Obr. 3. Čas pílenia na 1 Ah kapacity akumulátora



Obr. 4. Plocha prepílených pričných prierezov na 1 Ah kapacity akumulátora

Na základe priložených grafov môžeme konštatovať, že Husqvarna dokázala na 1 Ah píliť o 98 % dlhšie ako Stihl. V ploche prepílených pričných prierezov na 1 Ah naopak dominovala akumulátorová PRP Stihl ale rozdiel bol menší ako v prípade času pílenia a to približne 40% prepílenej plochy.

Tabuľka 3 zobrazuje doplnkové údaje zistené pri testovaní výkonnosti akumulátorových PRP. Pre praktické zhodnotenie možnosti využitia testovaných akumulátorových PRP pri zbere biomasy sú vhodnými ukazovateľmi počet vyťažených jedincov a najmä hmotnosť vyťaženej biomasy. Na základe uvedených údajov môžeme konštatovať, že aj napriek značným rozdielom v sledovaných parametroch výkonnosti, ako aj počte vyťažených jedincov, dokázali obe testované akumulátorové PRP vyťažiť takmer totožné množstvo biomasy na jeden akumulátor a to približne 2,9 ton.

Tab. 3 Doplnkové údaje zisťované počas testovania

Typ reťazovej pily/akumulátor	Priemerná hrúbka pričných prierezov (cm)	Počet vyťažených jedincov (ks)	Hmotnosť vyťaženej biomasy (kg)
Stihl MSA 220 c-bq / AP 300 S	5,57	377	2908,8
Husqvarna 536 Li xp / BLi 300	5,6	305	2894,5

4. DISKUSIA A ZÁVER

Prenosná reťazová píla je neoddeliteľnou súčasťou prác nielen v lesníctve ale aj v mnohých iných pracovných sektoroch. Možnosť jej využitia pri širokom spektre pracovných činností z nej robí len ťažko nahraditeľný pracovný nástroj.

Zvyšovanie nárokov na ergonómiu práce, spolu s rastom cien fosílnych palív a obmedzovaním emisií CO₂ môžeme považovať za hlavné dôvody postupného zavádzania elektromotorov a akumulátorovej technológie aj do tejto oblasti.

Ako uvádza Colantoni et al. 2016, akumulátorové PRP sú schopné znížiť množstvo špecifických rizík vznikajúcich pre ich obsluhu a navyše nevytvárajú žiadne priame emisie (Laschi et al. 2023). Samotná technológia akumulátorov však predstavuje určité obmedzenie a to najmä na pracoviskách, ktoré sú značne vzdialené od bežných zdrojov elektrickej siete.

Pre zvládnutie pracovnej zmeny piliara, v oblastiach mimo dosahu elektrickej siete, je potrebné zaobstaráť pri práci s akumulátorovou pilou väčšie množstvo akumulátorov (Huber et al. 2021). Neri et al. 2023 vo svojej práci uvádza, že obsluha s akumulátorovou pilou Stihl MSA 220C-B dokázala efektívne pracovať po dobu 30 min. Pri potrebe minimálne 6 akumulátorov na pracovnú zmenu, ako uvádza Tomczak, Naskrent 2022, to predstavuje značné zvýšenie nielen finančných nákladov.

Alternatívou na zníženie veľkého počtu akumulátorov je napríklad použitie chrbtového akumulátora, ktorý v závislosti od výrobcu a kapacity dokáže nahradiť niekoľko bežných akumulátorov. Táto alternatíva má však aj svoje nevýhody. Napríklad hmotnosť samotného akumulátora presahujúca 9 kg, značne zvyšuje fyzickú záťaž piliara počas práce (Poje et al. 2018) pričom cena akumulátora (bez príslušenstva) mnohokrát presahuje 1400€ (Sténia a.s. - Stihl AR 3000L).

Akumulátorové PRP môžeme na základe doterajších výskumov a údajov deklarovaných výrobcami považovať za bezpečnejšiu a najmä ekologicky vhodnejšiu náhradu tradičných reťazových píl so spaľovacím motorom, najmä pri menej výkonovo náročných činnostiach. V našom výskume sa taktiež Stihl MSA 220 c-bq a Husqvarna 536 Li xp osvedčili pri zbere biomasy rýchlorastúcich topoľov a aj napriek rozdielom v jednotlivých parametroch výkonnosti boli schopné vyťažiť na jeden akumulátor každá približne 2,9 ton biomasy.

Práve testovanie akumulátorových PRP v podmienkach reálnej prevádzky nám prináša potrebné zistenia, na základe ktorých dokážeme zhodnotiť efektívnosť ich nasadenia do praxe. Zistené výsledky môžu taktiež slúžiť ako podklad pre ďalší vývoj a zdokonaľovanie akumulátorových PRP, s ohľadom na dosiahnutie štandardov potrebných na ich využívanie v jednotlivých pracovných sektoroch.

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektu APVV-22-0001) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202).

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

COLANTONI, F. - MAZZOCCHI, F. - COSSIO, M. - CECCHINI, R. - BEDINI, D. MONARCA, Comparisons between battery chainsaws and internal combustion engine chainsaws: performance and safety. *Contemporary Engineering Sciences*, Vol. 9, 2016, no. 27, 1315-1337, <http://dx.doi.org/10.12988/ces.2016.68133>
DĄBROWSKI, A. Analysis and Laboratory Testing of Technical Injury Prevention Measures for Portable Combustion Chainsaws. *Forests* 2020, 11, 276. <https://doi.org/10.3390/f11030276>

GEJDOŠ, M. - HITKA, M. - KAMPF, R. Anthropometrics Parameters of the Adult Population as Ergonomics Modifier for the Chainsaw Handle. *Forests* 2022, 13, 645. <https://doi.org/10.3390/f13050645>

HUBER, M. – HOFFMANN, S. – BRIEGER, F. – HARTSCH, F. – JAEGER, D. – SAUTER, UH. Vibration and Noise Exposure during Pre-Commercial Thinning Operations: What Are the Ergonomic Benefits of the Latest Generation Professional-Grade Battery-Powered Chainsaws? *Forests*. 2021, 12(8):1120. <https://doi.org/10.3390/f12081120>

CHramec, J. *Vývoj akumulátorových prenosných reťazových píl*. Zvolen, 2018. Vedúci práce Martin Lieskovský. LF-5773-27605. Bakalárska práca, TU Zvolen, LF KLŤLM. Elektronický zdroj. Dostupné na internete: <http://opac.crzp.sk/?fn=detailBiblioForm&sid=752BE197E3AE405D448AF879404B>

LASCHI, A. – NERI, F. – MARRA, E. – FABIANO, F. – FRASSINELLI, N. – MARCHI, E. – PAOLONI, R. – FODERI, C. Comparing the Productivity of the Latest Models of Li-Ion Battery and Petrol Chainsaws in a Conifer Clear-Cut Site. *Forests* 2023, 14, 585. <https://doi.org/10.3390/f14030585>

LATTERINI, F. – STEFANONI, W. – ALFANO, V. – PALMIERI, N. – MATTEI, P. – PARI, L. Assessment of Working Performance and Costs of Two Small-Scale Harvesting Systems for Medium Rotation Poplar Plantations. *Forests* 2022, 13, 569. <https://doi.org/10.3390/f13040569>

LIESKOVSKÝ, M. 2019. *Výročná správa o činnosti Lesníckej fakulty za rok 2018*, 72 s. Technická univerzita vo Zvolene. Dostupné na internete: https://dokumenty.tuzvo.sk/sites/default/files/hodnotenie_vvc_2018_vr.pdf

NERI, F. – LASCHI, A. – BERTUZZI, L. – GALIPÒ, G. – FRASSINELLI, N. – FABIANO, F. – MARCHI, E. – FODERI, C. – MARRA, E. A Comparison between the Latest Models of Li-Ion Batteries and Petrol Chainsaws Assessing Noise and Vibration Exposure in Crosscutting. *Forests* 2023, 14, 898. <https://doi.org/10.3390/f14050898>

NERI, F. - LASCHI, A. - FODERI, C. - FABIANO, F. - BERTUZZI, L. - MARCHI, E. Determining Noise and Vibration Exposure in Conifer Cross-Cutting Operations by Using Li-Ion Batteries and Electric Chainsaws. *Forests* 2018, 9, 501. <https://doi.org/10.3390/f9080501>

NERI, F. - LASCHI, A. - MARCHI, E. - MARRA, E. - FABIANO, F. - FRASSINELLI, N. - FODERI, C. Use of Battery- vs. Petrol-Powered Chainsaws in Forestry: Comparing Performances on Cutting Time. *Forests* 2022, 13, 683. <https://doi.org/10.3390/f13050683>

POJE, A. - POTOČNIK, I. - MIHELIČ, M. Comparison of Electric and Petrol Chainsaws in Terms of Efficiency and Safety When Used in Young Spruce Stands in Small-Scale Private Forests. *Small-scale Forestry* 17, 411–422 (2018). <https://doi.org/10.1007/s11842-018-9395-4>

RUKAT, W. - JAKUBEK, B. - BARCZEWSKI, R. - WROBEL, M. The Influence of the Direction of Wood Cutting on the Vibration and Noise of Chainsaws. *Tehnički vjesnik*, Vol. 27 No. 6, 2020. <https://doi.org/10.17559/TV-20190719101429>

SIMANOV, V. - BERNACKÝ, R. *Motorová pila a její historie*. Národní zemědělské muzeum, Praha, 2018. ISBN 978-80-88270-03-4.

Sténia a.s. STIHL AR 3000L. Dostupné na internete: <https://stihl.sk/produkt/chrbtova-bateria-ar-3000-l-412-ah/>

SUCHOMEL, J. - BELANOVÁ, K. - VLČKOVÁ, M. *Analýza výskytu chorôb z povolania v lesníctve Slovenska*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011 (a). ISBN 978-80-228-2206-0.

SUCHOMEL, J. - SLANČÍK, M. - GEJDOŠ, M. *Obsluha prenosnej reťazovej pily*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2011 (b). ISBN 978-80-228-2306-7.

TOMCZAK, K. – NASKRENT, B. Work Efficiency of Battery-Powered Chainsaws during the Commercial Thinning in the Young Pine Stand. *Environ. Sci. Proc.* 2022, 22, 18. <https://doi.org/10.3390/IECF2022-13052>

TŮMA, J. *Aku řetězové pily: Nástup akumulátorových řetězových pil* [online]. 2017. Dostupné na internete: <http://www.toolscomp.cz/technologie/aku-retezove-pily/>

Ing. Dominik Gretsches, PhD.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, Technická Univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika. Email: xgretsches@is.tuzvo.sk

HODNOTENIE PRACOVNEJ A ENVIRONMENTÁLNEJ EXPOZÍCIE PRACHOVÝM ČASTICIAM PM₁₀ A PM_{2.5} PRI SKLADOVANÍ A MANIPULÁCII S BIOMASOU V MESTSKEJ TEPLÁRNI

DANIEL TOMČÍK, MILOŠ GEJDOŠ

The objectives of this study were to characterize occupational exposure during chip-loading activities and to evaluate ambient PM concentrations in the surrounding environment. Occupational exposure was assessed in accordance with the relevant standards using the Temtop M2000C, while continuous ambient monitoring was conducted with the AirNote device. The results indicate a significant increase in PM concentrations during woodchip loading activities. Mean PM_{2.5} concentrations were 24.03 µg/m³ during loading and 8.07 µg/m³ during non-loading, while PM₁₀ levels were 38.75 µg/m³ and 12.80 µg/m³, respectively. Continuous monitoring revealed that PM_{2.5} concentrations exceeded the WHO 24-hour guideline of 15 µg/m³ on 3 days. The maximum daily mean PM_{2.5} concentration was 43.7 µg/m³, while the median daily mean was 22.5 µg/m³. For PM₁₀, the maximum daily mean reached 70.9 µg/m³ and the median daily mean was 35.6 µg/m³, with exceedance of the WHO 24-hour guideline of 45 µg/m³ observed on one day. Distance from the woodchip pile also had a significant effect on PM concentrations ($p < 0.001$), with levels at 50 m exceeding WHO 24-hour guidelines by 2.9 times for PM_{2.5} and 1.6 times for PM₁₀. Beyond 100 m, no further significant reduction in PM levels was observed. Biomass storage operations can cause temporary PM exceedances, particularly during handling and near storage areas. These findings underscore the importance of implementing mitigation strategies to reduce airborne particulate emissions.

Kľúčové slová: prachové častice, hromada drevnej štiepky, biomasa, mestská tepláreň

Key words: particulate matter, wood chips pile, biomass, urban heating plants

1. ÚVOD

V posledných rokoch si rozvoj bioenergetického sektora vyžiadala zvýšenie veľkokapacitného skladovania drevnej biomasy s cieľom zabezpečenia stabilného a plynulého zásobovania palivom (Sahoo et al., 2019). S rastúcimi požiadavkami na skladovanie však narastajú aj súvisiace riziká pre zdravie a bezpečnosť, najmä v súvislosti s emisiami prachových častíc do ovzdušia (Kim et al., 2015). Expozícia zvýšeným koncentráciám prachových častíc (PM), konkrétne PM₁₀ a PM_{2.5}, v blízkosti hromád biomasy a teplární využívajúcich biomasu predstavuje potenciálne ohrozenie zdravia pracovníkov, ale aj obyvateľov žijúcich v okolí (Gejdoš and Lieskovský, 2024). Okrem zdravotných rizík sú to aj bezpečnostné riziká a to pri kumulácii jemných prachových častíc, kedy sa zvyšuje riziko samovznietenia (Zhou et al., 2022), môže dôjsť k explóziám (Varela et al., 2023) a uvoľňovaniu nebezpečných zlúčenín (Sarani et al., 2025). Riziko je obzvlášť vysoké pri skladovaní biomasy, kde dochádza k procesom samo nahrievania, najmä vo veľkých silách s nedostatočným vetraním, čo môže viesť k nebezpečným tepelným únikom (Varela et al., 2023). Historické incidenty spojené so skladovaním biomasy z rokov 2000 až 2018 zdôrazňujú naliehavú potrebu zlepšeného monitorovania a zavádzania opatrení na prevenciu katastrofických udalostí (Krigstin et al., 2018). Medzi najkritickejšie zdroje vznietenia patria otvorený oheň a priame teplo, pričom zvlášť zraniteľné sú miesta akumulácie prachu, ktoré predstavujú taktiež významnú hrozbu. Z tohto dôvodu je nevyhnutné prijať prísne bezpečnostné opatrenia, vrátane pravidelného monitoringu prašnosti, zabezpečenia dostatočného vetrania a dôsledného dodržiavania prevádzkových bezpečnostných predpisov (Zhou et al., 2022).

Manipulácia, spracovanie a skladovanie drevnej štiepky uvoľňuje jemný drevný prach do ovzdušia (Jacobsen et al., 2021; Simpson et al., 2016; Takougang et al., 2023). Tieto častice, pozostávajúce najmä z jemného drevného prachu alebo spór fytopatogénov, sa môžu šíriť vzduchom mimo bezprostrednú blízkosť skladísk. Drevný prach ako preukázaný karcinogén pre človeka sa spája s výskytom rakoviny nosovej dutiny a prínosových dutín, rôznymi respiračnými ochoreniami vrátane astmy, chronickej bronchitídy a alergických reakcií (Pérez-

Rios et al., 2009; Whitehead, 1982; Wiggans et al., 2015). To podčiarkuje význam riešenia problematiky drevného prachu s cieľom ochrany verejného zdravia (Jacobsen et al., 2021; Ozga et al., 2020; Siew et al., 2012).

Hoci väčšina výskumov sa zameriava na pracovnú expozíciu (Bohadana et al., 2000; Mofidi et al., 2022; Takougang et al., 2023), blízkosť hromád drevnej štiepky k obývaným oblastiam vyvoláva obavy týkajúce sa koncentrácie drevného prachu v ovzduší (Noll and Jirjis, 2012). Expozícia drevnému prachu je podrobne zdokumentovaným pracovným rizikom (Siew et al., 2012).

Na zmiernenie týchto rizík je nevyhnutné zaviesť účinné opatrenia na kontrolu prašnosti v skladovacích zariadeniach biomasy. Medzi osvedčené stratégie patrí zakrývanie hromád štiepky, udržiavanie optimálnej vlhkosti a využívanie systémov na potlačanie prašnosti, ktoré môžu významne znížiť emisie prachu. Kľúčové je aj pravidelné monitorovanie kvality ovzdušia v priľahlých obytných oblastiach (Chen et al., 2024; Chin et al., 2016; Lieskovský and Gejdoš, 2023; Noll and Jirjis, 2012; Zhou et al., 2022). Novšie štúdie zdôrazňujú potrebu integrovaného hodnotenia pracovnej aj environmentálnej expozície PM, aby bolo možné komplexne posúdiť zdravotné riziká (Chen et al., 2024; Chin et al., 2016). Napriek rozsiahlej literatúre o pracovnej expozícii drevnému prachu však existuje len obmedzený počet štúdií, ktoré kvantifikujú a porovnávajú pracovnú a environmentálnu expozíciu PM zo skladovania biomasy v mestských teplárnach, najmä vo vzťahu k medzinárodným zdravotným štandardom. Na Slovensku je riadenie pracovných rizikových faktorov súvisiacich s expozíciou drevnému prachu regulované legislatívou, konkrétne Nariadením vlády č. 356/2006 Z. z. (Nariadenie vlády SR č. 356/2006 Z. z.). Táto legislatíva uznáva drevný prach ako preukázaný karcinogén a stanovuje technickú referenčnú hodnotu pre jeho expozíciu.

Cieľom tejto štúdie je vyhodnotiť prachové častice v ovzduší z mestskej teplárni a posúdiť ich potenciálny vplyv na respiračné zdravie pracovníkov a obyvateľov v blízkosti. Hodnotenie pozostávalo z dvoch hlavných častí: (1) merania pracovnej expozície v súlade so štandardizovanými postupmi, konkrétne EN 689+AC, ktorá stanovuje stratégie pre hodnotenie inhalačnej expozície chemickým faktorom a zabezpečenie súladu s expozičnými limitmi, a STN EN 482, ktorá upravuje postupy na stanovenie koncentrácie chemických látok v pracovnom prostredí; a (2) vyhodnotenia environmentálnej expozície a jej potenciálneho dopadu na populácie žijúce v blízkosti hromady biomasy. Namerané koncentrácie prachových častíc (PM₁₀ a PM_{2.5}) boli ďalej porovnané so smernicami Svetovej zdravotníckej organizácie (WHO, 2021) s cieľom posúdiť, či úrovne expozície prekračujú odporúčané limity, a zhodnotiť potenciálne zdravotné riziká spojené s pracovnou aj environmentálnou expozíciou.

2. METODIKA

2.1. Lokalita štúdie

Štúdia analyzuje prachové častice vo vzduchu zo skladovania drevnej štiepky a hodnotí ich potenciálny dopad na respiračné zdravie pracovníkov a obyvateľov v blízkom okolí zariadenia, ktoré prevádzkuje centrálny systém výroby a distribúcie tepla v Hriňovej, Slovensko. Mestské teplárne na Slovensku sú typicky situované v centrách miest a poskytujú teplo v relatívne malom polomere. Väčšina mestských teplární v krajine pracuje za podobných podmienok, charakterizovaných kontinuálnou spotrebou a dopĺňaním biomasy, čo priamo ovplyvňuje kvalitu ovzdušia a emisie. Na tomto mieste hromada drevnej štiepky zaberá plochu približne 30 × 60 metrov a jej výška sa pohybuje od 5 do 15 metrov.

2.2 Metodika merania

2.2.1 Meracie zariadenia

Na hodnotenie parametrov kvality ovzdušia počas štúdie bol použitý prístroj na meranie kvality ovzdušia Temtop M2000C (Obr. 1). Toto prenosné zariadenie založené na laserovej technológii je špeciálne určené na meranie $PM_{2.5}$ a PM_{10} v reálnom čase. Hoci Temtop M2000C dokáže merať aj ďalšie parametre, ako je oxid uhličitý (CO_2) a celkové prchavé organické zlúčeniny (TVOC), v tejto štúdii bol použitý na monitorovanie koncentrácií prachových častíc ($PM_{2.5}$ a PM_{10}). Pracuje pomocou vysoko presného laserového senzora, ktorý poskytuje okamžité a spoľahlivé údaje vhodné pre priemyselné aj rezidenčné hodnotenia. Jeho prenosnosť umožňuje meranie na viacerých miestach, čo zabezpečuje priestorovo reprezentatívny zber údajov.

Na kontinuálne monitorovanie kvality ovzdušia bol použitý prístroj AirNote, vyrábaný spoločnosťou Blues. AirNote je prenosné zariadenie na monitorovanie kvality ovzdušia v reálnom čase, špeciálne navrhnuté na priebežné meranie koncentrácií prachových častíc, teploty a vlhkosti. Poskytuje vysoké rozlíšenie údajov počas dlhších časových období, čo je obzvlášť vhodné na hodnotenie dlhodobých trendov kvality ovzdušia a rizík expozície v priemyselnom aj obytnom prostredí.



Obr. 1 Zariadenie Temtop M2000C (vpravo) a meracia lokalita vo vzdialenosti 150 m

2.2.2 Meranie

Na hodnotenie vplyvu manipulácie s drevnou štiepkou na koncentrácie prachových častíc sa porovnávali úrovne $PM_{2.5}$ a PM_{10} medzi fázou nakladania štiepky a referenčným obdobím počas bežných prevádzkových hodín. Hodnotenie zahŕňalo meranie pracovnej expozície v súlade so štandardizovanými metodikami, konkrétne EN 689+AC, ktorá poskytuje stratégie na hodnotenie vdýchnutej expozície chemickým látkam a zabezpečenie zhody s limitmi pracovnej expozície, a STN EN 482, ktorá stanovuje postupy určovania koncentrácie chemických látok na pracovisku. V súlade s týmito normami sa merania pracovnej expozície vykonávali počas 2-hodinového merania. Namerané koncentrácie prachových častíc (PM_{10} a $PM_{2.5}$) boli následne porovnané s hodnotami kvality ovzdušia stanovenými Svetovou zdravotníckou organizáciou (WHO, 2021), aby sa zistilo, či úrovne expozície prekračujú odporúčané limity a vyhodnotili sa potenciálne zdravotné riziká spojené s pracovnou aj environmentálnou expozíciou.

Na zistenie dlhodobých zmien v koncentrácií prachových častíc sa uskutočnilo kontinuálne monitorovanie od 29. mája do 23. júna 2024. Tento rozšírený monitoring umožnil komplexnejšie hodnotenie výkyvov kvality ovzdušia ovplyvnených prevádzkovými aktivitami, meteorologickými podmienkami a rozkladom biomasy. Integrácia krátkodobých a dlhodobých údajov poskytla robustný základ pre hodnotenie prachových častíc vo vzduchu v mestskej teplárni.

Na hodnotenie disperzie prachových častíc sa merania kvality ovzdušia vykonávali v rôznych vzdialenostiach od hromady drevnej štiepky. Údaje boli zberané priamo pri hromade a vo vzdialenostiach 50 m, 100 m a 150 m, čo umožnilo komplexnú priestorovú analýzu prachových častíc. Na každej vzdialenosti sa kontinuálne merania zaznamenávali minimálne

dve hodiny za stáleho počasia (rýchlosť vetra < 1 m/s, bez zrážok). Meracie usporiadanie je znázornené na *Obrázku 2*, ktorý ukazuje tri sústredné kruhy so stredom v hromade štiepky, predstavujúce špecifikované vzdialenosti, pri ktorých sa zaznamenávali údaje o kvalite ovzdušia. Hodnotenie zahŕňalo meranie pracovnej expozície v súlade s normami EN 689+AC a STN EN 482. V súlade s týmito normami sa merania pracovnej expozície vykonávali počas kontinuálneho 2-hodinového odberu vzoriek. Namerané koncentrácie prachových častíc (PM_{10} a $PM_{2.5}$) boli porovnané s 24-hodinovými limitmi podľa WHO (2021), aby sa zistilo, či úrovne expozície na rôznych vzdialenostiach prekračujú odporúčané limity.



Obr. 2 Miesta merania vzhľadom na hromadu štiepky vo vzdialenostiach 50 m, 100 m a 150 m

Vzdialenosť od hromady štiepky bola meraná pomocou Vertex Laser Geo laserového diaľkomeru (Haglöf Sweden AB, Švédsko), ktorý poskytuje presné údaje kombináciou ultrazvukovej a laserovej technológie. Na každom mieste bol diaľkomer umiestnený vo výške približne 1,5 m nad zemou a namierený na pevný referenčný bod na boku hromady štiepky. Horizontálna vzdialenosť bola určená laserom, pričom sa dbalo na minimalizovanie prekážok a zachovanie priamej viditeľnosti pre zabezpečenie presnosti (Obrázok 3). Každé meranie sa opakovalo niekoľkokrát na overenie konzistencie.

2.3 Vyhodnotenie meraní

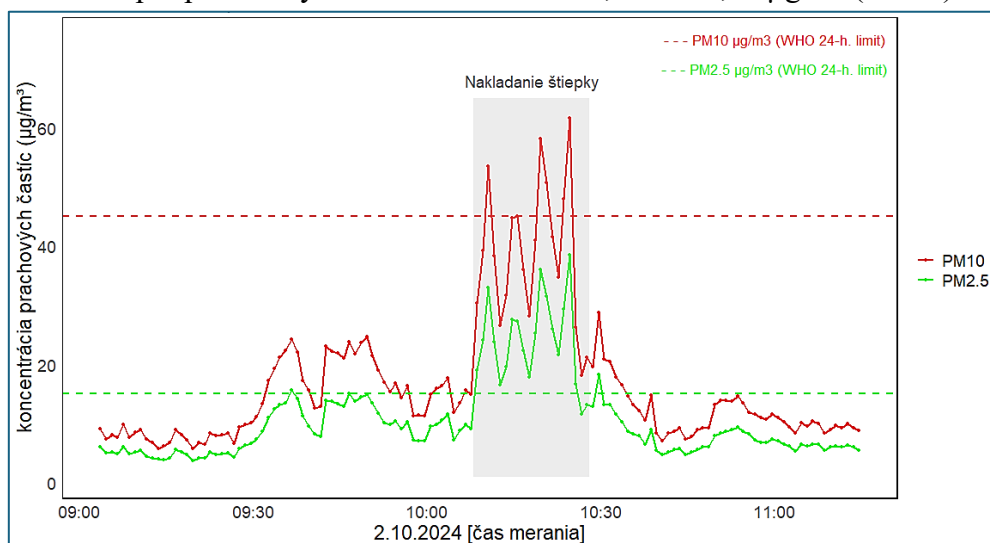
Štatistická analýza bola vykonaná pomocou programu R (R Core Team, 2024), ktorý bol použitý na sumarizáciu, triedenie, spracovanie, úpravu a analýzu údajov. Medzi voľne dostupnými knižnicami bol predovšetkým použitý balík dplyr (Wickham et al., 2023) na organizovanie, triedenie a správu datasetu. Na porovnanie priemerov medzi podparcelami bol aplikovaný Welchov t-test pre dva vzorky (Welch, 1947). Ďalej bola použitá analýza rozptylu (ANOVA) na hodnotenie rozdielov medzi vzdialenosťami od 50 do 150 metrov (R Core Team, 2024).

3. VÝSLEDKY

3.1 Meranie pracovnej expozície v súlade s normami

Koncentrácie $PM_{2.5}$ a PM_{10} boli porovnané medzi obdobiami nakladania drevnej štiepky a obdobiami bez nakladania počas pracovného dňa. Výsledky ukázali významný nárast hladín prachových častíc počas nakladania štiepky (Obr. 3). Pre $PM_{2.5}$ bola priemerná koncentrácia počas nakladania $24,03 \mu\text{g}/\text{m}^3$, v porovnaní s $8,07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ počas obdobia bez nakladania. Welchov t-test potvrdil, že tento rozdiel je štatisticky významný ($t = 9,58$, $df = 20,36$, $p < 0,001$), pričom 95 % interval spoľahlivosti (CI) pre priemerný rozdiel sa pohyboval od $12,49$ do $19,43 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Podobne boli koncentrácie PM_{10} počas nakladania významne vyššie, s priemernými hodnotami $38,75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pri nakladaní a $12,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pri období bez nakladania.

(Obr. 4). Welchov test tiež potvrdil štatisticky významný rozdiel ($t = 9,51$, $df = 20,32$, $p < 0,001$), s 95 % CI pre priemerný rozdiel v rozmedzí 20,26 až 31,63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Tab. 1).



Obr. 3 Časová rada koncentrácií prachových častíc PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$ s vyznačeným obdobím nakladania štiepky. Odporúčané hodnoty kvality ovzdušia podľa WHO sú zobrazené prerušovanými čiarami (červená pre PM_{10} a zelená pre $\text{PM}_{2.5}$).

Podľa odporúčaní Svetovej zdravotníckej organizácie (WHO) pre kvalitu ovzdušia (2021) sú odporúčané 24-hodinové priemerné limity 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pre $\text{PM}_{2.5}$ a 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ pre PM_{10} . Výsledky ukazujú, že počas nakladania štiepky dosiahla priemerná koncentrácia $\text{PM}_{2.5}$ hodnotu 24,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, čo prekračuje 24-hodinový limit WHO približne 1,6-násobne, zatiaľ čo koncentrácie PM_{10} sa približovali k odporúčanému limitu. Naopak, počas období bez nakladania boli priemerné hodnoty $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10} 8,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a 12,80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, čo je v rámci odporúčaných limitov WHO.

Tab. 1: Výsledky t-testov s veľkosťou efektu (Cohenovo d) porovnávajúce obdobia nakladania a nenakladania pre $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10} ($\bar{O}$ – priemer). $N = 20$ (obdobie nakladania), 112 (obdobie nenakladania). N predstavuje počet pozorovaní.

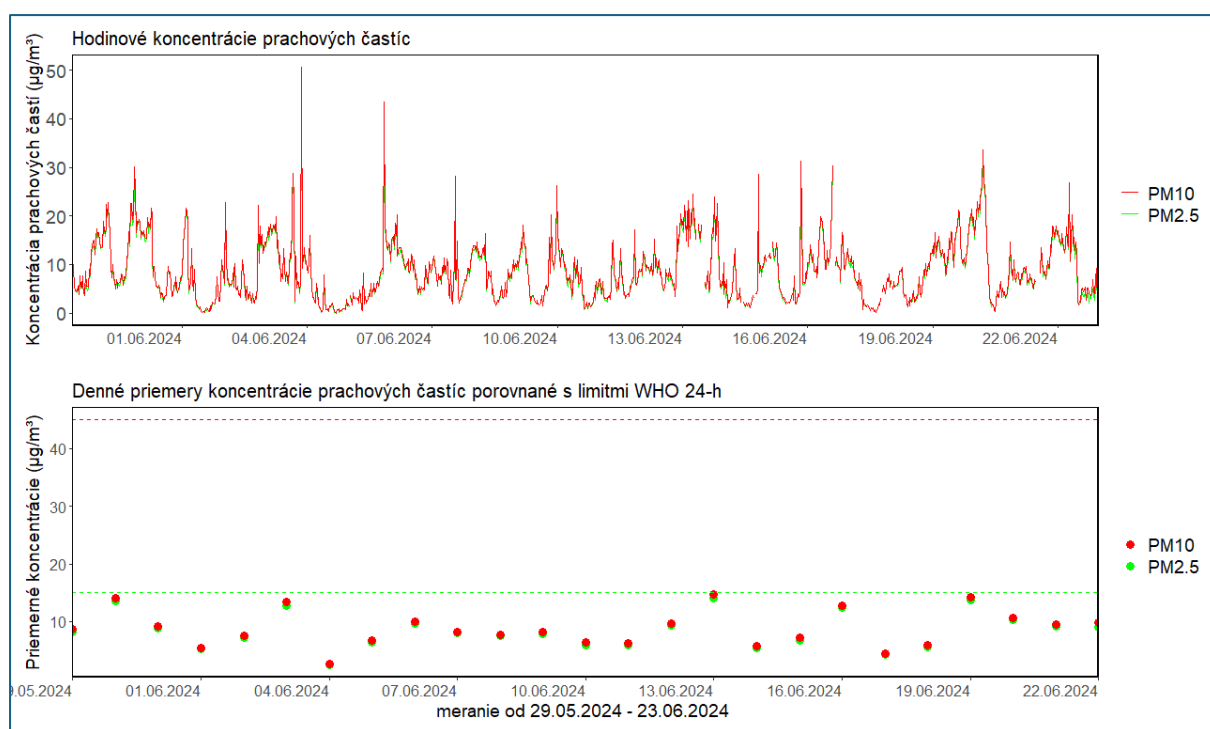
Prachové častice	Počas nakladania $\bar{O}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	Mimo nakladania $\bar{O}(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	Priemerná diferenciacia	95% interval spoľahlivosti (CI)	Cohen's d	p-hodnota
$\text{PM}_{2.5}$	24.03	8.07	15.96	12.49-19.43	3.88	< 0.001
PM_{10}	38.75	12.80	25.95	20.26-31.63	3.88	< 0.001

3.2 Kontinuálne meranie – environmentálna expozícia a jej dopad na obyvateľstvo v okolí

Kontinuálne sledovanie častíc PM_{10} a $\text{PM}_{2.5}$ v období od 29. mája do 22. júna 2024 odhalilo výrazné kolísanie koncentrácií. Hodnoty PM_{10} sa pohybovali od minimálneho 0,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do maximálneho 50,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, s mediánom 7,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a priemerom 8,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Podobne sa koncentrácie $\text{PM}_{2.5}$ pohybovali od minimálneho 0,03 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ do maximálneho 44,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, s mediánom 7,27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a priemerom 8,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Počas monitorovacieho obdobia hodnota PM_{10} prekročila limit podľa WHO len raz, s maximálnou zaznamenanou hodnotou

50,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Naopak, koncentrácie $\text{PM}_{2.5}$ prekročili limit viacnásobne, dosahujúc maximálne hodnoty 44,30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, čo predstavuje takmer trojnásobok odporúčanej hodnoty. Tieto prekročenia upozorňujú na potenciálne zdravotné riziká, najmä počas epizód zvýšeného znečistenia.

Počas sledovaného obdobia koncentrácie $\text{PM}_{2.5}$ prekročili 24-hodinový limit celkovo počas 82,5 hodín, čo predstavuje 14,2 % celkového času merania. V prípade PM_{10} boli prekročenia zaznamenané len jednorázovo počas 0,5 hodiny, čo predstavuje zanedbateľných 0,09 % doby monitorovania. Napriek týmto krátkodobým prekročeniam bol priemerný $\text{PM}_{2.5}$ naprieč celým súborom údajov 8,38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a priemerný PM_{10} 8,75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ – obe hodnoty v rámci limitov WHO. Na posúdenie súladu s odporúčaniami WHO 2021 boli vypočítané denné priemerné koncentrácie častíc. Maximálny denný priemer $\text{PM}_{2.5}$ dosiahol 43,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pričom medián denného priemeru bol 22,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, čo prekročilo denný limit WHO 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ počas troch dní. Pre PM_{10} bol maximálny denný priemer 70,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a medián 35,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, pričom len jeden deň prekročil dennú smernicu WHO 45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.



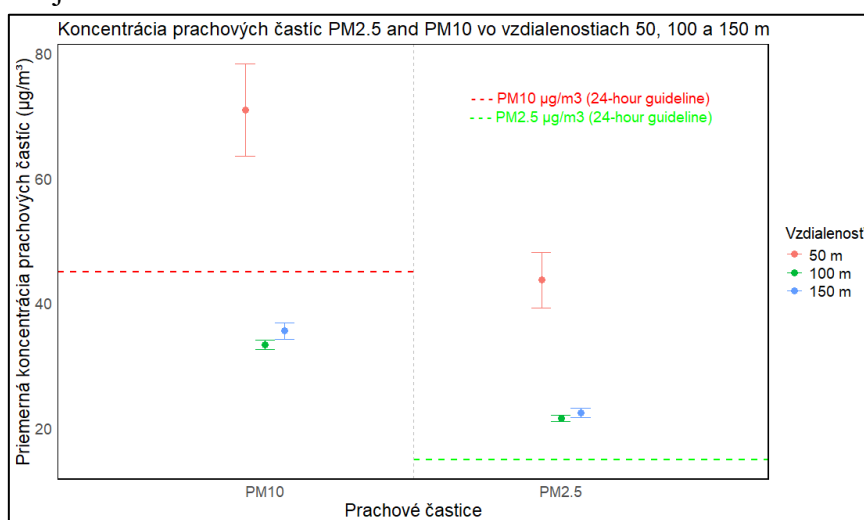
Obr. 4 Hodinové a denné priemerné koncentrácie $\text{PM}_{2.5}$ a PM_{10} merané v Hriňovej. Prerušované horizontálne čiary označujú hodnoty odporúčané WHO pre 24-hodinový priemer ($\text{PM}_{2.5} = 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$; $\text{PM}_{10} = 45 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

3.3 Meranie v rôznych vzdialenostiach od hromady štiepky

Koncentrácie prachových častíc (PM) boli merané vo vzdialenostiach 50 m, 100 m a 150 m od hromady štiepky. Analýza odhalila významné rozdiely v hladinách $\text{PM}_{2.5}$ aj PM_{10} v závislosti od vzdialenosti. Najvyššie koncentrácie boli zaznamenané vo vzdialenosti 50 m od hromady, s priemernými hodnotami 70,9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (95 % interval spoľahlivosti (CI): 63,5–78,3) pre PM_{10} a 43,7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (95 % CI: 39,3–48,1) pre $\text{PM}_{2.5}$. Vo vzdialenosti 100 m koncentrácie výrazne poklesli na 33,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (95 % CI: 32,6–34,1) pre PM_{10} a 21,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (95 % CI: 21,1–22,0) pre $\text{PM}_{2.5}$. Merania vo vzdialenosti 150 m ukázali mierne vyššie hodnoty než na 100 m, s priemernými hodnotami 35,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (95 % CI: 34,3–36,9) pre PM_{10} a 22,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (95 % CI:

21,7–23,3) pre PM_{2.5} (Obr. 5). Tieto výsledky naznačujú, že koncentrácie prachových častíc sú najvyššie v blízkosti skládky, klesajú významne do 100 m a následne sa stabilizujú v rozmedzí 100–150 m.

