

POROVNANIE 2D A 3D PRÍSTUPU PRI HODNOTENÍ MNOŽSTVA STROMOVEJ ZELENÉ V MESTE KOŠICE POMOCOU DÁT Z LETECKÉHO LASEROVÉHO SKENOVANIA

Nikola Svetozarov*, Michal Gallay*

* Univerzita Pavla Jozefa Šafárika v Košiciach, Prírodovedecká fakulta, Ústav geografie, Jesenná 5,
040 01 Košice, Slovensko, nikola.svetozarov@upjs.sk, michal.gallay@upjs.sk

Comparison of 2D and 3D approach for assessing the amount of tree vegetation in the city of Košice using airborne laser scanning data

Urban vegetation is crucial for ecological balance and social well-being in cities. Understanding its detailed structure is essential for effective spatial planning in the face of climate change. While traditional studies relied on 2D views from satellite imagery or aerial photography, modern remote sensing technologies like airborne laser scanning enable comprehensive 3D analysis of urban vegetation. This paper examines the 3D structure of urban vegetation in Košice using airborne lidar data, employing canopy height model analysis. Results show a total urban vegetation volume of 31.12 million m³, equating to 0.56 m³ per square meter, with 136.5 m³ of vegetation per city resident. While the ratio of vegetation area to building area (V/B) is 93.2%, the ratio of vegetation volume to building volume ($3D\ V/B$) is only 38.7%, which highlights the importance of considering the third dimension when evaluating the quality of the urban areas. The study highlights the unequal distribution of urban vegetation across the city, with certain areas, including historical core, wider city centre, panel housing estates and newly built residential complexes, experiencing urban vegetation shortages. Utilizing state-of-the-art lidar datasets, identifying areas with low urban vegetation volume assists city planners in making informed decisions and improving urban designs for enhanced environmental sustainability.

Key words: urban vegetation, airborne laser scanning, point cloud, vegetation volume, canopy height model, 3D vegetation indices, Košice, Slovakia

ÚVOD

Zeleň plní v urbanizovanom prostredí nenahraditeľné environmentálne, sociálne a ekonomické funkcie (Fam et al. 2008) a je dôležitým prvkom na zvyšovanie kvality života v mestách. V súvislosti s klimatickou zmenou narastá význam najmä jej environmentálnych funkcií, pretože priaznivo pôsobí na mikroklimu mesta a zohráva významnú úlohu pri zmiernovaní mestských ostrovov tepla (Dobrovolný a Kraňhala 2015, Hofierka et al. 2020 a Marando et al. 2022). Na zabezpečenie udržateľného rozvoja miest je preto nevyhnutné poznať aj priestorovú štruktúru zelene, a to aj vo vzťahu k zastavaným územiám. Existuje mnoho definícií mestskej zelene (MZ), ktoré prehľadovo zhrnuli napr. Reháčková a Pauditsšová (2006) alebo Stanková a Matula (2017). V užšom zmysle slova MZ predstavuje plochy pokryté zelenou prírodnou alebo umelo vysadenou a udržiavanou vegetáciou (vegetačnou pokrývkou), zatiaľ čo širšie chápanie zahŕňa aj iné otvorené verejné priestranstvá a otvorené plochy určené na šport a rekreáciu obsahujúce zeleň (Stanková a Matula 2017). Z hľadiska rozmerov, objemu hmoty, plochy olistenia a s tým súvisiacou mierou evapotranspirácie uvedené funkcie zelene v mestách vo výraznej miere zabezpečuje najmä stromová vegetácia (Shashua-Bar et al. 2023).

Miera urbanizácie svetovej populácie podľa najnovších prognóz OSN (2019) stúpne do roku 2050 až na 68 %. Tento trend bude postupne viesť k zahusťovaniu mestskej zástavby a k degradácii MZ nielen v rýchlo sa zväčšujúcich mestách rozvojových krajín, ale aj Európy, čo so sebou prinesie celý rad nových výziev a potrebu prijímania opatrení na zabezpečenie trvalo udržateľného rozvoja miest (Haaland a Bosch 2015). Paradoxne, napriek všeobecnému nárastu miery urbanizácie sú špecifickým fenoménom aj tzv. zmršťujúce sa mestá (“shrinking cities”). Tento fenomén sa vyskytuje prevažne v USA, Európe a v Japonsku a vyznačuje sa úbytkom obyvateľstva miest v dôsledku starnutia populácie, poklesu pôrodnosti či emigrácie a prejavuje sa komplexnou zmenou štruktúry miest. V samotnej Európskej únii je zmršťovaním postihnutá asi štvrtina miest, najmä v postsocialistických krajinách, kde tento jav súvisí so spoločenskými a ekonomickými zmenami po roku 1989 (Aurambout et al. 2021). Práve v mnohých východoeurópskych mestách je už dlhší čas pozorovaný aj úbytok MZ. Brownfieldy a voľné, nevyužívané plochy v zmršťujúcich sa mestách sa však stávajú atraktívnymi pre urbanistov a ich transformácia na zelené plochy či rekreačné areály je vnímaná ako pozitívny trend v plánovaní miest (Kabisch a Haase 2013).

S príchodom metód diaľkového prieskumu Zeme (DPZ) sa výskum štruktúry MZ postupne od 70. rokov 20. storočia preorientoval na využívanie družicových či leteckých obrazových dát, ktoré nahrádzali časovo náročné a málo efektívne terénne metódy (Shahtahmassebi et al. 2021). Široké uplatnenie pri výskume zelene našli najmä letecké snímky a ortofotomapy, neskôr, s nástupom misií Landsat a Sentinel aj voľne dostupné multispektrálne satelitné snímky umožňujúce monitorovanie zelene v pravidelných intervaloch. Komerčné satelitné systémy ako IKONOS, QuickBird, GeoEye, RapidEye, WorldView či Pleiades síce umožňujú získavať obrazové dáta v rozlíšení porovnateľnom s leteckými snímkami, ale vysoká cena a obmedzená dostupnosť dát výrazne obmedzujú možnosti ich praktického využitia na mapovanie zelene. Nástup technológie Street View tiež priniesol nové prístupy v analýze MZ, čo potvrdzujú viaceré práce (napr. Li et al. 2015 a Chen et al. 2020). Voľne dostupné satelitné záznamy však aj naďalej ostávajú jednou z najpoužívanejších metód pri analýze štruktúry MZ (Kopecká et al. 2017), hoci rozlíšenie obrazového záznamu neumožňuje vykonávať analýzy s vysokým priestorovým rozlíšením.

Spomínané metódy DPZ navyše produkujú len dvojrozmerné dáta, ktoré sú vhodné na klasifikáciu plôch krajiny pokrývky, plošné vyhodnocovanie kvality vegetačnej pokrývky a jej zmien či na výpočet plošných ukazovateľov zelene, avšak neumožňujú priamo analyzovať trojrozmernú štruktúru zelene. Pri výskume priestorovej štruktúry zelene v oblasti lesníctva ukázala potenciál metóda fotogrametrie (Frey et al. 2018 a Iglhaut et al. 2019). Fyzikálna podstata fotogrametrie však neumožňuje komplexne mapovať trojrozmernú štruktúru vegetácie, iba vrchnú časť vegetačnej pokrývky. Navyše je použitie tejto metódy výrazne závislé od podmienok svetelnosti a oblačnosti, čo obmedzuje jej využitie v praxi. Potenciál pri výskume zelene ukázal aj radar so syntetickou apertúrou (Schmitt et al. 2013), ktorý umožňuje skúmať vegetáciu v celom vertikálnom profile, avšak kvalita získaných dát, ako aj miera penetrácie lúčov do vegetačnej pokrývky významne závisí od použitej vlnovej dĺžky a nevýhodou technológie je aj častý vznik artefaktov.

Technológia topografického laserového skenovania (lidar) umožňuje eliminovať mnohé z uvedených nedostatkov a podrobne zachytiť a analyzovať zložitú a komplexnú priestorovú štruktúru mestskej krajiny, vrátane stromovej zelene, a to s vysokou úrovňou detailu aj na veľkých plochách, čo potvrdil výskum v meste Luxemburg (Zięba-Kulawik et al. 2021). Technológia lidarů však pri mapovaní MZ aj napriek svojmu obrovskému potenciálu stále ostáva do veľkej miery nevyužitá, a to nielen na území Slovenska. Existujúce práce v zahraničnej (Fernández-Sarría et al. 2013, Zhu et al. 2021 a Zhou et al. 2022), prípadne aj v domácej literatúre (Smreček 2013) sa zameriavali prevažne len na segmentáciu a individuálny výpočet objemu korún obmedzeného počtu stromov, ale nie na komplexné kvantitatívne vyhodnotenie stromovej zelene na väčších územiach.

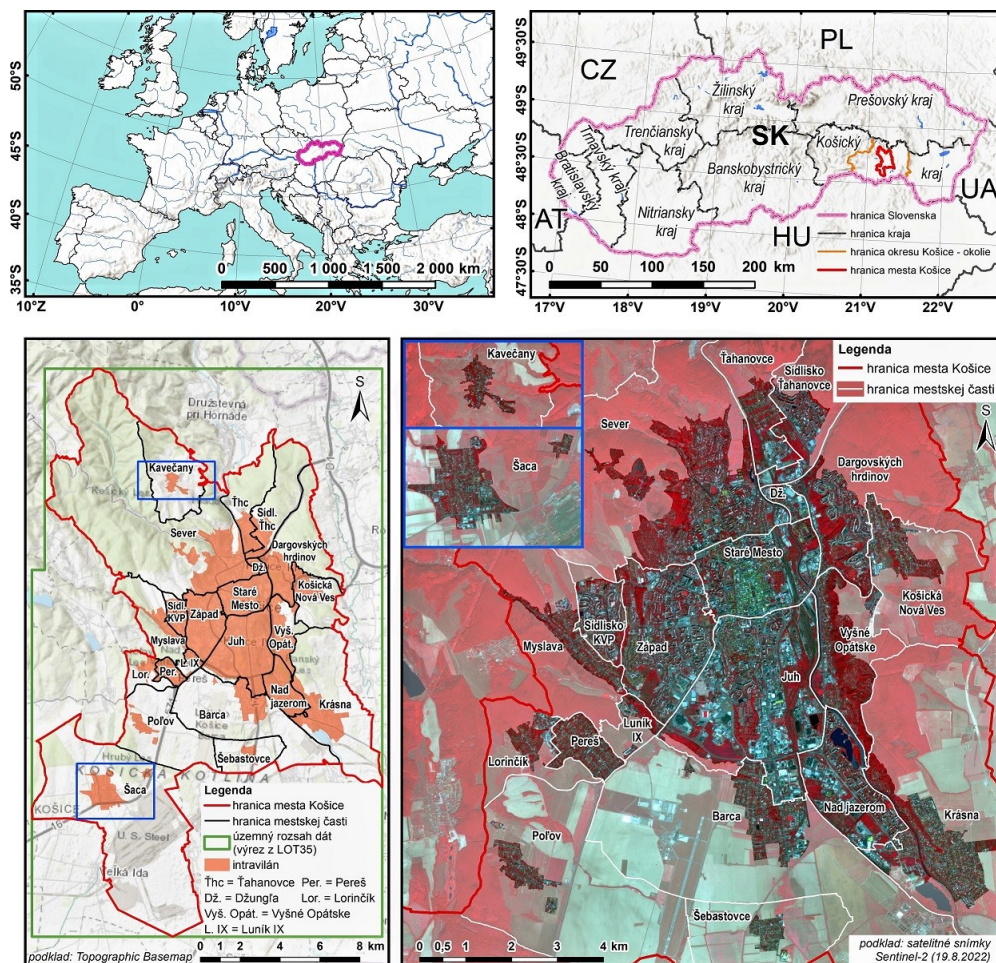
Nedávno publikované dáta leteckého laserového skenovania, ktorých zber zabezpečoval Úrad geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky (ÚGKK SR), sú dnes prístupné už pre celé územie Slovenska (GKÚ 2024) a prinášajú možnosti aplikácie nových metód pri výskume mestskej zelene. Verejne dostupné klasifikované mračno bodov, ako produkt leteckého laserového skenovania, vo svojej práci využili aj Gallay et al. (2023), ktorí skúmali rôzny vplyv plôch pokrytých nízkou vegetáciou (trávniky a kroviny) a vysokou vegetáciou (stromy) pri zmiernovaní ostrova tepla v meste Zvolen. Nevenovali sa však priamo priestorovej (3D) štruktúre zelene.

V predkladanom príspevku prezentujeme použitie nových prístupov pri výskume priestorovej (3D) štruktúry MZ stromového charakteru na príklade mesta Košice s využitím voľne dostupných lidarových dát. Hlavným cieľom príspevku je vyhodnotenie množstva MZ v intraviláne mesta, a to formou plošných, ale najmä objemových ukazovateľov, ktoré sú vyjadrené pre jednotlivé základné sídelné jednotky (urbanistické obvody) a bunky rastra a ktoré zohľadňujú aj intenzitu zástavby či počet obyvateľov.

ZÁUJMOVÉ ÚZEMIE

Analýzu priestorovej štruktúry MZ sme vykonali na území intravilánu mesta Košice (obr. 1). Cieľom bolo zamerať sa na územie, v ktorom obyvatelia trávajú väčšinu času a jeho charakter najintenzívnejšie vnímajú alebo ich bezprostredne ovplyvňuje. Vylúčili sme tak rozsiahle mestské lesy, priemyselné a dopravné areály (napr. oceľiarne a letisko) v extraviláne mesta. Vzhľadom na už neaktuálne katastrálne vymedzenie intravilánu sme pristúpili k vlastnej delimitácii intravilánu zohľadňujúc čo najvernejšie jeho súčasný stav.

Súčasná štruktúra mesta je veľmi rôznorodá a jej vývoj ovplyvnili najmä procesy druhej polovice 20. storočia. Intenzívna socialistická industrializácia a urbanizácia sa podpísala pod vznik panelových sídlisk, ktoré dominujú súčasnej panoráme mesta (obr. 2), zároveň však boli k mestu administratívne pričlenené priľahlé obce, ktoré dnes vystupujú ako samostatné mestské časti a stále majú prevažne vidiecky charakter (Csachová a Višňovský 2013). Hoci má mesto Košice podľa existujúcej urbanistickej štúdie dostatok plôch mestskej zelene v prepočte na obyvateľa, tá je rozložená nerovnomerne a jej kvalita je všeobecne nízka (Dobrucká 2013).



Obr. 1. Poloha záujmového územia v kontexte širších vzťahov

Vpravo dole je intravilán mesta znázornený na satelitných snímkach Sentinel-2 z augusta 2022 v kompozícii v nepravých farbách; územie mimo intravilánu je farebne stlmené.

Zdroj: EÚ (2022).