Podľa smerníc Svetovej zdravotníckej organizácie (WHO, 2021) koncentrácie PM namerané vo vzdialenosti 50 m od skládky prekročili odporúčané hodnoty. Konkrétne hladiny PM₁₀ boli približne 1,6-krát vyššie a koncentrácie PM_{2.5} približne 2,9-krát vyššie než odporúčané 24-hodinové limity WHO. Vo vzdialenostiach 100 m a 150 m priemerne dosahovali koncentrácie PM₁₀ 33,4 µg/m³ a 35,6 µg/m³, teda zostávali pod 24-hodinovým limitom WHO, ale sa mu približovali. Naopak, hladiny PM_{2.5} vo vzdialenostiach 100 m (21,5 µg/m³) a 150 m (22,5 µg/m³) prekročili 24-hodinový limit približne 1,4–1,5-krát, čo naznačuje pretrvávajúce jemných častíc aj vo väčších vzdialenostiach.



Obr. 5: Priemerné koncentrácie PM₁₀ a PM_{2.5} na rôznych vzdialenostiach od hromady štiepky s 95 % intervalmi spoľahlivosti. Smernice WHO sú znázornené prerušovanými čiarami.

Tab. 2 Výsledky analýzy rozptylu ANOVA and Tukey HSD post-hoc test pre koncentrácie prachových častíc PM10 a PM2.5

Prachové častice	Porovnávané vzdialenosti	Priemerná diferenciacia (µg/m ³)	95% Interval spoľahlivosti	p-hodnota
PM10	150 m - 100 m	2.22	-5.27 to 9.70	0.766
	50 m - 100 m	37.51	30.07 to 44.96	< 0.001
	50 m - 150 m	35.30	27.87 to 42.72	< 0.001
PM2.5	150 m - 100 m	0.91	-3.55 to 5.38	0.880
	50 m - 100 m	22.13	17.70 to 26.57	< 0.001
	50 m - 150 m	21.22	16.79 to 25.64	< 0.001

Na vyhodnotenie vplyvu vzdialenosti na koncentrácie prachových častíc bola vykonaná jednosmerná analýza rozptylu (ANOVA), nasledovaná Tukeyho post hoc testom pre párové porovnania (Tab. 2).

Jednosmerná ANOVA preukázala štatisticky významný vplyv vzdialenosti na koncentrácie PM₁₀ ($p < 0,001$). Post hoc analýza nepreukázala významný rozdiel medzi vzdialenosťami 100 m a 150 m (priemerný rozdiel = 2,22 µg/m³), čo naznačuje, že koncentrácie PM₁₀ sú

významne vyššie pri 50 m v porovnaní s 100 m a 150 m, zatiaľ čo hladiny nad 100 m zostávajú štatisticky podobné. Podobne ANOVA pre $PM_{2.5}$ ukázala významný vplyv vzdialenosti ($p < 0,001$). Medzi 100 m a 150 m nebol zistený štatisticky významný rozdiel (priemerný rozdiel = $0,91 \mu g/m^3$, $p = 0,880$), čo naznačuje, že koncentrácie $PM_{2.5}$ klesajú významne nad 50 m, ale medzi 100 m a 150 m nenastáva ďalšie významné zníženie.

4. DISKUSIA

Počas nakladania štiepky dosiahli priemerné hodnoty $PM_{2.5}$ úroveň $24,0 \mu g/m^3$ (rozsah: $11,6\text{--}38,5 \mu g/m^3$), čo bolo približne trikrát viac v porovnaní s priemernou hodnotou bez nakladania ($8,1 \mu g/m^3$; rozsah: $3,7\text{--}18,2 \mu g/m^3$). Podobne, koncentrácie PM_{10} boli výrazne zvýšené počas nakládky, pričom priemer predstavoval $38,7 \mu g/m^3$ (rozsah: $18,1\text{--}61,7 \mu g/m^3$), zatiaľ čo počas obdobia bez nakládky dosahovali iba $12,8 \mu g/m^3$ (rozsah: $5,7\text{--}28,8 \mu g/m^3$). Tieto rozdiely boli štatisticky významné ($p < 0,001$). Podobné výsledky boli zaznamenané aj v priemyselných prostrediach, kde manipulácia s materiálom generuje významné množstvo prachových častíc (Jacobsen et al., 2021; Pérez-Rios et al., 2009). Predchádzajúce štúdie zamerané na skladovanie biomasy a emisie pri jej spaľovaní poukazujú na porovnateľné úrovne znečistenia ovzdušia tuhými časticami (PM) v podobných podmienkach. Napríklad Chen et al., (2023), Tissari et al., (2008) preukázali, že spaľovanie biomasy produkuje značné množstvo jemných častíc, ktorých zdravotné účinky sú porovnateľné s účinkami mestského znečistenia ovzdušia. Tieto zistenia sú v súlade s výsledkami výskumov zameraných na skladovanie biomasy, ktoré preukázali zvýšené emisie častíc v okolí hromád na báze dreva (Müllerová, 2014; Zhou et al., 2022).

Kontinuálne monitorovanie uskutočnené v období od 29. mája do 22. júna 2024 prinieslo ďalšie poznatky o rizikách krátkodobého vystavenia. Boli zaznamenané prekročenia limitných hodnôt WHO, predovšetkým pri $PM_{2.5}$. Maximálne denné priemery dosiahli $43,7 \mu g/m^3$ pre $PM_{2.5}$ a $70,9 \mu g/m^3$ pre PM_{10} , pričom prekročenie odporúčaných limitov sa vyskytlo počas troch dní pri $PM_{2.5}$ a počas jedného dňa pri PM_{10} . Napriek týmto krátkodobým prekročeniam zostali priemerné hodnoty oboch ukazovateľov v rámci limitov WHO. Tieto výsledky sú v súlade s predchádzajúcimi štúdiami, ktoré zaznamenali dočasné nárasty koncentrácií tuhých častíc v dôsledku manipulácie s biomasou, pričom ročné priemery zostali v súlade s odporúčaniami (Vicente et al., 2021). Zistenia zdôrazňujú potrebu hodnotenia nielen dlhodobých priemerných expozícií, ale aj krátkodobého extrémneho nárastu koncentrácií, ktoré môžu predstavovať akútne zdravotné riziká, najmä pre osoby s existujúcimi respiračnými ochoreniami (Lelieveld et al., 2015; Pope and Dockery, 2006).

Výsledky tejto štúdie poukazujú na významné rozdiely v koncentráciách PM_{10} a $PM_{2.5}$ v okolí hromady drevnej štiepky, pričom najvyššie hodnoty boli zaznamenané vo vzdialenosti 50 m a výrazný pokles bol pozorovaný vo vzdialenostiach 100 m a 150 m. Tieto výsledky korešpondujú s predchádzajúcimi výskumami, ktoré preukázali zvýšené emisie prachových častíc pri skladovaní a manipulácii s biomasou, spojené s rizikom respiračných ochorení (Tissari et al., 2008; Varela et al., 2023). Tento vzorec odráža predchádzajúce zistenia, že emisie tuhých častíc síce klesajú so vzdialenosťou od zdroja, ale môžu zostať zvýšené v dôsledku atmosférickej disperzie a resuspenzie (Kim et al., 2015). Podobné priestorové vzorce poklesu koncentrácií PM so vzdialenosťou boli zaznamenané aj pri veľkých teplárnach (Cichowicz and Dobrzański, 2021). Štúdie zamerané na stavebné a manipulačné činnosti rovnako potvrdzujú, že zvýšené koncentrácie PM môžu pretrvávať až do vzdialenosti 100 m od zdroja, čo podporuje naše zistenie o výraznom poklese medzi 50 a 100 m (Yan et al., 2023). Navyše, výskumy týkajúce sa dymu z dreva a spaľovania biomasy poukazujú na to, že koncentrácie $PM_{2.5}$ v blízkosti zdroja môžu prekračovať odporúčané hodnoty WHO a že zvýšené úrovne jemných častíc ($20\text{--}40 \mu g/m^3$) sú bežne pozorované v komunitách vystavených emisiám z biomasy

(Allen and Rector, 2020; Chalvatzaki et al., 2012; Weichenthal et al., 2017). Tieto štúdie podporujú naše zistenia, že koncentrácie PM₁₀ sa vo vzdialenostiach 100–150 m vracajú k odporúčaným hodnotám WHO alebo pod ne, zatiaľ čo PM_{2.5} zostávajú zvýšené, čo podčiarkuje ich pretrvávajúce a zdravotný význam pri transporte v atmosfére po manipulácii s biomasou.

Zistenia tejto štúdie zdôrazňujú potrebu implementácie účinných opatrení na obmedzenie emisií tuhých častíc zhromaždených biomasy. Vzhľadom na významné prekročenia limitov WHO – predovšetkým počas nakladania štiepky – je vhodné zaviesť systémy na potláčanie prašnosti a optimalizovať techniky manipulácie s materiálom. Okrem toho je nevyhnutné uprednostniť preventívne opatrenia, vrátane používania respiračných ochranných prostriedkov a pravidelného monitorovania expozície pracovníkov (Anlimah et al., 2023; Khan, 2016; Ren et al., 2011; Ruiter et al., 2023; Sarani et al., 2025; Smaoui et al., 2018).

5. ZÁVER

Táto štúdia prináša cenné poznatky o vplyve skladovania biomasy v mestskej teplárni na kvalitu ovzdušia, a to nielen z hľadiska expozície pracovníkov, ale aj obyvateľov žijúcich v ich blízkosti. Koncentrácie prachových častí boli významne zvýšené počas manipulácie a nakladky drevnej štiepky. Kontinuálne monitorovanie odhalilo krátkodobé prekročenia 24-hodinových limitných hodnôt WHO, najmä pri PM_{2.5}, čím sa potvrdzuje, že prechodné vysoké prekročenia limitov môžu predstavovať akútne zdravotné riziko aj v prípadoch, keď celkové priemerné koncentrácie zostávajú v rámci odporúčaných hodnôt. Priestorová analýza ukázala, že koncentrácie PM klesali so vzdialenosťou od zdroja. Vo vzdialenosti 100 m a 150 m zostali hodnoty PM₁₀ pod odporúčaným 24-hodinovým limitom WHO, zatiaľ čo koncentrácie PM_{2.5} pretrvávali na úrovniach 1,4–1,5-násobne nad odporúčanými hodnotami. To poukazuje na pretrvávajúce jemných častíc v okolí teplární a pri manipulácii s biomasou. Celkové výsledky zdôrazňujú potrebu implementácie účinných mitigačných opatrení na zníženie emisií tuhých častíc v priestoroch skladovania biomasy a zvyšujú všeobecné povedomie o potrebe preventívnych krokov na ochranu zdravia pri energetickom využívaní biomasy. Medzi odporúčané opatrenia patrí zavádzanie systémov na potláčanie prašnosti, optimalizácia manipulačných procesov, využívanie osobných ochranných pracovných prostriedkov a pravidelné monitorovanie koncentrácií PM na zabezpečenie dodržiavania limitných hodnôt kvality ovzdušia a ochrany pracovného aj verejného zdravia v okolí hromád drevnej štiepky.

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektu APVV-22-0001) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202). Táto štúdia bola spolufinancovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

ALLEN, G., RECTOR, L. Characterization of Residential Woodsmoke PM_{2.5} in the Adirondacks of New York. *Aerosol Air Qual. Res.* 2020, 20, 2419–2432. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.01.0005>

ANLIMAH, F., GOPALDASANI, V., MACPHAIL, C., DAVIES, B. A systematic review of the effectiveness of dust control measures adopted to reduce workplace exposure.

Environmental Science and Pollution Research 2023, 30, 1–22.
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-26321-w>

BOHADANA, A., MASSIN, N., WILD, P., TOAMAIN, J.-P., ENGEL, S., GOUTET, P. Symptoms, airway responsiveness, and exposure to dust in beech and oak wood workers. *Occupational and environmental medicine* 2000, 57, 268–73.
<https://doi.org/10.1136/oem.57.4.268>

EN 689+AC Workplace exposure — Guidance for the assessment of exposure by inhalation to chemical agents for comparison with limit values — Part 1: Strategy for testing compliance with occupational exposure limit values (Amendment AC).

CHALVATZAKI, E., ALEKSANDROPOULOU, V., GLYTSOS, T., LAZARIDIS, M. The effect of dust emissions from open storage piles to particle ambient concentration and human exposure. *Waste Management* 2012, 32, 2456–2468.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.005>

CHEN, P., LI, Y., ZHANG, Y., XUE, C., HOPKE, P.K., LI, X. Dynamic Changes of Composition of Particulate Matter Emissions during Residential Biomass Combustion. *Environ. Sci. Technol.* 2023, 57, 15193–15202. <https://doi.org/10.1021/acs.est.3c05412>

CHEN, X., YAN, H., MA, L., FANG, Q., ZHANG, C., CHEN, G., YIN, C. Comprehensive experimental study of microbial respiration during self-heating in biomass storage piles. *Fuel* 2024, 362, 130746. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.130746>

CHIN, Y., DARVELL, L.I., LEA-LANGTON, A., WILLIAMS, A. Ignition Risks of Biomass Dust on Hot Surfaces. *Energy & Fuels* 2016, 30.
<https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.5b02622>

CICHOWICZ, R., DOBRZAŃSKI, M. 3D Spatial Analysis of Particulate Matter (PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0}) and Gaseous Pollutants (H₂S, SO₂ and VOC) in Urban Areas Surrounding a Large Heat and Power Plant. *Energies* 2021, 14, 4070. <https://doi.org/10.3390/en14144070>

GEJDOŠ, M., LIESKOVSKÝ, M. Overview of Health and Safety Risks in the Process of Production and Storage of Forest Biomass for Energy Purposes—A Review. *Energies* 2024, 17, 1064. <https://doi.org/10.3390/en17051064>

JACOBSEN, G., SCHAUMBURG, I., SIGSGAARD, T., SCHLÜNSSEN, V. Wood Dust Exposure Levels and Respiratory Symptoms 6 Years Apart: An Observational Intervention Study Within the Danish Furniture Industry. *Annals of Work Exposures and Health* 2021, 65, 1029–1039. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxab034>

KHAN, M. Review of Dust Control Strategy Optimisation using Real-time Respirable Dust Monitoring. 2016.

KIM, K.-H., KABIR, E., KABIR, S. 2015. A review on the human health impact of airborne particulate matter. *Environment International* 2015, 74, 136–143.
<https://doi.org/10.1016/j.envint.2014.10.005>

- KRIGSTIN, S., WETZEL, S., JAYABALA, N., HELMESTE, C., MADRALI, S., AGNEW, J., VOLPE, S. Recent Health and Safety Incident Trends Related to the Storage of Woody Biomass: A Need for Improved Monitoring Strategies. *Forests* 2018, 9, 538. <https://doi.org/10.3390/f9090538>
- LELIEVELD, J., EVANS, J., FNAIS, M., GIANNADAKI, D., POZZER, A. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale. *Nature* 2015, 525, 367–71. <https://doi.org/10.1038/nature15371>
- LIESKOVSKÝ, M., GEJDOŠ, M. Monitoring of Respiratory Health Risks Caused by Biomass Storage in Urban-Type Heating Plants. *Forests* 2023, 14, 707. <https://doi.org/10.3390/f14040707>
- MOFIDI, A., TOMPA, E., KALCEVICH, C., MCLEOD, C., LEBEAU, M., SONG, C., KIM, J., DEMERS, P. Occupational Exposure to Wood Dust and the Burden of Nasopharynx and Sinonasal Cancer in Canada. *International Journal of Environmental Research and Public Health* 2022, 19, 1144. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031144>
- MÜLLEROVÁ, J. Health and Safety hazards of biomass storage. 2014. <https://doi.org/10.5593/SGEM2014/B41/S17.034>
- NARIADENIE VLÁDY SR č. 356/2006 Z. z. o ochrane zdravia zamestnancov pri práci so zdravotne závažnými chemickými faktormi. Zbierka zákonov Slovenskej republiky.
- NOLL, M., JIRJIS, R. Microbial communities in large-scale wood piles and their effects on wood quality and the environment. *Applied microbiology and biotechnology* 2012, 95, 551–63. <https://doi.org/10.1007/s00253-012-4164-3>
- OZGA, A., OBUCHOWSKA, A., STANDYLO, A., WÓJCIK, J., OBUCHOWSKA, K. Wood dust exposure and risk of sinonasal cancer development. *Journal of Education, Health and Sport* 2020, 10, 520. <https://doi.org/10.12775/JEHS.2020.10.09.063>
- PÉREZ-RIOS, M., RUANO-RAVINA, A., ETMINAN, M., TAKKOUICHE, B. A meta-analysis on wood dust exposure and risk of asthma. *Allergy* 2009, 65, 467–73. <https://doi.org/10.1111/j.1398-9995.2009.02166.x>
- POPE, C.A., DOCKERY, D.W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J. Air Waste Manag. Assoc.* 2006, 56, 709–742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- R CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2024. URL: <https://www.R-project.org/>.
- REN, T., PLUSH, B., AZIZ, N. Dust Controls and Monitoring Practices on Australian Longwalls. *Procedia Engineering* 2011, 26, 1417–1429. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.2319>
- RUITER, S., BARD, D., JEDDI, H., SAUNDERS, J., SNAWDER, J., WARREN, N., GORCE, J.-P., CAUDA, E., KUIJPERS, E., PRONK, A. Exposure Monitoring Strategies for Applying

Low-Cost PM Sensors to Assess Flour Dust in Industrial Bakeries. *Annals of Work Exposures and Health* 2023, 67. <https://doi.org/10.1093/annweh/wxac088>

SAHOO, U.K., SINGH, S.L., GOGOI, A., KENYE, A., SAHOO, S.S. Active and passive soil organic carbon pools as affected by different land use types in Mizoram, Northeast India. *PLoS ONE* 2019, 14, e0219969. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0219969>

SARANI, A., TAVAN, A., AMINIZADEH, M., MORADI, S.M., BAHADINBEIGY, K., FARAHMANDNIA, H. Mitigation strategies of healthcare centers for dust hazard: A systematic review. *Journal of Education and Health Promotion* 2025, 14. https://doi.org/10.4103/jehp.jehp_1588_23

SIEW, S., KAUPPINEN, T., KYRÖNEN, P., HEIKKILÄ, P., PUKKALA, E. Occupational exposure to wood dust and formaldehyde and risk of nasal, nasopharyngeal, and lung cancer among Finnish men. *Cancer Management and Research* 2012, 4, 223–32. <https://doi.org/10.2147/CMAR.S30684>

SIMPSON, A.T., HEMINGWAY, M.A., SEYMOUR, C. Dangerous (toxic) atmospheres in UK wood pellet and wood chip fuel storage. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene* 2016, 13, 699–707. <https://doi.org/10.1080/15459624.2016.1167279>

SMAOUI, N., KIM, K., GNAWALI, O., LEE, Y.J., SUH, W. Respirable Dust Monitoring in Construction Sites and Visualization in Building Information Modeling Using Real-time Sensor Data. *Sensors and Materials* 2018, 30, 1775. <https://doi.org/10.18494/SAM.2018.1871>

STN EN 482 Workplace atmospheres — General requirements for the performance of procedures for the measurement of chemical agents

TAKOUGANG, I., BUKAM GUENNYEN, G.W., EDZAMBA, M.F., LEKEUMO CHEUYEM, F.Z., ASSOMO NDEMBA, P.B., PEFURA, W.Y. Exposure to Wood dust and its Respiratory Health EFFECTS AMONG WOOD WORKERS IN YAOUNDÉ (CAMEROON). 2023. <https://doi.org/10.1101/2023.12.28.23300613>

TISSARI, J., LYRÄNEN, J., HYTÖNEN, K., SIPPULA, O., TAPPER, U., FREY, A., SAARNIO, K., PENNANEN, A.S., HILLAMO, R., SALONEN, R., HIRVONEN, M.-R., JOKINIEMI, J. Fine particle and gaseous emissions from normal and smouldering wood combustion in a conventional masonry heater. *Atmospheric Environment* 2008, 42, 7862–7873. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.019>

VARELA, A., ARBIZU, J., TASCÓN, A. Application of Factorial Analysis to the Study of Vented Dust Explosions in Large Biomass Storage Silos. *Fire* 2023, 6, 226. <https://doi.org/10.3390/fire6060226>

VICENTE, E., ALVES, C., MARTINS, V., ALMEIDA, S., LAZARIDIS, M., Lung-deposited dose of particulate matter from residential exposure to smoke from wood burning. *Environmental Science and Pollution Research* 2021, 28, 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15215-4>

WEICHENTHAL, S., KULKA, R., LAVIGNE, E., VAN RIJSWIJK, D., BRAUER, M., VILLENEUVE, P.J., STIEB, D., JOSEPH, L., BURNETT, R.T. Biomass Burning as a Source of Ambient Fine Particulate Air Pollution and Acute Myocardial Infarction. *Epidemiology* 2017, 28, 329–337. <https://doi.org/10.1097/EDE.0000000000000636>

WELCH, B. L. The generalization of “Student’s” problem when several different population variances are involved. *Biometrika*, 1947, 34(1–2), 28–35. <https://doi.org/10.1093/biomet/34.1-2.28>

WHITEHEAD, L.W. Health effects of wood dust - relevance for an occupational standard. *American Industrial Hygiene Association Journal* 1982, 43, 674–678. <https://doi.org/10.1080/15298668291410404>

WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [www Document], n.d. URL <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228> (accessed 3.18.25).

WICKHAM H, FRANÇOIS R, HENRY L, MÜLLER K, VAUGHAN D. 2023. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. R package (version 1.1.4) [software]. <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>.

WIGGANS, R., EVANS, G., FISHWICK, D., BARBER, C. Asthma in furniture and wood processing workers: A systematic review. *Occupational medicine (Oxford, England)* 2015, 66. <https://doi.org/10.1093/occmed/kqv149>

YAN, H., Li, Q., FENG, K., ZHANG, L. The characteristics of PM emissions from construction sites during the earthwork and foundation stages: an empirical study evidence. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 2023, 30, 62716–62732. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26494-4>

ZHOU, X., LI, X., CUI, Z., WU, L., ZHOU, H., LU, X. Combustible wood dust explosions and impacts on environments and health - A review. *Environmental Research* 2022, 216, 114658. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114658>

Ing. Daniel Tomčík, PhD.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika. Email: xtomcikd@is.tuzvo.sk
doc. Ing. Miloš Gejdoš, PhD.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika. Email: gejdos@tuzvo.sk

LESNÉ PORASTY NA NELESNÝCH POZEMKOCH (BIELE PLOCHY) A MOŽNOSTI ICH OCEŇOVANIA

JÁN MERGANIČ, KATARÍNA MERGANIČOVÁ

White areas with predominantly deciduous forests cover almost 300,000 hectares of Slovakia. Forests on non-forest land cover a relatively high proportion of the forested area, approximately 13%, which results in an increase of the forest cover of Slovakia by approximately 6%. Decree 492/2004 stipulates that in the event of a discrepancy between the data on the type of land in the cadastre and the actual situation, a forestry expert shall determine the general value of the forest even if forest trees occur extensively on land other than forest land. The article describes the current state of white areas in Slovakia and the possibilities for valuing forest stands in these areas.

Kľúčové slová: biele plochy, oceňovanie lesa
Key words: white areas, forest valuation

1. ÚVOD

Podľa údajov zo Zelených správ Slovenska sa celková plocha lesných pozemkov zvýšila z 1,78 mil. ha v roku 1960 na 1,98 mil. ha v roku 2000 a celková plocha lesných pozemkov s lesnými porastami sa zvýšila z 1,77 mil. ha v roku 1960 na 1,92 mil. ha v roku 2000. Po roku 1989 dochádza k opúšťaniu poľnohospodárskej pôdy (Midriak, 2011; Šebeň et al., 2018; Zaušková et al., 2012; Zaušková and Midriak, 2008). Preto sa v priebehu posledných 20 rokov znížil podiel poľnohospodárskej pôdy v Západných Karpatoch (Rączkowska et al., 2012). Opustené lúky, pasienky, polia a sady postupne zarastali rôznymi sukcesnými štádiami krovinatej a stromovej vegetácie (Boltiziar and Olah, 2013; Kozak, 2003; Kuemmerle et al., 2009, 2008; Plesník, 1987) alebo boli umelo zalesnené (Jaśkowiec, 2013; Kulla and Sitková, 2012; Merganičová et al., 2013). Na Slovensku boli takéto lokality nazvané „biele plochy“ (Šebeň et al., 2018; Zaušková et al., 2012). Biele plochy zahŕňajú pozemky porastené lesnými drevinami, ktoré nie sú evidované ako lesné pozemky.

Inventarizácie lesov sú špeciálne systémy získavania údajov, ktoré nám poskytujú aktuálne a objektívne informácie o stave a vývoji lesov. Je už takmer štandardom, že v rámci národných inventarizácií lesov sa hodnotí stav lesov všeobecne tj. aj na pozemkoch, ktoré nie sú vedené ako lesné pozemky. Je tomu tak aj v rámci našej Slovenskej NIML. Zároveň je to v súčasnosti jediný zdroj podrobných informácií o týchto lesoch na Slovensku. Stav lesov sa posudzoval na všetkých inventarizačných plochách, ktoré splnili kritériá pre pokrytie lesom v zmysle medzinárodnej definície lesa podľa klasifikácie FAO, konkrétne: „Les je pozemok pokrytý drevinovou vegetáciou s rozlohou presahujúcou 0,5 ha, minimálnou šírkou 20 m a pokryvnosťou korún stromov viac ako 10 %. Stromy by mali na danom mieste dosahovať minimálnu výšku 5 m“ (Šebeň et al., 2015; Šmelko et al., 2006). Za lesy sa považujú aj dočasne odlesnené porasty, v súčasnosti obnovené čistiny a mladé porasty. Za lesy sa nepovažujú porasty s menšou šírkou ako 20 m a porasty alebo pozemky s prevažne poľnohospodárskym alebo mestským využitím.

Plochu starších lesných porastov na lesnej a nelesnej pôde možno odvodiť pomocou metód diaľkového prieskumu Zeme (Bucha, 2014; Hlásny and Sitková, 2010; Jaśkowiec, 2013; Kurčíková, 2013), ale na rozdiel od NIL nám tieto zdroje nedokážu s dostatočnou presnosťou poskytnúť ďalšie informácie, napr. drevinové zloženie, štruktúru porastu, zásobu atď.

1.1 Súčasný stav

Podľa NIML2 2015-2016 dosiahla plocha lesov na nelesných pozemkoch hodnotu 288 ±39 tisíc ha. Analýza kategórií pozemkov odhalila, že na Slovensku sa biele miesta nachádzali primárne na poľnohospodárskej pôde, najmä na trvalých trávnych porastoch (75 %),

nasledovala iná pôda (13 %) a v menšej miere aj na ornej pôde, vodných plochách, zastavaných plochách a záhradách. Analýza vlastníckej štruktúry (Šebeň, 2017) ukázala, že tri štvrtiny plochy lesov na nelesnej pôde patrili súkromným vlastníkom a približne jedna desatina neznámym vlastníkom. Zvyšnú menšiu časť vlastnil štát, obce alebo cirkev. Z hľadiska ich výškového rozloženia sa najvyšší podiel lesov na nelesnej pôde nachádzal v nadmorských výškach pod 400 m n. m. ($40,3 \pm 7,1$ %). Vo všeobecnosti sa uvádza, že využívanie pôdy v horských oblastiach je stabilnejšie v porovnaní s nížinami, kde sa často uplatňovala intenzifikácia využívania pôdy (Boltiziar and Olah, 2013). Na Slovensku boli zistené väčšie regionálne rozdiely s najmenším podielom lesov na nelesnej pôde na juhozápade a najvyšším podielom na východe krajiny. Z hľadiska priemernej zásoby dreva na hektár (hrubina bez kôry) boli hodnoty v lesoch na nelesnej pôde na úrovni $159 \pm 22 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$. Celková zásoba dreva sa odhaduje na 45.5 ± 6.7 mil. m^3 , čo predstavuje 20.3 ± 2.9 mil. t viazaného uhlíka. Pomer zásoby ihličnatých a listnatých drevín je zhruba 1:2. Drevinové zloženie lesov na nelesnej pôde bolo pestršie ako zloženie lesov na lesnej pôde. To vyplýva z prirodzenej expanzie lesov a je v súlade s teóriou ekologickej sukcesie. Najzastúpenejším ihličnanom bol smrek ($22,6 \pm 5,5$ %) a z listnatých druhov prevládali buk a hrab (Šebeň, 2017).

Tab. 1 Výmera lesných a nelesných pozemkov v jednotlivých krajoch na Slovensku stanovená z výsledkov oboch cyklov NIML SR (Šebeň et al., 2018)

Kraj	Výmera	NIML1 (2005-2006)			NIML2 (2015-2016)		
		Lesné pozemky	Nelesné pozemky	Podiel NLP/ (LP+NLP)	Lesné pozemky	Nelesné pozemky	Podiel NLP/ (LP+NLP)
	tis. ha-1	tis. ha-1	tis. ha-1	%	tis. ha-1	tis. ha-1	%
Bratislavský (BA)	205	75 $\pm$ 18	2 $\pm$ 4	2.8 $\pm$ 4.7	76 $\pm$ 21	2 $\pm$ 3	2.1 $\pm$ 3.9
Trnavský (TT)	415	62 $\pm$ 18	3 $\pm$ 4	4.9 $\pm$ 6.6	62 $\pm$ 19	3 $\pm$ 4	4.9 $\pm$ 6.7
Trenčiansky (TN)	450	221 $\pm$ 27	24 $\pm$ 12	9.7 $\pm$ 4.5	222 $\pm$ 35	27 $\pm$ 11	10.9 $\pm$ 5.0
Nitriansky (NR)	634	85 $\pm$ 22	5 $\pm$ 6	5.5 $\pm$ 5.9	86 $\pm$ 22	11 $\pm$ 7	11.7 $\pm$ 8.2
Žilinský (ZA)	681	351 $\pm$ 33	54 $\pm$ 18	13.4 $\pm$ 3.9	358 $\pm$ 44	43 $\pm$ 14	10.8 $\pm$ 3.9
Banskobystrický (BB)	945	450 $\pm$ 39	57 $\pm$ 19	11.2 $\pm$ 3.3	447 $\pm$ 49	78 $\pm$ 18	14.8 $\pm$ 4.0
Prešovský (PO)	897	403 $\pm$ 43	84 $\pm$ 25	17.2 $\pm$ 4.5	411 $\pm$ 47	86 $\pm$ 18	17.4 $\pm$ 4.4
Košický (KE)	675	253 $\pm$ 28	46 $\pm$ 14	15.3 $\pm$ 4.2	262 $\pm$ 38	37 $\pm$ 13	12.4 $\pm$ 4.8
Slovakia	4 903	1 901 $\pm$ 86	273 $\pm$ 41	12.6 $\pm$ 1.7	1 924 $\pm$ 54	288 $\pm$ 39	13.0 $\pm$ 1.7

Tab. 2 Zásoba dreva (hrubina bez kôry) a zásoba uhlíka v lesoch na nelesných pozemkoch na Slovensku (NIML 2015-2016) (Šebeň et al., 2018)

Hrubková kategória	Skupina drevín	Zásoba dreva			Uhlík	
		m3 ha-1	mil. m3	Podiel %	t ha-1	mil. t
d1.3<7 cm	Ihličnaté				0.4 $\pm$ 0.4	0.1 $\pm$ 0.1
	Listnaté				2.4 $\pm$ 1.2	0.7 $\pm$ 0.3
	Spolu				2.8 $\pm$ 1.2	0.8 $\pm$ 0.4
d1.3>7 cm	Ihličnaté	48 $\pm$ 14	13.7 $\pm$ 3.5	30.1 $\pm$ 6.1	15.8 $\pm$ 3.9	4.5 $\pm$ 1.1
	Listnaté	111 $\pm$ 19	31.8 $\pm$ 5.5	69.9 $\pm$ 11.7	52.2 $\pm$ 8.0	15.0 $\pm$ 2.3
	Spolu	159 $\pm$ 22	45.5 $\pm$ 6.7	100	68.0 $\pm$ 5.0	19.5 $\pm$ 2.5
Spolu	Ihličnaté	48 $\pm$ 14	13.7 $\pm$ 3.5	30.1 $\pm$ 6.1	16.2 $\pm$ 3.9	4.6 $\pm$ 1.1
	Listnaté	111 $\pm$ 19	31.8 $\pm$ 5.5	69.9 $\pm$ 11.7	54.6 $\pm$ 8.2	15.7 $\pm$ 2.4
	Spolu	159 $\pm$ 22	45.5 $\pm$ 6.7	100	70.8 $\pm$ 6.6	20.3 $\pm$ 2.9

1.2 Biele plochy z pohľadu legislatívy a hospodárenia na nich

Keďže biele plochy sú lesné porasty na nelesných pozemkoch, nevzťahuje sa na nich zákon o lesoch a tým pádom potreba odborného obhospodarovania lesov v zmysle plánov starostlivosti o lesy. Je zrejmé, že obnova a vývoj lesných porastov na týchto plochách sú spontánne, bez systematických ľudských zásahov, s výnimkou občasnej ťažby. Výrub lesa sa vykonáva výlučne na základe rozhodnutia vlastníka pozemku, často bez rešpektovania princípov optimalizácie výnosového potenciálu. Nekvalitné drevo z týchto porastov sa prevažne využíva na energetické účely (Šebeň et al., 2018).

V súvislosti so vstupom Slovenska do Európskej únie vznikol v roku 2004 vznikol register poľnohospodársky využívanej pôdy, nazývaný LPIS (Land Parcel Identification System). Bol vytvorený Výskumným ústavom pôdozvedectva a ochrany prírody. LPIS tvoria pôdne bloky, ktoré predstavujú umelo alebo prirodzene ohraničené poľnohospodársky využívané časti krajiny. Pôdne bloky sa spracovali na základe ortofotomáp z celého územia Slovenska. V roku 2004 sa zistil nesúlad výmer trvalých trávnych porastov (TTP) v LPIS s evidenciou TTP v katastri nehnuteľností na 37% plochy (Pado, 2018).

Z hľadiska výmery môžeme fenomén bielych plôch podrobnejšie rozčleniť na (Pado, 2018):

- „Biele plochy“ - dlhodobozalesnené poľnohospodárske pôdy, ktoré dlhodobozslúžia na plnenie funkcie lesov a sú vhodné na preradenie medzi lesné pozemky, t.j. na zmenu poľnohospodárskeho druhu pozemku na lesný pozemok. Z praxe vyplýva, že ide o viac ako 20-ročné porasty lesných drevín na poľnohospodárskej pôde (nie sú výnimkou ani 80-ročné porasty drevín na poľnohospodárskej pôde, ktoré sú dnes súčasťou lesných ekosystémov). Je treba zdôrazniť, že ide o dlhodobozalesnenú poľnohospodársku pôdu, ktorá je v registri „C“ katastra nehnuteľností stále evidovaná ako „poľnohospodársky druh pozemku“, najčastejšie ako trvalý trávny porast. Takéto poľnohospodárske pozemky sú vhodné na preradenie medzi lesné pozemky
- „Ľahký samonálet“ - dlhodobozzanedbané poľnohospodárske pôdy s porastom burín, krovín a stromov. Ide o dlhodobozzanedbanú poľnohospodársku pôdu, ktorá je v registri „C“ katastra nehnuteľností stále evidovaná ako „poľnohospodársky druh pozemku“. Takéto poľnohospodárske pozemky nie sú vhodné na preradenie medzi lesné pozemky.

Vzhľadom na nezrovnalosti v katastri nehnuteľností sa zvyšujú aj administratívne nároky týchto zmien. Časť týchto pozemkov (najmä tie úrodnejšie) by sa mohla využívať na poľnohospodárstvo, najmä ak sa dôsledne uplatňuje dotačná agrárna politika. Časti, ktoré sa zjavne nebudú využívať na poľnohospodárske účely, by sa mali v katastri nehnuteľností presunúť do kategórie lesnej pôdy. To si vyžaduje niekoľko krokov: identifikáciu, mapovanie a administratívnu prekategORIZáciu. V súčasnosti je tento proces výslovne spojený so žiadosťou vlastníka. Okrem problémov s identifikáciou napr. neznámych vlastníkov, je veľkým problémom aj neochota vlastníkov vykonať takúto zmenu v kategórii pozemku, pretože na takýchto miestach sa nemusí dodržiavať pomerne prísna lesnícka legislatíva (hospodárenie v lesoch podľa programov starostlivosti o lesy) (Šebeň et al., 2018).

Podľa ustanovení zákona o ochrane pôdy nie je vlastník a užívateľ poľnohospodárskej pôdy povinný pestovať poľnohospodárske plodiny na poľnohospodárskej pôde, je však povinný zabezpečiť základnú starostlivosť o poľnohospodársku pôdu. V tomto zmysle podľa ustanovenia § 3 zákona o ochrane pôdy je každý vlastník alebo užívateľ poľnohospodárskej pôdy povinný vykonávať opatrenia na zabezpečenie základnej starostlivosti o poľnohospodársku pôdu tak, že vykonáva agrotechnické opatrenia zamerané na ochranu a zachovanie kvalitatívnych vlastností a funkcií poľnohospodárskej pôdy a na ochranu pred jej

poškodením a degradáciou, vrátane predchádzania výskytu a šíreniu burín a samonáletu drevín na neobrábaných pozemkoch (Pado, 2018).

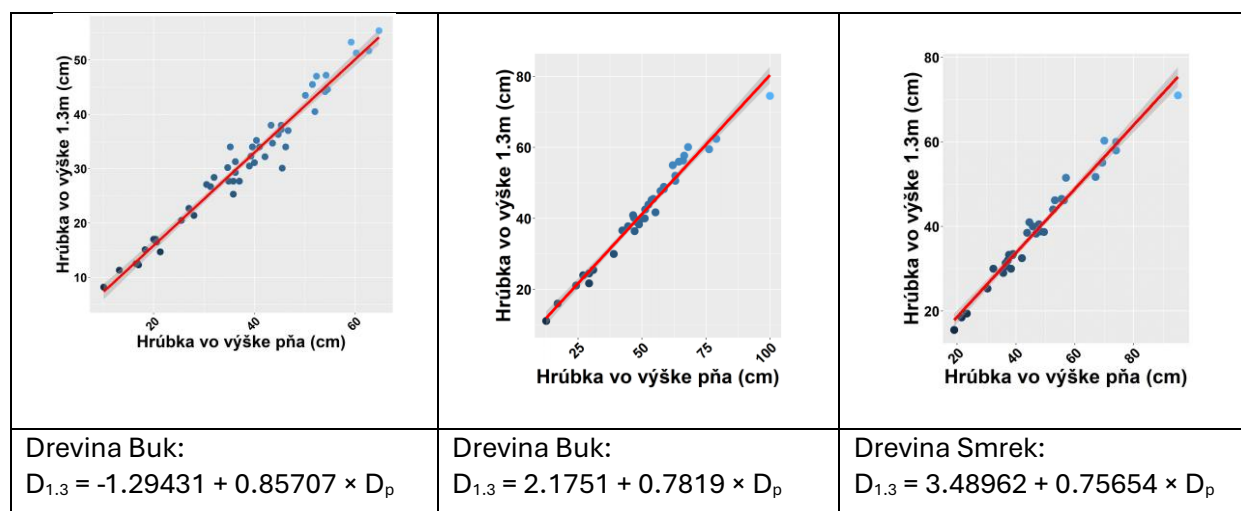
Neobrábané poľnohospodárske plochy môžu byť lákavou príležitosťou pre eurofondové dotačné podvody i zdrojom krádeží pre niekoho neexistujúcej drevnej hmoty (Pado, 2018).

2. OCENENIE LESNÉHO PORASTU NA BIELYCH PLOCHÁCH

Ocenenie lesného majetku tj. lesného pozemku a porastu sa riadi vyhláškou 492/2004 (Vyhláška Ministerstva spravodlivosti Slovenskej republiky o stanovení všeobecnej hodnoty majetku). Oceňovanie lesného majetku môžu vykonávať znalci v odbore Lesníctvo. A priori sa oceňovanie lesného majetku týka pozemkov a porastov na lesných pozemkoch. Vyhláška však ustanovuje, že v prípade nesúladu údajov o druhu pozemku v katastri nehnuteľností so skutočným stavom znalec stanovuje všeobecnú hodnotu lesa aj v prípadoch, ak ide o plošný výskyt lesných stromov na iných ako lesných pozemkoch. Ak dôjde k nelegálnemu výrubu na takýchto pozemkoch, jediná možnosť získať informácie o lesnom poraste je terénna obhliadka a zisťovanie stavu a parametrov pňov a okolitého porastu. V takomto prípade je možné využiť metódu rekonštrukcie jednotlivého stromu (Merganič and Bahýľ, 2024). V prípade totálneho odstránenia porastu je určitým východiskom využiť údaje z diaľkového prieskumu zeme (napr. údaje z leteckého skenovania, aj voľne dostupné na ZBGIS).

2.1 Metóda rekonštrukcie jednotlivého stromu

V prípade rekonštrukcie jednotlivého stromu (Merganič and Bahýľ, 2024) spočíva postup v zmeraní hrúbok pňov vo výške pňa a určenie potrebných informácií k rekonštrukcii (druh dreviny, stupeň rozkladu a pod.) a odmeraní dendrometrických veličín, pokiaľ možno pre všetky hodnotené druhy drevín, na vybranom súbore okolo stojacich (neďaleko stojacich) stromov, ktorých hrúbky pokrývajú celé predpokladané variačné rozpätie hrúbok nelegálne vyrúbaných stromov. Na vybraných stojacich stromoch, tzv. vzorníkoch, sa odmerajú hrúbky vo výške 1,3m ($d_{1.3}$) aj vo výške pňa 0,20-0,25m. Zároveň sa odmeria aj výška týchto stromov. Z údajov zo vzorníkov sa vytvoria regresné modely a to model hrúbky vo výške 1,3m z hrúbky vo výške pňa a model štádiovej výškovej krivky tj. vzťah hrúbky v $d_{1.3}$ a výšky stromu. Na základe týchto lokálnych modelov sa najprv na údajoch z pňov určí hrúbka vo výške 1,3m a potom s jej využitím aj výška už neexistujúcich stromov.



Obr. 1 Ukážka regresného vzťahu medzi hrúbkou $d_{1.3}$ a hrúbkou vo výške pňa (príklady z viacerých znaleckých posudkov)

Alternatívny postup určenia hrúbky stromu v $d_{1.3}$ určuje vyhláška 170/2021 Z.z. Avšak neodporúčame používať tento spôsob, nakoľko absolútny aj regresný člen lineárnych modelov je drevinovo a stanovištne špecifický. Ako uvádzajú (Merganič and Bahýľ, 2024; Scheer and Vaculčíak, 2007), používanie tohto postupu vedie k systematickému nadhodnocovaniu hrúbky vo výške 1.3m, čo sa následne môže prejavovať vychýleným odhadom objemu stromu a teda aj zásoby porastu. Pre matematické vyrovnanie výškovej krivky je možné využiť viacero typov regresných rovníc, odporúčame však využiť lesnícky známe funkcie napr. funkciu podľa Michajlova (Merganič and Bahýľ, 2024).

Odvozená hrúbka $d_{1.3}$ a výška sa následne použije pre výpočet objemu cez lesnícky dobre známe objemové tabuľky alebo rovnice. Z hľadiska určenia objemu stromov je najpresnejším spôsobom použitie dvojparametrového modelu (Petráš and Pajtík, 1991) či už v tabuľkovej alebo rovnícovej forme. Pre praktické použitie je vytvorená internetová verzia dostupná na adrese <https://bosela.shinyapps.io/Biomasa/>, kde je okrem objemu stromov možné vypočítať aj ich biomasu.

Pre ocenenie drevnej hmoty je potrebné ju ešte kvalitatívne ohodnotiť tj. roztriediť do zaužívaných akostných tried. Po jej rozdelení prenasobíme zásobu v jednotlivých akostných triedach zvyčajne všeobecne platnými cenami dreva publikovanými napr. v „Spravodajcovi NLC Zvolen, Priemerné ceny dodávok sortimentov surového dreva po oblastiach v sektore štátnych lesov a neštátnych lesov (bez DPH, lokalita expedičný sklad, odvozné miesto)“. V ďalšom kroku je potrebné hodnotu speňaženia prepočítať na lokalitu „PEŇ“. Od hodnoty speňaženia odpočítame náklady na ťažbu, približovanie, manipuláciu a odvoz dreva ako aj režijné náklady. Určenie úplných vlastných nákladov výroby môže byť na týchto pozemkoch komplikovanejšie, ale s využitím v teréne zistených informácií pre aplikáciu výkonových noriem a plánovacích sadzieb (v EUR bez DPH na normohodinu pre jednotlivé technológie ťažbového procesu $\times$ normohodiny príslušnej operácie) napr. platných pre Lesy SR š.p. (najbližšia organizačná jednotka) generalizujeme výpočet. Náklady za odvoz je potrebné uplatniť vtedy, ak sa použijú priemerné ceny sortimentov z lokality expedičný sklad. Výšku výrobného režia je možné odhadnúť z metodiky (Merganič et al., 2023). Výšku výrobného režia potom vykalkulujeme ako priame náklady celkom $\times$ (Réžia%/100). Súčet priamych nákladov výroby dreva a výrobných režijných nákladov predstavuje úplné vlastné náklady výroby.

3. ZÁVER

Biele plochy tvoria ďalších takmer 300 tisíc hektárov lesa, pričom na základe údajov z Národnej inventarizácie a monitoringu lesov SR sa na nich nachádzajú listnaté lesy prevažne vo veku do 60 rokov. Analýza údajov z NIML ukázala, že lesy na nelesnej pôde pokrývajú pomerne vysoký podiel zalesnenej plochy na Slovensku a to približne 13 % (Šebeň et al., 2018).

Vzhľadom na národný, ako aj medzinárodný význam tejto pôdy, by sa na rozsiahle zmeny pri rekultivácii týchto plôch mali vyčleniť dostatočné finančné zdroje zo štátnych (verejných) zdrojov, prípadne zo štrukturálnych fondov EÚ, pretože vzhľadom na nezrovnalosti v katastri nehnuteľností sa zvyšujú aj administratívne nároky týchto zmien. Časť týchto pozemkov (najmä tie úrodnejšie) by sa mohla využívať na poľnohospodárstvo, najmä ak sa dôsledne uplatňuje dotačná agrárna politika. Časti, ktoré sa zjavne nebudú využívať na poľnohospodárske účely, by sa mali v katastri nehnuteľností presunúť do kategórie lesnej pôdy (Kurčíková, 2013; Pado, 2018; Šebeň et al., 2018; Zaušková et al., 2012).

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektu APVV-22-0001) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202). Táto štúdia bola spolufinancovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence.

LITERATÚRA

BOLTIŽIAR, M., OLAH, B. Land Use Changes of UNESCO Biosphere Reserves in the Slovak Carpathians Since the Late Eighteenth Century, in: Kozak, J., Ostapowicz, K., Bytnerowicz, A., Wyżga, B. (Eds.), *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. pp. 377–391. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12725-0_27

BUCHA, T., 2014. *Satelity v službách lesa*. Národné lesnícke centrum, Zvolen.

HLÁSNY, T., SITKOVÁ, Z. (EDS.). *Spruce forests decline in the Beskids*, 1. ed. ed. 2010. Národné lesnícke centrum, Zvolen, Praha, Jíloviště - Srnady.

JÁŠKOWIEC, B. Assessment of Land Cover Changes in the Carpathian Mountains with MODIS Data, in: Kozak, J., Ostapowicz, K., Bytnerowicz, A., Wyżga, B. (Eds.), *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*. 2013. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 639–653. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12725-0_45

KOZAK, J. Forest Cover Change in the Western Carpathians in the Past 180 Years. *Mt. Res. Dev.* 2003, 23, 369–375. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2003\)023\[0369:FCCITW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2003)023[0369:FCCITW]2.0.CO;2)

KUEMMERLE, T., CHASKOVSKYY, O., KNORN, J., RADELOFF, V.C., KRUHLOV, I., KEETON, W.S., HOSTERT, P. Forest cover change and illegal logging in the Ukrainian Carpathians in the transition period from 1988 to 2007. *Remote Sens. Environ.* 2009, 113, 1194–1207. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.02.006>

KUEMMERLE, T., HOSTERT, P., RADELOFF, V.C., VAN DER LINDEN, S., PERZANOWSKI, K., KRUHLOV, I., Cross-border Comparison of Post-socialist Farmland Abandonment in the Carpathians. *Ecosystems* 2008, 11, 614–628. <https://doi.org/10.1007/s10021-008-9146-z>

KULLA, L., SITKOVÁ, Z. (EDS.). *Rekonštrukcie nepôvodných smrekových lesov: poznatky - skúsenosti - odporúčania*, 1. vyd. ed. 2012. Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav, Zvolen.

KURČÍKOVÁ, M. Identifikácia hraníc a charakteristík bielych plôch s využitím údajov DPZ, in: GIS Ostrava. Presented at the GIS Ostrava, Ostrava. 2013. p. 11.

MERGANIČ, J., BAHÝĽ, J. *Hodnotenie a oceňovanie lesa a poľovných revírov*. 2024. Technická univerzita vo Zvolene, Zvolen.

MERGANIČ, J., BARBIERIK, I., BAHÝĽ, J. Stanovenie a rozbor režijných nákladov v neštátnom sektore pre účely oceňovania lesa v rámci priestupkových, správnych, trestných či civilných konaní. 2023. Znalecký ústav, NLC Zvolen.

MERGANIČOVÁ, K., SITKO, R., MERGANIČ, J. *Využitie GIS pre procesne orientované modelovanie vývoja lesa*, in: *Praktické využití GIS v lesnictví a zemědělství*. Praha, 2013. p. 11.

Midriak, R., *Spustnuté pôdy a pustnutie krajiny Slovenska*. 2011. 1. vyd. ed. Univerzita Mateja Bela, Banská Bystrica.

PADO, R. Biele plochy – slovenské Hic sunt leones [WWW Document]. blog.sme.sk. URL <https://blog.sme.sk/pado/spolocnost/biele-plochy-slovenske-hic-sunt-leones> (accessed 8.28.25). 2018.

PETRÁŠ, R., PAJTÍK, J., Sústava československých objemových tabuliek drevín. *Lesn. Časopis* 1991, 37, 49–56.

PLESNÍK, P., Pôvodnosť hlavných lesných drevín na Kysuciach (v oblasti Čadce). *Geographica*, 1987, P. 27–48.

RĄCZKOWSKA, Z., ŁAJCZAK, A., MARGIELEWSKI, W., ŚWIĘCHOWICZ, J. Recent Landform Evolution in the Polish Carpathians, in: Lóczy, D., Stankoviansky, M., Kotarba, A. (Eds.), *Recent Landform Evolution: The Carpatho-Balkan-Dinaric Region*. 2012. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 47–101. https://doi.org/10.1007/978-94-007-2448-8_5

SCHEER, Ľ., VACULČIAK, T. Odhad objemu vyťažených stromov v poraste pomocou hrúbky pňov. *Acta Fac. For. Zvolen Slovak*. 2007, 49, 65–79.

ŠEBEŇ, V. *Národná inventarizácia a monitoring lesov SR 2015-2016*. Informácie-metódy-výsledky, Lesnícke štúdie. 2017, Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav, Zvolen.

ŠEBEŇ, V., KUČERA, M., MERGANICOVA, K., KONÔPKA, B. The current state of non-forest land in the Czech Republic and Slovakia - forest cover estimates based on the national inventory data. *Lesn. Časopis* 2018, 64. <https://doi.org/10.1515/forj-2017-0043>

ŠEBEŇ, V., MERGANIČ, J., KULLA, Ľ., BOŠEĽA, M. *Národná inventarizácia a monitoring lesov Slovenska. Metodika zberu údajov – Pracovné postupy pre 2. cyklus NIML SR 2015-2016*. 2015. Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav, Zvolen.

ŠMELKO, Š., MERGANIČ, J., ŠEBEŇ, V., RAŠI, R., JANKOVIČ, J. *Národná inventarizácia a monitoring lesov Slovenskej republiky 2005-2006. Metodika terénneho zberu údajov (Pracovné postupy – 3. Doplnená verzia)*. 2006. Národné lesnícke centrum - Lesnícky výskumný ústav, Zvolen.

ZAUŠKOVÁ, Ľ., MIDRIAK, R. Multifunkčné poľnohospodárstvo ako alternatíva trvalo udržateľného rozvoja poľnohospodárskej krajiny (na príklade slovenskej časti Medzibodrožia), In: *Smolenická výzva IV. : kultúrna krajina ako objekt výskumu v oblasti trvalo udržateľného*

rozvoja. Presented at the *Smolenická výzva IV. : kultúrna krajina ako objekt výskumu v oblasti trvalo udržateľného rozvoja*, 2008. Ústav krajinnej ekológie SAV, Smolenice, pp. 61–67.

ZAUŠKOVÁ, Ľ., MIDRIAK, R., ŠEBEŇ, V. „Biele plochy“ z pohľadu pustnutia kultúrnej poľnohospodárskej krajiny. *For. J.* 2012. 121–128.

doc. Ing. Ján Merganič, Ph.D.: Technical University in Zvolen, Forestry Faculty, Masarykova 24, SK – 960 53 Zvolen, Slovak Republic. Email: merganic@tuzvo.sk

Dr. nat. techn. Ing. Katarína Merganičová: Department of Biodiversity of Ecosystems and Landscape, Institute of Landscape Ecology, Slovak Academy of Sciences, 949 01 Nitra, Slovak Republic. Email: k.merganicova@forim.sk

HODNOTENIE A METÓDY ODHADU SUCHEJ A ČERSTVEJ HMOTNOSTI DENDROMASY NA PLANTÁŽACH RÝCHLORASTÚCICH DREVÍN

SKLADAN MICHAL, LIESKOVSKÝ MARTIN, JULIANA CHUDÁ, JOZEF VÝBOŠŤOK

Short-rotation woody crop (SRWC) plantations play a crucial role in addressing the current energy and climate crisis. Their dendromass production potential represents a strategic source of renewable energy and an effective means of carbon sequestration, while also contributing to the energy self-sufficiency of rural regions. Efficient monitoring of production characteristics—particularly the estimation of dry biomass—is essential for optimizing the management and productivity of these plantations. This study focused on estimating both dry and fresh biomass in a coppiced poplar plantation using three scanning technologies: terrestrial laser scanning (TLS), mobile laser scanning (MLS), and a low-cost MLS prototype. Volume models were generated from point cloud data, with the low-cost MLS prototype demonstrating the highest performance, achieving correlation coefficients up to 0.84 (R^2) and root mean square error (RMSE) values below 0.75 kg. Predictive models were developed to estimate not only dry biomass but also fresh biomass. The highest accuracy in dry biomass estimation was achieved using the MLS prototype with a voxel size of 5 cm, yielding $R^2 = 0.89$ and $RMSE = 0.75$ kg. The results confirm that both TLS and MLS technologies are effective tools for dendromass quantification under Central European conditions. Moreover, the low-cost MLS prototype offers excellent performance at minimal operational cost, making it a promising solution for large-scale biomass monitoring. This approach demonstrates high potential for precise tracking of dendromass dynamics in SRWC plantation environments and supports the development of sustainable biomass production systems.

Kľúčové slová: Pozemné laserové skenovanie, mobilné laserové skenovanie, plantáže rýchlorastúcich drevín, odhad suchej hmotnosti

Key words: Terrestrial Laser Scanning, mobile laser scanning, short-rotation woody crop plantations, dry biomass estimation

1. ÚVOD

Plantáže RRD majú veľký význam pri zabezpečení dostupnosti obnoviteľnej energie a ich pestovanie prispieva k uhlíkovej neutralite a má potenciál vytvárať negatívnu uhlíkovú stopu počas celého životného cyklu (Fuertes et al., 2023; Sramek et al., 2023). Okrem toho zvyšujú biodiverzitu, znižujú eróziu pôdy a zlepšujú riadenie povodní, čím prispievajú k boju proti globálnemu otepľovaniu (Rodrigues et al., 2021). Ich rozvoj tiež podporuje zamestnanosť a udržateľný rozvoj vidieckych oblastí. Slúžia aj ako doplnkový zdroj energie, ktorý môže vyvážiť nestabilné obnoviteľné zdroje ako slnko či vietor (Scarlat et al., 2015). Efektívne využívanie RRD si vyžaduje okrem správneho výberu lokalít aj presný odhad biomasy, najmä nadzemnej drevnej biomasy - dendromasy, ktorý je kľúčový pre optimalizáciu zberu a logistiky (Sramek et al., 2023).

Tradičné metódy odhadu dendromasy, založené na terénnych meraniach, sú presné, ale aj časovo náročné a prácne. Alternatívou sú alometrické modely, ktoré odhadujú dendromasu na základe parametrov, ako je priemer kmeňa či výška stromu, no tieto modely často platia len pre konkrétne lokality, alebo genotypy (Menéndez-Miguélez et al., 2023). Moderné technológie, hlavne laserové skenovanie (MLS, TLS), ponúkajú rýchlejšie a spoľahlivejšie alternatívy. Štúdie ukazujú, že v hustých, výmladkových plantážach modely založené na TLS poskytujú presnejšie odhady dendromasy (Menéndez-Miguélez et al., 2023; Puletti et al., 2021) (Menéndez-Miguélez a kol., 2023; Puletti a kol., 2021).

V tejto štúdii sme použili na odhad dendromasy metódu založenú na voxelizácii bodových mračen získaných pomocou MLS (Stonex X120GO), TLS (Riegl VZ1000) a nízko-nákladový prototyp MLS založený na senzore Livox MID360. Predmetom výskumu bola topoľová plantáž počas druhého rotačného cyklu. Použili sa rôzne veľkosti voxelov (5, 10, 15,

20 cm), a na základe týchto údajov sme vytvorili regresné a predikčné modely spájajúce suchú a čerstvú dendromasu s objemom voxelizovaných bodových mračen pre jednotlivé prístroje.

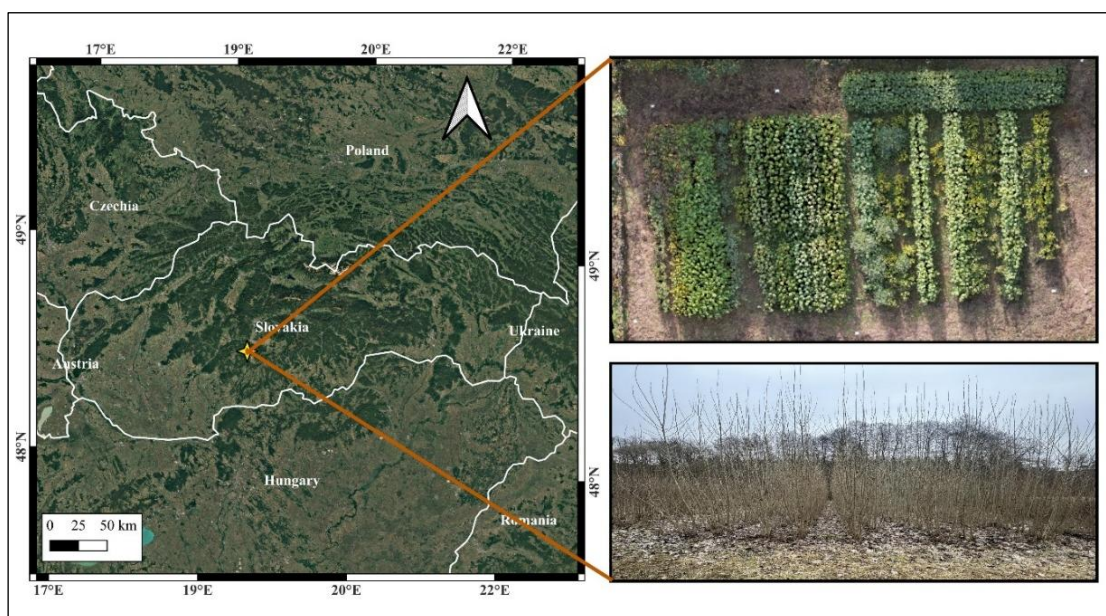
2. CIEĽ PRÁCE

Cieľom práce bolo vyhodnotiť presnosť a spoľahlivosť metódy odhadu suchej a čerstvej hmotnosti dendromasy na plantážach RRD s využitím rôznych technológií blízkeho dosahu (TLS, MLS, MLS prototyp). Prezentované výsledky sú zamerané na hodnotenie metódy odhadu suchej a čerstvej hmotnosti dendromasy na klonovom archíve v Budči, pričom zdrojom dát je dizertačná práca Skladan (2025).

3. MATERIÁL A METODIKA PRÁCE

3.1 Miesto štúdie

Plantáž sa nachádza na strednom Slovensku, pri obci Budča (48,59°S, 19,06°V). Bola založená na jar 2018 vo výške 312 m. Priemerná ročná teplota je 8,3 °C, s ročnými zrážkami 670–850 mm. Zahŕňa 19 schválených klonov topoľa z sekcie Aigeiros (napr. Blanc du Poitou, I-476, Dolomiten, Gelrica, Spreewald) a sekcie Tacamahaca (Oxford, NE-42, Fritz Pauley, MAX1–MAX5). Plantáž je súčasťou demonštračného objektu v Budči spravovaného Technickou univerzitou vo Zvolene, je usporiadaná v dvoj-radoch s rozstupmi 1,2 x 0,5 m a vzdialenosťou medzi dvoj-radmi 2,4 m. Na jeseň 2022 bola vyťažená a je v treťom roku druhého rotačného cyklu, počas ktorého vyrastá viacero výhonkov z každého pňa. Štúdia bola vykonaná vo februári 2025, keď porast plantáže nemal listy.



Obr. 1 Vľavo - KA Budča poloha v rámci Slovenska, vpravo hore - ortomozaika plantáže z UAV fotogrametrie, vpravo dole – detail plantáže

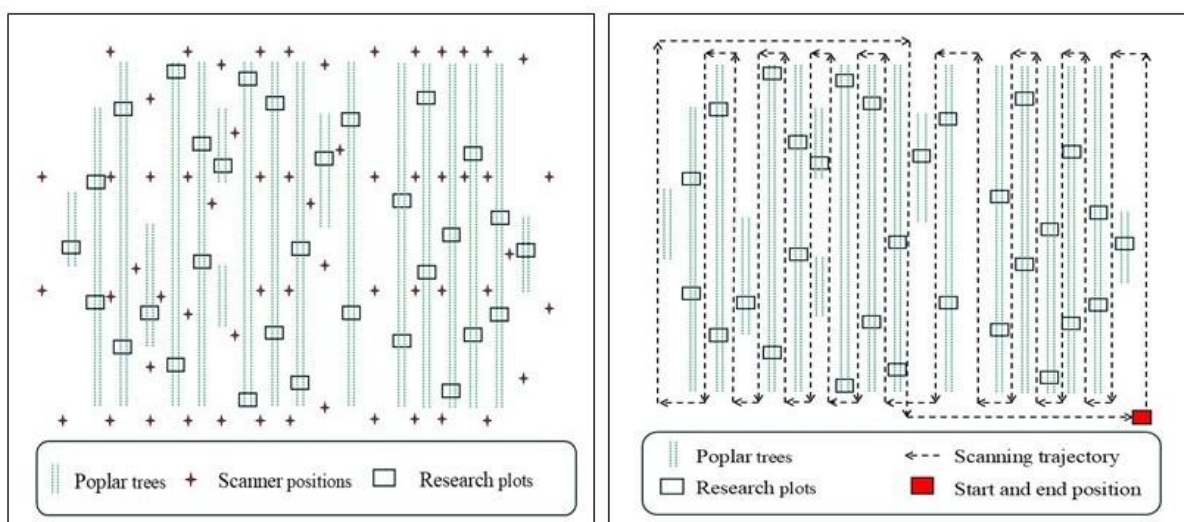
3.2 Založenie výskumných plôch

Pre účely tejto štúdie bolo v plantáži založených 31 výskumných plôch, z ktorých 16 bolo určených na vytvorenie regresných modelov spájajúcich objem voxelov získaný z bodových mračen a suchú biomasu. Zvyšných 15 plôch slúžilo ako kontrolné na overenie presnosti odhadu dendromasy. Každá plocha tvoril dvoj-trs stromov, pričom pre každý dvojrad boli vytvorené dve plochy; tam, kde boli rady výrazne zredukované, bola vytvorená len jedna

plocha. Na jednoduchšiu identifikáciu v rámci bodových mračien boli okolo každej plochy zapichnuté drevené kolíky a medzi kolíky bola natiahnutá plastová páska.

3.3 Laserové skenovanie

Pre účely TLS bol využitý prístroj Riegl VZ1000. Použila sa metóda „multi-scan“, kde bola plantáž skenovaná z viacerých pozícií, pričom všetky skeny boli počas predspracovania zlúčené do jedného finálneho skenu. Medzi každý dvojrad boli stanovené štyri pozície, okrem výrazne zredukovaných radov, kde boli pozície upravené podľa situácie, čo viedlo k celkovému počtu 58 TLS pozícií pre celú plantáž. Skenovanie z jednej pozície trvalo približne 50 sekúnd, zatiaľ čo celkové skenovanie plantáže vrátane presunu a prestavenia skenera trvalo celkovo 2 hodiny a 45 minút. Pre MLS bol použitý prístroj Stonex X120GO, ktorý bol držaný v ruke a bol nesený pozdĺž dvojradov. Skenovanie začalo aj skončilo na tej istej pozícii. Rovnakú trajektóriu použil aj lacnejší prototyp MLS. Skenovanie celej plantáže pomocou oboch systémov MLS trvalo približne 8 minút. Trajektória MLS a polohy TLS sú zobrazené na obrázku 2.



Obr. 2 Pozície TLS v rámci plantáže sú na ľavej strane, trajektória MLS je na pravej strane

3.4 Vyt'aženie výskumných plôch a stanovenie suchej hmotnosti

Po dokončení skenovania bola každá výskumná plocha vyt'ažená. Čerstvá hmotnosť sa vážila priamo v teréne ihneď po vyt'ažení pomocou zavesnej váhy. Hmotnosť pre každú plochu bola zaznamenaná a z každej plochy sa odobrali štyri vzorky približne 20 cm dlhé: jedna zo spodnej časti, jedna zo stredu, jedna z hornej časti kmene a štvrtá z bočnej vetvy. Vzorky boli označené a uzavreté v plastových vreckách, následne doručené do laboratória, kde boli vážené s presnosťou na stotinu gramu. Následne boli vzorky vysušené v laboratórnej sušiarňi pri 104 °C, až kým nedosiahli konštantnú hmotnosť, a opätovne zvažované. Tieto údaje boli použité na určenie relatívnej vlhkosti vzoriek topoľov na výskumných plôchách a výpočet ich suchej hmotnosti. Obrázok 3. znázorňuje proces zberu, váženia a sušenia.



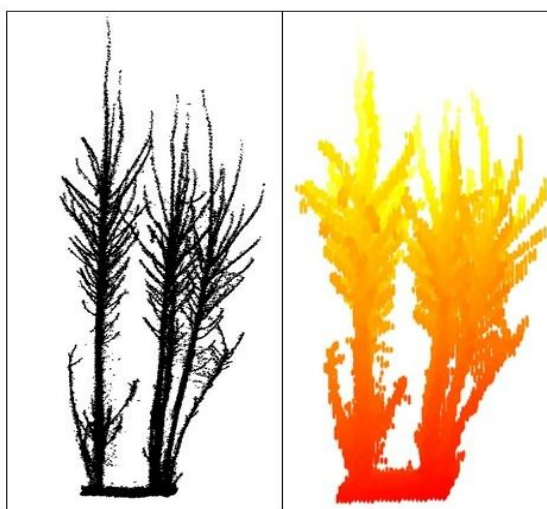
Obr. 3 vyťaženie výskumných plôch: Váženie priamo v teréne (vľavo), váženie vzoriek v laboratóriu (uprostred) a sušenie vzoriek (vpravo)

3.5 Tvorba bodových mračien zo skenerov a voxelizácia

Pre vytvorenie bodových mračien z TLS a MLS boli surové dáta predspracované softvérom od výrobcu skenera. Dáta z RIEGL VZ-1000 boli spracované pomocou softvéru RiSCAN PRO 2.1.2 (RiSCAN PRO., 2025), zatiaľ čo dáta zo Stonex X120 GO boli predspracované softvérom GOpot ('X120 GO SLAM Laser Scanner', n.d.). Na generovanie bodových mračien z dát MLS prototypu bol použitý voľne dostupný (open-source) SLAM algoritmus – Lidar Odometry (Będkowski, 2024). Tento softvér je špeciálne optimalizovaný na spracovanie dát zo senzora Livox MID360.

Bodové mračná pre celú plantáž aj pre jednotlivé výskumné plochy boli spracované v CloudCompare 2.13.1. Prvým krokom bolo orezanie plantáže z celkového bodového mračna, nasledované orezaním jednotlivých plôch pomocou nástroja segment. Na odstránenie šumu v bodových mračnách bola použitá filter SOR (Statistical Outlier Removal) v CloudCompare.

Voxelizácia bodových mračien pre každú výskumnú plochu bola vykonaná pomocou balíka lidR v programovacom jazyku R. Pre každé bodové mračno bola použitá veľkosť voxelov 5, 10, 15 a 20 cm. Obrázok 4. zobrazuje voxelizované a nevoxelizované bodové mračno jednej výskumnej plochy.



Obr. 4. Top of Form Nevoxelizované bodové mračno z TLS vľavo, voxelizované bodové mračno s nastavením veľkosti voxelu 5 cm vpravo

3.6 Tvorba regresných modelov a predikčných modelov

Pre analýzu vzťahov medzi objemom voxelizovaných bodových mračien a suchou aj čerstvou hmotnosťou boli vytvorené regresné modely pomocou balíka `lme4`. Do analýzy bolo zahrnutých všetkých 31 výskumných plôch. Na tvorbu predikčných modelov pre suchú a čerstvú hmotnosť dendromasy bol použitý balík `randomForest` v R. Kde 16 plôch slúžilo ako tréningové dáta, zatiaľ čo 15 plôch tvorilo testovaciu množinu, v ktorej bola hodnotená presnosť predikcie pre suchú aj čerstvú hmotnosť. Na analýzu neistôt bola použitá metrika odvodená priamo z balíka `randomForest`, ktorá hodnotila štandardnú odchýlku predikcií jednotlivých stromov.

3.7 Štatistické analýzy

Pre každý skener a veľkosť voxelov bol skúmaný vzťah medzi skutočnou a odhadovanou suchou a vlhkou hmotnosťou pomocou strednej kvadratickej chyby (RMSE). Okrem toho boli vypočítané koeficient determinácie (R^2) a relatívna stredná kvadratická chyba (rRMSE). Štatistická analýza bola vykonaná pomocou softvéru R. Rovnice používané na hodnotenie regresných a predpovedných modelov sú:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y})^2}$$

$$rRMSE = \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y})^2}}{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Y_i} \times 100$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y})^2}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Kde:

Y_i je skutočné pozorovanie

$\hat{Y}$ je odvodené pozorovanie

N je celkový počet pozorovaní

$\bar{Y}$ je priemer pozorovaných údajov

4. VÝSLEDKY

4.1 Regresia medzi objemom voxelizovaného bodového mračna a hmotnosťou výskumných plôch

Vzťahy medzi objemom voxelizovaných bodových mračien a hmotnosťou výskumných plôch sú znázornené v tabuľke 1.