Obr. 2. Panoráma mesta Košice s prevažujúcou zástavbou panelových sídlisk (pohľad z vrchu Heringes smerom na západ)

DÁTA A METÓDY

Realizovaný výskum bol založený na dátach poskytnutých Geodetickým a kartografickým ústavom (GKÚ) osobným odberom mračna bodov (ÚGKK SR a GKÚ 2022) v územnom rozsahu znázornenom na obr. 1 vľavo dole, ktorý je výrezom z lokality LOT35 Košice. V rámci danej lokality prebiehal zber lidarových dát počas jednej leteckej kampane v apríli 2021, teda mimo obdobia olistenia listnatých stromov. Najdôležitejšie parametre poskytnutých dát za územie ako celok sú vyjadrené v tab. 1, avšak ako je možné vidieť aj na obr. 3, vlastnosti poskytnutého mračna bodov sa výrazne odlišujú i v rámci tejto lokality. Keďže poskytnuté mračno bodov bolo klasifikované len do triedy reprezentujúcej terén a v rámci LOT35 nebol k dispozícii ani digitálny model povrchu (DSM), mračno bodov bolo nevyhnutné na potreby našej analýzy pred samotnou klasifikáciou dôsledne pripraviť.

Tab. 1. Parametre lidarových dát dodaných pre záujmové územie

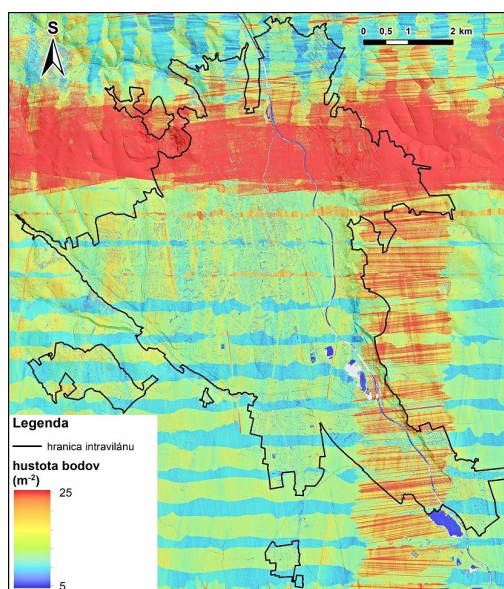
Parameter	Hodnota parametra	Parameter	Hodnota parametra
Formát	.laz (verzia LAS 1.4)	Počet bodov posl. odrazu	7,649 mld.
Veľkosť na disku	31,9 GB		
Dátum zberu dát	10. 4. – 26. 4. 2021	Výšková presnosť bodov	3 cm*
Súradnicový systém	S-JTSK (JTSK03); EPSG:8353	Polohová presnosť bodov	9 cm*
Výškový systém	Balt po vyrovnaní (Bpv)		
Počet letových pásov	111	Celková hustota bodov	18,48/m ²
Max. počet prekrývajúcich sa letových pásov	8	Hustota bodov posl. odrazu	15,54/m ²
Výmera zvoleného územia	494 km ²	Priemerná vzdialenosť bodov	23 cm
Celkový počet bodov	9,094 mld.	Priemerná vzdialenosť bodov posl. odrazu	25 cm
z toho v triede:			
1 (neklasifikované)	2,512 mld.		
2 (terén)	6,582 mld.		

* takto označené parametre sú vyjadrené pre celú lokalitu LOT35
Zdroj: vlastné výpočty pomocou lasinfo, GKÚ (2023).

Prípravu mračna bodov na potreby klasifikácie sme vykonávali podľa návodu Isenburga (2018) v prostredí softvéru LAStools s platnou licenciou. Príprava dát zahŕňala ich vizuálnu aj technickú kontrolu (nástroje *lasview* a *lascontrol*), odstránenie duplicitných bodov (*lasduplicate*), odstránenie vysokého šumu (*lasnoise*) a výpočet relatívnej výšky bodov nad terénom spolu s odstránením nízkeho šumu (*lasheight*). Na zníženie nárokov na pamäť a urýchlenie výpočtov sme pomocou nástroja *lastile* rozdelili mračno bodov na štvorcové dlaždice s veľkosťou strany 300 m so vzájomným prekrytím 50 m. Prekrytie je nevyhnutné na zabránenie vzniku tzv. artefaktov na rozhraní dlaždíc. Výpočty sme realizovali na takto rozdelenom mračne bodov a až finálne výstupy sme zlúčili do jedného celku.

Ďalším krokom spracovania dát bola klasifikácia dátového mračna bodov na samostatné triedy bodov reprezentujúce budovy alebo vegetáciu. Geometrická

komplexnosť urbánnej krajiny si vyžadovala netriviálny proces klasifikácie podľa vlastných nastavení hodnôt vstupných parametrov. Na potreby klasifikácie sme využili nástroj *lasclassify*, súčasť softvérovej sady LAStools. Zaužívané štandardy klasifikácie podľa ASPRS (2019) rozlišujú viac ako 15 kvalitatívnych tried a z toho tri triedy vegetácie podľa jej výšky: 3 (nízka), 4 (stredná) a 5 (vysoká). Väčšina lokalít na Slovensku, pre ktoré GKU sprístupnil klasifikované mračno bodov, už obsahuje klasifikované body aj do všetkých troch tried vegetácie a do triedy 6 (budovy), triedy 9 (voda) a triedy 17 (konštrukcie mostov), čo však nie je prípad našej lokality, kde bolo mračno bodov klasifikované len do triedy 2 (terén) a zvyšné body ostali neklasifikované. Nástroj *lasclassify* umožňuje klasifikovať vegetáciu len do jednej, všeobecnej triedy a pri budovách zas dokáže klasifikovať spravidla len ich strechy.



Obr. 3 Hustota bodov v mračne

Dôsledné nastavenie parametrov je tak pre dosiahnutie čo najpresnejšej klasifikácie kľúčové. Kvalita výstupu závisí aj od hustoty bodov v mračne, čo by sa malo zohľadniť pri nastavení veľkosti vyhľadávacieho poľa – *search area size* (rapidlasso 2022). Ďalšími nastaviteľnými parametrami sú miera „rovinnosti“ – *planarity*, ktorá kontroluje maximálne možné variačné rozpätie hodnôt súradnice z pre klasifikáciu striech budov a miera drsnosti – *ruggedness*, ktorá kontroluje minimálne možné variačné rozpätie hodnôt súradnice z pre klasifikáciu vegetácie. Parameter *ground offset* vyjadruje hodnotu minimálnej výšky nad terénom, od ktorej sa má klasifikácia vykonávať. Použité hodnoty parametrov klasifikácie boli stanovené empiricky po viacerých pokusoch a vizuálnom zhodnotení klasifikácie v rôznych typoch krajiny nasledovne: *search area size* – 1,8, *planarity* – 0,15 a *ruggedness* – 1,8. Hodnotu *ground offset* sme ponechali na úrovni 2 metre. Jednotlivé body sme tak klasifikovali až vo výške väčšej ako 2 metre, pretože práve do