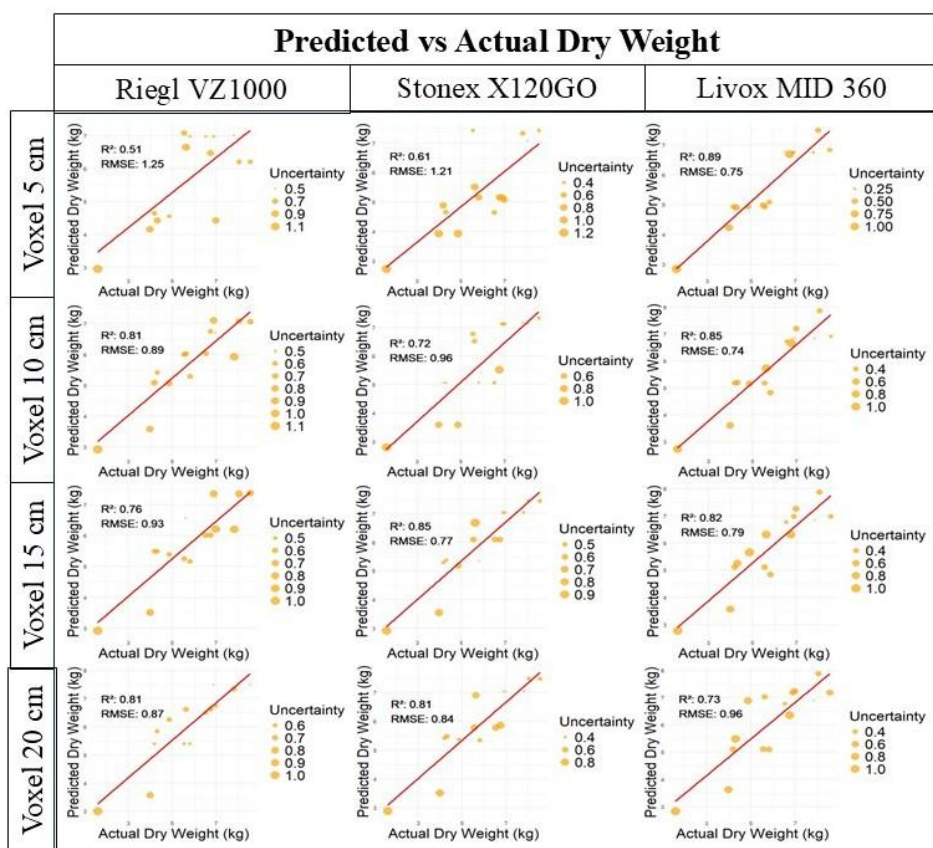
Tab. 1 Korelácia medzi suchou hmotnosťou, čerstvou hmotnosťou a celkovým objemom voxelizovaných výskumných plôch s R2, RMSE a rRMSE

Scanner	Voxel size (cm)	Dry Weight			Wet Weight		
		RMSE	rRMSE	R2	RMSE	rRMSE	R2
			(%)			(%)	
Riegl VZ1000	5	1,13	19,50	0,60	2,73	20,37	0,61
	10	0,92	16,01	0,73	2,03	15,18	0,78
	15	0,87	15,08	0,76	1,77	13,22	0,83
	20	0,86	14,88	0,77	1,63	12,17	0,86
Stonex X120GO	5	1,01	17,46	0,68	2,44	18,2	0,69
	10	0,82	14,27	0,82	1,79	13,38	0,83
	15	0,79	13,69	0,8	1,57	11,57	0,87
	20	0,75	12,92	0,82	1,4	10,45	0,9
Livox MID 360	5	0,7	12,19	0,84	1,5	11,2	0,88
	10	0,72	12,45	0,84	1,3	9,72	0,91
	15	0,75	13,09	0,82	1,37	10,21	0,9
	20	0,77	13,36	0,81	1,39	10,41	0,9

Tabuľka 1. ukazuje, že všetky zariadenia dosahujú so všetkými nastaveniami veľkosti voxelov koreláciu vyššiu ako $R^2 = 0,60$. Najnižšia korelácia, $R^2 = 0,60$, bola zaznamenaná s Riegl VZ1000 pri odhade suchej hmotnosti s voxelom 5 cm, s RMSE 1,13 kg a rRMSE 19,5 %. Naopak, najvyššiu koreláciu dosiahol prototyp MLS (Livox MID360) pri odhade suchej hmotnosti s voxelom 10 cm, s RMSE 1,3 kg a rRMSE 11,2 %. Vo všeobecnosti mali najvyššie korelácie všetky zariadenia pri meraniach čerstvej hmotnosti. Veľkosť voxela mala významný vplyv na vyššiu koreláciu najmä u Riegl VZ1000 a Stonex X120GO, pričom najmenej presné korelácie sa zaznamenali s voxelom 5 cm. U ostatných veľkostí voxelov (10, 15 a 20 cm) nebol významný rozdiel v presnosti, avšak mierne vyššia presnosť bola spojená s voxelmi 15 a 20 cm. Pre prototyp Livox MID360 bola najpresnejšia odhad suchej hmotnosti s menšími voxelmi 5 a 10 cm, zatiaľ čo pri čerstvej hmotnosti bola najvyššia presnosť pre voxel 10 cm. Pri prototypu veľkosť voxela mala minimálny vplyv na koreláciu.

4.2 Odhad suchej a čerstvej hmotnosti nadzemnej biomasy

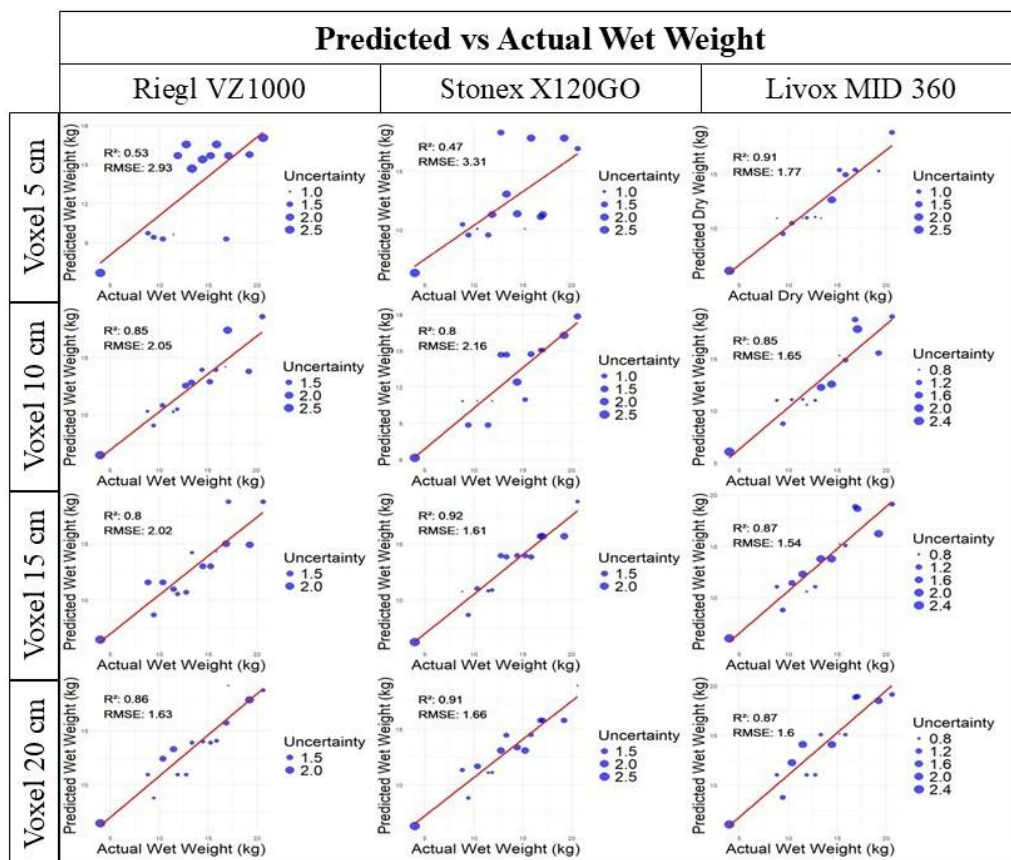
Vzťahy ilustrujúce presnosť odhadu suchej hmotnosti sú znázornené na obrázku 5, pričom ďalšie informácie sú uvedené v tabuľke 2. Podobne, vzťahy pre predpovede čerstvej hmotnosti sú zobrazené na obrázku 6 a podrobné opisy sú uvedené v tabuľke 3.



Obrázok 5. Vzťahy medzi odhadovanou a skutočnou suchou hmotnosťou, zobrazujúce R^2 , RMSE a rRMSE.

Tab. 2 Odhad suchej hmotnosti dendromasy

Dry Weight Prediction (Mean Actual weight 5.834 kg)										
Scanner	Vox.	Min.E	Max.E	Range	SD	SE	Mean Pred.	RMSE	rRMSE	R2
	(cm)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(%)	
Riegl VZ1000	5	-1,54	2,56	4,10	1,29	0,33	5,72	1,25	21,48	0,5
	10	-1,34	1,90	3,24	0,92	0,24	5,74	0,89	15,24	0,8
	15	-1,33	1,62	2,96	0,96	0,25	5,75	0,93	15,95	0,8
	20	-1,53	1,09	2,62	0,86	0,22	6,08	0,87	14,88	0,8
Stonex X120GO	5	-1,89	1,92	3,81	1,15	0,30	5,34	1,21	20,79	0,6
	10	-1,23	1,47	2,70	0,98	0,25	5,67	0,96	16,52	0,7
	15	-1,33	1,12	2,45	0,80	0,21	5,91	0,77	13,26	0,9
	20	-1,30	1,09	2,40	0,86	0,22	5,89	0,84	14,33	0,8
Livox MID 360	5	-1,26	1,73	2,99	0,76	0,20	5,66	0,75	12,92	0,9
	10	-1,13	1,66	2,79	0,77	0,20	5,78	0,74	12,75	0,9
	15	-1,19	1,60	2,79	0,82	0,21	5,84	0,79	13,61	0,8
	20	-2,03	1,39	3,42	0,97	0,25	6,04	0,96	16,48	0,7



Obrázok 6. Vzťahy medzi odhadovanou a skutočnou čerstvou hmotnosťou, zobrazujúce R², RMSE a rRMSE.

Tab. 3 Odhad čerstvej hmotnosti dendromasy

Wet Weight Prediction (Mean Actual weight 13.423 kg)										
Scanner	Vox.	Min.E	Max.E	Range	SD	SE	Mean Pred.	RMSE	rRMSE	R2
	(cm)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(%)	
Riegl VZ1000	5	-3,80	7,54	11,35	3,02	0,78	13,15	2,93	21,8	0,53
	10	-2,53	5,45	7,98	1,90	0,49	12,50	2,05	15,26	0,85
	15	-2,73	4,32	7,05	2,00	0,52	12,83	2,02	15,04	0,8
	20	-2,49	1,86	4,34	1,68	0,43	13,40	1,63	12,11	0,86
Stonex X120GO	5	-5,55	5,75	11,29	3,24	0,84	12,35	3,31	24,47	0,47
	10	-2,19	4,27	6,46	2,04	0,53	12,54	2,16	16,09	0,8
	15	-2,36	3,58	5,93	1,58	0,41	12,93	1,61	11,96	0,92
	20	-2,48	3,48	5,96	1,67	0,43	13,00	1,66	12,4	0,91
Livox MID 360	5	-2,11	3,97	6,09	1,61	0,41	12,57	1,77	13,21	0,91
	10	-2,18	3,68	5,86	1,67	0,43	13,07	1,65	12,32	0,85
	15	-2,21	3,01	5,23	1,59	0,41	13,47	1,54	11,47	0,87
	20	-2,68	1,71	4,39	1,56	0,40	13,95	1,6	11,92	0,87

Podobne ako vzťah medzi hmotnosťou a objemom voxelizovaných bodových mračen pre všetky výskumné plochy, aj predikčné modely ukázali vyššiu presnosť pri predpovedaní čerstvej hmotnosti. Najvyššia presnosť odhadu čerstvej hmotnosti bola zaznamenaná

s prístrojom Stonex X120GO pri voxelovej veľkosti 15 cm, dosahujúc R^2 0,92 a RMSE 1,61 kg, čo predstavuje rRMSE 11,96 %. Výsledky s voxelovou veľkosťou 20 cm pre rovnaký prístroj boli veľmi podobné. Prototyp (Livox MID360) tiež dosiahol presné výsledky pri všetkých veľkostiach voxelov, s najvyššou koreláciou pri predpovedi čerstvej hmotnosti.

Celkovo môžeme skonštatovať, že pre odhady čerstvej aj suchej hmotnosti je najmenej spoľahlivá veľkosť voxelov 5 cm pre zariadenia Riegl VZ1000 a Stonex X120GO. Koeficient determinácie sa pri tejto veľkosti voxelov pohyboval od 0,47 pre čerstvú hmotnosť so Stonex po 0,61 pre suchú hmotnosť so Stonex. Naopak, prototyp poskytol uspokojivé odhady pre hmotnosť vo všetkých veľkostiach voxelov. V tejto štúdiu sme dosiahli najvyššiu koreláciu pre čerstvú hmotnosť s R^2 0,92 s prístrojom Stonex X120 MLS pri voxelovej veľkosti 15 cm, a pre suchú hmotnosť s R^2 0,89 pri prototypnom MLS Livox MID360 s voxelom 5 cm.

5. DISKUSIA

Výsledky tejto štúdie ukazujú, že všetky hodnotené zariadenia TLS (Riegl VZ1000), MLS (Stonex X120GO) a nízko nákladový prototyp MLS (Livox MID360) môžu byť využité na odhad čerstvej alebo suchej hmotnosti dendromasy v plantážach RRD, najmä u topoľa v ich druhom rotačnom cykle. Zdôraznili sme hmotnosť suchej dendromasy pred objemom, pretože poskytuje stabilnejšie, presnejšie a spoľahlivejšie hodnotenie skutočne vyprodukovanej dendromasy, čo je zvlášť dôležité pre energetické a priemyselné aplikácie. Naším hlavným cieľom bolo predpovedať suchú hmotnosť, avšak vyvinuli sme aj modely na odhad čerstvej hmotnosti, ktoré dosiahli vyššiu presnosť. To môže byť spôsobené tým, že čerstvá hmotnosť bola priamo meraná na váhe v teréne, zatiaľ čo suchá hmotnosť bola odhadnutá na základe sušenia vzoriek z každej plochy, čo mohlo viesť k menej presným referenčným váham.

Najpresnejšiu predpoveď hmotnosti dosiahli prototyp MLS (Livox MID360) a MLS (Stonex X120GO). Presnosť bola medzi týmito dvoma skenermi porovnateľná, okrem voxelovej veľkosti 5 cm pre Stonex X120GO, ktorá vykazovala mierne nižšiu presnosť. Avšak pre prototyp boli všetky veľkosti voxelov spoľahlivé pri odhadovaní hmotnosti. Prekvapivo, najnižšia presnosť odhadu hmotnosti bola zaznamenaná pri TLS, aj keď TLS poskytuje najkvalitnejšie bodové mračná. Tento rozpor môže byť spôsobený viacerými faktormi. Po prvé, hoci bolo použitých 58 pozícií TLS na vytvorenie finálneho bodového mračna, mohlo dôjsť k problémom s oklúziou (keď sú niektoré výhonky zakryté inými), najmä v hustejších porastoch, ako je skúmaná plantáž, kde každý trs má viacero výhonkov. Tento problém bol zmiernený pri MLS a MLS prototypu, pretože skenovanie prebiehalo počas pohybu, čo umožnilo lepšie nasnímanie plantáže.

Ďalším faktorom mohol byť dlhší čas skenovania pri TLS, ktorý trval takmer 3 hodiny, zatiaľ čo MLS zariadenia skenovali za menej ako 10 minút. Hoci bolo počasie stabilné, mierne pohyby spôsobené vetrom mohli ovplyvniť tenké, dlhé výhonky počas dlhého času skenovania TLS, čo mohlo ovplyvniť presnosť.

Celkovo, zatiaľ čo TLS poskytuje kvalitné bodové mračná s minimálnym šumom a rozmazaním, jeho využiteľnosť je obmedzená časom potrebným na zber dát, časom spracovania a vyššími nákladmi na zariadenie. Riegl VZ1000 už nie je na trhu dostupný, ale alternatívne TLS zariadenia od Riegl, ako VZ-400i alebo VZ-600i, sa pohybujú v cene od približne 90 000 do 130 000 € vrátane softvéru. Naopak, MLS Stonex X120GO je cenovo dostupnejší, s cenou medzi 30 000 a 35 000 € (Skladan et al., 2025). Prototyp bol vyvinutý približne za 2 500 €. Môžeme povedať, že, prototyp ponúka veľmi praktické riešenie, najmä pri obmedzenom rozpočte, čím je dostupný a vhodný pre široké spektrum používateľov.

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektov APVV-22-0001; VV-MVP-24-0412 „Revolúcia budúcnosti: Zlepšenie mapovania lesnej biomasy a odhadu sekvestrácie uhlíka prostredníctvom technológií diaľkového prieskumu Zeme“) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202).

LITERATÚRA

BĘDKOWSKI, J. (2024). Open source, open hardware hand-held mobile mapping system for large scale surveys. *SoftwareX*, 25, 101618. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101618>

FUERTES, A., OLIVEIRA, N., CANELLAS, I., SIXTO, H., RODRIGUEZ-SOALLEIRO, R., HANEWINKEL, M., & SPERLICH, D. Assessing the potential of poplar short rotation plantations to contribute to a low-carbon bioeconomy under water-limited conditions. *J. Envir. Manag.* 2023, 347, 119062. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119062>

MENÉNDEZ-MIGUÉLEZ, M., MADRIGAL, G., SIXTO, H., OLIVEIRA, N., & CALAMA, R. Terrestrial Laser Scanning for Non-Destructive Estimation of Aboveground Biomass in Short-Rotation Poplar Coppices. *Remote Sensing*, 2023, 15(7), Article 7. <https://doi.org/10.3390/rs15071942>

PULETTI, N., GROTTI, M., FERRARA, C., & CHIANUCCI, F. Influence of voxel size and point cloud density on crown cover estimation in poplar plantations using terrestrial laser scanning. *Annals of Silvicultural Research* 2021, 46(2), Article 2. <https://doi.org/10.12899/asr-2256>

RiSCAN PRO. Get the software safely and easily. (2025, March 18). Software Informer. <https://riscan-pro.software.informer.com/2.1/>

RODRIGUES, A. M., COSTA, M. M. G., & NUNES, L. J. R. Short rotation woody coppices for biomass production: An integrated analysis of the potential as an energy alternative. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports* 2021, 8(1), 70–89. <https://doi.org/10.1007/s40518-020-00171-3>.

SCARLAT, N., DALLEMAND, J.-F., MONFORTI-FERRARIO, F., & NITA, V. The role of biomass and bioenergy in a future bioeconomy: Policies and facts. *Environmental Development*, 2015, 15, 3–34. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2015.03.006>

SKLADAN, M., CHUDÁ, J., SINGH, A., MASNÝ, M., LIESKOVSKÝ, M., PÁSTOR, M., MOKROŠ, M., & VYBOŠTOK, J. Choosing the right close-range technology for measuring DBH in fast-growing trees plantations. *Trees, Forests and People* 2025, 19, 100747. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2024.100747>

SRAMEK, M., WEGER, J., BUBENIK, J., MATOUSKOVA, M., LENGALOVA, K., & MATULA, R. Effective woody biomass estimation in poplar short-rotation coppices-*Populus nigra* x *P. maximowiczii*. *I-Forest - Biogeosciences and Forestry* 2023, 16, 202–209. <https://doi.org/10.103832/ifer4200016>

X120 GO SLAM Laser Scanner. (n.d.). Stonex. Retrieved 7 April 2025, from <https://www.stonex.it/product/x120go-slam-laser-scanner/>

Ing. Michal Skladan, Ph.D.: Technical University in Zvolen, Forestry Faculty, Masarykova 24, SK – 960 53 Zvolen, Slovak Republic. Email: skladan.michal@gmail.com

doc. Ing. Martin Lieskovský, Ph.D.: Technical University in Zvolen, Forestry Faculty, Masarykova 24, SK – 960 53 Zvolen, Slovak Republic. Email: lieskovsky@tuzvo.sk

Ing. et Ing. Juliána Chudá, Ph.D.: Technical University in Zvolen, Forestry Faculty, Masarykova 24, SK – 960 53 Zvolen, Slovak Republic. Email: xchudaj@is.tuzvo.sk

Ing. Jozef Výboštok, Ph.D.: Technical University in Zvolen, Forestry Faculty, Masarykova 24, SK – 960 53 Zvolen, Slovak Republic. Email: jozef.vybostok@gmail.com

ZISŤOVANIE POŠKODENIA PRIBLIŽOVACÍCH LINIEK PRI SÚSTREĎOVANÍ DREVA S VYUŽITÍM BLÍZKEJ FOTOGRAMETRIE A LIDARU

MICHAL FERENČÍK, SEBASTIÁN MOTÝL

The article presents the results of measuring soil surface changes on an skid road after the passage of a universal wheeled tractor during timber harvesting. Two non-contact methods of surface scanning and point cloud creation were used to detect changes in the terrain surface and soil damage, namely terrestrial photogrammetry and terrestrial laser scanning (LIDAR). Both surface scanning methods used the same device (Apple iPhone). The measurements were carried out in two phases, before and after the passage of the loaded tractor. The measurements were performed on a test area measuring 5 x 1.5 m, located in stand 44a at LC Lokca (northern Slovakia). The soil type was cambisol, and the wood was transported through semi suspended skidding with a standard universal tractor. The photogrammetric method produced point clouds with a density of 32 million points, while the LIDAR method produced 0.4 million points. Both methods recorded a statistically significant change in the average terrain height. The photogrammetric method showed an average decrease in terrain level, while the LIDAR method showed an average increase in terrain surface after the tractor passed. This difference was proved to be statistically significant. Both methods can be considered usable for evaluating surfaces with an area of up to 10 m².

Kľúčové slová: sústreďovanie dreva, poškodenie pôdy, meranie poškodenia, blízka fotogrametria, LIDAR
Key words: timber skidding, soil damage, damage measurement, close range photogrammetry, LIDAR

1. ÚVOD

Materiál, drevo, ktoré sa transportuje od pňa na odvozné miesto v procese sústreďovania dreva má nepravidelný tvar, značný objem a veľkú hmotnosť. Na jeho prepravu sa v prevažnej miere používajú ťažké mechanizmy, ktoré sa pohybujú po približovacích linkách, resp. cestách s nespevneným povrchom. Prakticky všetky mechanizmy na území Slovenska, okrem lanoviek a vrtuľníkov sa pohybujú po povrchu terénu na kolesovom, alebo pásovom podvozku a navyše prevažná časť týchto mechanizmov sústreďuje drevo vlečením po povrchu terénu v polozávесе. V ťažbovom procese sa preto nevyhneme negatívnym dopadom technológií, ktoré spôsobujú poškodenia ostávajúceho porastu, podrastu a lesnej pôdy (ALLMAN ET AL., 2017). Poškodenie ostávajúceho porastu a podrastu má negatívny vplyv na zdravotný stav porastov a následné zhodnotenie drevnej suroviny. Poškodenie pôdy má takisto negatívny dopad na porast, najmä na stromy v okolí približovacích komunikácií. Následkom pohybu strojov a dreva dochádza k viacerým druhom poškodenia pôdy (LUKÁČ, 2003):

- Premiestnenie povrchových vrstiev kolesami, pásmi, reťazami alebo kolopásmi stroja, ťažbovo – dopravná erózia,
- zhutnenie pôdy tiažou stroja a nákladu,
- zvýšená zrážková erózia.

Regenerácia pôdy je pritom veľmi pomalá a ani 5 ročné obdobie nie je dostatočné na jej úplný priebeh (JANKOVSKÝ ET AL., 2019). Preto je potrebné poškodenie pôdy sledovať a snažiť sa o jeho minimalizáciu. Existuje viacero metód na hodnotenie zmeny povrchu pôdy, teda intenzity ťažbovo – dopravnej erózie s rôznou efektívnosťou a presnosťou. Donedávna sa najčastejšie využívala kontaktná metóda merania pomocou vodorovnej laty a pásma (vertikálnej tyčky), prípadne s využitím laserového diaľkomera (CAMBI ET AL., 2015, KULAK ET AL., 2020, KORMANEK, GOŁĄB, 2021). Spomínaní autori uvádzajú presnosť meraní vertikálnej vzdialenosti (hlĺbky koľají) pri týchto metódach 0.005, resp. 0.003 m. Nevýhodou týchto metód je skutočnosť, že nezachytia celý povrch pokusných plôch, pretože merania prebiehajú na relatívne malom počte priečnych profilov a aj na nich sa hodnoty merajú

v určitých rozstupoch, napr. 10, alebo 20 cm. Tieto merania sa následne extrapolujú na celú plochu. To je jeden z dôvodov, prečo sú pre tento typ meraní vhodné geopriestorové metódy merania zachycujúce celý povrch pokusnej plochy (KOREŇ ET AL., 2015).

Tieto bezkontaktné metódy zaznamenávajúce povrch terénu vhodné na snímanie menších plôch možno rozdeliť do dvoch základných skupín:

- fotogrametria, zvlášť blízka fotogrametria s využitím fotoaparátu, alebo smartfónu,
- LIDAR, zvlášť metóda pozemného laserového skenovania (TLS).

Tieto metódy umožňujú nasnímať celý povrch pokusnej plochy s pomerne vysokým rozlíšením za krátky čas s presnosťou väčšou ako 0,001 m (JESTER, KLIK, 2005). Ciele tejto práce boli:

- zistiť veľkosť zmeny povrchu približovacej cesty po sústreďovaní dreva pomocou UKT s využitím pozemnej fotogrametrie a metódy TLS,
- stanoviť rozsah poškodenia povrchu pôdy na daných pokusných plochách,
- porovnať výsledky zistené pomocou oboch metód,
- porovnať využiteľnosť oboch metód.

2. METODIKA

V rámci výskumu bola zisťovaná zmena nadmorskej výšky povrchu terénu na pokusnej ploche po prejazde univerzálneho kolesového traktora s nákladom. Na základe rozdielu nadmorskej výšky pred a po prejazde traktora bola hodnotená miera poškodenia plochy.

2.1. Lokalita výskumu

Výskum prebiehal na ploche dielca. 44a, v LHC Lokca, pod hrebeňom Oravskej Magury. Na ploche sa nachádzala kambizem modálna, kyslá (PÔDNE MAPY SK, 2025). Údaje o poraste 44a sú spracované v tabuľke (tab. 1).

Tab.1 Základné údaje o poraste 44a, % udávajú zastúpenie drevín a m³ udávajú priemernú objemovosť

Sklon (%)	Vek (r)	Výmera (ha)	Sm (%)	Jd (%)	Bk (%)	Sm (m ³)	Jd (m ³)	Bk (m ³)
50	60	8.51	75	20	5	0.72	0.75	0.19

Pokusná plocha (obr. 1) bola umiestnená na približovacej ceste a jej rozmery boli 5 m na šírku (červená línia na obrázku) a 1,5 m na dĺžku (oranžová línia). Rozmery boli zamerané v teréne pomocou pásma.



Obr. 1 Pokusná plocha s vyznačenými kalibračnými líniami.

V každom rohu plochy bol umiestnený vlícovací terč pre následnú kalibráciu bodového mračna. Šírka plochy bola volená tak aby pri prejazde traktora s nákladom nedošlo k posunutiu vlícovacieho terča.

2.2. Sústred'ovací prostriedok

Sústred'ovanie dreva bolo vykonané pomocou traktora Zetor Forterra 9641. Traktor bol vybavený pneumatikami s rozmerom 18.4 R 34 (zadné) a 420/70 R24 (predné), dvojhubnovým navijakom a mal hmotnosť 7 t. Traktor sústred'oval náklad s objemom 2,2 m³.

2.3. Priebeh merania

Samotné meranie bolo vykonané pomocou mobilného telefónu iPhone 14 Pro (Apple Inc. USA). Meranie prebiehalo v dvoch krokoch, a to pred a po prejazde traktora s nákladom a meralo sa v dvoch režimoch:

- meranie fotogrametrickým spôsobom, pričom sa bodové mračno vytváralo zo série fotografií plochy,
- meranie pomocou zabudovaného laserového skenera.

Fotogrametrické meranie (SFM) začínalo určením potrebného počtu snímok podľa postupu uverejneného v práci FERENČÍK ET AL, 2022, pričom bol stanovený minimálny počet fotografií na 36. Následne prebehlo fotografovanie plochy pred a po prejazde traktora, export fotografií do programu Agisoft Metashape, kde boli štandardným postupom vytvorené bodové mračná v lokálnom súradnicovom systéme. Bodové mračná sa následne georeferencovali, aby mali stredy vlícovacích terčov rovnaké súradnice pri oboch bodových mračnách.

Skenovanie plochy pomocou LIDARu prebehlo takisto pred a po prejazde traktora s nákladom, s tým rozdielom, že výsledkom boli hotové bodové mračná. Aj tieto bodové mračná boli georeferencované tak, aby mali vlícovacie body rovnaké súradnice ako bodové mračná vytvorené pomocou fotogrametrie.

V oboch prípadoch prebiehalo snímanie povrchu z výšky približne 1 m nad úrovňou terénu.

V ďalšom boli všetky georeferencované bodové mračná prevedené na rastrové súbory v programe CloudCompare a následne orezané v programe QGIS štvoruholníkom ohraňeným vlícovacími bodmi. Do týchto orezaných štvoruholníkov boli vložené rovnomerne rozmiestnené vzorkovacie body, ktorých bolo 179 (obr. 2).

Tieto body slúžili na odčítanie hodnôt súradníc Z z príslušného bodového poľa. V tomto prípade sa nedá hovoriť o nadmorskej výške, pretože bodové mračno je georeferencované

v lokálnom súradnicovom systéme. Veľkosť poškodenia resp. rozdiel hodnôt Z na ploche pred a po ťažbe sa z hodnôt pre tie isté body vypočítal podľa vzorca:

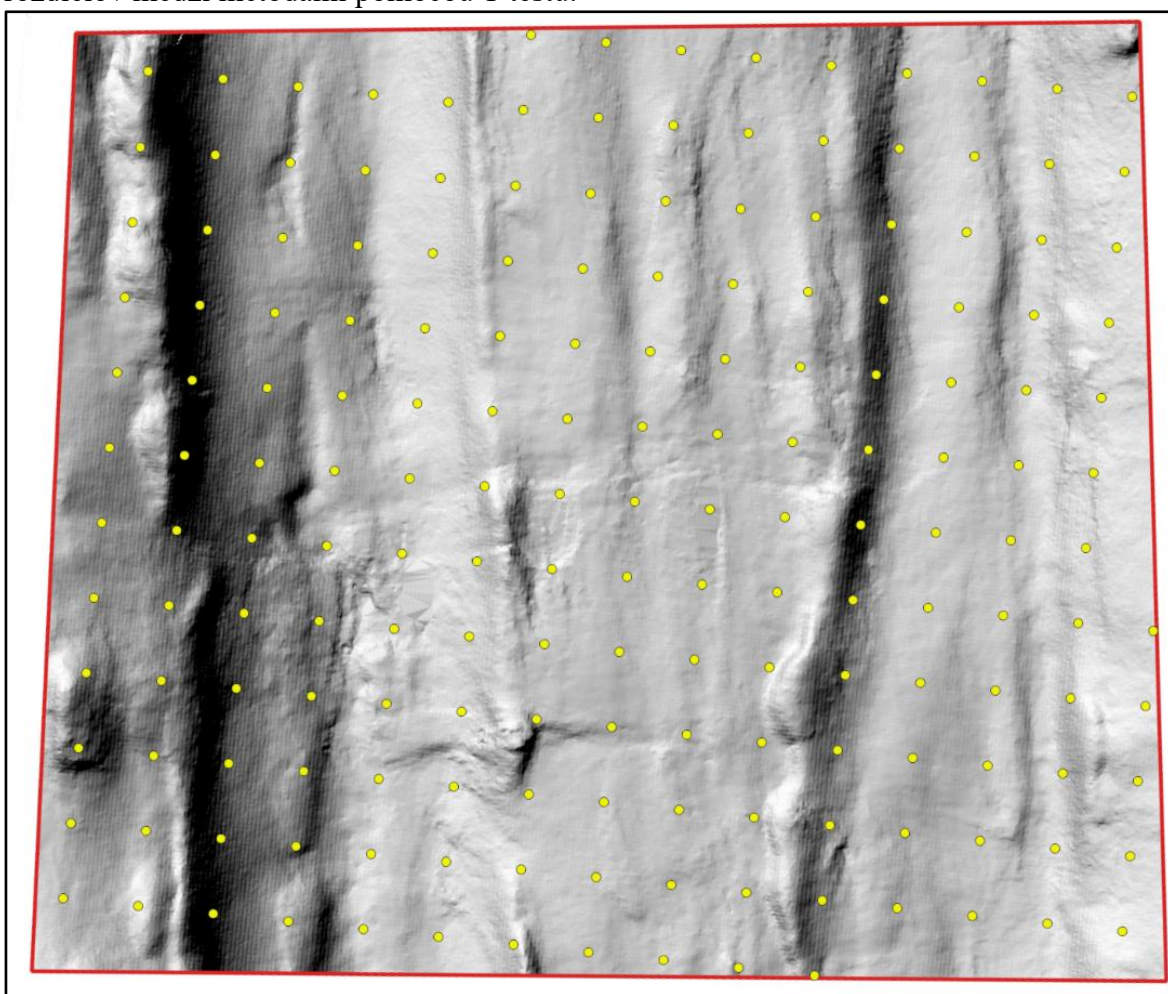
$$\Delta z = h_o - h_i$$

kde:

- Δz – zmena súradnice Z (výškový rozdiel) po prejazde
- h_o – výška bodu pred prechodom stroja
- h_i – výška bodu po prechode stroja.

V prípade kladných hodnôt Δz došlo k poklesu povrchu terénu, čiže traktor s nákladom vytvoril ryhu, resp. koľaj a v prípade zápornej hodnoty Δz došlo k zvýšeniu povrchu terénu, napríklad nahrnutím zeminy nákladom.

Normalita získaných hodnôt bola overovaná pomocou Shapiro-Wilkovho testu a významnosť rozdielov medzi metódami pomocou T-testu.



Obr. 2 Rozmiestnenie vzorkovacích bodov na orezanom rastrí v programe QGIS

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

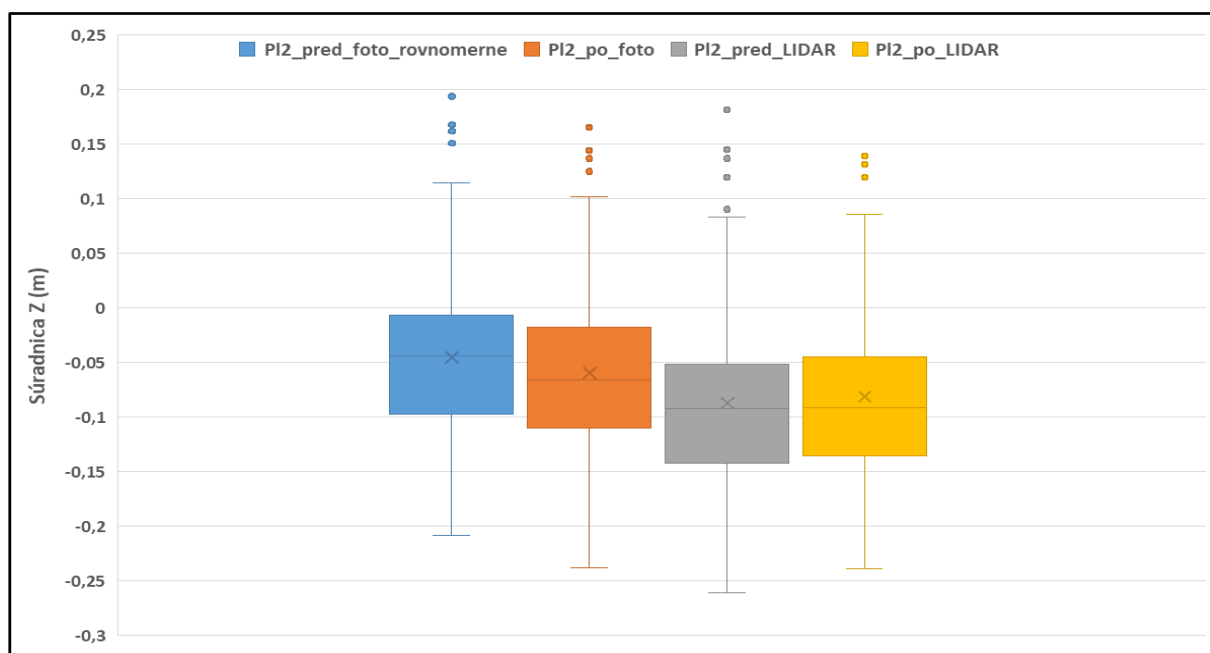
3.1. Porovnanie bodových mračien

Z hľadiska času záznamu sú obe metódy tvorby bodového mračna podobné. Ako pri SFM, tak aj pri metóde LIDAR trvalo zaznamenanie plôch s danými rozmermi približne 2 – 3 min. Zásadný rozdiel je v čase spracovania a v hustote výsledného bodového mračna. Pri SFM metóde je potrebné získané fotografie spracovať a vytvoriť bodové mračno, čo si vyžaduje

špeciálny softvér a určitý čas. Na spracovanie dvoch súborov po 60 fotografií a vytvorenie bodových mračen je potrebná približne 1 h času. Pri metóde LIDAR boli bodové mračná k dispozícii prakticky ihneď po skončení skenovania. Následný postup bol spoločný pre obe metódy (georeferencovanie, rasterizácia a vyhodnotenie v programe QGIS) trval približne 30 min. Ďalším výrazným rozdielom oboch metód bola hustota bodového mračna. Mračno získané pomocou LIDAR metódy malo 0,4 mil. bodov, pričom mračno získané z tej istej plochy metódou SFM malo v priemere 30 mil. bodov.

3.2. Poškodenie pôdneho povrchu

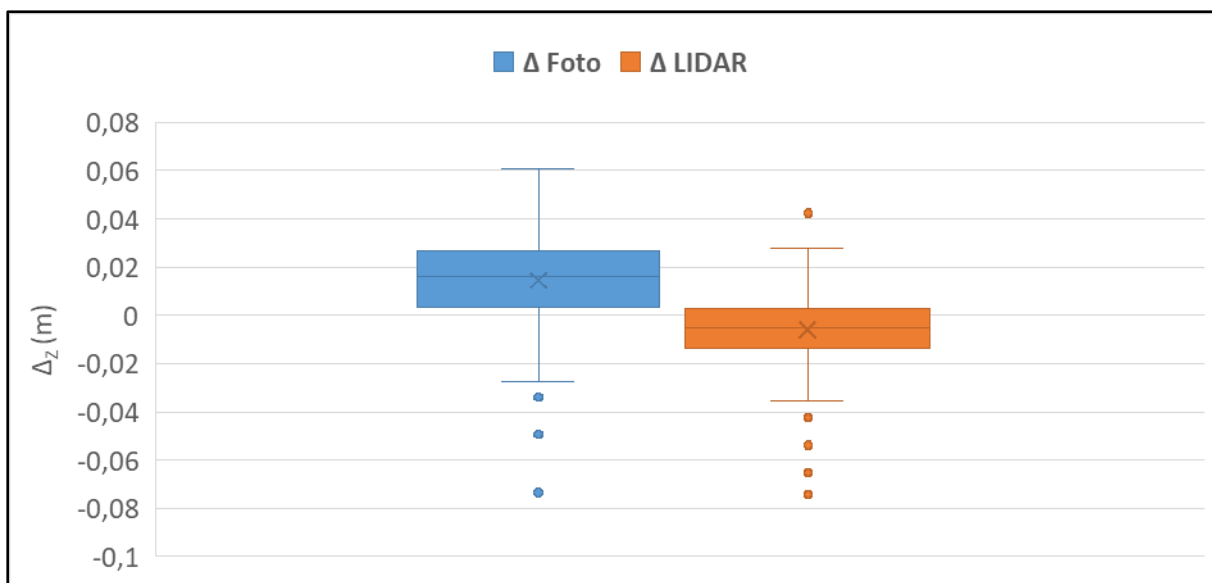
Prehľad absolútnych hodnôt Z súradníc z jednotlivých bodových mračen získaných oboma metódami pred a po prejazde traktora je znázornený na obrázku (obr. 3).



Obr. 3 Nadmorské výšky povrchu terénu získané z vzorkovacích bodov na jednotlivých bodových mračnách (x – priemer, box - $\pm s_x$, I - $\pm 2s_x$)

Vzhľadom na sklon a tvar terénu bola variabilita hodnôt Z v rámci plôch väčšia ako medzi plochami. Pre porovnanie výsledkov získaných jednotlivými metódami a hodnotenie zmeny povrchu, resp. poškodenia pôdy bolo potrebné odčítať hodnoty súradníc Z po prejazde traktora od hodnôt Z pred prejazdom traktora, výsledné hodnoty ΔZ udávajú zmenu povrchu terénu. V prípade kladnej hodnoty terén v danom bode poklesol, v prípade zápornej hodnoty terén v danom bode stúpol. Výsledné hodnoty ΔZ sú prezentované na obrázku (obr. 4). Po prejazde traktora neboli v teréne viditeľné koľaje, pretože povrch „zarovnal“ ťahaný náklad.

Pri bodovom mračne zaznamenanom pomocou fotogrametrickej metódy bol zaznamenaný priemerný pokles terénu o 0.0145 m, ktorý bol štatistickým T-testom potvrdený významný rozdiel priemeru oproti 0, takže možno konštatovať, že pri použití fotogrametrickej metódy bol zaznamenaný priemerný pokles terénu. Pri veľkosti plochy 7.5 m² bola teda pôdna strata vyčíslená na 0.109 m³. Z hľadiska hodnotenia intenzity poškodenia pôdy boli prakticky všetky hodnoty ΔZ menšie ako 7 cm (obr. 4) a poškodenie podľa klasifikácie intenzity poškodenia (LUKÁČ, 2005) nepresiahlo úroveň triedy poškodenia A. Išlo teda o zanedbateľné poškodenie povrchu terénu. Treba podotknúť, že hodnotený bol iba 1 prejazd traktora s nákladom.



Obr. 4 Zmena povrchu terénu zistená pomocou fotogrametrickej a LIDAR metódy (x – priemer, box - +- s_x , I - +- $2s_x$)

V prípade bodového mračna získaného pomocou LIDAR metódy bola naopak zaznamenaná záporná hodnota priemeru ΔZ , teda došlo k zvýšeniu úrovne terénu v priemere o 0.0063 m. Aj keď štatistický T-test potvrdil významný rozdiel priemeru oproti 0, možno usudzovať, že ide o zmenu na hranici rozlíšiteľnosti danej metódy. T test nezávislých súborov potvrdil štatisticky významný rozdiel priemerov ΔZ medzi oboma metódami. Rozdielne výsledky zistené oboma metódami možno vysvetliť skutočnosťou, že pri ťahaní nákladu po povrchu plochy dochádza k premiestňovaniu zeminy a nevytvárajú sa koľaje. Zvlášť pri celkovej malej zmene výšky povrchu môže lokálne dôjsť dokonca ku nahrnutiu pôdy a teda navýšeniu terénu. Podobné zmeny výšky terénu boli zaznamenané aj pri hodnotení prejazdov traktorov v rámci 1 metódy, kedy došlo medzi prejazdami toho istého stroja striedavo k nárastu a poklesu povrchu terénu (FERENČÍK ET AL., 2022).

Ďalším faktorom môže byť nižšia hustota bodového mračna pri metóde LIDAR s využitím zariadenia iPhone, kedy pri interpolácii chýbajúcich údajov v procese rasterizácie, môže dôjsť k rozdielnym výsledkom oproti rádovo hustejším bodovým mračnám získaným fotogrametrickou metódou. Podrobnejšie hodnotenie presnosti rôznych zariadení využívajúcich LIDAR boli publikované vo viacerých prácach (HRŮZA ET AL., 2018, MIKITA ET AL., 2022).

4. ZÁVER

Obidve metódy možno považovať za veľmi dobre využiteľné na zisťovanie zmien povrchu približovacích ciest.

Fotogrametrická metóda nevyžaduje špeciálne technické vybavenie na snímanie terénu, postačuje bežný smartfón s kvalitnejším, prípadne viacobjektívnym fotoaparátom. Takisto sa dá využiť bežný kompaktný digitálny fotoaparát s malou ohniskovou vzdialenosťou. Tento spôsob je však náročnejší na tvorbu bodového mračna, pretože je potrebné spojiť pomerne veľké množstvo fotografií. To si vyžaduje špeciálne programové vybavenie a kladie značné nároky na hardvér počítača. Spájanie fotografií a tvorba mračna je náročná aj na čas. Blízka, pozemná fotogrametria je vhodná na snímanie pokusných plôch, približne vo veľkosti do 15 m² pretože pri väčších plochách výrazne stúpa počet zhotovených fotografií a tým aj nároky

na spracovanie. Na väčšie plochy, prípadne hodnotenie dlhších úsekov ciest je vhodnejšia letecká fotogrametria, napríklad s využitím dronov.

Pokiaľ ide o LIDAR metódu s využitím malého mobilného zariadenia, prakticky jedinou bežne dostupnou možnosťou je použitie zariadenia iPhone, alebo iPad. V prípade prezentovaného výskumu sa na skenovanej ploche prejavilo obmedzenie použitého zariadenia (iPhone), pretože hardvérová výkonnosť neumožňovala tvorbu hustejšieho bodového mračna. Možno konštatovať, že hodnotená plocha bola na hornej hranici využiteľnosti daného zariadenia. Je pravdepodobné, že pri využití výkonnejšieho zariadenia (iPad) by bolo možné skenovať väčšie plochy, prípadne vytvárať hustejšie bodové mračná.

Z hľadiska vyhodnotenia a spracovania údajov z výsledných bodových mračien medzi metódami nie sú badateľné rozdiely.

Zistené poškodenie povrchu približovacej cesty možno považovať za zanedbateľné, ale treba zdôrazniť, že bol hodnotený iba 1 prejazd traktora a navyše približovacia cesta bola používaná už predtým, takže výraznejšie zmeny povrchu nie sú pravdepodobné ani po ďalších prejazdoch.

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektov APVV-22-0001) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202) a Vedeckou grantovou agentúrou (č. projektu VEGA 1/0177/24 Zisťovanie poškodenia povrchu vybraných kategórií lesnej dopravnej siete pomocou najmodernejších metód pozemného laserového skenovania a blízkej fotogrametrie).

LITERATÚRA

ALLMAN, M., JANKOVSKÝ, M., ALLMANOVÁ, Z., FERENČÍK, M., MESSINGEROVÁ, V. Negatívne dopady ťažbovo-dopravných technológií na lesnú pôdu a možnosti prevencie v lesoch Slovenska, (vedecká monografia), 2017, Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 112 s., ISBN 978-80-228-2925-0

CAMBI, M.; CERTINI, G.; FABIANO, F.; FODERI, C.; LASCHI, A.; PICCHIO, R. Impact of Wheeled and Tracked Tractors on Soil Physical Properties in a Mixed Conifer Stand. *iForest—Biogeosci. For.* 2015, 9, 89.

FERENČÍK, M., DUDÁKOVÁ, Z., KARDOŠ, M., SIVÁK, M., MERGANIČOVÁ, K., MERGANIČ, J. Measuring soil surface changes after traffic of various wheeled skidders with close-range photogrammetry. *Forests* 2022, 13(7), 976.

HRŮZA, P., MIKITA, T., TYAGUR, N., KREJZA, Z., CIBULKA, M., PROCHÁZKOVÁ, A., & PATOČKA, Z. Detecting forest road wearing course damage using different methods of remote sensing. *Remote sens.* 2018, 10(4), 492.

JANKOVSKÝ, M., ALLMAN, M., ALLMANOVÁ, Z., FERENČÍK, M., VLČKOVÁ, M., 2019: Changes of key soil parameters five years after forest harvesting suggest slow regeneration of disturbed soil. *Journal of Sustainable Forestry* 2019, 38(4), 369-380.

JESTER, W.; KLIK, A. Soil Surface Roughness Measurement—Methods, Applicability, and Surface Representation. *CATENA* 2005, 64, 174–192.

KOREN, M.; SLANČÍK, M.; SUCHOMEL, J.; DUBINA, J. Use of Terrestrial Laser Scanning to Evaluate the Spatial Distribution of Soil Disturbance by Skidding Operations. *iForest—Biogeosci. For.* 2015, 8, 386.

KORMANEK, M.; GOŁĄB, J. Analysis of Surface Deformation and Physical and Mechanical Parameters of Soils on Selected Skid Trails in the Gorce National Park. *Forests* 2021, 12, 797.

KULAK, D.; STAŃCZYKIEWICZ, A.; SZEWCZYK, G. Influence of the Logging Season on the Condition of Topsoil Layers. *For. Lett.* 2020, 113, 1–7.

LUKÁČ, T. Ťažbovo-dopravné technológie v lesnom hospodárstve. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2003, 218 s. ISBN 80-89100-01-5

LUKÁČ, T. Viacoperačné stroje v lesnom hospodárstve. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2005, 134 s., ISBN 80-228-1348-6.

MIKITA, T., KRAUSKOVÁ, D., HRŮZA, P., CIBULKA, M., PATOČKA, Z., Forest road wearing course damage assessment possibilities with different types of laser scanning methods including new iPhone LiDAR scanning apps. *Forests* 2022, 13(11), 1763.

PÔDNE MAPY SK, 2025: http://www.podnemapy.sk/portal/prave_menu/podna_mapa/podna_mapa.aspx

Ing. Michal Ferenčík, Ph.D.: Katedra lesnej ťažby logistiky a meliorácií, TU Zvolen, T. G. Masaryka 24, 960 01, Zvolen, ferencik@tuzvo.sk

Bc. Sebastián Motýl, TU Zvolen, smotyl@is.tuzvo.sk

VYUŽITIE NÍZKONÁKLADOVÉHO RUČNÉHO MOBILNÉHO SKENERA V LESNOM HOSPODÁRSTVE

JOZEF VÝBOŠŤOK, JULIÁNA CHUDÁ

Thorough monitoring of the condition and development of forest ecosystems is essential for effective forest management. Among the key dendrometric parameters are diameter at breast height (DBH) and tree height, which serve as the basis for estimating timber volume, biomass, and accumulated carbon. Traditional methods for measuring these parameters are time-consuming, labor-intensive, and costly, which becomes particularly evident in structurally diverse forests. Modern 3D scanning technologies, such as terrestrial laser scanning (TLS) and mobile laser scanning (MLS), enable the acquisition of detailed and accurate 3D point clouds, offering new possibilities for determining DBH and tree height. TLS provides the highest accuracy; however, its use is limited by high acquisition and operational costs. MLS allows rapid data collection even in challenging terrain but is associated with lower accuracy and higher noise levels. Consumer devices equipped with integrated LiDAR sensors (e.g., iPhone, iPad) represent an alternative, offering affordable but less accurate data sources. In the past two years, several types of accessible LiDAR sensors have been developed, enabling the creation of comprehensive, low-cost solutions. The aim of this study is to present a low-cost mobile scanner designed with an emphasis on user accessibility and low requirements for data collection and processing, and to highlight its potential for collecting dendrometric data and other applications in forestry, such as monitoring timber stocks, assessing forest road conditions, or estimating the volume of wood chips.

Kľúčové slová: LiDAR, mobilný laserový skener, nízkonákladový LiDAR

Key words: LiDAR, mobile laser scanner, low-cost LiDAR

1. ÚVOD

Dôkladný monitoring stavu a vývoja lesných ekosystémov je nevyhnutný pre efektívne hospodárenie v lesoch. Medzi základné dendrometrické parametre stromov patrí hrúbka vo výške prsnej (D1,3) a výška stromov. Tieto parametre sú kľúčové pre výpočet širokého spektra charakteristík, vrátane objemu dreva, biomasy a akumulovaného uhlíka (Balenović et al. 2021). Hrúbka stromov sa v súčasnosti zisťuje pomocou priemerky alebo obvodomeru, zatiaľ čo výška stromov sa určuje prostredníctvom výškomera. Získavanie týchto parametrov je však časovo náročné, pracné a finančne nákladné, predovšetkým z dôvodu vysokej miery zapojenia ľudskej činnosti.

V súčasnosti, keď sa ukazuje, že štruktúrované lesy dokážu lepšie odolávať klimatickej zmene, dochádza k významnému nárastu ich zastúpenia na Slovensku. Tento trend však negatívne ovplyvňuje presnosť a efektívnosť merania hrúbok a výšok klasickými metódami. Preto je potrebné hľadať časovo menej náročné riešenia, ktoré zároveň dosahujú požadovanú presnosť.

Dynamický rozvoj technológií 3D modelovania priniesol v posledných rokoch významný pokrok. Pomocou rôznych typov laserových skenerov je možné vytvárať detailné a presné 3D bodové mračná alebo modely. Na ich základe možno určovať hrúbky a výšky jednotlivých stromov. V lesnom hospodárstve je možné tieto technológie využiť nielen na meranie stojacich stromov v poraste, ale aj na určovanie množstva materiálov na hromadách, napríklad pri drevnej štiepke, alebo na monitoring stavu lesných ciest.

Zariadenia na zber 3D údajov delíme vo všeobecnosti na pozemné a letecké. Pozemné LiDAR zariadenia sa podľa mobility rozdeľujú na terestrické laserové skenery (TLS) a mobilné laserové skenery (MLS) (Hyypä et al. 2020). TLS poskytuje najkvalitnejšie 3D mračná bodov a najpresnejšie odhady DBH. Na druhej strane je spojené s vysokými obstarávacími nákladmi, časovou náročnosťou a veľkým objemom dát, ktoré vyžadujú výkonné výpočtové zdroje. Jeho použitie je obmedzené aj náročným terénom, preto je TLS najvhodnejšie na detailný monitoring menších plôch (Liang et al. 2014). Pri TLS sa využívajú dve hlavné metódy:

jednobodové skenovanie, ktoré je rýchle, ale často prehliada stromy kvôli zakrývaniu, a viacbodové skenovanie, ktoré je síce časovo aj spracovateľsky náročnejšie, no poskytuje komplexnejšie a presnejšie dáta (Liang et al. 2016).

MLS minimalizuje efekt zakrývania tým, že skenuje plochy z viacerých perspektív počas pohybu. Môže byť prenášaný v ruke (HMLS), v batohu alebo na rôznych platformách. Využíva technológiu SLAM, ktorá súčasne určuje polohu a orientáciu zariadenia a vytvára mapu okolia (Bauwens et al. 2016). Hlavnou výhodou MLS je rýchly zber dát bez potreby kalibrácie a bez zložitej logistiky so statívmi a cieľmi. MLS je ľahší a mobilnejší než TLS, čo umožňuje jednoduchý pohyb v lese. Nevýhodou je nižšia hustota bodov a presnosť, ako aj vyššia úroveň šumu v mračnách, čo môže viesť k chybným detekciám stromov, najmä v hustých porastoch (Mokros et al. 2020).

Ďalšiu možnosť predstavujú spotrebiteľské zariadenia s integrovaným LiDAR-om, ako napríklad iPad alebo iPhone, ktoré umožňujú zber mračien bodov do vzdialenosti približne 5 m (Gollob et al. 2020). Aplikácie ako 3D Scanner či ForestScanner umožňujú merať DBH a zaznamenávať súradnice stromov priamo počas chôdze (Tatsumi et al. 2023). Hoci TLS a MLS poskytujú najvyššiu presnosť, mobilné zariadenia môžu predstavovať dostupnú alternatívu v menej náročných aplikáciách a šetriť čas oproti tradičným metódam, v závislosti od požadovanej presnosti a rozsahu inventarizácie.

Uplatnenie metód tvorby 3D bodových mračien je v súčasnosti významne obmedzené ich vysokou obstarávacou cenou a náročnosťou na zber a spracovanie údajov. V posledných dvoch rokoch však došlo v oblasti LiDAR senzorov k veľkému pokroku, ktorý umožňuje vytváranie dostupných nízkonákladových laserových skenerov.

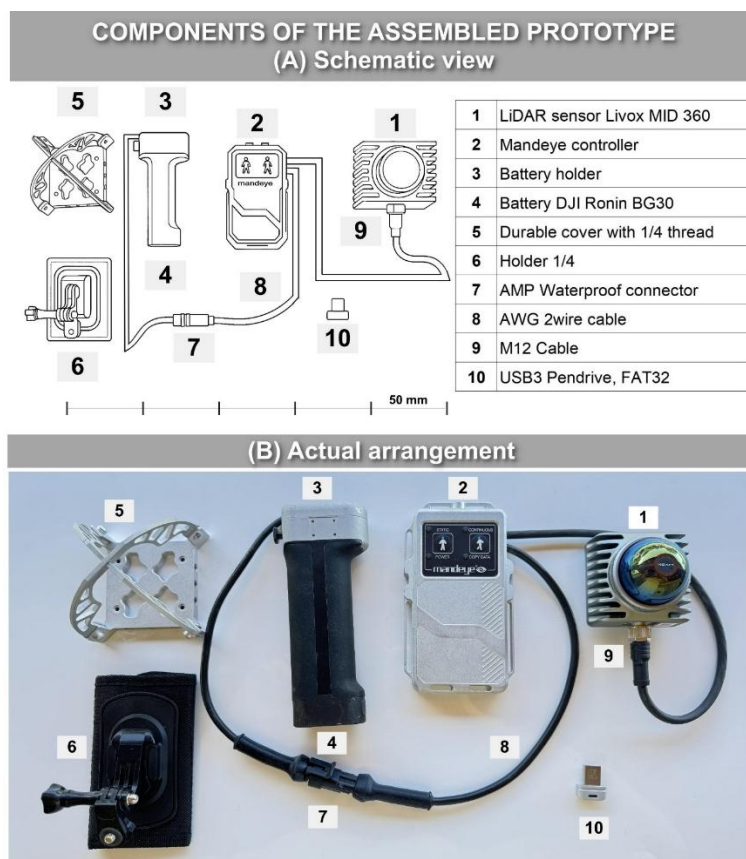
Cieľom predkladaného príspevku je predstaviť nízkonákladový mobilný skener a možnosti jeho využitia v oblasti lesného hospodárstva.

2.METODIKA

2.1 Konštrukcia prototypu

Základom systému je Livox Mid-360. Tento 3D LiDAR senzor navrhnutý pre mobilné a robotické aplikácie poskytuje zorné pole 360° horizontálne × 59° vertikálne, generuje 200 000 bodov za sekundu a dokáže detegovať objekty do vzdialenosti 40 m pri odrazivosti 10 % a až do 70 m pri odrazivosti 80 %. Na riadenie procesu zberu dát a komunikáciu so senzorom bola použitá jednotka Mandeeye, kompatibilná so zvoleným typom senzora. Napájanie systému zabezpečuje batéria DJI Ronin BG30, uchytená pomocou samostatného držiaka batérie. Mechanické uchytenie prototypu umožňuje kombinácia odolného krytu so závitom 1/4" a štandardizovaného držiaka 1/4", ktoré umožňujú stabilnú fixáciu zariadenia na rôzne mobilné nosiče. Pre zabezpečenie spoľahlivého pripojenia v terénnych podmienkach bol použitý vodotesný konektor typu AMP, spolu s dvojžilovým vodičom AWG pre napájanie a káblom M12 pre dátové rozhranie. Zozbierané údaje sú ukladané na USB 3.0 pamäťové médium, vložené priamo do riadiacej jednotky.

Celý prototyp je zostavený z bežne dostupných komponentov, čo umožňuje jeho konštrukciu aj v podmienkach mimo špecializovaného laboratória. Okrem samotných súčiastok je na zostavenie zariadenia potrebné disponovať základným technickým vybavením, najmä spájkovačkou a 3D tlačiarňou, ktoré slúžia na prípravu a prispôbenie mechanických častí a spojov (obr. 1). Vďaka tejto otvorenej a technicky nenáročnej koncepcii je prototyp ľahko replikovateľný, čo umožňuje jeho využitie v rôznych výskumných alebo aplikačných kontextoch s obmedzenými rozpočtovými a priestorovými podmienkami.



Obr.1 Zoznam komponentov

Vzhľadom na kompaktné rozmery a nízku hmotnosť použitých komponentov je prototyp vhodný na inštaláciu na rôzne typy mobilných nosičov. V terénnych podmienkach môže byť zariadenie nesené priamo na batohu operátora, čím sa zabezpečuje vysoká flexibilita pohybu (Obr 2).



Obr.2 Verzia prototypu s umiestnením na ruksak

Alternatívne je možné prototyp upevniť na stabilizované rámové konštrukcie alebo na mieru vyrobené ochranné obaly a držiaky, ktoré umožňujú jeho nasadenie na rôzne platformy, vrátane vozidiel alebo stacionárnych stojanov. Modulárna konštrukcia prototypu umožňuje prispôbiť spôsob uchytenia konkrétnym podmienkam zberu dát, pričom dôraz sa kladie na zachovanie stability, spoľahlivého napájania a nerušeného zorného poľa senzora počas skenovania.

V jednom z možných variantov sú všetky komponenty umiestnené do 3D puzdra navrhnutého autormi, ktoré vytlačili na 3D tlačiarňi Prusa XL z termoplastického polyesteru PETG (polyetyléntereftalát-glykol) (Obr. 3).



Obr.3 Verzia prototypu v kompaktnom obale

Z hľadiska operačného systému prototyp využíva jednoplatňový počítač (Raspberry Pi) so systémom Raspbian Bullseye, na ktorom beží softvér vyvinutý v jazyku C++ pod licenciou MIT. Softvér funguje ako služba a využíva knižnice Livox SDK (zber dát z LiDAR a IMU), GPIOd (práca s hardvérovými vstupmi/výstupmi), Pistache (webové rozhranie) a LASzip (kompresia bodových mračien). Dátové vlákna zbierajú údaje, ktoré sa následne komprimujú a ukladajú na USB médium.

Zber dát pomocou nízkonákladového ručného mobilného skenera je opísaný vo všeobecnosti v troch typoch prostredí, ktoré reprezentujú rôzne podmienky pre zber bodových mračien.

- **Kopy štiepok:** skenovanie je realizované pohybom okolo objektu s cieľom zachytiť jeho tvar a objem. Pri skenovaní sa dbá na dostatočný počet prekrývajúcich sa trajektórií, aby sa minimalizovali tieň spôsobené nerovným povrchom.
- **Kopy dreva:** skenovanie prebieha podobne s dôrazom na zachytenie hraníc a štruktúry jednotlivých kmeňov. Vzhľadom na pravidelnejší tvar objektov sa používa kombinácia obchádzania objektu a skenovania z krátkej vzdialenosti.
- **Lesné prostredie:** zber je realizovaný pohybom operátora po vopred určenej trase, najčastejšie po líniiach s 10-15m rozstupom. Priestor je zaznamenávaný tak aby skeny pokrývali jednotlivé stromy aj medzery medzi nimi.

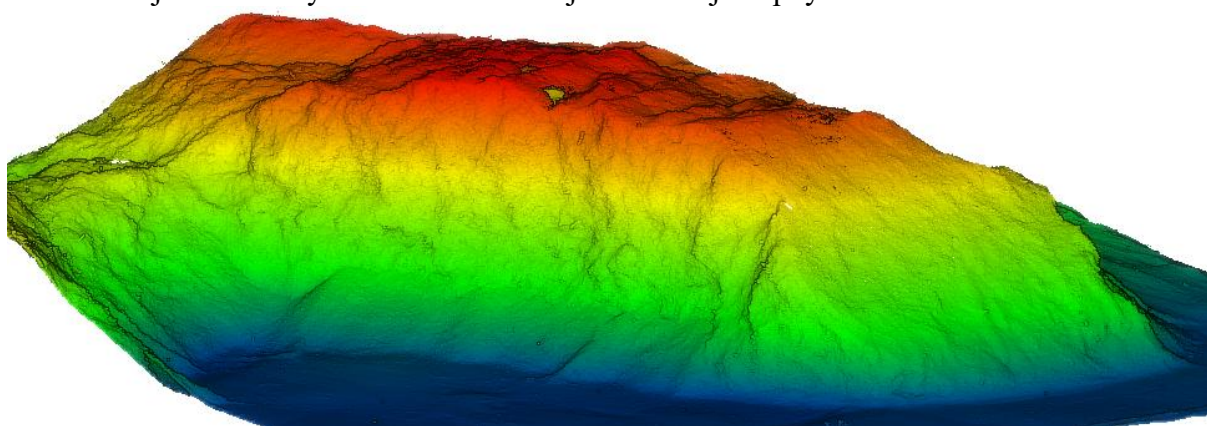
Vo všeobecnosti je dôraz je kladený na plynulosť pohybu a udržanie stabilného zorného poľa senzora, aby sa predišlo vzniku nehomogenít v hustote bodového mračna.

2.2 Spracovanie dát

Registrácia dát z prototypu je realizovaná pomocou open-source softvéru, ktorý bol pôvodne navrhnutý na registráciu TLS dát (Będkowski 2023) a neskôr rozšírený pre potreby mobilného mapovania (Będkowski 2024).

3. VÝSLEDKY

Prototyp nízkonákladového skenera je možné využiť na generovanie bodových mračien hromád. V kontexte lesného hospodárstva môže ísť napríklad o hromady drevných štiepok (Obr. 4). Na základe získaného bodového mračna je následne možné s vysokou presnosťou stanoviť objem hromady a kvantifikovať objem drevnej štiepky.



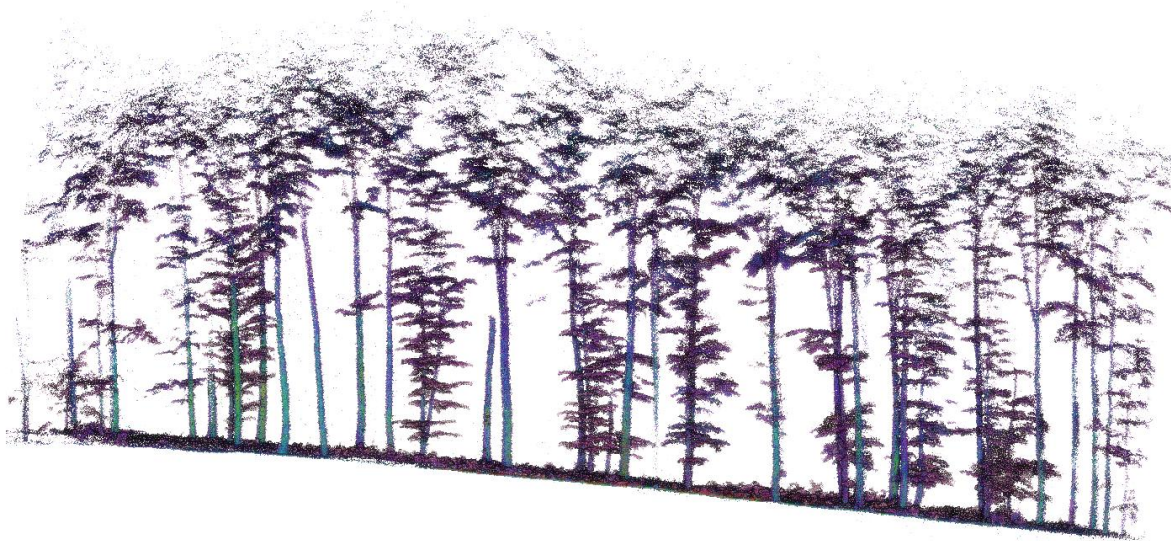
Obr. 4 Bodové mračno hromady drevnej štiepky

Prototyp je možné využiť na generovanie bodových mračien kmeňov uložených vedľa seba (Obr. 5) alebo na hromadách. Na základe týchto dát je následne možné automatizovane určovať početnosť, merať hrúbky a dĺžky, ako aj vypočítavať objemy jednotlivých kmeňov.



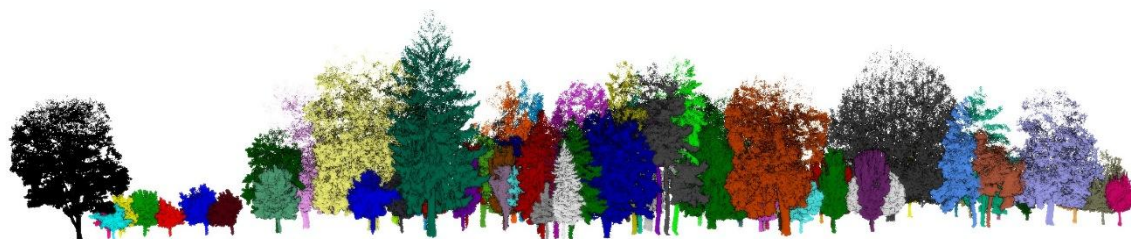
Obr. 5 Bodové mračno zachytávajúce surové kmene

Prototyp je možné využiť na monitoring lesných porastov (Obr. 6). Vysoká hustota bodového mračna umožňuje kvantifikovať všetky kľúčové parametre jednotlivých stromov, ako je hrúbka, výška a objem. Okrem toho je možné na základe bodových mračien určiť aj množstvo vetiev, a teda objem drevnej hmoty využiteľnej na energetické účely.



Obr. 6 Bodové mračno zachytávajúce lesný ekosystém

Bodové mračná získané pomocou prototypu vykazujú vysokú kvalitu, čo umožňuje automatizovanú segmentáciu jednotlivých stromov (Obr. 7). Údaje o vysegmentovaných stromoch následne slúžia ako podklad na výpočet širokého spektra dendrometrických parametrov.



Obr. 7 Segmentácia jednotlivých stromov

4. DISKUSIA A ZÁVER

Prototyp nízko nákladového ručného mobilného skenera preukazuje, že aj s využitím nízko nákladových komponentov je možné zostrojiť zariadenie schopné zbierať kvalitné 3D dáta v rôznych podmienkach. Testy v prostredí mestských parkov, pri kopách štiepok či dreva a v lesných porastoch potvrdili jeho praktickú využiteľnosť nie len pri dokumentácii a odhade objemu materiálu ale aj pri zbere dendrometrických údajov. Hoci presnosť takéhoto riešenia zatiaľ nedosahuje úroveň komerčných TLS systémov, presnosť je pritom pomerne vysoká (DOPLNIT CO SA TI HODÍ). Vzhľadom na nízke obstarávacie náklady, to robí z prototypu atraktívnu alternatívu k drahším komerčným systémom, ktorého výhodou je spomínaná nízka cena, flexibilita, jednoduchá obsluha a neustály vývoj algoritmu jeho prispôbovaním spracovaniu dát z prírodného prostredia. Prototyp tak predstavuje prístupnú alternatívu pre výskumné aj aplikačné úlohy naviazané na lesné hospodárstvo.

POĎAKOVANIE

Funded by the EU NextGenerationEU through the Recovery and Resilience Plan for Slovakia under the project No.09I03-03-V04-00341

ZOZNAM LITERATURY

BALENOVIĆ, I., XINLIAN L., JURJEVIĆ, L., HYYPPÄ, J., SELETKOVIĆ, A., KUKKO, A. Hand-held personal laser scanning—current status and perspectives for forest inventory application. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering* 2021, 42 (1): 165–83.

BAUWENS, S., HARM B., CALDERS, K., LEJEUNE. P. Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning. *Forests* 2016, 7 (6). <https://doi.org/10.3390/f7060127>.

BĘDKOWSKI, J. Benchmark of Multi-View Terrestrial Laser Scanning Point Cloud Data Registration Algorithms. *Measurement* 2023, 219, 113199. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113199>.

BĘDKOWSKI, J. Open Source, Open Hardware Hand-Held Mobile Mapping System for Large Scale Surveys. *SoftwareX* 2024, 25, 101618. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2023.101618>.

GOLLOB, CH., RITTER, T., NOTHDURFT, A. Forest inventory with long range and high-speed Personal Laser Scanning (PLS) and Simultaneous Localization and Mapping (SLAM) technology. *Remote Sensing* 2020, 12 (9). <https://doi.org/10.3390/RS12091509>.

HYYPPÄ, E., KUKKO, A., KAIJALUOTO, R. et al. Accurate Derivation of Stem Curve and Volume Using Backpack Mobile Laser Scanning. *Isprs Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* (Amsterdam) 2020, 161, 246–62. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.01.018>.

XINLIAN, L., KANKARE, V., HYYPPÄ, J. et al. Terrestrial laser scanning in forest inventories”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 2016, 115, 63–77. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2016.01.006>.

XINLIAN, L., KUKKO, A., KAARTINEN, H. et al. Possibilities of a Personal Laser Scanning System for Forest Mapping and Ecosystem Services”. V *Sensors*, 2014, 14(1). <https://doi.org/10.3390/s140101228>.

MOKROS, M., VYBOSTOK, J., GRZNAROVA, A., BOSELA, M., SEBEN, V., MERGANIC, J. Non-Destructive Monitoring of Annual Trunk Increments by Terrestrial Structure from Motion Photogrammetry. *PLoS ONE* (San Francisco) 2020, 15(3): e0230082. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0230082>.

SHINICHI, T., YAMAGUCHI, K., FURUYA, N. ForestScanner: A Mobile Application for Measuring and Mapping Trees with LiDAR-Equipped iPhone and iPad. *Methods in Ecology and Evolution* 2023, 14 (7): 7. <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13900>.