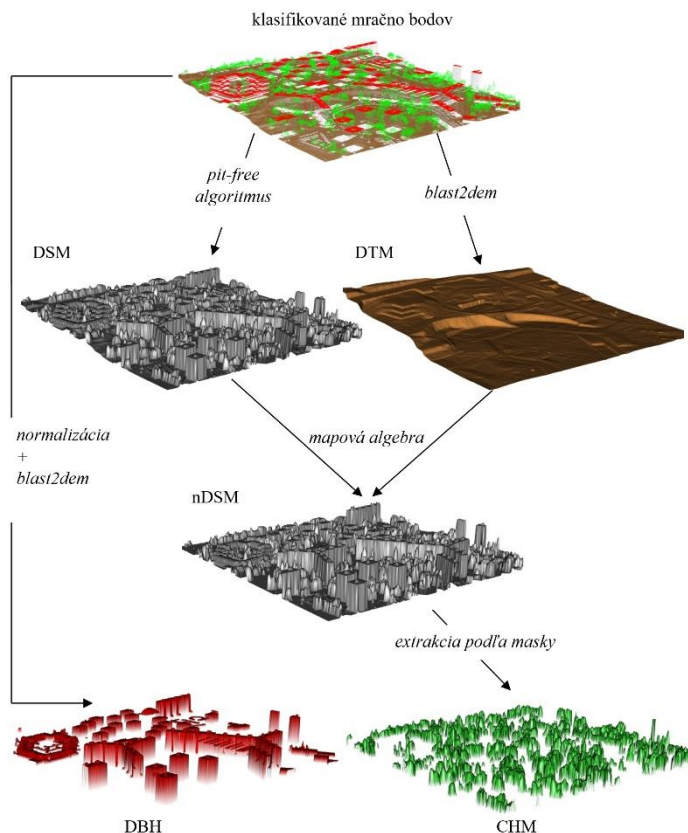
tejto výšky nad terénom nachádzame mnoho rôznorodých objektov (ľudia, osobné vozidlá a drobná infraštruktúra), ktoré by s vysokou pravdepodobnosťou boli aj tak chybné klasifikované a na účely tohto príspevku irelevantné. Navyše sme nastavili aj dodatočný parameter počtu čiastkových krokov na najvyššiu možnú mieru (*substep* 8), vďaka čomu sme dosiahli lepšie výsledky klasifikácie, hoci to mierne predĺžilo výpočet. Z pôvodného počtu asi 2,49 mld. neklasifikovaných bodov sme ako vegetáciu klasifikovali 1,51 mld. bodov a ako budovy ďalších 247 miliónov bodov. Neklasifikovaných ostalo 730 miliónov bodov.

Pri hodnotení kvality klasifikácie sme ako referenčné dáta zvolili klasifikované mračná bodov z troch rôznych oblastí Bratislavy (historické centrum, Petržalka ako charakteristické socialistické sídlisko a lesné porasty v okolí Železnej studničky), ďalej vidiecku obec Zálesie v zázemí Bratislavy a silne industrializovanú krajinu priemyselného podniku Duslo v Šali. Tieto mračná bodov reprezentovali päť rôznych typov krajiny. Dáta boli získané z online portálu GKÚ a boli už klasifikované. Z nich sme odstránili šum a body reprezentujúce vodnú hladinu. Body klasifikované do rôznych tried vegetácie (nízka, stredná a vysoká) sme zlúčili do jednej triedy a všetky body vo výške menšej ako 2 metre nad terénom sme zaradili do triedy „neklasifikované“. Získali sme tak zjednodušené referenčné dáta. Následne sme tieto mračná preklasifikovali s totožným nastavením parametrov ako v prípade nášho mračna bodov z Košíc a takto nanovo preklasifikované mračná sme porovnali so zjednodušenými referenčnými dátami, čím sme vyhodnotili presnosť nami vykonanej klasifikácie. Celková presnosť klasifikácie v intraviláne dosahuje 80 – 90 %, ale líši sa v závislosti od typu krajiny a charakteru zástavby, čo bližšie komentujeme v diskusii.

Z klasifikovaného mračna bodov sme už mohli odvodiť spojitý digitálne modely terénu (DTM – angl. digital terrain model), povrchu krajiny pokrývky (DSM – angl. digital surface model), výšky vegetačnej pokrývky (CHM – angl. canopy height model) a výšky budov (DBH – angl. digital building height), ktoré boli vstupom pre výpočet plochy či objemu vegetácie a budov v meste.

DTM vznikol priamou konverziou hodnôt nadmorskej výšky (z) z bodov s klasifikačným atribútom 2 (terén) do pravidelnej mriežky (rastra) pomocou nástroja *blast2dem*. Vzhľadom na priestorovú hustotu vstupných bodov sme zvolili rozmer buniek dátovej mriežky $0,5 \times 0,5$ metra. V ďalšom kroku bol podobne odvodený DSM z bodov s klasifikačným atribútom 5 (vegetácia) a 6 (budovy). Použili sme tzv. *pit-free* algoritmus podľa Khosravipourovej et al. (2014). Následne vznikol normalizovaný model povrchu (nDSM) použitím mapovej algebry ako rozdielový povrch odčítaním DTM od DSM, čo znamená, že všetky body na terénne nadobudli hodnotu relatívnej výšky 0 metrov.

Pre výpočet objemu vegetácie a budov z normalizovaného modelu povrchu (nDSM) sme najprv oddelili časti pokrývky zastúpené vegetáciou a budovami. Pomocou nástroja *lasgrid* sme z klasifikovaného bodového mračna vytvorili masku vegetácie, ktorú sme použili na extrakciu vegetačnej pokrývky (CHM). V zmysle nastavených parametrov klasifikácie bodového mračna sme tak z nDSM extrahovali len plochy vegetácie vyššej ako 2 metre. Pre budovy sme uvažovali iba body klasifikované ako budovy a bodové mračno sme tiež normalizovali. Následne sme pomocou nástroja *blast2dem* vytvorili model výšky budov (DBH). Tento postup je ilustrovaný na obr. 4.



Obr. 4. Schematický postup odvodenia digitálnych modelov DTM, DSM, CHM a DBH

Objem budov sme vypočítali z jestvujúceho DBH pomocou mapovej algebry podľa vzorca:

$$VB = \sum_{i=1}^n S_i \times h_i ,$$

kde VB vyjadruje objem budov pre oblasti záujmu, S_i plochu jednej bunky rastra (pri rozlíšení $0,5 \times 0,5$ m sa rovná $0,25$ m²) a h_i vyjadruje výšku budovy v danom mieste nad terénom (v metroch).

Vzhľadom na komplikovanú štruktúru vegetácie bol postup pri výpočte jej objemu zložitejší. Z CHM sme nemohli priamo odvodiť objem, pretože v prípade stromovej vegetácie sa základňa koruny stromu nachádza až v niekoľkých metroch nad terénom. Ak by sme objem vegetácie počítali rovnakým spôsobom ako v prípade budov, zahrnuli by sme do objemu vegetácie aj prázdny priestor pod korunami stromov, čím by sme objem vegetácie výrazne nadhodnotili. Preto bolo nevyhnutné najprv určiť hodnotu výšky základne korún stromov a objem vegetácie uvažovať až

od nej vyššie. Vzhľadom na rôznorodosť vegetácie v záujmovom území a nejednoznačnosť definícií (Zhu et al. 2021) je to komplexná úloha. Hoci sa najviac bodov v mračne klasifikovaných ako vegetácia nachádza vo výške 4 – 4,5 m, výšku základne koruny sme napokon stanovili na 5 metrov nad terénom, pretože zodpovedá (po zaokrúhlení) približne 1. kvartilu výšok všetkých bodov vegetácie nad terénom v záujmovom území (obr. 5). Do ďalších výpočtov tak vstupovali iba bunky CHM s hodnotou výšky viac ako 5 metrov nad terénom (obr. 6). Následne sme objem vegetácie počítali už len nad touto úrovňou (teda pri splnení podmienky $h > 5$) pomocou vzorca:

$$VV = \sum_{i=1}^n S_i \times (h_i - 5),$$

kde VV vyjadruje objem vegetácie pre oblasti záujmu, S_i plochu jednej bunky rastra (pri rozlíšení $0,5 \times 0,5$ m sa rovná $0,25 \text{ m}^2$) a h_i vyjadruje výšku vegetácie v danom mieste nad terénom.