Ing. Jozef Výboštok, Ph.D.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, technická univerzita vo Zvolene. T. G. Masaryka 24, 96001 Zvolen, Slovensko. Email: jozef.vybostok@tuzvo.sk

Ing. Juliána Chudá, Ph.D.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, technická univerzita vo Zvolene. T. G. Masaryka 24, 96001 Zvolen, Slovensko. Email: xchudaj@is.tuzvo.sk

VÝVOJ PODIELU SORTIMENTOV SUROVÉHO DREVA NA SLOVENSKU

JÁN MERGANIČ, MILOŠ GEJDOŠ, KATARÍNA MERGANIČOVÁ

The aim of this paper is to analyze the long-term development of assortment structure in Slovakia based on statistical reporting data obtained from the Ministry of Agriculture and Rural Development of the Slovak Republic (Les2-04). The analysis of data from 2010 to 2023 revealed that deliveries were predominantly composed of pulpwood of the fifth quality class. The ratio between the subcategories of sawlog assortments consistently remained around 1:2, with the highest sawlog quality class III.A showing a relatively stable trend with a slight decline. When comparing the ratio of delivered assortments III.A to III.B, a mildly increasing trend was observed, approximately at a ratio of 1:2. In deliveries of coniferous wood, quality class III.C slightly dominated over pulpwood. For broadleaved species, the trend mirrored the overall overview—pulpwood was significantly predominant. Index-based comparisons showed that in assortments of coniferous species, the ratio between the highest sawlog quality assortment III.A versus III.B maintained a balanced trajectory, while for broadleaved species, there was a gradual rising trend, reaching a ratio of approximately 1:1,7. Understanding the correct assortment structure of the harvested mass represents one of the key tools for setting marketing strategies as well as for scheduling sales management plans.

Kľúčové slová: dodávky dreva, výkaz Les2-04, sortimenty surového dreva, piliarska guľatina

Key words: wood supplies, Les2-04 report, raw-wood assortments, sawlogs

1. ÚVOD

Sortimentácia drevnej hmoty do akostných tried zohráva dôležitú úlohu pri oceňovaní stojacich lesných porastov. Všeobecný model v podobe sortimentačných tabuliek bol vypracovaný autormi Petráš a Nociar (1991). Za obdobie posledných tridsiatich rokov došlo k viacerým zmenám jednak v oblasti druhotovania dreva v zmysle existujúcich technických podmienok (revízia noriem, obchodných technických podmienok) ako aj podmienok v dodávateľsko-odberateľských vzťahoch (záväznosť technických podmienok kvalitatívneho triedenia dreva až uzavretím obchodnej zmluvy). Výstupy sortimentačných tabuliek v podobe podielu akostných tried nezodpovedajú súčasnej štruktúre sortimentov realizovaných na trhu s drevom, pretože boli konštruované tak, aby zodpovedali technickým podmienkam kvalitatívneho triedenia združeným v normách STN 48 0055 a STN 48 0056 z roku 1989. Od tohto roku však už tieto normy prešli dvojitoú revíziou (posledná v roku 2007) a v obchodných vzťahoch je možné používať prakticky ktorékoľvek technické podmienky, pokiaľ sa dodávateľ s odberateľom na nich dohodnú v obchodnej zmluve (Gejdoš, 2025), respektíve je možné používať aj skupinu noriem, ktoré kvalitatívne triedia sortimenty surového dreva, pri ktorých nie je známy účel ich použitia (STN EN 1927-1,2,3; STN EN 1316-1,2).

Okrem technických a obchodných podmienok, ktoré sa od čias vydania sortimentačných tabuliek pomerne výrazne zmenili, je tiež potrebné uviesť, že sa určovanie akostných tried podľa sortimentačných tabuliek vyznačuje pomerne vysokou mierou subjektivity hodnotiteľa, ktorý podľa nich drevo v poraste druhuje.

Z uvedeného vyplýva, že legislatíva a technické podmienky kvalitatívneho triedenia a dodávky sortimentov surového dreva je len na národnej úrovni značne komplikovaná. Pre jasnú špecifikáciu v obchode a dodávkach sortimentov surového dreva sú dôležité korektné obchodné vzťahy. Poznanie správnej sortimentovej štruktúry v ťažbovom fonde predstavuje jeden z kľúčových nástrojov nastavenia marketingovej stratégie, ale aj časového plánu manažmentu odbytu a v neposlednom rade aj manažment ťažbovo-dopravných technológií v krátkodobom aj dlhodobom horizonte.

Cieľom príspevku je analyzovať vývoj štruktúry dodávok sortimentov surového dreva z výkazu Les2-04 a kvantifikovať pomer medzi piliarskymi akostnými triedami.

2. METODIKA

Ministerstvo pôdohospodárstva a rozvoja vidieka SR vykonáva štatistické zisťovania za účelom získania informácií o dodávkach dreva v lesníctve (Výkaz Les (MPRV SR) 2-04). Toto zisťovanie je súčasťou Programu štátnych štatistických zisťovaní schváleného na roky 2024 - 2026 vydaného v Zbierke zákonov SR. Spravodajská povinnosť vyplniť štatistický formulár vyplýva z §18 zákona č. 540/2001 Z. z. o štátnej štatistike v znení neskorších predpisov. Ak spravodajská jednotka v sledovanom období nevykonávala žiadnu činnosť alebo nevykonávala činnosť, ktorá je predmetom tohto štatistického zisťovania, predkladá negatívny výkaz s písomným uvedením dôvodu. Spravodajské jednotky predkladajú výkaz do 16. kalendárneho dňa po sledovanom období na adresu: Národné lesnícke centrum, Ústav lesných zdrojov a informatiky, Sokolská 2, 960 01 Zvolen. Výkaz obsahuje nomenklatúru výrobných sortimentov dreva v agregácii podľa jednotlivých druhov ihličnatých a listnatých drevín. Výkaz súčasne obsahuje sortiment lesné štiepky a ihličnaté a listnaté rezivo. V záhlaví výkazu sú merné jednotky, ktoré oddeľujú dodávky a zásoby dreva v m³ b. k. od tržieb za drevo, ktoré sa sledujú v eurách. Výkaz sleduje vo vertikálnom členení (v stĺpcoch) údaje o vlastnej spotrebe dreva, o dodávkach pre tuzemských odberateľov a dodávkach na celkový vývoz, ktoré v súčte poskytnú údaje o celkových dodávkach dreva realizovaných v sledovanom období. Výkaz osobitne sleduje speňaženie dodávok dreva v tuzemsku a pri celkovom vývoze do zahraničia. Rezortný výkaz nerozlišuje dodávky dreva z vlastnej ťažbovej činnosti a z výkupu dreva. Výkaz obsahuje menovite hlavné sortimenty dreva podľa platných technických noriem (STN 480055 Ihličnaté sortimenty surového dreva – Technické požiadavky, STN – 480056 Listnaté sortimenty surového dreva – Technické požiadavky) a hlavné dreviny (STN 480056, 2007).

Údaje evidované vo výkaze sú verejne dostupné a publikované na nasledovnej webovej stránke: <https://gis.nlcsk.org/ibulh/CenyDreva/CenyDrevaT>

3. VÝSLEDKY

Z analýzy vyplýva, že za celé vykazované obdobie 2010 až 2023 prevláda v dodávkach sortiment „Vlákninové drevo“. Za ním nasledujú sortimenty III. akostnej triedy III.C, III.B a III.A. Pomer medzi III.B a III.C je cca 1:2 a zhruba taký istý pomer je aj medzi III.A a III.B.

Tab. 1 Prehľad o množstve a podiele dodávok surového dreva za celé vykazované obdobie 2010 až 2023 na báze výkazu Les2-04

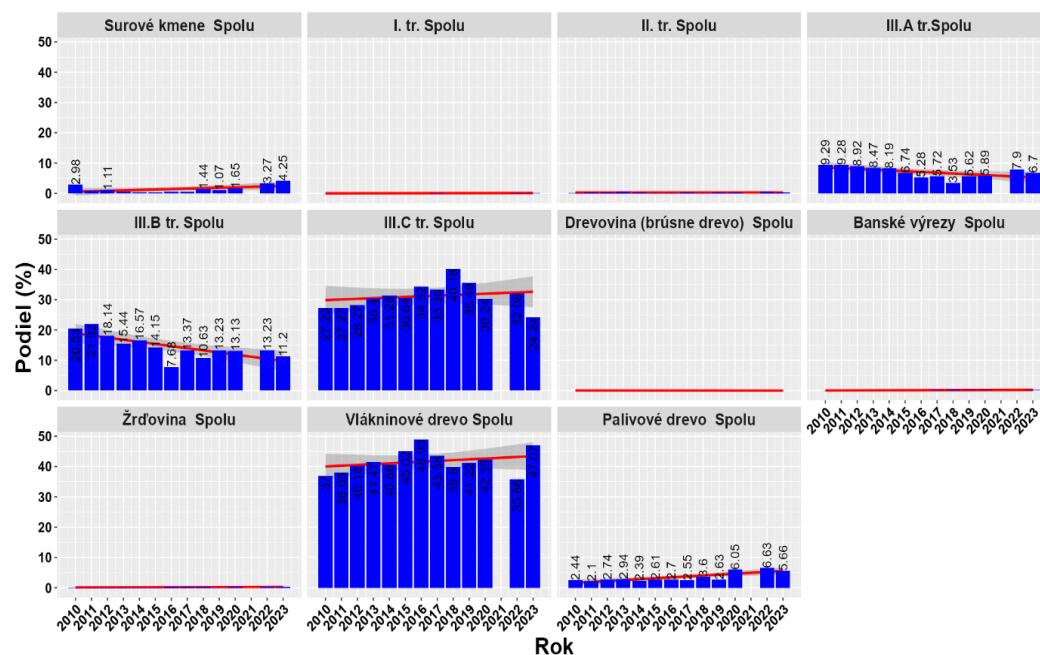
Sortiment	Suma dodávky (m ³)	Podiel sortiment (%)
Surové kmene Spolu	1695853	1.60
I. tr. Spolu	71850	0.07
II. tr. Spolu	327327	0.31
III.A tr. Spolu	7580012	7.15
III.B tr. Spolu	15456640	14.58
III.C tr. Spolu	32636077	30.79
Drevovina (brúsne drevo) Spolu	16700	0.02
Banské výrezy Spolu	124218	0.12
Žrdovina Spolu	200888	0.19
Vlákninové drevo Spolu	44098811	41.60
Palivové drevo Spolu	3802924	3.59

Analýza po jednotlivých rokoch ukazuje, že podiel dodaných sortimentov III.A má aj medziročne pomerne vyrovnaný priebeh s tendenciou mierneho poklesu. Pri sortimentoch III.B a III.C je vidieť určité sezónne kolísanie medzi 7.68% a 21.92%, resp. pri III.C medzi 24.24% a 40.18%. Všeobecne je pri sortimentoch III.B klesajúci trend a pri III.C mierne stúpajúci trend. Celkovo je možné hovoriť o medziročnom klesajúcom trende pri podiele kvalitnejších akostných triedach a stúpajúcom trende podielu menej kvalitných akostných tried sortimentov.

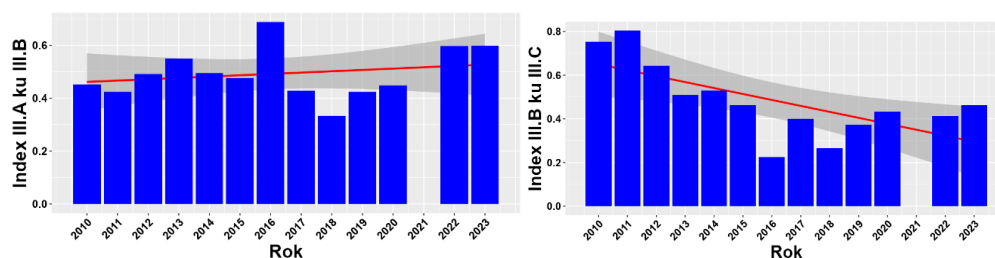
Pri hodnotení pomeru množstva dodaného sortimentu III.A ku III.B zistujeme, že tento pomer má mierne stúpajúci trend a je približne na úrovni 1:2. Obdobne je to aj s pomerom III.B ku III.C, avšak s výraznejšie klesajúcim medziročným trendom. Všeobecne môžeme v poslednom období aj pri pomere III.B ku III.C uvažovať s pomerom 1:2.

Pri rozčlenení sortimentov surového dreva do dvoch skupín - ihličnaté a listnaté dreviny, môžeme vidieť určité odlišnosti, a to že pri ihličnatých drevinách mierne prevláda v dodávkach akostná trieda III.C nad vlákniňovým drevom. Pri skupine listnatých drevín je to obdobné celkovému prehľadu t.j. značne prevláda vlákniňové drevo.

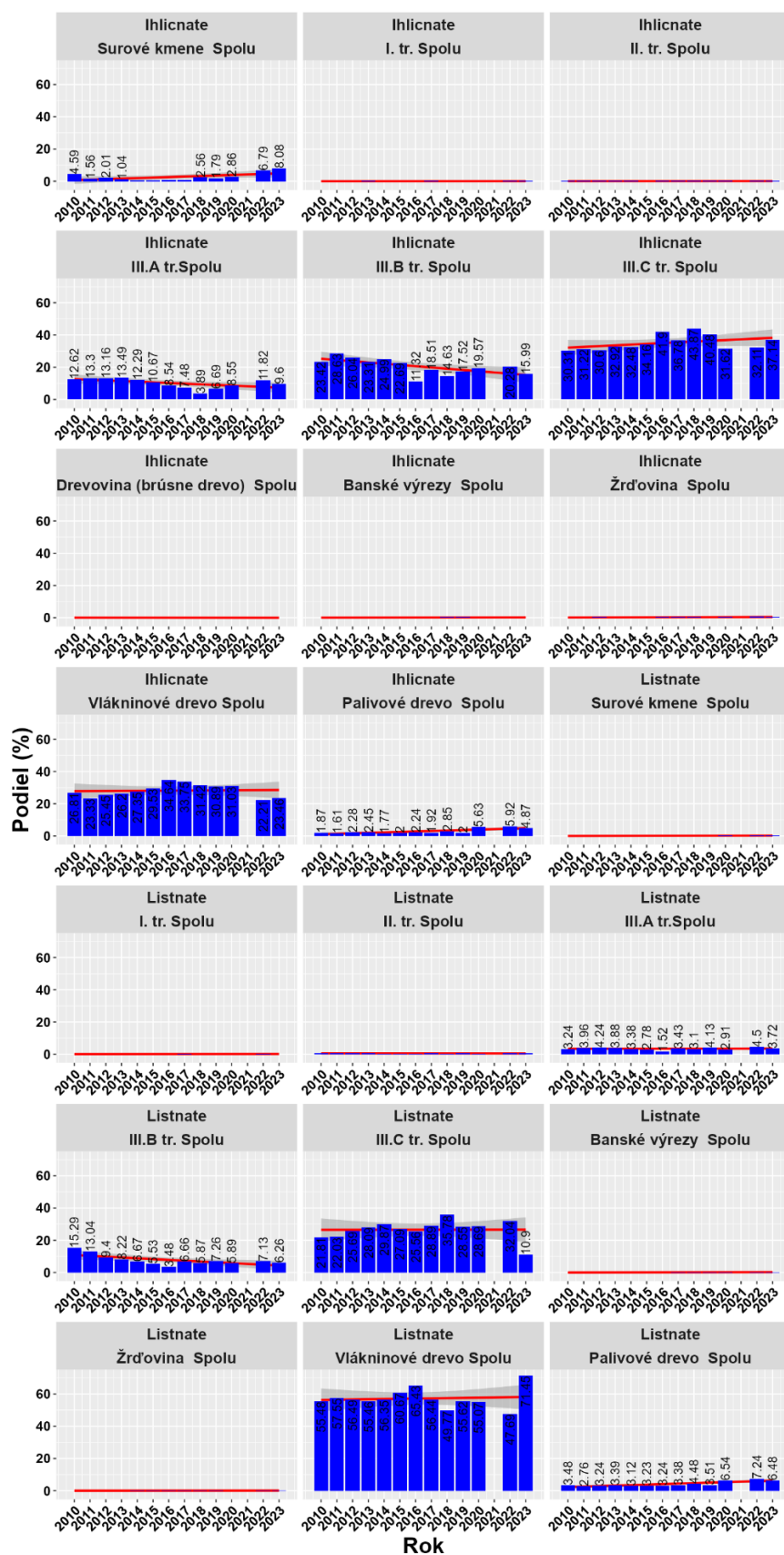
Pri hodnotení pomeru akostných tried III.A ku III.B vidíme, že pri ihličnatých drevinách je trend vyrovnaný na úrovni 1:2. Pri listnatých drevinách vidíme výrazne stúpajúci trend indexu a v poslednom období je pomer medzi III.A a III.B akostnými triedami na úrovni cca 1:1,7. Pri hodnotení pomeru akostných tried III.B ku III.C vidíme pri oboch skupinách drevín značne klesajúci trend. Pri ihličnatých drevinách klesol tento pomer v súčasnosti pod 1:2, pri listnatých drevinách bol dlhodobejšie na úrovni 1:4, avšak v roku 2023 vyskočil na cca 1:2.



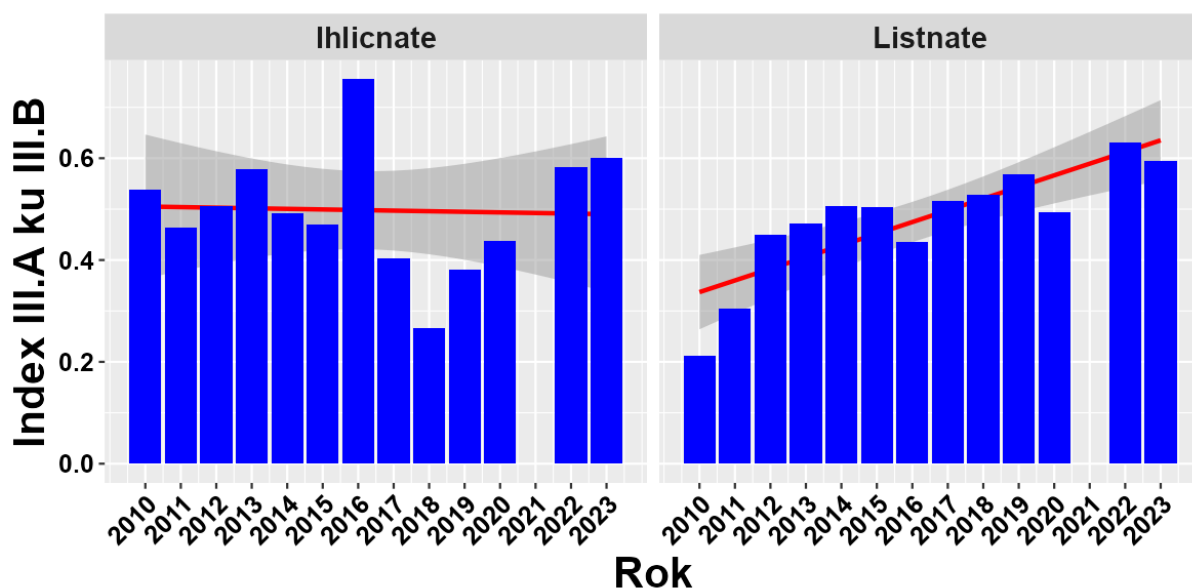
Obr. 2 Vývoj podielu akostných tried sortimentov surového dreva v dodávkach evidovaných na výkaze Les2-04



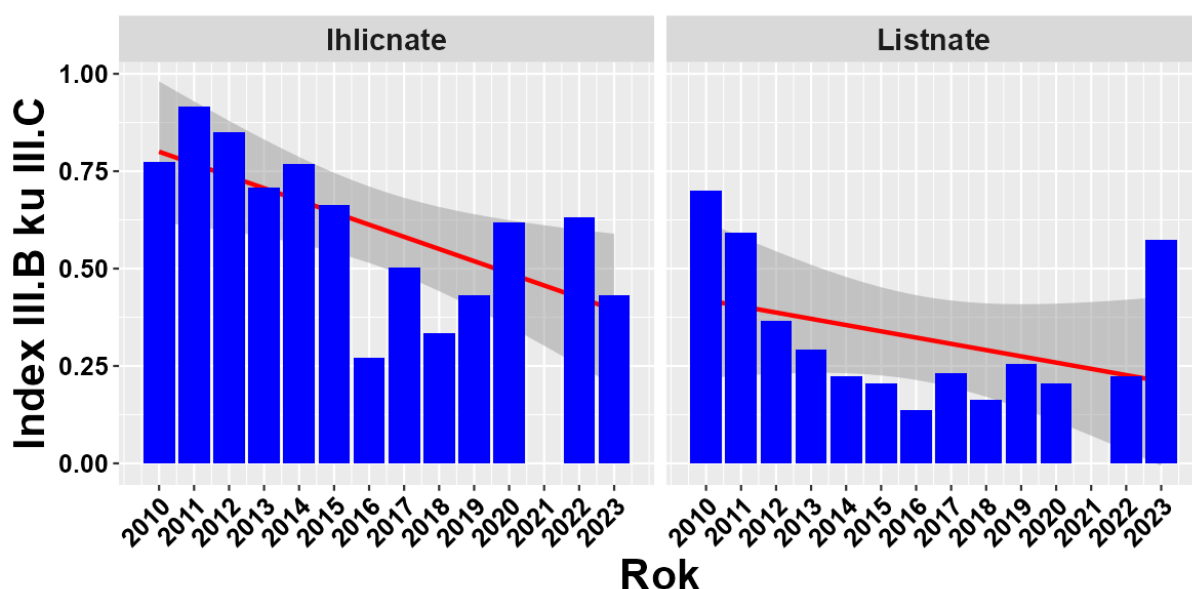
Obr. 3 Vývoj pomeru sortimentov surového dreva III.A ku III.B (vľavo) a III.B ku III.C (vpravo)



Obr. 4 Vývoj podielu akostných tried sortimentov surového dreva v dodávkach evidovaných na výkaze Les2-04 členených podľa skupín drevín (Ihličnaté, Listnaté)



Obr. 5 Vývoj pomeru sortimentov surového dreva III.A ku III.B v jednotlivých skupinách drevín (Ihličnaté, Listnaté)



Obr. 6 Vývoj pomeru sortimentov surového dreva III.B ku III.C v jednotlivých skupinách drevín (Ihličnaté, Listnaté)

4. ZÁVER

Výsledky analýzy výkazu Les2-04 za obdobie rokov 2010 až 2023 jednoznačne poukazujú na dominanciu vláknirového dreva v dodávkach surového dreva na Slovensku. Piliarske sortimenty III. akostnej triedy (III.A, III.B, III.C) síce predstavujú významnú časť dodávok, avšak ich podiel často vykazuje medziročné kolísanie a v prípade kvalitnejších tried aj mierne klesajúci trend. Pomer medzi triedami III.A a III.B sa stabilizoval na úrovni približne 1:2, pričom pri triedach III.B a III.C je pozorovaný výraznejší pokles pomeru.

Rozdelenie podľa skupín drevín ukazuje, že pri ihličnatých drevinách mierne prevláda trieda III.C nad vláknirovým drevom, zatiaľ čo pri listnatých drevinách je vláknirové drevo dominantné. Tieto rozdiely naznačujú potrebu diferencovaného prístupu pri plánovaní marketingových stratégií a manažmente odbytu.

Zistenia poukazujú na dôležitosť pravidelného hodnotenia vývoja sortimentovej štruktúry, keďže správne nastavenie obchodných vzťahov a technických podmienok kvalitatívneho triedenia je kľúčové pre efektívne fungovanie trhu s drevom. Vzhľadom na legislatívne a technické zmeny je nevyhnutné aktualizovať sortimentačné modely tak, aby reflektovali reálnu štruktúru dodávok a podporovali rozhodovanie v oblasti lesného hospodárstva.

POĎAKOVANIE

Výskum v tejto práci bol podporený Agentúrou na podporu výskumu a vývoja (číslo projektov APVV-22-0001) a Ministerstvom Školstva, Výskumu, Vývoja a Mládeže Slovenskej republiky; Kultúrnou a edukačnou grantovou agentúrou (č. projektu: KEGA 004TU Z-4/202). Táto štúdia bola spolufinancovaná Európskou komisiou v rámci projektu LignoSilva [Grant Agreement #101059552] v rámci akcie Horizon Europe Teaming for Excellence.

ZDROJE LITERATÚRY

GEJDOŠ, M. KVALITATÍVNE HODNOTENIE DREVA V SLOVENSKEJ REPUBLIKE. 2025, TU VO ZVOLENE, ISBN 978-80-228-3477-3, 246 S.

PETRÁŠ, R., NOCIAR, V. SORTIMENTAČNÉ TABUĽKY HLAVNÝCH DREVÍN. 1991. BRATISLAVA: VEDA. ISBN 80-224-0376-8.

STN 48 0055 KVALITATÍVNE TRIEDENIE IHLIČNATEJ GULATINY; 1989, 2004, 2007

STN 48 0056 KVALITATÍVNE TRIEDENIE LISTNATEJ GULATINY; 1989, 2004, 2007

[HTTPS://GIS.NLCSK.ORG/IBULH/CENYDREVA/CENYDREVAT](https://gis.nlcsk.org/ibulh/cenydreva/cenydrevat)

doc. Ing. Ján Merganič, Ph.D.: Technical University in Zvolen, Forestry Faculty, Masarykova 24, SK – 960 53 Zvolen, Slovak Republic. Email: merganic@tuzvo.sk; Národné lesnícke centrum, Znalecký ústav, T.G. Masaryka 22, Zvolen 960 01. Email: jan.merganic@nlcsk.org

Dr. nat. techn. Ing. Katarína Merganičová: Department of Biodiversity of Ecosystems and Landscape, Institute of Landscape Ecology, Slovak Academy of Sciences, 949 01 Nitra, Slovak Republic. Email: k.merganicova@forim.sk

doc. Ing. Miloš Gejdoš, Ph.D.: Katedra lesnej ťažby, logistiky a meliorácií, Lesnícka fakulta, Technická univerzita vo Zvolene, T.G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen. Email: gejdos@tuzvo.sk; Národné lesnícke centrum, Sekcia pre vedu a výskum, T.G. Masaryka 22, Zvolen 960 01. Email: milos.gejdos@nlcsk.org

NEEVIDOVANÝ OBJEM DREVA PRI ŤAŽBE SORTIMENTOVOU ŤAŽBOVOU METÓDOU

MARTIN JANKOVSKÝ, JIŘÍ DVOŘÁK, RADIM LÖWE, PAVEL NATOV, MONIKA LÖWE, MICHAL ALLMAN, ONDŘEJ NUHLÍČEK, JAN MACKŮ, MARTIN DUCHAN

This conference paper presents a summary of research on the volume of Norway spruce wood that remains unrecorded during cut-to-length (CTL) harvesting operations. Harvest data from 15 mechanized harvesters in Czechia (176,980 logs, total recorded volume 10,333 m³) were analyzed to determine the share of unrecorded timber volume resulting from length allowances. The logs were classified into five assortment grades by dimensional and quality criteria, and butt logs (logs from the stem butt) were distinguished from other logs. Results indicate that approximately 1.99% of the produced spruce timber volume was not captured in the primary harvest records. In assortment grades where both a customer-required trim allowance and a cutting window were applied, the unrecorded volume accounted for about 2.99–3.16% of the total log volume, whereas in grades using only a cutting window it was about 0.27–0.46%. Shorter logs had a higher relative length allowance volume than longer logs, and butt logs exhibited a slightly lower relative length allowance than other logs. These findings highlight the impact of harvester length allowances on timber volume records and the importance of accurate measurement and calibration in mechanized timber harvesting.

Kľúčové slová: sortiment; kmeňový súbor, StanForD, prídavok na priečny rez, rezné okno

Key words: Assortment; stem file; StanForD; cross-cut allowance; cutting window

1. PROBLEMATIKA

Technológia sortimentovej ťažbovej metódy (CTL), čiže spracovanie dreva harvesterom na výrezy priamo pri ťažbe, zaznamenala v posledných dvoch dekádach výrazný rozmach. Podiel mechanizovanej ťažby harvesterom na celkovom objeme ťažby v ČR vzrástol z asi 11% (1 712 000 m³) v roku 2005 na približne 38% (6 093 900 m³) v roku 2015 (Natov et al. 2017; Dvořák et al. 2019). V rokoch 2017 a 2018 bol zaznamenaný mierny pokles CTL ťažbovej metódy z 38 % na 34 % a následne na 32 %, čo bolo spôsobené najmä rastúcim podielom podkôrníkovej náhodnej ťažby (*Ips typographus*). Ročný objem dreva vyprodukovaného ťažobnými spoločnosťami však v absolútnych číslach naďalej rastie a v roku 2018 dosiahol 8 300 000 m³. To bolo približne o 2 206 000 m³ viac ako v roku 2015, keď produkcia dreva ťažobnými spoločnosťami dosiahla 6 094 000 m³ (Ministerstvo zemědělství ČR 2016, 2019). Hlavnou výhodou CTL technológie v ťažbovo dopravnom procese je, že zvyšuje produktivitu a znižuje výrobné náklady v porovnaní s motomanuálnou technológiou (Spinelli et al. 2014; Mederski et al. 2016). V niektorých európskych krajinách, ako je Švédsko, Nórsko a Fínsko, sa metóda CTL používa pre všetky typy ťažieb (Lundbäck et al. 2018). Popri nesporných výhodách však mechanizovaná ťažba dreva prináša aj nové výzvy v oblasti evidencie dreva. Napríklad rozdiely medzi skutočným množstvom vyrobeného dreva a množstvom vykázaným v evidencii môžu vznikať zo skutočných (technologických) a fiktívnych (metodických) dôvodov. K skutočným patria prídavky na dĺžku, priečne rezy, technologické straty, odkôrňovanie atď. pričom k fiktívnym patria rozdiely z metód merania (zaokrúhľovanie) a kubikovania (rôzne metódy odhadu objemu dreva) (Simanov 2003; Wojnar 2007). Tieto rozdiely môžu spôsobiť stratu pre vlastníkov lesov a vo výnimočných prípadoch môže byť objem dreva nadhodnotený.

Cieľom tejto štúdie je odhadnúť objem nezaevidovanej drevnej hmoty v dĺžkových prídavkoch v prípade vyrábaných sortimentov na základe údajov získaných z harvesterov v rámci Českej republiky a zovšeobecniť tieto výsledky na celoštátnu úroveň.

2. MATERIÁL A METODIKA

Zber dát bol realizovaný od 15 harvesterov pre drevinu *Picea abies* naprieč Českou republikou a prebiehal od januára 2016 do augusta 2018. Primárne údaje pochádzali zo súborov *.stm (StanForD), ktoré obsahovali informácie o každom spracovanom kmeni. Pre zaistenie presnosti nameraných dĺžok a priemerov boli zariadenia stroja a riadiace a informačné systémy riadne kontrolované a v prípade potreby kalibrované. Kontrolné meranie sa vykonávalo na troch až piatich kmeňoch na začiatku každého pracovného dňa. Stromy pre kontrolné merania boli vybrané tak, aby mali čo najuniformnejší tvar, čo pomohlo zdôrazniť chyby merania harvestora (Strandgard 2009). Extrahované údaje z riadiacich a informačných systémov harvesterov boli uložené v priečinku, čím sa vytvorila databáza obsahujúca približne pol milióna súborov *.stm. V prvom kroku bola databáza skontrolovaná a vyčistená od duplicitných súborov, pričom bol pridelený jedinečný identifikátor každému zostávajúcemu súboru *.stm, čím bol vytvorený súbor údajov, ktorý obsahoval celkovo 493 920 súborov *.stm. Podrobný popis získavania údajov popisuje Jankovský et al. (2019). Pre spracovanie údajov bola použitá náhodná vzorka, ktorá sa skladala z 10 % súborov *.stm. Na vytvorenie náhodnej vzorky bola použitá funkcia PHP array_rand (PHP.net 2019). Údaje uložené v súboroch *.stm z tejto vzorky boli prevedené na pracovný súbor *.XLSX pomocou aplikácie STeMa, verzia 1.0. V záverečnej fáze po odfiltrovaní extrémnych a odľahlých hodnôt ako aj iných drevín s výnimkou *Picea abies* bola v konečnej fáze vytvorená databáza vzoriek, ktorá obsahovala 40 471 smrekových kmeňov (súbory *.stm) a 194 954 sortimentov. Z tejto vzorky pochádzalo 38 % celkového zaznamenaného objemu dreva z prebierkových ťažieb a 62 % z obnovných ťažieb.

Vyrábané sortimenty boli zatriedované do piatich kvalitatívnych tried: píliaarska guľatina (dĺžka 245–700 cm; priemer na tenšom konci ≥ 200 mm), agregátna guľatina (dĺžka 150–700 cm; priemer na tenšom konci 90–200 mm), vlákna (dĺžka 190–600 cm; priemer na tenšom konci ≥ 50 mm), stĺpové výrezy (dĺžka 220–255 cm; priemer na tenšom konci ≥ 60 mm) a ťažbové zvyšky. Ďalej boli rozlišované tzv. pňové a ostatné výrezy. Pňové výrezy predstavovali prvý výrez z územkovej časti stromu, ktorý môže byť deformovaný koreňovými nábehmi. Ostatné výrezy predstavujú všetky ostatné sortimenty, ktoré boli z kmeňa stromu vyprodukované a nemali koreňové nábehy.

Štatistické analýzy boli realizované v programe Statistica 13. Na analýzu dát bola použitá popisná štatistika (aritmetický priemer, smerodajná odchýlka–SD), jednofaktorová ANOVA a Tukeyho HSD test. Za kritickú hodnotu štatistickej významnosti bola stanovená hladina významnosti na úrovni 5 %.

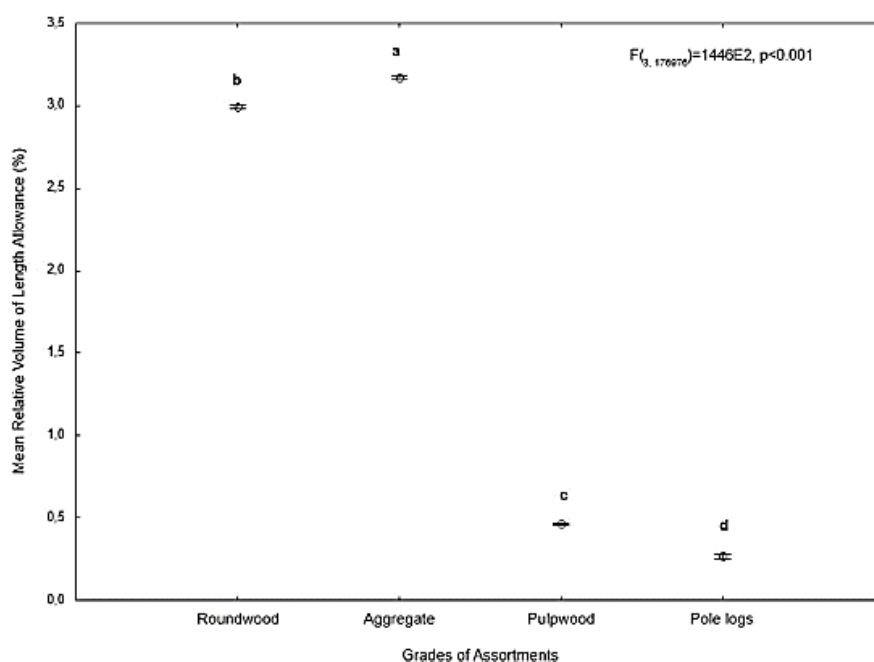
3. VÝSLEDKY

V triede ťažbových zvyškov bolo zaznamenané celkovo 17974 kusov s celkovým objemom 210,78 m³ v kôre. Celkovo bolo analyzované 176980 kusov smrekových sortimentov v obchodovateľných triedach s celkovým objemom 10332,83 m³. Celkový nezaevidovaný objem dreva spôsobený prídavkami na dĺžku dosiahol 205,2 m³, čo predstavuje 1,99 % z celkového objemu obchodovateľných sortimentov vyprodukovaných harvestormi. Pri analýze jednotlivých sortimentových tried sa celkový zaevidovaný objem dreva pohyboval v intervale 139–4462 m³ a celkový nezaevidovaný objem spôsobený prídavkami na dĺžku v intervale 0,38–125,32 m³ (Tabuľka 1).

Tab 1. Základné ukazovatele sortimentných tried a súhrnné objemy.

Parameter	Guľatina	Aggregate	Celulózové	Týčovina	Spolu
Počet výrezov (ks)	16 527	23 644	129 515	7 294	176 980
Priem. požadovaná dĺžka (cm)	393	323	207	228	241
Priem. na tenšom konci (mm)	268	159	112	94	121
Priem. prídavok na dĺžku (cm)	12,7	11,5	1,1	0,7	3,6
Priem. evidovaný objem / výrez (m ³)	0,27	0,08	0,03	0,02	0,06
Súčet evidovaného objemu (m ³)	4 462	1 884	3 848	139	10 333
Súčet neevidovaného (m ³)	125,32	55,23	24,27	0,38	205,20
Relatívny neevidovaný objem (%)	2,81	2,93	0,63	0,27	1,99

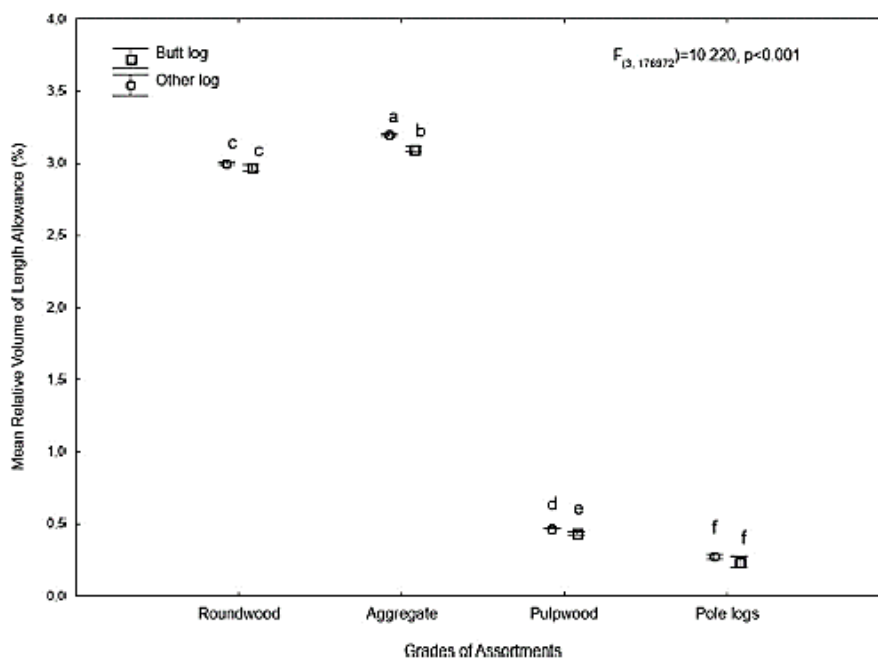
Najväčší priemerný relatívny objem prídavkov na dĺžku bol zaznamenaný v prípade agregátnej guľatiny (3,16 %, SD = 0,83 %). Nasledovali triedy guľatiny (2,99 %, SD = 0,81 %) a vlákničky (0,46 %, SD = 0,68 %). Najnižší priemerný relatívny objem dĺžkových prídavkov bol zistený v triede stĺpových výrezov (0,27 %, SD = 0,53 %) (Obrázok 1).



Obr. 1 Rozdiely v priemernom relatívnom objeme dreva v prídavkoch na dĺžku medzi jednotlivými triedami sortimentov (chybové úsečky označujú 95% interval spoľahlivosti)

Z celkového počtu 176 980 evidovaných výrezov bolo 39 033 pňových výrezov. Štatistické analýzy týchto údajov ukázali významné rozdiely ($p < 0,001$) v priemernom relatívnom objeme dreva prídavkov na dĺžku medzi jednotlivými triedami (Obrázok 2). Trieda guľatiny obsahovala celkovo 4 485 pňových výrezov a 12 042 ostatných výrezov. V tejto triede sa nezistil žiadny významný rozdiel ($p = 0,24$) medzi priemerným relatívnym objemom dĺžkových prídavkov pňových (2,97%) a ostatných výrezov (3,00%). Kategória agregátnej guľatiny celkovo obsahovala 6 422 pňových výrezov a 17 222 ostatných výrezov. Priemerný relatívny objem prídavkov na dĺžku bol výrazne nižší ($p < 0,001$) u pňových výrezov (3,10%)

v porovnaní s ostatnými výrezmi (3,19%). V prípade vláknniny bolo celkovo zaznamenané 26 959 pňových výrezov a 102 556 ostatných výrezov. Priemerný relatívny objem prídavkov na dĺžku bol výrazne nižší ($p < 0,001$) pre pňové výrezy (0,44%) v porovnaní s ostatnými výrezmi (0,47%). V prípade stĺpových výrezov bolo zaznamenané 1 167 pňových výrezov a 6 127 ostatných výrezov. V tejto triede sa nezistil žiadny významný rozdiel ($p = 0,67$) medzi priemerným relatívnym objemom prídavkov na dĺžku pňových (0,24%) a ostatných výrezov (0,27%).



Obrázok 2 Rozdiely v priemernom relatívnom objeme dreva v dĺžkovej tolerancii medzi pňovými výrezmi a ostatnými výrezmi v rôznych triedach sortimentov (chybové úsečky označujú 95% interval spoľahlivosti; označenie a-a, f-f označuje, že v uvedených prípadoch nebola potvrdená signifikantnosť rozdielov porovnaním jednotlivých kategórií Tukeyho HSD testom)

4. DISKUSIA

Štúdia odhalila, že v primárnej evidencii nebolo zaznamenaných 1,99 % objemu obchodovateľného smrekového dreva, ktoré vyprodukovali harvestory. Tento výsledok je nižší ako v predchádzajúcej štúdii Löwe et al. (2019), ktorá uvádza 2,19 %. Rozdiel je vysvetlený odlišným typom ťažby: kým predchádzajúca štúdia analyzovala iba ťažbu obnovnú, táto štúdia zahŕňa aj údaje z prebierok, ktoré produkujú viac sortimentov nižšej kvality. Údaje z prebierok znížili podiel sortimentov vyššej triedy s povolenou dĺžkovou toleranciou (guľatina, agregátna trieda), zatiaľ čo zvýšili podiel sortimentov nižšej triedy, kde bolo povolené len „cutting window“ (vláknnina, stĺpovina), čo sa prejavilo v menších objemových stratách. Prídavok na dĺžku môže pozostávať z dvoch častí a to „the cross-cut allowance“ (prirážka na priečny rez) a „cutting window“ (rezné okno) interval dĺžok, kde môže byť rez vykonaný (Natov, Dvořák 2018). Z tohto dôvodu boli zistené signifikantné rozdiely medzi jednotlivými sortimentovými triedami. Prídavok na dĺžku u stĺpových výrezov a vláknniny vznikol len vďaka cutting window, v dôsledku čoho boli podiely neevidovaných objemov prídavku na dĺžku v priemere 0,27 % a 0,46 %. V porovnaní so sortimentmi guľatiny a zmesových výrezov, kde bola pridaná aj „cross-cut allowance“, sa objem prídavkov na dĺžku zvýšil na 2,99 % až 3,16 %.

Na zabezpečenie spoľahlivých primárnych záznamov o ťažbe dreva, ktoré sú uvádzané vo výstupoch z harvestora, je nevyhnutné pravidelne kontrolovať meracie systémy harvestora

a v prípade potreby vykonať ich kalibráciu. Pravidelná kontrola a kalibrácia zvyšujú presnosť meracích systémov (Nieuwenhuis a Dooley 2006) a zvyšujú spoľahlivosť ich výstupov. V Českej republike sa tolerovaná odchýlka objemu dreva získaného z výstupu harvestora od objemu dreva odhadnutého podľa Wojnar (2007) zvyčajne pohybuje medzi 2 a 5 %, v závislosti od zmluvných podmienok (Natov a Dvořák 2018). Hoci neevidovaný objem v prídavkoch na dĺžku bude vznikať vždy pri ťažbe dreva harvestorovou technológiou, je dôležité usilovať sa o jeho minimalizáciu na prijateľnú úroveň. Preto by sa zmluvné strany mali riadiť vnútroštátnymi odporúčanými pravidlami pre nastavenie riadiaceho a informačného systému harvestora, ak existujú. Je dôležité zaznamenávať množstvo vyťaženej drevnej hmoty čo najpresnejšie, najmä s ohľadom na širokú škálu sektorových ukazovateľov a dotácií, ktoré sú na tieto údaje naviazané.

5. ZÁVER

Dosiahnuté výsledky prinášajú objektívne výsledky pre producentov dreva, ktorí na ich základe môžu odhadnúť množstvo neevidovanej drevnej hmoty v prídavkoch na dĺžku, ktorá je dodávaná ich zákazníkom. Dosiahnuté výsledky je možné taktiež použiť pri vývoji softvéru pre lesné hospodárstvo ako doplňujúcej informácie na získanie komplexnejšieho pohľadu na objem drevnej zásoby v lese.

Tieto výsledky slúžia aj ako podklad pre diskusie o porovnaní odhadu vyťaženého objemu, ktorý poskytuje Národná inventarizácia lesov II (Adolt et al. 2016), s objemom, ktorý každoročne vykazuje Ministerstvo zemědelství ČR. Rozdiel medzi týmito odhadmi bol v rokoch 2001 – 2010 minimálne 19 %. Práve neevidovaný objem dreva spôsobený prídavkami na dĺžku môže čiastočne vysvetliť tento rozdiel.

LITERATÚRA

NATOV P, DVOŘÁK J, SEDMÍKOVÁ M, LÖWE R, FERENČÍK M. Srovnání vyrobeného objemu dříví harvesterem se zásobou porostu stanovenou objemovými tabulkami (Comparison of harvester-produced timber volume with the standing timber volume determined by volume tables). *Zprávy Lesnického Výzkumu – Reports of Forestry Research*. 2017, 62(1):1–6.

DVOŘÁK J, CHYTRÝ M, NATOV P, JANKOVSKÝ M, BELJAN K. Long-term cost analysis of Mid-performance harvesters in Czech conditions. *Austrian J For Sci*. 2019, 136(4):351–372.

LUNDBÄCK M, HÄGGSTRÖM C, NORDFJELL T. Worldwide trends in the methods and systems for harvesting, extraction and transportation of roundwood. In: *Proceedings of the 6th international forest engineering conference “quenching our thirst for new knowledge”*. 16–19. April 2018. Rotorua, New Zealand: p. 3; Available from: vforesteng.canterbury.ac.nz/FEC2018.shtml.

STRANDGARD M. Evaluation of manual log measurement errors and its implications on harvester log measurement accuracy. *Int J For Eng*. 2009, 20:9–16. doi:10.1080/14942119.2009.10702578.

JANKOVSKÝ M, NATOV P, DVOŘÁK J, SZALA L. Norway spruce bark thickness models based on log midspan diameter for use in mechanized forest harvesting in Czechia. *Scandinavian J For Res*. 2019, 34(7):617–626. doi:10.1080/02827581.2019.1650952.

PHP.net. 2019. Function array_rand.php, PHP manual. Available from: www.php.net/manual/en/function.array-rand.php [Cited 2019 November 20].

Ministry of Agriculture of the Czech Republic. 2016. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2015 (Report on the state 392 J. DVOŘÁK ET AL. of forests and forestry in the Czech Republic in the year 2015). Prague, Czech Republic: Ministry of Agriculture of the Czech Republic.

Ministry of Agriculture of the Czech Republic. 2019. Zpráva o stavu lesa a lesního hospodářství České republiky v roce 2018 (Report on the state of forests and forestry in the Czech Republic in the year 2018). Prague, Czech Republic: Ministry of Agriculture of the Czech Republic.

LÖWE R, SEDMÍKOVÁ M, NATOV P, DVOŘÁK J, JANKOVSKÝ M. Analýza neevidovaného objemu dříví v přidavcích k délce výřezů při výrobě smrkového dříví harvesterovou technologií (Analysis of unrecorded timber volume in length allowances of logs in spruce timber production by harvester's technology). Zprávy Lesnického Výzkumu - Reports of Forestry Research. 2019, 64(4):207–216.

SPINELLI R, LOMBARDINI C, MAGAGNOTTI N. The effect of mechanization level and harvesting system on the thinning cost of Mediterranean softwood plantations. *Silva Fenn.* 2014, 48:1–15. doi:10.14214/sf.1003.

MEDERSKI P, BEMBENEK M S, KARASZEWSKI Z, LACKA A, SZCEPANSKA-ÁLVAREZ A, ROSINSKA M. Estimating and modelling harvester productivity in pine stands of different ages, densities and thinning intensities. *Croatian J For Eng.* 2016, 37(1):27–36.

SIMANOV V. Rozdíly v evidovaném objemu dříví (Differences in recorded volume of timber). *Lesnická práce.* 2003, 82(2):32–34.

WOJNAR T. *Doporučená pravidla pro měření a třídění dříví v České republice 2008* (Guidelines for timber scaling in the Czech Republic 2008), 2nd ed. Kostelec nad Černými lesy, Czech Republic: Lesnická práce. 2007, p. 147.

NATOV P, DVOŘÁK J. *Doporučená pravidla pro elektronický příjem dříví harvestory v ČR 2018* (Guidelines for electronic registration of the harvested timber by harvesters in the Czech Republic 2018). Prague, Czech Republic: Produkce BPP. 2018, 136 p.

NIEUWENHUIS M, DOOLEY T. The effect of calibration on the accuracy of harvester measurements. *Int J For Eng.* 2006, 17:25–33. doi:10.1080/14942119.2006.10702533.

ADOLT R, KUČERA M, KOHN I, KRATĚNA L, FEJFAR J, ZÁVODSKÝ J, PIŠKYTLOVÁ K, ČECH Z. Výstupy Národní inventarizace lesů uskutečněné v letech 2011–2015, 3. Těžba dříví (Outputs of the national forest inventory in 2011–2015, 3. harvesting). *Lesnická práce.* 2016, 95(2):8. Available from: http://nil.uhul.cz/data/documents/vysledky_projektu_nil2/tezba_drivi_lp_unor_2016.pdf.

*Katedra lesnických technologií a staveb, Fakulta lesnická a dřevařská, Kamýcká 129, 165 00 Praha-Suchbát**correspondent author: allman@fld.czu.cz

VYUŽITIE DIAĽKOVO PILOTOVANÝCH LETECKÝCH SYSTÉMOV PRI MAPOVANÍ PLÔCH PO VYKONANÍ OBNOVNEJ ŤAŽBY V LESNÝCH PORASTOCH

DANIEL ČURILA, MIROSLAV KARDOŠ

The paper focuses on the use of remotely piloted aircraft systems for the creation of orthophotos and their positional accuracy in the mapping of forest spatial distribution units. The orthophotos were made from aerial photographs of two categorically different types of drones, which represented the range in their category at the time of their introduction to the market. DJI Mavic Air 2 fell into the category of drones for recreational use and DJI Phantom 4 PRO belonged to the category for professional use. Reference data points were collected using the Stonex s900+ GNSS receiver, with the subsequent processing of aerial photos in the Agisoft Metashape software into aerial orthophotos, on which the coordinate differences were determined. The results of the statistical evaluation provided mean difference of $2,96 \pm 0,13$ m for DJI Mavic Air 2 and $1,94 \pm 1,52$ for DJI Phantom 4 Pro. With the 68 % probability, the true positions of the points from the reference points are in the case of DJI Mavic Air 2 in range of $\pm 2,97$ m (RMSE) and RMSE of $\pm 2,46$ m in case of DJI Phantom 4 Pro.

Kľúčové slová: bezpilotné letecké systémy, mapovanie lesa, letecké snímkovanie, fotogrametria, globálne navigačné satelitné systémy

Key words: unmanned aerial systems, forest mapping, airborne imaging, photogrammetry, global navigation satellite systems

1. ÚVOD

Lesnícke mapy sú súčasťou programu starostlivosti o lesy (PSL) a zobrazujú stav všetkých lesov na začiatku platnosti PSL. Tieto mapy kombinujú prvky topografickej a tematickej mapy a tvoria výsledok lesníckeho mapovania na takmer 42 % územia Slovenska. Každoročne sa obnovuje lesnícke mapové dielo na približne 1/10 tejto plochy, pričom sa využívajú mapové podklady verejného mapovania so zameraním na biologické, technické a ekonomické špecifiká lesného hospodárstva.

Využívajú sa dve základne skupiny metód meraní a vyhodnotenia v lesníckom mapovaní:

- Geodetické terestrické merania, v ktorých sa dnes prevažne využívajú globálne navigačné satelitné systémy
- Fotogrametrické vyhodnotenia, ktoré v lesníckom mapovaní dominujú, a realizujú sa využitím prostriedkov digitálnej fotogrametrie, v súčasnosti doplnené aj o technológiu LiDAR

Produktom lesníckeho mapovania a kartografického spracovania je tematické štátne mapové dielo s obsahom lesného hospodárstva (TŠMD) (NLC ZVOLEN, 2025)

Presnosť mapovania je daná v zmysle štandardu digitálneho mapového diela metódou obstarávania príslušného prvku mapovania, pričom sa predpokladá, že s uvedenými metódami sa dosiahne stredná súradnicová chyba $m_{xy} \leq 0,50$ m.

V poslednej dekáde sa do popredia pri špecifických mapovacích úlohách dostáva aj technológia diaľkovo pilotovaných leteckých systémov (RPAS). Predovšetkým sa jedná o zisťovanie štruktúry lesných porastov a mapovanie zásoby biomasy, napr. v lese s dominantným zastúpením smreka obyčajného a buka lesného (napr. KUŽELKA, SUROVÝ, 2018). Významnou aplikáciou zariadení RPAS v lesníctve je zisťovanie zásoby lesných porastov a zisťovanie ďalších porastových charakteristík (napr. FRASER, CONGALTON, 2021). Vďaka rôznym senzorom, ktoré môžu niesť zariadenia RPAS, predovšetkým zachytávajúce elektromagnetické spektrum vo viacerých pásmach je možné úspešne identifikovať zdravotný stav lesa (napr. ABDOLAHNAJED, PANAGIOTIDIS, 2020), resp. identifikovať drevinové zloženie lesných porastov (napr. LIU ET AL., 2021, REILLY ET AL., 2021).

Za posledných 10 rokov bol uskutočnený obrovský technologický pokrok v použití a vývoji technológií, ktoré dohromady vytvárajú základ bežne dostupných komerčných RPAS.

Kvalita senzorov, ktorými sú tieto zariadenia vybavené umožňuje získavať letecké snímky, resp. laserové skeny s vysokou priestorovou rozlišovacou schopnosťou. Tieto charakteristiky ich predurčujú aj na využitie pri aktualizácii hraníc pozemkov zobrazených v katastrálnych mapách (napr. KYSEL ET AL., 2024, ŠAFÁŘ ET AL., 2021), resp. ich vytýčenie v poľnohospodárskych oblastiach (SUNG, LEE, 2016)

Zásadným prínosom je dostupnosť globálneho polohového systému (GPS) bez obmedzeného prístupu a rozšírenia polohovacích systémov z rôznych kontinentov (napr. TOMAŠTÍK, 2020). Rovnako viedol vývoj RPAS k veľkému rozvoju v oblasti batérií, ich kapacít, motorov, závesných systémov, senzorov, eliminácii vibrácií, miniaturizácii elektroniky a pokročilého programovania ovládacích softvérov a ďalších spojených technológií, ktoré dávajú dohromady RPAS malých rozmerov.

Podľa Vykonávacieho nariadenia Európskej komisie 2019/947 je prevádzka dronov rozdelená do troch kategórií. Prvá a najmenej obmedzujúca je kategória „otvorená“. Ďalej je tu „osobitná“ kategória a posledná a najšpecifickejšia je kategória s názvom „osvedčená“. Podľa toho, ako užívateľ využíva dron, bude zaradený do jednej z týchto kategórií a vzťahujú sa na neho pravidlá danej kategórie. Dopravný úrad SR predpokladá, že do roku 2030 by mohlo byť na území Slovenskej republiky u štátnych a obchodných spoločností registrovaných viac ako 50-tisíc bezpilotných lietadiel a u súkromných osôb okolo 200 tisíc. Z tohto dôvodu bola ministerstvom dopravy SR prijatá v júli 2024 nová legislatíva regulujúca prevádzku RPAS na Slovensku (DOPRAVNÝ ÚRAD SR, 2021).

RPAS sú určené pre mapovanie menších až stredne veľkých území vo vysokom obrazovom rozlíšení. Jednou z najväčších výhod využitia RPAS pre mapovanie je možnosť ich rýchleho nasadenia a zmapovania aktuálnej situácie aj do druhého dňa od vzniku požiadavky, čo je u družíc alebo klasických pilotovaných lietadiel takmer nemožné.

Uvedené metódy a technológie sa v poslednej dekáde začali uplatňovať aj v oblasti lesníctva. Naším cieľom je overenie polohovej presnosti získaných údajov z dostupných RPAS multikoptér pri mapovaní plochy po vykonaní lesnej ťažby.

2. METODIKA

V rámci výskumu bola zisťovaná zmena polohy na signalizovaných kontrolných bodoch na ploche lesného porastu po vykonaní lesnej ťažby (vo fáze dorubu) voči polohe identických bodov zosnímaných technológiou RPAS na vytvorených ortofotomapách.

2.1. Lokalita výskumu

Výskumná plocha sa nachádza v JPRL 326 (obr. 1), ktorá leží západne od obce Sielnica, okres Zvolen. Dielec sa nachádza v lesnej oblasti Kremnické vrchy – Vtáčnik. JPRL 326 pozostáva z troch porastových skupín. Prvá porastová skupina má vek 120 rokov. Zakmenenie je 0.74. Stredná výška porastu je 30m. Porastový typ: jedľové bučiny. Skladá sa z dvoch častí. Druhá porastová skupina má vek 15rokov, zakmenenie 1.0, stredná výška 6m, porastový typ: hrabové bučiny-semenného pôvodu. Pozostáva tiež z dvoch častí. Tretia porastová skupina má vek 5 rokov, zakmenenie 1.0, strednú výšku 1m, porastový typ: bučiny- semenného pôvodu, pozostáva zo štyroch častí. Expozícia porastu je na východ, priemerný sklon je 40%. Celková výmera JPRL 326 je 10,86 ha. Porast bol cielene vybraný za účelom výskumu z dôvodu jeho prístupnosti a aktuálne vykonanej obnovnej ťažby, kde bol v okrajových obnovných prvkoch vykonaný dorub nad prirodzeným zmladením.



Obr. 1 Porastová mapa zobrazujúca JPRL č. 326

2.2. Meranie kontrolných bodov

Zameranie kontrolných bodov a ich súradníc sme realizovali prostredníctvom GNSS prijímača značky Stonex s900+ , ktorý je vybavený 1408 kanálovým čipom s podporou všetkých dostupných satelitných systémov. Prostredníctvom 4G GSM modemu je zabezpečené pripojenie k mobilnému internetu pre príjem diferenciálnych korekcií zo služby SKPOS. Vďaka integrovanej IMU jednotke odolnej voči elektromagnetickým vplyvom je možné merať a vytyčovať s maximálnym náklonom až do 60°, s presnosťou do 5 cm. Horizontálna presnosť RTK-VRS (SKOPS) je $5\text{mm} \pm 0,5\text{ppm(RMS)}$, vertikálna presnosť je $10\text{mm} \pm \text{ppm (RMS)}$. Pre účely výskumu diplomovej práce bolo potrebné získať dva druhy dát.

Kontrolné body sa vyznačili na výskumnej ploche krížmi bielej farby (cca 25x25 cm) nastriekané značkovacím sprejom na rôzne povrchy (pne vyrúbaných stromov, skaly). Stredy krížov sme následne zamerali pomocou GNSS prijímača Stonex (obr. 2)



Obr. 2 Meranie kontrolných bodov pomocou GNSS prijímača Stonex s900+.

2.3. Snímkovanie prostredníctvom RPAS

Na experiment sme použili dve zariadenia RPAS, DJI PHANTOM 4 PRO a DJI MAVIC AIR 2. Jedná sa o kvadrokoptéry s kamerou umiestnenou na 3-osovom stabilizovanom závесе s integrovaným systémom na prenos obrazu, s video pozičným systémom a antikolíznymi senzormi. Podrobnejšie informácie a charakteristiku senzorov uvádza tabuľka č. 1. Výška letu sa pri oboch systémoch pohybovala priemerne na 70 m nad terénom (obr. 3).

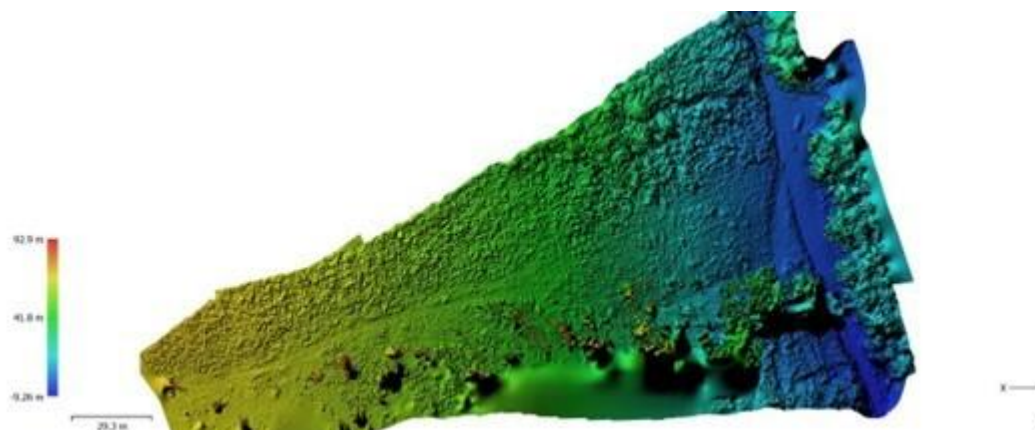
Tab. 1 Charakteristika testovaných zariadení RPAS

Technická špecifikácia	DJI Mavic Air 2	DJI Phantom 4 Pro
Hmotnosť	570g	1388g
Max. rýchlosť	19 m/s	20m/s
Max. prevádzková výška nad hladinou mora	5000m	6000m
Max. letový čas	34 min.	30 min.
Satelitné systémy	GPS + GLONASS	GPS + GLONASS
Senzor	½" CMOS	1" CMOS
Efektívny pixel	12/48 Mpx	20 Mpx
Objektív	FOV: 84° Ekvivalent 35mm formátu: 24 Clona : f / 2,8 Rozsah ostrenia: 1m až ∞	FOV: 84° Ekvivalent 35mm formátu: 24 Clona: f / 2,8 – f/11 Rozsah ostrenia: 1m až ∞

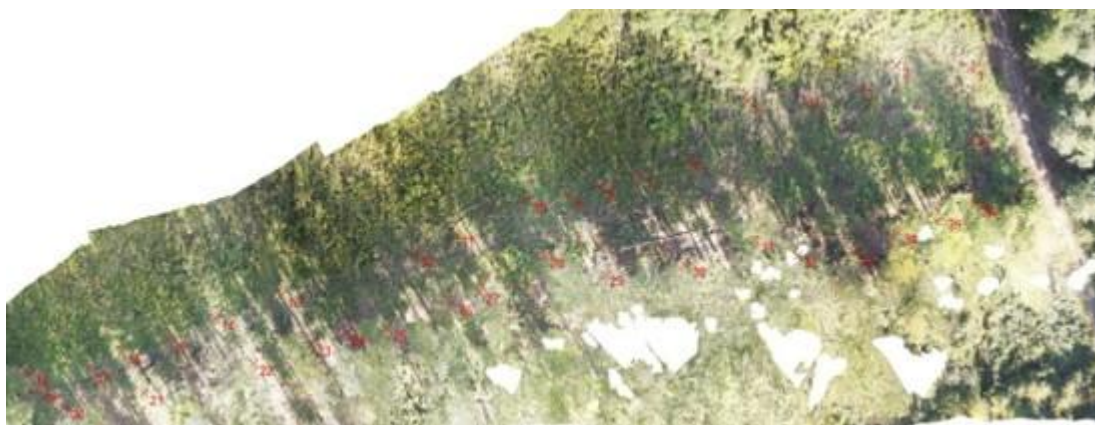


Obr. 3 Pozície RPAS pri snímaní plochy

Fotogrametrické spracovanie leteckých snímok sa realizovalo v softvéri Agisoft Metashape s využitím metódy Structure from Motion (SfM). Celý proces predstavoval spájanie snímok prostredníctvom identických bodov, ich vyrovnanie, tvorbu bodového mračna, digitálneho modelu povrchu (obr. 4) a ortofotomozaiky (obr. 5). Na georeferencovanie do súradnicového systému boli použité parametre vonkajšej orientácie snímok získané počas snímkového letu, pričom súradnice stredu premietania boli transformované do súradnicového systému S-JTSK, v ktorom boli zamerané aj súradnice kontrolných bodov na teréne.



Obr. 4 Digitálny model povrchu (DMP) vygenerovaný zo snímok



Obr. 5 Výrez digitálnej ortofotomozaiky vytvorenej diferenciálnym prekreslením s použitím DMP (prázdné miesta reprezentujú plochu s nedostatočným prekrytom snímok)

2.4. Vyhodnotenie meraní

Prvý krok predstavoval výpočet súradnicových diferencií pomocou vzorca:

$$e_i = \sqrt{\Delta Y^2 + \Delta X^2}, \quad (1)$$

kde ΔY a ΔX = Rozdiel Y, resp. X súradnice odčítanej z ortofotosnímkou – Y, X súradnica zameraná GNSS prijímačom. Pre súradnicové rozdiely boli vypočítané základné štatistické charakteristiky, ktoré zahŕňali výpočet individuálnych diferencií (vzorec 1); priemernej diferencie $\bar{e}$ (vzorec 2); smerodajnej odchýlky s_e (vzorec 3); a strednej kvadratickej chyby RMSE (vzorec 4), s 68 % intervalom spoľahlivosti. Navyše bol vykonaný test normality dosiahnutých odchýlok (hodnota p) s použitím Shapiro–Wilks W testu a v nadväznosti na jeho výsledky naparametrický Wilcoxonov párový test pre vyhodnotenie štatistickej významnosti polohových odchýlok testovaných metód na hladine významnosti $\alpha = 0.05$ s $f = n-1$ stupňami voľnosti (95 % interval spoľahlivosti).

$$\bar{e} = \frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} \quad (2)$$

$$s_e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}{n-1}} \quad (3)$$

$$RMSE = \sqrt{s_e^2 + \bar{e}^2} \quad (4)$$

3. VÝSLEDKY A DISKUSIA

3.1. Vyhodnotenie polohovej presnosti RPAS

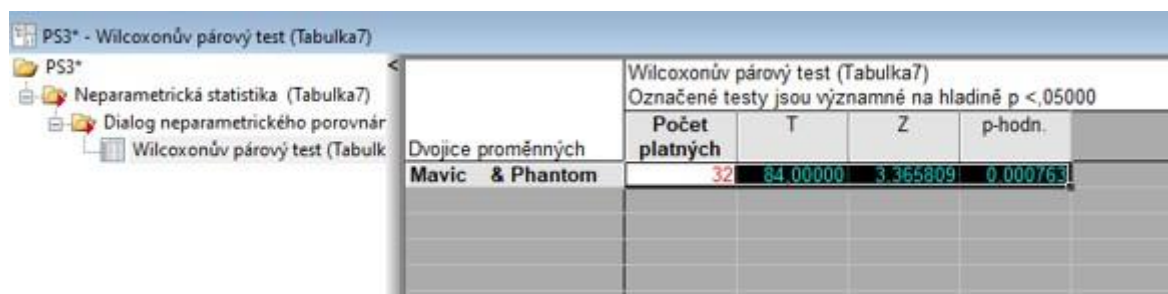
Výsledné hodnoty vypočítaných štatistických charakteristík pre systém DJ PHANTOM 4 PRO a DJI MAVIC AIR 2 sú uvedené v tabuľke č. 2. V prípade systému DJI MAVIC AIR 2 polohová chyba dosahovala hodnotu v intervale od 2,78 m do 3,42 m, pričom jej priemerná hodnota dosiahla 2,96 m (priemerný polohový posun bodov meraných na ortofotomozaike od referenčných bodov meraných GNSS). Hodnota smerodajnej odchýlky dosiahla hodnotu $\pm 0,13$ m, čo je výrazne lepší výsledok ako dosiahol systém DJI PHANTOM 4 PRO ($\pm 1,52$ m). Celková správnosť určenia polohy bodov reprezentovaná celkovou chybou (RMSE – stredná kvadratická chyba) dosiahla hodnotu $\pm 2,97$ m. S pravdepodobnosťou 68 % sa správne polohy určených bodov od meraných referenčných údajov nachádzajú v intervale $\pm 2,97$ m.

Systém DJ PHANTOM 4 PRO dosiahol nižšiu celkovú priemernú odchýlku určenia bodov na ortofotomozaike 1,94 m, čo je o 1,02 m menej ako pri systéme Mavic. Samotné polohové odchýlky na jednotlivých bodoch dosahovali hodnoty v intervale od 0,48 m do 6,70 m. Napriek celkovej nižšej priemernej odchýlke systém DJ PHANTOM 4 PRO vykázal vo výsledkoch vyššiu variabilitu hodnôt okolo priemernej odchýlky $\pm 1,52$ m v porovnaní so systémom DJI MAVIC AIR 2. Celková správnosť určenia polohy bodov reprezentovaná hodnotou strednej kvadratickej chyby dosiahla hodnotu $\pm 2,46$ m (teda o 0,51 m) lepšie ako v prípade systému DJI MAVIC AIR 2. S pravdepodobnosťou 68 % sa teda správne polohy určených bodov od meraných referenčných údajov nachádzajú v intervale $\pm 2,46$ m.

Tab. 2 Štatistické charakteristiky vypočítané z diferencií nameraných na kontrolných bodoch

	DJI MAVIC AIR2	DJI PHANTOM 4
Suma	94,86	62,08
Priemerná polohová diferencia	2,96	1,94
Smerodajná odchýlka	0,13	1,52
Stredná kvadratická chyba	2,97	2,46
Počet bodov	32	32

Výsledok párového neparametrického testu (Wilcoxonov test) medzi polohovými chybami zistenými na 32 identifikovaných bodoch medzi oboma systémami (obr. 6) poukazuje na štatisticky významný rozdiel ($p = 0,000763$) na hladine významnosti $\alpha = 0.05$. Z pohľadu interpretácie výsledkov tak oba systémy medzi sebou poskytujú signifikantne odlišné výsledky. Z pohľadu celkovej správnosti $RMSE = \pm 2,46$ m sa teda javí ako výhodnejšie použiť pre uvedený účel systém DJ PHANTOM 4 PRO.



Wilcoxonův párový test (Tabulka7)				
Označené testy jsou významné na hladině $p < 0,05000$				
Dvojice proměnných	Počet platných	T	Z	p-hodn.
Mavic & Phantom	32	84	0.00000	3.365809
				0.000763

Obr. 6 Výsledok Wilcoxonovho neparametrického testu medzi polohovými odchýlkami určenými systémom DJI MAVIC AIR2 a DJ PHANTOM 4 PRO

4. ZÁVER

Výrobcovia RPAS, alebo zjednodušene tzv. dronov sa predbiehajú vo vývoji a výskume leteckých systémov a implementácií najnovších technológií do nich v takej miere, že užívateľský sektor postupne zisťuje využiteľnosť najnovších technológií v rôznych oblastiach hospodárstva a vedeckého výskumu. V tomto trende nezaostal ani lesnícky sektor, ktorý už istý čas objavuje možnosti využitia dronov v lesníckom výskume a praxi lesného hospodárstva. Drony nás preniesli v reálnom čase nad lesné porasty, ktoré môžeme skúmať z vtáčej perspektívy, nielen iba klasickými prostriedkami leteckej fotogrametrie (viditeľné spektrum), ale aj v rôznych ďalších spektrách (infračervené, termálne, hyperspektrálne). Úlohou lesníckeho výskumu je overovať presnosť, spoľahlivosť týchto informácií a ich aplikačný potenciál. V uvedenej práci sme skúmali presnosť určenia polohy bodov na ortofotomozaíke dvoma leteckými systémami, ktoré využívajú na určovanie polohy zabudovaný GNSS prijímač. Z dosiahnutých výsledkov vyplýva, že na účel mapovania je vhodnejší systém DJ PHANTOM 4 PRO s priemernou polohovou chybou ($\pm 1.94\text{m}$) a hodnotou strednej kvadratickej chyby ($\pm 2.94\text{m}$). Vzhľadom na požiadavky pre lesnícke mapovanie ($0,5\text{m}$) sú však aj tieto hodnoty nedostačujúce. Výsledky poukazujú v oboch prípadoch na systematický posun v oboch overovaných zariadeniach, ktorý prisudzujeme použitému GNSS čipu nižšej kategórie, ktorý slúži na určovanie polohy projekčných centier jednotlivých snímok počas expozícií. môžeme konštatovať, že na využitie v lesníckom mapovaní ani tento letecký systém nedosahuje dostatočnú presnosť. Riešením je použitie RPAS so zabudovanou anténou GNSS s pripojením na korekcie zo služby SKPOS, kde je dosiahnuteľná presnosť $\pm 3\text{ cm}$ v polohe a vo výške. Tieto zariadenia však zatiaľ patria do kategórie cenovo menej dostupných a zároveň ťažších.