Nosným prvkom prezentovaného výskumu je výpočet trojrozmerných (3D) ukazovateľov zelene podľa Zięba-Kulawik et al. (2021). Uvažovali sme nasledovné ukazovatele:

Nosným prvkom prezentovaného výskumu je výpočet trojrozmerných (3D) ukazovateľov zelene podľa Zięba-Kulawik et al. (2021). Uvažovali sme nasledovné ukazovatele:

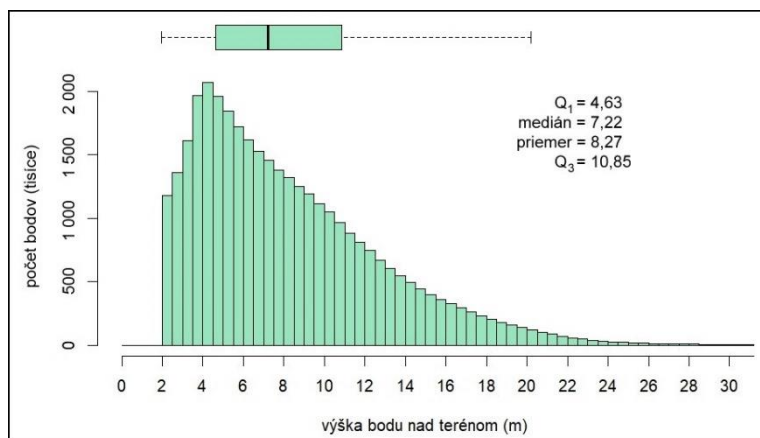
Koeficient objemu vegetácie $3D KV$ (m^3/m^2): $3D KV = VV / S$

Koeficient objemu vegetácie na obyvateľa $3D KV_{Ob}$ ($\text{m}^3/\text{ob.}$): $3D KV_{Ob} = VV / PO$

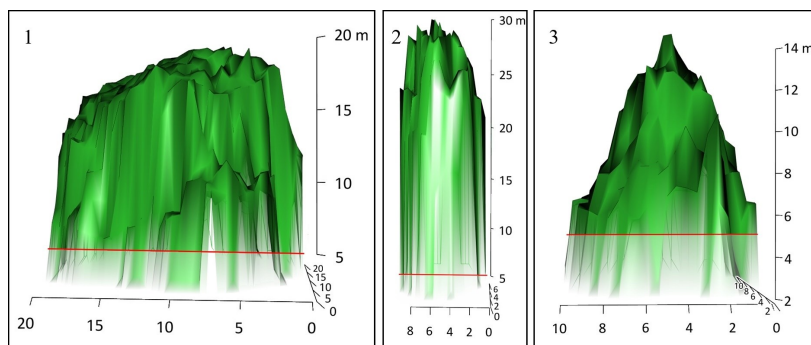
Koeficient objemu budov $3D KB$ (m^3/m^2): $3D KB = VB / S$

Koeficient objemu budov na obyvateľa $3D KB_{Ob}$ ($\text{m}^3/\text{ob.}$): $3D KB_{Ob} = VB / PO$

Vzájomný pomer objemu vegetácie a budov $3D V/B$ (%): $3D V/B = (VV / VB) \times 100$



Obr. 5. Histogram bodov klasifikovaných ako vegetácia v záujmovom území v závislosti od ich výšky nad terénom



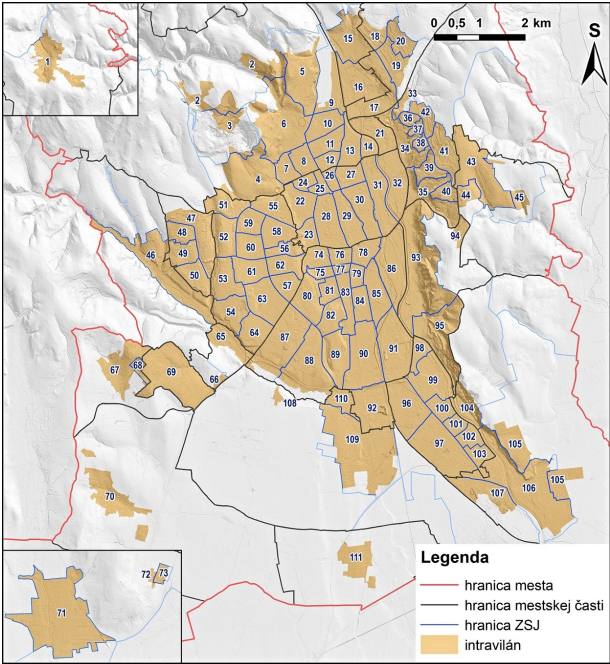
Obr. 6. Objemy korún stromov vypočítané z CHM

1 – 3074,4 m³, 2 – 1050,7 m³, 3 – 224,6 m³

Pre uvedené vzorce platí, že VV označuje sumárny objem vegetácie a VB sumárny objem budov v územnej jednotke, S celkovú plochu danej územnej jednotky a PO celkový počet obyvateľov v danej územnej jednotke. Údaje o počte obyvateľov pochádzajú zo sčítania obyvateľov (SÚSR 2021). Vzhľadom na to, že v odbornej praxi sa stále ešte široko používajú aj plošné ukazovatele (Vitková 2014), ktoré je eventúálne možné porovnať aj s inými prácami, definovali sme aj tie. Vzorce na ich výpočet sú analogické ako pri 3D ukazovateľoch, kde sme však objemové jednotky nahradili plošnými. Plošné (2D) koeficienty sú tak vyjadrené v percentách (%), resp. ako plocha na jedného obyvateľa (m²/ob.).

Opísané priestorové ukazovatele vegetácie a budov sme kartograficky vyjadrili pre dva typy priestorových jednotiek. Prvým typom boli urbanistické obvody – základné sídelné jednotky (ZSJ), pre ktoré boli poskytnuté aj údaje o počte obyvateľov zo sčítania v roku 2021 (SÚSR 2021). Uvažované ZSJ sú znázornené na obr. 7. Ich zoznam uvádzame v tab. 2. Pre jednotlivé ZSJ sme tak dokázali vyjadriť aj hodnoty ukazovateľov vzťahujúcich sa na počet obyvateľov. Uvažovali sme však iba ZSJ s počtom obyvateľov aspoň 50, teda primárne tie, ktoré majú obytný charakter a vylúčili sme tak ZSJ s prevažne rekreačným a priemyselným charakterom. ZSJ považujeme za priestorové jednotky, ktoré sú veľmi vhodné na interpretáciu našich výsledkov, pretože na rozdiel od rastra lepšie vystihujú skutočnú štruktúru mesta a jeho jednotlivé funkčné zóny.