Treba ale poznamenať, že pre každý systém bol vykonaný iba jeden let v jednej výškovej hladine a iba v dvoch smeroch. Spresnenie polohovej chyby by mohlo zabezpečiť, ako uvádza vo svojej práci ŠTRONER ET AL., 2021, viacnásobné zalietanie záujmovej plochy v rôznych výškach, v rôznych smeroch a snímanie aj pod rôznym uhlom kamery. Tento spôsob snímkovania plochy by bolo vhodné overiť ďalšími meraniami a následným vyhodnotením získaných dát.

Prihliadnuc na zistené skutočnosti, tento spôsob akým sme získali potrebné dáta, je možné využiť napr. na určenie výmery prvkov v lesníckej praxi, napr. pri vedení grafickej evidencie, zisťovaní výmer plôch nových holín a v zimnom období aj na kontrolu zalesnenia, prípadne plochu potrebnú na zalesnenie. Taktiež môžeme určovať výmery stojacich fragmentov rubného porastu, ktoré vznikli rozpracovaním porastu obnovnou ťažbou. Rovnako sa dá takýmto spôsobom veľmi pohodlne odhadnúť aj rozsah stojacej kalamity. Podľa výskumu TOMAŠTÍK ET AL., 2017, 2019, ktorý sa zaoberal určením horizontálnej a vertikálnej presnosti ortofotosnímkov, bodového mračna a i., dosiahli výsledky uspokojivé hodnoty pre účely lesníckeho mapovania. Autor uvádza, že horizontálna RMSE nepresiahla 10 cm a vertikálna RMSE nad 20 cm pri použití zariadenia SenseFly eBee Plus.

Použitím novších technológií ako sú napr. WingtraOne gen II, ktorý obsahuje výkonný viac-frekvenčný PPK GNSS prijímač, s horizontálnou presnosťou výsledkov až 1 cm bez použitia vlicovacích bodov odpadáva nutnosť výsledné ortofotosnímky georeferencovať pomocou vlicovacích bodov terestrický meraním GNSS prijímačmi, čo prináša zjednodušenie a uľahčenie práce na jednej strane, ale na strane druhej vyššiu obstarávaciu cenu.

Takáto kombinácia je pre používateľa všestrannejšia, ale zároveň časovo náročnejšia, pretože zameranie vlicovacích bodov, ktorých množstvo závisí od veľkosti plochy, (najvhodnejšie 15 bodov) podľa (RENGEL ET AL., 2018), trvá aj niekoľko hodín.

Je na užívateľovi akú technológiu si vyberie, vzhľadom na svoje potreby s ohľadom na najnovšie legislatívne zmeny, týkajúce sa registrácie RPAS, jeho poistenia a manipulácie s ním.

POĎAKOVANIE:

Táto práca vznikla s podporou agentúry VEGA na základe projektu VEGA 1/0568/23 Využitie signálov globálnych navigačných satelitných systémov (GNSS) pre účely lokalizácie a sledovania stavu vegetácie v lesnom prostredí.

LITERATÚRA

ABDOLLAHNEJAD, A., PANAGIOTIDIS, D. Tree Species Classification and Health Status Assessment for a Mixed Broadleaf-Conifer Forest with UAS Multispectral Imaging. *Remote Sensing*. 2020; 12(22):3722. <https://doi.org/10.3390/rs12223722>

FRASER, B.T., CONGALTON, R.G. Estimating Primary Forest Attributes and Rare Community Characteristics Using Unmanned Aerial Systems (UAS): An Enrichment of Conventional Forest Inventories. *Remote Sensing*. 2021; 13(15):2971. <https://doi.org/10.3390/rs13152971>

KARAS, J. TICHÝ, T. Drony. Computer Press Brno, ISBN 978-80-251-4680-4.

KUŽELKA, K., SUROVÝ, P. Mapping Forest Structure Using UAS inside Flight Capabilities. *Sensors*. 2018; 18(7):2245. <https://doi.org/10.3390/s18072245>

KYSEL, P., HUDECOVÁ, L., VESTEG, H. Updating of the cadastral map using unmanned aerial vehicles in Slovakia. *SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. DOI:[10.5593/sgem2024/2.1/s10.36](https://doi.org/10.5593/sgem2024/2.1/s10.36)

LIU, K., WANG, A., ZHANG, S., ZHU, Z., BI, Y., WANG, Y., DU, X. Tree species diversity mapping using UAS-based digital aerial photogrammetry point clouds and multispectral imageries in a subtropical forest invaded by moso bamboo (*Phyllostachys edulis*). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021. Volume 104, 102587, <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102587>.

RANGEL, J.M.G., GONÇALVES, R. G., PEREZ, J.A. The impact of number and spatial distribution of GCPs on the positional accuracy of geospatial products derived from low-cost UASs. *Int. J. Remote Sens.* 2018, 39, 7154–7171

REILLY, S., CLARK, M.L., BENTLEY, L.P., MATLEY, C., PIAZZA, E., OLIVERAS MENOR, I. The Potential of Multispectral Imagery and 3D Point Clouds from Unoccupied Aerial Systems (UAS) for Monitoring Forest Structure and the Impacts of Wildfire in Mediterranean-Climate Forests. *Remote Sensing*. 2021; 13(19):3810. <https://doi.org/10.3390/rs13193810>

SUNG, S., LEE, J.O. Accuracy of Parcel Boundary Demarcation in Agricultural Area Using UAV-Photogrammetry. *Journal of the Korean Society of Surveying, Geodesy, Photogrammetry and Cartography*, 34, 53-62.

ŠAFÁŘ, V., POTŮČKOVÁ, M., KARAS, J., TLUSTÝ, J., ŠTEFANOVÁ, E., JANČOVIČ, M., ŽOFKOVÁ, D.C. The Use of UAV in Cadastral Mapping of the Czech Republic. *ISPRS Int. J. Geo Inf.*, 10, 380.

ŠTRONER, M., URBAN, R., SEIDL, J., REINDL, T., BROUČEK, J. Photogrammetry Using UAV-Mounted GNSS RTK: Georeferencing Strategies without GCPs. *Remote Sensing*. 2021; 13(7):1336. <https://doi.org/10.3390/rs13071336>

TOMAŠTÍK, J. Družicová geodézia a globálne navigačné systémy. Zvolen: TU Zvolen, ISBN 978-80-228-3257-1.

TOMAŠTÍK, J., MOKROŠ, M., SALOŇ, Š., CHUDÝ, F., TUNÁK, D. Accuracy of Photogrammetric UAV-Based Point Clouds under Conditions of Partially-Open Forest Canopy. *Forests*. 2017; 8(5):151. <https://doi.org/10.3390/f8050151>

TOMAŠTÍK, J., MOKROŠ, M., SUROVÝ, P., GRZNÁROVÁ, A., MERGANIČ, J. UAV RTK/PPK Method—An Optimal Solution for Mapping Inaccessible Forested Areas? *Remote Sensing*. 2019; 11(6):721. <https://doi.org/10.3390/rs11060721>

DOPRAVNÝ ÚRAD SR, 2021: <https://sita.sk/nasadoprava/v-roku-2030-by-mohlo-byt-na-slovensku-pouzivanych-az-150-tisic-dronov-ake-su-ich-prinosy-a-rizika/>

NÁRODNÉ LESNÍCKE CENTRUM, 2025: <https://www.forestportal.sk/odborna-sekcia-i/mapovanie-lesov/>

Ing. et. Ing. Daniel Čurila: Katedra plánovania lesných zdrojov a informatiky, TU Zvolen, T. G. Masaryka 24, 960 01, Zvolen, xcurila@is.tuzvo.sk

Doc. Ing. Miroslav Kardoš, PhD. Katedra plánovania lesných zdrojov a informatiky, TU Zvolen, T. G. Masaryka 24, 960 01, Zvolen, kardos@is.tuzvo.sk

LIMITY VYUŽITIA KONOPY SIATEJ (*CANNABIS SATIVA*, L.) PRI PRÍPRAVE DEGRADOVANÝCH PÔD NA ZALESNENIE

BLANKA GIERTLIOVÁ

This paper analyzes the limitations and opportunities of using industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) for preparing degraded soils for afforestation. It reviews ten primary and two review studies focused on hemp's use in the phytoremediation of mine-impacted soils, assessing remediation mechanisms, soil property changes, side effects, and potential end-uses of hemp biomass. The results show that the dominant mechanism of hemp is phytostabilization, which reduces the mobility of risk elements (Pb, Sb, Cu) and lowers environmental risk. Phytoextraction was confirmed only for Cd and Zn, with efficiency depending on contamination level and biomass yield. Positive soil changes included increased pH, reduced labile metal fractions, and improved soil biological properties. Biomass appears most suitable for technical and energy applications, while food and pharmaceutical uses remain risky. Overall, industrial hemp shows promise as a tool for preparing degraded soils for afforestation, due to its ability to stabilize contaminants, support ecological restoration, and enhance conditions for tree establishment. Future research should focus on long-term field trials, leachate monitoring, and biomass safety testing for practical applications.

Kľúčové slová: konopa siata; fytoremediácia; degradované pôdy; biomasa; zalesňovanie
Key words: industrial hemp; phytoremediation; degraded soils, biomass, reforestation

1 ÚVOD

Na území Slovenskej republiky sa nachádza viac ako 320 lokalít s potvrdenými environmentálnymi záťažami a takmer 880 pravdepodobných lokalít s rizikom kontaminácie. Najčastejšie ide o pozostatky banskej činnosti, chemického priemyslu, vojenských objektov, skládok odpadu či skladov pesticídov (MŽP SR 2021). Tieto miesta predstavujú významné riziko pre zdravie obyvateľov, pôdu a podzemné vody. Obnovovanie degradovaných pôd a ich následné využitie tak predstavujú jednu z hlavných environmentálnych výziev. Ako preukázala prax, tradičné technológie sanácie sú v záujmovom prostredí často ekonomicky neefektívne a environmentálne invazívne, čo vytvára priestor pre inovatívne a udržateľné prístupy. Alternatívu predstavuje fytoremediácia. Ide o proces, pri ktorom vhodne zvolené zelené rastliny, vďaka svojmu prirodzenému rastu a biologickým vlastnostiam, absorbujú a spracovávajú škodlivé látky z pôdy, čím prispievajú nielen k jej dekontaminácii ale aj k obnove pôdnej štruktúry a zlepšeniu biodiverzity. Kombináciou tradičných fytoremediálnych postupov a produkcie biomasy prostredníctvom výsadby vysoko produktívnych nepotravinárskych plodín je možné dosiahnuť nielen zníženie environmentálnych rizík ale aj zabezpečiť príjmy z pôdy počas procesu sanácie (de Vos et al. 2023). V tomto kontexte sa fytoremediácia prostredníctvom konopy siatej (*Cannabis sativa* L.) javí ako efektívne, ekonomicky dostupné a ekologické riešenie, ktoré umožňuje:

- odstraňovanie nežiaducich látok z pôdy,
- obnovu pôdneho mikrobiómu,
- podporu biodiverzity a ekosystémových služieb,
- priemyselné využitie biomasy, čím sa znižuje ekonomická náročnosť remediácie,
- prípravu územia na následné ekologické využitie, najmä formou zalesňovania, ktoré napomáha návratu krajiny k jej pôvodnej funkcii.

Konopa je obnoviteľný zdroj energie s vysokým potenciálom. V Slovenskej republike je možné pestovať odrody uvedené v Spoločnom katalógu odrôd poľnohospodárskych rastlinných druhov Európskej únie a jeho dodatkov v súlade s čl. 17 smernice Rady 2002/53/ES, pričom osivo musí byť certifikované podľa smernice Rady 2002/57/ES alebo v

súlade s článkom 10 smernice Komisie 2008/62/ES v prípade odrôd na zachovanie. Zároveň obsah tetrahydrokanabinolu (THC) používaných odrôd nesmie presiahnuť 0,3 %.

Technická univerzita vo Zvolene v spolupráci so Slovenským konopným družstvom a spoločnosťou RVPH j.s.a. pripravuje projekt využitia technickej konopy ako remediácie plodiny pre postťažbové lokality v okolí mesta Handlová a . Ide o územie historicky zaťažené intenzívnou ťažbou hnedého uhlia, ktorá spôsobila značné poškodenie pôdneho a krajinného prostredia. Predložený príspevok prezentuje výsledky prieskumu potenciálu konopy pre fytoremediáciu a následnú obnovu poškodených plôch na základe analýzy vybraných vedeckých štúdií.

2 FYTOREMEDIÁCIA – ZÁKLADNÉ PRINCÍPY A MECHANIZMY

Fytoremediácia je založená na prirodzenej schopnosti rastlín interagovať s pôdnym a vodným prostredím. Rastliny prijímajú kontaminanty prostredníctvom koreňov a následne ich buď akumulujú vo svojich tkanivách, alebo premieňajú na menej toxické formy (Kafle et al. 2022). Zároveň znižujú mobilitu kontaminantov, stabilizujú pôdu, obmedzujú jej eróziu a zlepšujú jej štruktúru. Prostredníctvom koreňových systémov vytvárajú aeróbne podmienky a obohacujú substrát o organickú hmotu, ktorá podporuje väzbu škodlivín (Bolan et al. 2011). Okrem toho vegetácia znižuje prašnosť a riziko vylúhovania kontaminantov, pričom prispieva aj k posilneniu biodiverzity a obnoveniu ekologickej rovnováhy (Pilon-Smits 2005). Vďaka týmto mechanizmom predstavuje fytoremediácia efektívnu, ekologicky prijateľnú a udržateľnú metódu revitalizácie znečistených či degradovaných území. Základné mechanizmy fytoremediácie sú (Kafle et al. 2022):

1. **Fytoakumulácia:** Rastliny absorbujú kontaminanty, ako sú ťažké kovy a iné chemické látky, cez svoje koreňové systémy. Tieto látky sa potom premiestňujú do rôznych častí rastlín, najmä do listov.
2. **Biodegradácia:** Niektoré rastliny majú schopnosť degradovať organické kontaminanty pomocou vlastných metabolických procesov alebo symbiotických mikroorganizmov, ktoré žijú v ich koreňových zónach. Tieto mikroorganizmy rozkladajú toxické látky na menej škodlivé zlúčeniny.
3. **Fytostabilizácia:** Rastliny môžu stabilizovať kontaminanty v pôde a znižovať ich mobilitu, čím zabráňujú ich prenikaniu do podzemných vôd. Proces zahŕňa transpiráciu a rast koreňov, ktoré imobilizujú kontaminanty znížením vylúhovania, kontrolou erózie, vytvorením aeróbného prostredia v koreňovej zóne a pridaním organickej hmoty do substrátu, ktorá viaže kontaminant (Bolan et al. 2011).
4. **Fytovolatilizácia:** Niektoré rastliny majú schopnosť uvoľňovať kontaminanty do atmosféry procesom odparovania (napríklad niektoré organické rozpúšťadlá). Proces je vhodný v prípade, ak sú odparené zlúčeniny menej toxické v atmosfére ako v pôde.
5. **Fytoextrakcia:** Ide o proces, pri ktorom rastliny absorbujú a akumulujú ťažké kovy a iné kontaminanty v svojich tkanivách, ktoré je potom možné odstrániť z prostredia, keď sú rastliny zozbierané a spracované.

Tieto mechanizmy môžu fungovať samostatne alebo v kombinácii, v závislosti od typu rastlín a prírody kontaminantov.

3 METODIKA

Základom realizovaného prieskumu bolo vyhľadanie a analýza odborných článkov a štúdií zameraných na fytoremediáciu pôd ovplyvnených ťažbovou činnosťou s dôrazom na využitie *Cannabis sativa* (priemyselnej konopy). Do výberu boli zahrnuté práce, ktoré sa venovali ťažkým kovom, metaloidom a ďalším kontaminantom typickým pre banské prostredie, a to v reálnych ako aj modelových podmienkach.

Výber zdrojov sa riadil niekoľkými základnými kritériami. V prvom rade bola hodnotená relevancia k téme – do analýzy boli zaradené štúdie, ktoré poskytovali údaje o mechanizmoch fytozemediácie, o príjme a rozdelení kontaminantov v rastlinných pletivách, o výnose biomasy, o zmenách pôdných vlastností a mikrobiálneho spoločenstva, ako aj o možnostiach následného využitia biomasy z kontaminovaných lokalít. Druhým kritériom bola odborná kvalita a citovanosť publikácií, pričom boli uprednostňované práce uverejnené v renomovaných vedeckých časopisoch a prehľadové štúdie od uznávaných autorov. Tretím kritériom bola aktuálnosť – primárne boli vyhľadávané novšie štúdie z posledných rokov, ktoré však boli doplnené aj staršími prehľadovými prácami tvoriacimi jadro výskumu v danej oblasti.

Základnými zdrojmi vyhľadávania boli medzinárodné databázy Web of Science a Scopus, pričom bol použitý súbor kľúčových slov zahŕňajúci názvy rastliny („*Cannabis sativa*“, „hemp“, „industrial hemp“), pojmy súvisiace s fytozemediáciou („phytoremediation“, „phytoextraction“, „phytostabilization“) a kontext banského prostredia („mine“, „tailings“, „smelter“, „mining degraded soils“). Primárny výber článkov bol podporený využitím nástroja Elicit.com, ktorý s použitím metód umelej inteligencie identifikoval potenciálne relevantné publikácie. Tieto zdroje boli následne manuálne overené a posúdené podľa stanovených kritérií. Po odstránení duplicitných záznamov nasledovalo systematické prehľadávanie názvov a abstraktov a napokon detailná analýza plných textov. Zo základného súboru 50 prác bolo do hĺbkovej analýzy vybraných 12 štúdií, ktoré najlepšie spĺňali uvedené kritériá. Pre každú prácu boli zaznamenané bibliografické údaje, typ kontaminácie a prostredia, použitý kultivar konopy, podmienky pestovania, výsledky týkajúce sa mechanizmu fytozemediácie, koncentrácie kontaminantov v pletivách, biomasa, zmeny v pôde a mikrobiologické ukazovatele, ako aj informácie o bezpečnosti a možnom následnom využití biomasy.

Takto stanovená metodika umožnila získať reprezentatívny súbor štúdií, ktorý poskytuje komplexný pohľad na možnosti a limity využitia konopy sietej pri fytozemediácii pôd kontaminovaných ťažbovou činnosťou.

4 VÝSLEDKY

Na účely porovnania boli spracované výsledky desiatich primárnych a dvoch prehľadových štúdií zameraných na využitie konopy sietej (*Cannabis sativa* L.) pri fytozemediácii pôd ovplyvnených ťažobnou činnosťou. Tabuľka 1 sumarizuje prostredie pokusov, typ kontaminácie, hlavné mechanizmy fytozemediácie a závery jednotlivých prác, pričom osobitná pozornosť bola venovaná aj zmenám pôdných vlastností, prítomnosti vedľajších efektov a možnostiam využitia biomasy.

Analýza ukazuje, že dominantným mechanizmom účinku konopy na banských pôdach je fytostabilizácia. Pri málo mobilných prvkoch, ako sú Pb a Sb (čiastočne aj Cu), dochádza k ich akumulácii v koreňoch a k imobilizácii v rizosfére, čím sa znižuje riziko ich prieniku do potravného reťazca. Fytoextrakčný potenciál bol potvrdený len pri Cd a Zn, pričom efektivita závisela od úrovne kontaminácie a rastového výkonu rastlín. Najvyššie absolútne odbery sa zaznamenali na menej kontaminovaných lokalitách, kde konopa dosiahla vyššiu produkciu biomasy (Flajšman et al. 2023; Canu et al. 2022).

Na úrovni pôdy boli zdokumentované viaceré pozitívne zmeny – zvýšenie pH, pokles rastlinami prijateľných foriem kovov a v niektorých prípadoch aj vyššia aktivita enzýmov a diverzita mikroorganizmov (Garau et al., 2024; Husain et al., 2019). Tieto výsledky naznačujú širší ekologický prínos pestovania konopy, hoci väčšina poľných štúdií pôdne parametre systematicky nesledovala.

Tab.1 Prehľad vybraných štúdií o využití konopy siatej (*Cannabis sativa* L.) pri fytoremediácii degradovaných pôd

Autor	Prostredie / pôda	Kontaminant y	Mechanizmus a hlavné zistenia	Zmeny v pôde	Vedľajšie efekty / implikácie
Canu et al. 2022	Pole, Sardínia (3 lokality silne znečistené)	Cd, Pb, Zn	Čiastočná extrakcia Cd/Zn; vysoké obsahy v listoch (>950 mg Zn·kg ⁻¹) a Cd (> 6,8 mg kg ⁻¹)	Analýza pôdy realizovaná iba na začiatku, následne posúdené iba rastliny	Identifikovaná pozitívna korelácia koncentrácie Cd/Zn v rastlinách a miery znečistenia pôdy; atmosférický Pb skreslil výsledky; riziko u semien a listov – prekročené prahové hodnoty; potreba QA/QC.
De Vos et al. 2022	Pole, kontaminovaná pôda (Cd, Pb, Zn)	Cd, Pb, Zn	Zameranie na fytoattenuáciu a následné využitie vlákna; cieľom redukcia rizika a stabilizácia, nie extrakcia	Nesledované	Potvrdený potenciál využitia vlákna; odporúča testovanie vylúhovateľnosti
Flajšman et al. 2023	Pole, Celje, Slovinsko (3 úrovne znečistenia)	Pb, Zn, Cd	Čiastočná extrakcia Cd/Zn; nie hyperakumulátor; výpočet plošne normalizovanej extrakcie (PP)	Nesledované	Najvyššie PP na mierne znečistených pôdach; riziko pre semená/kvety (Zn, Cd); vlákno použiteľné
Garau et al. 2024	Skleník, postťažbová pôda silne kontaminovaná Sb s prítomnosťou Cd, Pb, Zn	Sb, Cd, Pb, Zn	Dominantná fytostabilizácia; biochar podporuje rast biomasy a zároveň Sb v koreňoch; Cd/Pb/Zn viazané hlavne v podzemných orgánoch	Pokles mobilných frakcií Sb a Zn; rast pôdnej respirácie, enzýmy; pozitívne zmeny v mikrobiome	Biochar zlepšil rast, podporil stabilizáciu, no znížil extrakčný potenciál; biomasa vhodnejšia pre technické využitie
Guo et al. 2024	Pole, silne kontaminovaná pôda	Cu, As, Cd, Pb	Konopa využiteľná v rámci fytoattenuácie;	Detaily neposkytnuté	Potvrďuje posun od extrakcie k stabilizácii na

			stabilizácia dominantná		multi-kovových lokalitách
Husain et al. 2019	Skleník + nádoby v exteriéri; USA, pôdy z opustených uhoľných baní	As, Pb, Ni, Hg, Cd	Tolerancia preukázaná; prevažuje stabilizácia nad remediáciou; údaje len z listov obmedzili interpretáciu	Rast pH po 60 dňoch u niektorých variantov	Jeden kultivar (USO 31) zlyhal; stres zvýšil obsah kanabinooidov; obmedzené využitie pre potraviny/medicínu
Linger et al. 2002	Pole, HM pôdy (Európa)	Pb, Zn, Cd	Zakladná štúdia: hemp rastie na kontaminovaných pôdach; stabilizácia > extrakcia	Nie	Vláknó zachovalo kvalitu; extrakcia limitovaná; kotvový odkaz v literatúre
Scordia et al. 2022	Pole, Grécko, marginálne pôdy zaťažené ťažbou	Multi-kovy (Cd, Ni, Cu, Pb, Zn, Sb, As)	Hodnotené len agronomicky; biomasa 5,4–8,8 t/ha pri zavlažovaní; mechanizmus nebol definovaný	Pôdne parametre nehodnotené	Potvrdil sa potenciál pre pestovanie na degradovaných pôdach; chýbajú dáta o remediácii
Sward et al. 2025	Skleník, Tar Creek, USA postťažbové pôdy s 3 úrovňami kontaminácie (slabá – stredná – nízka)	Cd, Pb, Zn	Slabá fytoextrakcia; translokačný factor nízky; Zn mierne citlivý na úroveň kontaminácie; biochar a odroda mali malý efekt	Pôdne parametre nehodnotené	Účinnosť nízka; potreba dlhodobého sledovania; biomasa neanalyzovaná z hľadiska následného využitia
Thurston et al. 2024	Skleník, Tar Creek, USA, postťažbové pôdy	Cd, Pb, Zn	Stabilizácia podporená biocharom, následok: zvýšenie objemu biomasy a zároveň pokles Cd/Pb/Zn v rastlinách; redukcia biokoncentrácie	Jasný pokles pre raastliny dostupných Cd, Pb, Zn, biochar podporil remediáciu	Vláknó perspektívne pre technické využitie; extrakcia by vyžadovala dlhý čas, na menej kontaminovaných pôdach lepšie výnosy biomasy
Placido, Lee 2022	Prehľadová štúdia	Multi-kov	Zhrnutie mechanizmov; organ-špecifická distribúcia kovov;	–	Poskytuje rámec pre interpretáciu výsledkov

			implikácie pre end-use		
Rheay et al. 2020	Prehľadová štúdia	Multi-kov	Spája fytoremediáciu a bioenergetiku; zdôrazňuje medzery (multi-sezónne bilancie, fate biomasy)	–	Upozorňuje na potrebu dlhodobých dát a analýzy bezpečnosti produktov

K vedľajším efektom patrí skutočnosť, že imobilizácia, ktorá zvyšuje biomasu, zároveň znižuje extrakčný potenciál Cd a Zn. Rizikové je aj využitie semien a kvetov, kde boli opakovane zistené zvýšené koncentrácie Zn a Cd nad bezpečnostnými limitmi (Flajšman et al., 2023; Singh et al., 2023). Naopak, vlákno a pazderie sú perspektívne pre technické a kompozitné aplikácie (De Vos et al., 2022; Linger, 2002), zatiaľ čo energetické využitie biomasy je možné pri kontrolovanom nakladaní s popolom či biouhlím (Placido & Lee, 2022). Tieto poznatky sú dôležité nielen pre hodnotenie samotného remediačného potenciálu konopy, ale aj pre jej uplatnenie ako nástroja prípravy pôd na následné zalesňovanie, ktoré predstavuje kľúčový krok k obnove ekologických funkcií krajiny.

5 DISKUSIA

Zistenia analyzovaných prác potvrdzujú, že konopa siata predstavuje perspektívnu plodinu pre fyto-management postťažbových pôd. Jej schopnosť akumulovať ťažké kovy, najmä Pb, Cd a Zn, bola zdokumentovaná v európskych aj mimoeurópskych podmienkach (Pietrini et al. 2019; Nason et al. 2024; Canu et al. 2022; Wu et al. 2021). Remediačný efekt sa najčastejšie prejavuje formou stabilizácie kontaminantov v koreňovej zóne. Tento proces je zosilnený pri použití pôdnych aditív, predovšetkým biocharu, ktorý podporuje rast biomasy, avšak zároveň znižuje dostupnosť ťažkých kovov a zároveň zlepšuje pôdnu mikrobiálnu aktivitu (Garau et al. 2024; Thurston et al. 2024).

Fytoextrakcia Cd a Zn bola potvrdená v modelových aj reálnych podmienkach (Flajšman et al., 2023; Canu et al., 2022), no jej rozsah je obmedzený. Najvyššie absolútne poklesy sa dosiahli na menej kontaminovaných lokalitách s vyšším výnosom biomasy, čo potvrdzuje, že pre silne kontaminované pôdy zostáva reálnejšou stratégiou stabilizácia. Tento trend je v súlade s globálnym posunom v oblasti fyto-remediácie od čisto extrakčných prístupov k stratégiám orientovaným na znižovanie rizika a dlhodobú stabilizáciu (Placido, Lee 2022).

Dôležitým aspektom je aj využitie biomasy. Zatiaľ čo semená a kvetenstvá sa ukázali ako rizikové pre potravinárske a farmaceutické aplikácie (Flajšman et al. 2023), stonky, vlákno a pazderie sú vhodné pre technické a kompozitné využitie (De Vos et al. 2022; Linger 2002). Energetické využitie prostredníctvom spaľovania alebo pyrolýzy je realizovateľné, ak sa zabezpečí kontrola vylúhovateľnosti a bezpečné nakladanie s popolom a biouhlím (Placido & Lee, 2022).

Napriek pozitívnym výsledkom existuje viacero málo alebo vôbec neanalyzovaných oblastí. Väčšina prác je krátkodobá a realizovaná v modelových, skleníkových podmienkach, zatiaľ čo dlhodobé experimenty realizované priamo v reálnych podmienkach zostávajú nedostatočne zastúpené. Absentuje systematické monitorovanie vylúhovania a odtoku kovov, čo je nevyhnutné na potvrdenie, že stabilizácia neprispieva k šíreniu kontaminantov do okolia (Sward, 2025; Canu et al., 2022). Rovnako dôležitá je štandardizácia metodík pre určovanie faktorov BCF a TF, koreňovo-nadzemnej distribúcie a pôdnych analytických postupov, ako aj testovanie bezpečnosti biomasy pre konkrétne aplikačné scenáre.

6 ZÁVER

Konopa siata predstavuje významnú plodinu pre revitalizáciu pôd ovplyvnených ťažkovou činnosťou. Má preukázanú schopnosť akumulovať a čiastočne stabilizovať ťažké kovy, predovšetkým Pb, Cd a Zn, čím prispieva k zníženiu ich koncentrácií v pôde (Pietrini et al. 2019; Canu et al. 2022; Wu et al. 2021). Jej remediačný účinok bol potvrdený vo viacerých štúdiách v Európe aj mimo nej (Nason et al. 2023; Singh et al. 2023; Placido, Lee 2022). Napriek značnému potenciálu sa ukázalo, že jej hlavnou funkciou na postťažbových pôdach je stabilizácia a redukcia rizika, nie úplná dekontaminácia.

Biomasa získaná z kontaminovaných pôd má perspektívne využitie v technických a energetických aplikáciách, pričom potravinárske a farmaceutické uplatnenie zostáva obmedzené. Využitie vlákna a pazderia je sľubné, energetické spracovanie prostredníctvom spaľovania alebo pyrolýzy je možné pri zabezpečení kontrolovanej manipulácie s rezíduami.

Budúci výskum by sa mal zamerať na dlhodobé poľné štúdie, systematické monitorovanie pôdných parametrov, hodnotenie vylúhovateľnosti a bezpečnosti produktov, ako aj na testovanie odrôd a ich interakcií s pôdnymi aditívami. Takto možno rozvinúť udržateľné stratégie fytomanagementu, v ktorých konopa zohráva kľúčovú úlohu pri stabilizácii kontaminantov a zároveň poskytuje využiteľnú biomasu. Zároveň sa potvrdzuje, že jej využitie môže byť významným predstupňom ekologickej obnovy degradovaných pôd určených na zalesnenie, čím sa zvyšuje celková efektívnosť a udržateľnosť revitalizačných procesov.

POĎAKOVANIE

Táto práca bola podporená Agentúrou na podporu výskumu a vývoja na základe projektov APVV-23-0116; APVV-22-0001 a vznikla v spolupráci so Slovenským konopným družstvom a spoločnosťou RVPH j.s.a.

LITERATÚRA

BOLAN, N. S., PARK, J. H., ROBINSON, B., NAIDU, R., HUH, K. Y. 2011. Chapter Four Phytostabilization: A Green Approach to Contaminant Containment. In *Advances in Agronomy* (Vol. 112, pp. 145-204). New York: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385538-1.00004-4>

CANU, M., MULE, P., SPANU, E., FANNI, S., MARRONE, A., CARBONI, G. 2022. Hemp cultivation in soils polluted by Cd, Pb and Zn in the Mediterranean area: Sites characterization and phytoremediation in real scale settlement. *Applied Sciences*. *Applied Sciences*, 2022, 12.7: 3548. <https://doi.org/10.3390/app12073548>

DE VOS, B., SOUZA, M.F., MICHELS, E. , MEERS, E. 2022. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) in a phytoattenuation strategy: Remediation potential of a Cd, Pb and Zn contaminated soil and valorization potential of the fibers for textile production. *Industrial Crops and Products*, Volume 178, 2022, 114592, ISSN 0926-6690, <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.114592>.

FLAJŠMAN, M., KOŠMELJ, K., GRČMAN, H., AČKO, D. K., ZUPAN, M. 2023. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.)—a valuable alternative crop for growing in agricultural soils contaminated with heavy metals. *Environmental Science and Pollution Research International*. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30.54: 115414-115429. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-30474-z>

GARAU, M. , ET AL., 2024. Using biochar for environmental recovery and boosting the yield of valuable non-food crops: The case of hemp in a soil contaminated by potentially toxic elements (PTEs). *Heliyon*, 2024, 10.6. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e28050>

GUO, Y., WEN, L., ZHAO, X., XING, C., HUANG, R. 2024. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) can utilize and remediate soil strongly contaminated with Cu, As, Cd, and Pb by phytoattenuation. *Chemosphere*, 358, 142199. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142199>

HUSAIN, R., et al., 2019. Enhanced tolerance of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) plants on abandoned mine land soil leads to overexpression of cannabinoids. *PLoS ONE*.

KAFLE, A., TIMILSINA, A., GAUTAM, A., ADHIKARI, K., BHATTARAI, A., ARYAL, N. 2022. Phytoremediation: Mechanisms, plant selection and enhancement by natural and synthetic agents. *Environmental Advances*, 8, 100203. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2022.100203>

LINGER, P., MÜSSIG, J., FISCHER, H., KOBERT, J. 2002. Industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) growing on heavy metal contaminated soil: fibre quality and phytoremediation potential. *Industrial crops and products*, 16(1), 33-42. [https://doi.org/10.1016/S0926-6690\(02\)00005-5](https://doi.org/10.1016/S0926-6690(02)00005-5)

MŽP SR. 2021. Štátny program sanácie environmentálnych záťaží (2022-2027). Available online: <https://www.minzp.sk/files/sekcia-geologie-prirodných-zdrojov/statny-program-sanacii-sps-ez-2022-2027.pdf>

NASON, S. L., ET AL. 2024. A comprehensive trial on PFAS remediation: hemp phytoextraction and PFAS degradation in harvested plants. *Environmental Science: Advances*, 3(2), 304-313. <https://doi.org/10.1039/D3VA00340J>

PIETRINI, F., PASSATORE, L., PATTI, V., FRANCOCCI, F., GIOVANNOZZI, A., ZACCHINI, M. 2019. Morpho-Physiological and Metal Accumulation Responses of Hemp Plants (*Cannabis Sativa* L.) Grown on Soil from an Agro-Industrial Contaminated Area. *Water* 11, no. 4: 808. <https://doi.org/10.3390/w11040808>

PILON-SMITS, E. 2005. Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 2005, 56.1: 15-39. <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.56.032604.144214>

PLACIDO, D. F., LEE, C. C. 2022. Potential of industrial hemp for phytoremediation of heavy metals. *Plants*, 11(5), 595. <https://doi.org/10.3390/plants11050595>

RHEAY, H. T., OMONDI, E. C., BREWER, C. E. 2021. Potential of hemp (*Cannabis sativa* L.) for paired phytoremediation and bioenergy production. *GCB Bioenergy* 2021, 13(4), 525-536. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12782>

SCORDIA, D., ET AL. 2022. Towards identifying industrial crop types and associated agronomies to improve biomass production from marginal lands in Europe. *GCB Bioenergy*, 2022, 14.7: 710-734. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12935>

SWARD, S., BRYE, K. R., MILLER, D. M., THURSTON, D. V. 2025. Use of biochar and industrial hemp for remediation of heavy-metal-contaminated soil: Root uptake and translocations for Cd, Pb, and Zn. *Soil Systems*, 2025, 9.2: 29. <https://doi.org/10.3390/soilsystems9020029>

THURSTON, D. V., BRYE, K. R., MILLER, D. M., MOORE JR, P. A., JOHNSON, D. M., RICHARDSON, M. 2024. Evaluation of industrial hemp cultivar and biochar rate to remediate

heavy-metal-contaminated soil from the Tar Creek Superfund Site, USA. Soil Systems, 2024, 8.4: 114. <https://doi.org/10.3390/soilsystems8040114>

Ing. Blanka Giertľiová, PhD.: Katedra lesníckej ekonomiky a politiky, Lesnícka fakulta, technická univerzita vo Zvolene, T. G. Masaryka 24, 960 01 Zvolen, Slovenská republika. Email: giertlioiva@tuzvo.sk

NÁZOV:	RIZIKÁ PRI SPRACOVANÍ A VYUŽÍVANÍ BIOMASY
DRUH PUBLIKÁCIE:	RECENZOVANÝ ZBORNÍK PÔVODNÝCH VEDECKÝCH PRÁC
VYDAVATEĽ:	TECHNICKÁ UNIVERZITA VO ZVOLENE
ROK VYDANIA:	2025
VYDANIE:	PRVÉ
NÁKLAD:	DOSTUPNÉ ONLINE
ISBN:	978-80-228-3497-1