Druhým typom priestorových jednotiek pre výpočet ukazovateľov bolo rozdelenie územia intravilánu na štvorcovú sieť (raster/grid) použitím kritéria centroidu. Veľkosť jednej bunky sme nastavili na 100 × 100 metrov podobne, ako odporúčajú Kusendová a Durček (2019) a Zięba-Kulawik et al. (2021). Takáto veľkosť bunky je primeraná aj veľkosti záujmového územia a zvolenej mierke. V prípade výpočtu vzájomného pomeru plôch (ukazovateľ V/B) a pomeru objemov vegetácie a budov (ukazovateľ $3D\ V/B$) sme v bunkách, v ktorých sa nenachádzali žiadne budovy, nahradili nulové hodnoty plôch a objemov budov hodnotou 1, aby sa v menovateli nenachádzala nula a aby pre tieto bunky bolo možné daný ukazovateľ vypočítať. Pri vybraných ukazovateľoch sme aplikovali nástroj fokálnych štatistik, pomocou ktorého sme pôvodnú hodnotu ukazovateľa nahradili novou hodnotou danou priemerom pôvodnej hodnoty bunky a jej ôsmich susedných buniek. Tento krok sme vykonali s cieľom zjednodušiť interpretáciu výsledkov, eliminovať lokálne extrémny a lepšie identifikovať areály s najväčším množstvom zelene, prípadne budov, čo prezentujeme aj vo výsledkovej časti.



Obr. 7. Základné sídelné jednotky v intraviláne mesta Košice

Tab. 2. Zoznam základných sídelných jednotiek podľa obr. 7

Por. čís.	Názov ZSJ	Mestská časť	Por. čís.	Názov ZSJ	Mestská časť	Por. čís.	Názov ZSJ	Mestská časť
1	Kavečany	Kavečany	38	Dargovských hrdinov III	Darg. hrdinov	75	Žižkova II	Juh
2	Bankov	Sever	39	Dargovských hrdinov IV	Darg. hrdinov	76	Sídliisko Vojvodská I	Juh
3	Baňa	Sever	40	Dargovských hrdinov V	Darg. hrdinov	77	Sídliisko Vojvodská II	Juh
4	Kalvária	Sever	41	Dargovských hrdinov VI	Darg. hrdinov	78	Sídliisko osloboditeľov I	Juh
5	Podhradová	Sever	42	Dargovských hrdinov VII	Darg. hrdinov	79	Sídliisko osloboditeľov II	Juh
6	Čermeľ	Sever	43	Košická Nová Ves I	Koš. N. Ves	80	Turgenevovo sídlisko	Juh
7	Sídliisko Watsonovo	Sever	44	Pod Pavlovou horou	Koš. N. Ves	81	Stará nemocnica	Juh
8	Vysokoškolský areál	Sever	45	Konopiská	Koš. N. Ves	82	Železníky	Juh
9	Park kultúry a oddychu	Sever	46	Myslava I	Myslava	83	Pri Astórii	Juh
10	Mier	Sever	47	Wuppertálska	Sídliisko KVP	84	Pri malej stanici	Juh
11	Mlynský náhon	Sever	48	Húskova	Sídliisko KVP	85	Jarmočná	Juh
12	Komenského - sever	Sever	49	Bauerova	Sídliisko KVP	86	Pod železničnou stanicou	Juh
13	Malá Praha	Sever	50	Dénešova	Sídliisko KVP	87	Všesportový areál	Juh
14	Nad železničnou stanicou	Sever	51	Jazdecký areál	Západ	88	Pri prachárni	Juh
15	Staré Ťahanovce	Ťahanovce	52	Popradská - sever I	Západ	89	Cintorín	Juh
16	Pri hati I	Ťahanovce	53	Nad Popradskou	Západ	90	Holubyho - juh	Juh
17	Pri hati II	Sídliisko Ťahanovce	54	Dom detí a mládeže	Západ	91	Nižné Kapustníky	Juh

Pokračovanie tab. 2.

18	Skalky	Sidl. Ťahanovce	55	Fakultná nemocnica	Západ	92	Priemyselný obvod I	Juh
19	Ťahanovce I	Sidl. Ťahanovce	56	Nové Mesto - stred	Západ	93	Nižná Úvrat'	Vyš. Opátske
20	Ťahanovce II	Sidl. Ťahanovce	57	Pri tehelni	Západ	94	Heringeš	Vyš. Opátske
21	Brody	Džungľa	58	Luník I	Západ	95	Vyšné Opátske	Vyš. Opátske
22	Kuzmányho - sever	Staré Mesto	59	Luník II	Západ	96	Priemyselný obvod III	Nad jazerom
23	Kuzmányho - juh	Staré Mesto	60	Luník III	Západ	97	Priemyselný obvod - juh	Nad jazerom
24	Zimná	Staré Mesto	61	Luník IV	Západ	98	Sídlisko Nad jazerom - sever	Nad jazerom
25	Angelinum	Staré Mesto	62	Luník V - VI	Západ	99	Sídlisko Nad jazerom - stred	Nad jazerom
26	Komenského - juh	Staré Mesto	63	Luník VII	Západ	100	Sídlisko Nad jazerom - juh	Nad jazerom
27	Tyršovo nábrežie	Staré Mesto	64	Luník VIII	Západ	101	Sídlisko Krásna - sever	Nad jazerom
28	Historické jadro - západ	Staré Mesto	65	Luník IX	Luník IX	102	Sídlisko Krásna - stred	Nad jazerom
29	Historické jadro - východ	Staré Mesto	66	Nové diely	Luník IX	103	Sídlisko Krásna - juh	Nad jazerom
30	Mestský park	Staré Mesto	67	Lorinčík	Lorinčík	104	Telek	Krásna
31	Železničná stanica	Staré Mesto	68	Pereš	Lorinčík	105	Družba	Krásna
32	Prešovská I	Staré Mesto	69	Pereš	Pereš	106	Krásna	Krásna
33	Košická hora	Darg. hrdinov	70	Poľov	Poľov	107	Štrkovisko - Krásna	Krásna
34	Vyšný Heringeš	Darg. hrdinov	71	Šaca	Šaca	108	Letisko	Barca
35	Slivník	Darg. hrdinov	72	Pastviská	Šaca	109	Barca I	Barca
36	Dargovských hrdinov I	Darg. hrdinov	73	Ludvikov dvor	Šaca	110	Barca II	Barca
37	Dargovských hrdinov II	Darg. hrdinov	74	Žižkova I	Juh	111	Šebastovce	Šebastovce

Zdroj: ŠÚSR (2020).

VÝSLEDKY

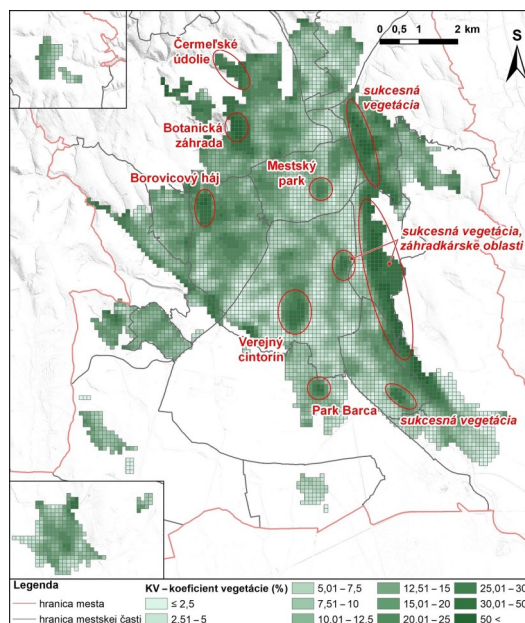
Dosiahnuté výsledky prezentujeme v ďalšom texte v dvoch podkapitolách. Prvá predstavuje zistenia na základe dvojrozmerných ukazovateľov, berúc do úvahy plochu vegetácie. Druhá podkapitola podáva výsledky zahŕňajúce aj výškový rozmer vegetácie, teda jej objem. V obidvoch prípadoch sú výsledné hodnoty ukazovateľov agregované pre ZSJ a pre štvorcovú sieť s rozmerom bunky 100 × 100 metrov.

Dvojrozmerné (2D) ukazovatele

Na území intravilánu mesta Košice sme identifikovali plochy vegetácie vyššej ako 2 metre v celkovej výmere 8,43 km².

Koeficient vegetácie KV (%)

Vyjadruje podiel vegetačnej pokrývky vyššej ako 2 metre (v zmysle použitých parametrov klasifikácie) na celkovej výmere priestorovej jednotky. Pre celý intravilán mesta má hodnotu 15 %. Po aplikácii fokálnych štatistík (spriemerovanie hodnôt KV v pohybujúcom sa okne veľkosti 3 × 3 bunky) sme získali vyhladený raster s eliminovanými lokálnymi extrémami. Pomocou neho sme vedeli identifikovať najvýraznejšie plochy zelene v meste, ktoré sú znázornené na obr. 8.



Obr. 8. Koeficient vegetácie KV (po aplikovaní fokálnych štatistík v okne 3×3 bunky)
Vyznačené sú oblasti s najväčšou hustotou zelene na jednotku plochy.

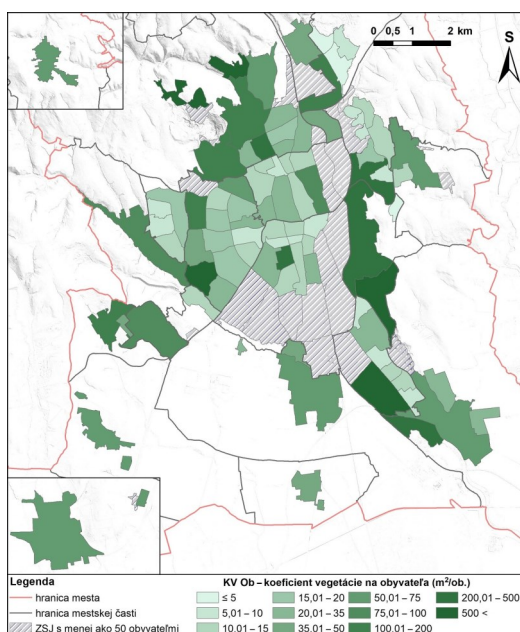
Ide spravidla o oblasti, do ktorých zasahujú blízke lesné porasty, napríklad v záhradkárskejších lokalitách, ďalej neudržiavané, sukcesne zarastajúce oblasti, parky, ale aj plochy zelene špeciálneho charakteru (Verejný cintorín, Borovicový háj a botanická záhrada). Naopak, najnižšie hodnoty KV pozorujeme prevažne v lokalitách s novopostavenými obytnými súbormi či v priemyselných areáloch.

Koeficient vegetácie na obyvateľa KV_{Ob} ($m^2/ob.$)

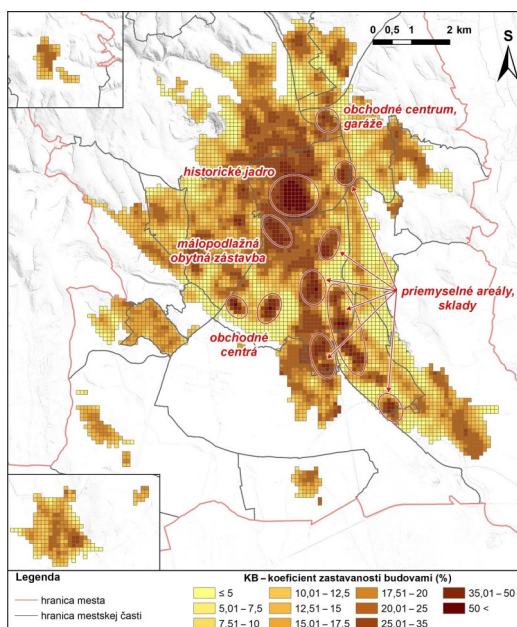
Samotnú hodnotu koeficientu vegetácie však nemožno považovať za rozhodujúci údaj vyjadrujúci kvalitu mestského prostredia. V oblastiach, kde KV dosahuje veľmi vysoké hodnoty, prípadne veľmi nízke hodnoty (priemyselné areály) totiž žije len minimum obyvateľov. Z toho dôvodu možno za dôveryhodnejší považovať koeficient vegetácie na obyvateľa KV_{Ob} vyjadrený v m^2 pôdorysnej plochy zelene na jedného obyvateľa. Priemerná hodnota za celé územie je $37 m^2/ob.$ Najvyššie hodnoty KV_{Ob} majú vo všeobecnosti riedko obývané lokality a najnižšie hodnoty zas vykazujú lokality s hustou viacpodlažnou obytňou zástavbou. Výsledky sú prezentované na obr. 9.

Koeficient zastavanosti budovami KB (%)

Popri výmere vegetácie je však dôležité spomenúť aj výmeru plôch zastavaných budovami, pretože aj tá má vplyv na kvalitu životného prostredia obyvateľov. V záujmovom území sme identifikovali plochy zastavané budovami v celkovej výmere $9,04 km^2$. Pripomínáme však, že pri vymedzení územia intravilánu sme mnohé, najmä priemyselné areály vôbec neuvažovali, napriek tomu, že zaberajú veľmi veľké plochy. Konkrétne išlo o areál letiska s priľahlým priemyselným parkom a oblasť oceliarní U. S. Steel.



Obr. 9. Koeficient vegetácie na obyvateľa KV_{Ob} v jednotlivých ZSJ



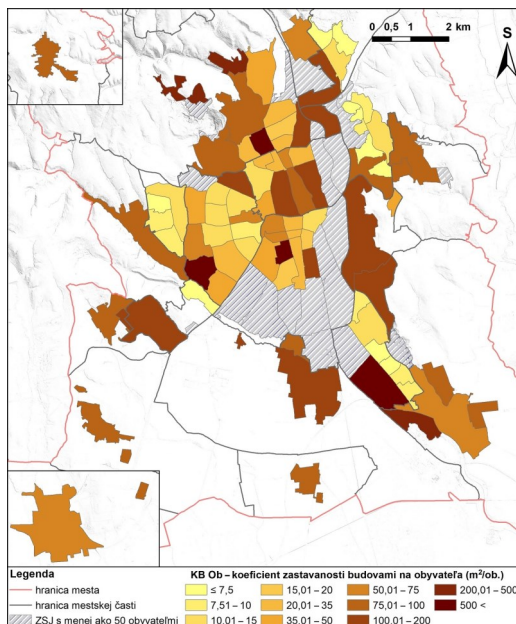
Obr. 10. Koeficient zastavanosti budovami KB (po aplikovaní fokálnych štatistík v okne 3×3 bunky)

Vyznačené sú oblasti s najväčšou hustotou zástavby na jednotku plochy

Priemerná hodnota koeficientu zastavanosti budovami KB v záujmovom území je 16,1 %. Rovnako ako v prípade zelene, aj v prípade budov sme aplikovali nástroj fokálnych štatistík, vďaka ktorému vieme ľahko identifikovať najhustejšie zastavané oblasti v intraviláne. Ako je zrejmé aj z obr. 10, najhustejšie zastavané je historické jadro mesta spolu so širším centrom, oblasti s veľkými obchodnými centrami, priemyselné areály a sklady. Najnižšie hodnoty koeficientu zas dosahujú oblasti bez špecifického využitia, ktoré spravidla zarastajú sukcesnou vegetáciou, záhradkárské lokality či plochy so špeciálnym využitím, napr. Verejný cintorín či botanická záhrada.

Koeficient zastavanosti budovami na obyvateľa KB_{Ob} ($m^2/ob.$)

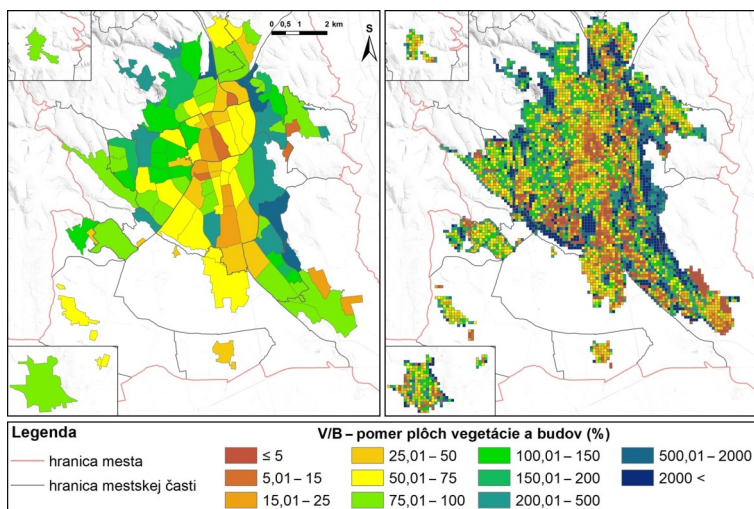
Pre úplnosť uvádzame aj koeficient zastavanosti budovami na obyvateľa KB_{Ob} vyjadrený v m^2 pôdorysnej plochy budov na jedného obyvateľa. Priemerná hodnota KB_{Ob} v záujmovom území je 39,7 $m^2/ob.$ Keďže však v našom príspevku nerozlišujeme jednotlivé typy budov, interpretácia tohto ukazovateľa nie je úplne jednoznačná. Vysoké hodnoty tohto ukazovateľa sú charakteristické skôr pre riedko obývané oblasti. Buď ide o oblasti, ktoré majú primárne iný než obytný charakter, alebo ide o oblasti s málopodlažnou obytnou zástavbou. Nízke hodnoty KB_{Ob} ($< 10 m^2/ob.$) vykazujú výlučne husto obývané oblasti s viacpodlažnou panelovou obytnou zástavbou. Napriek náročnejšej interpretácii ale môžeme konštatovať, že vysoké hodnoty daného ukazovateľa sú typické skôr pre mestské časti rurálneho typu a z hľadiska obyvateľov vyjadrujú pozitívny charakter prostredia, kým nízke hodnoty sú typické pre husto zaľudnené panelové sídliská a vyjadrujú negatívny charakter prostredia. Výsledky sú prezentované na obr. 11.



Obr. 11. Koeficient zastavanosti budovami na obyvateľa KB_{Ob} v jednotlivých ZSJ

Vzájomný pomer plôch vegetácie a budov V/B (%)

Ukazovateľ *V/B* vyjadruje vzájomný pomer pôdorysnej plochy zelene a budov. Priemerná hodnota *V/B* v záujmovom území je 93,2 %, teda mierna prevaha budov nad zelenými plochami. Metodika použitá v prezentovanom výskume však uvažuje len vegetáciu vysokú aspoň 2 metre, čiže žiadne trávniky alebo nízke kríky. Ako je aj z obr. 12 zrejmé, najvyššie hodnoty ukazovateľa dosahujú najmä riedko obývané lokality či záhradkárske oblasti a lokality s výskytom sukcesnej vegetácie. Kým panelové sídliská dosahujú približne priemerné hodnoty za celé mesto, lokality s novopostavenými obytnými súbormi, centrum mesta a priemyselné areály vykazujú výraznú prevahu zastavaných plôch nad plochami zelene.



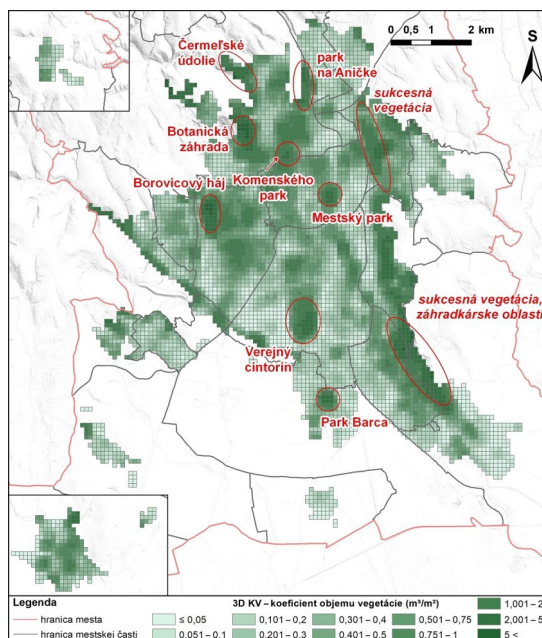
Obr. 12. Pomer plôch vegetácie a budov *V/B* vyjadrený pre jednotlivé ZSJ (vľavo) a vo forme rastra s rozlíšením bunky 100 × 100 metrov (vpravo)

Trojrozmerné (3D) ukazovatele

Ťažiskovými výsledkami príspevku sú práve ukazovatele využívajúce trojrozmernú priestorovú informáciu. Pripomeňme, že na výpočet objemu vegetácie sme použili spojený model výšky vegetačnej pokrývky (CHM) a objem stromovej vegetácie sme počítali až od výšky 5 metrov nad terénom. Na území intravilánu mesta Košice sme tak identifikovali stromovú vegetáciu v celkovom objeme 31,12 miliónov m³.

Koeficient objemu vegetácie 3D KV (m³/m²)

Priemerná hodnota pre celé záujmové územie je 0,56 m³/m². Ako je aj z obr. 13 zrejmé, vysoké hodnoty *3D KV* majú najmä oblasti s vysokou koncentráciou stromovej vegetácie – Verejný cintorín, Borovicový háj a väčšie parky v rôznych častiach mesta. Najnižšie hodnoty *3D KV* dosahujú najmä lokality s novopostavenými obytnými súbormi a priemyselné areály. Podobne, ako v prípade dvojrozmerného ukazovateľa – koeficientu vegetácie *KV*, aj tu sme aplikovali nástroj fokálnych štatistík na identifikáciu oblastí s najväčším objemom stromovej zelene v meste (obr. 13).



Obr. 13. Koeficient objemu vegetácie 3D KV (po aplikovaní fokálnych štatistík v okne 3 × 3 bunky)

Vyznačené sú oblasti s najväčším objemom vegetácie na jednotku plochy

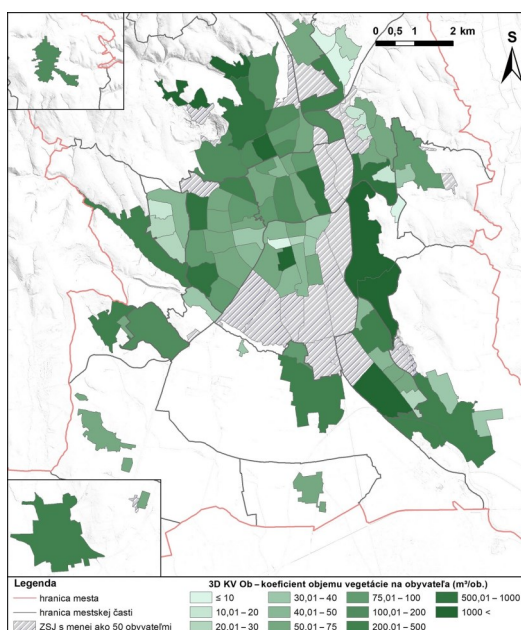
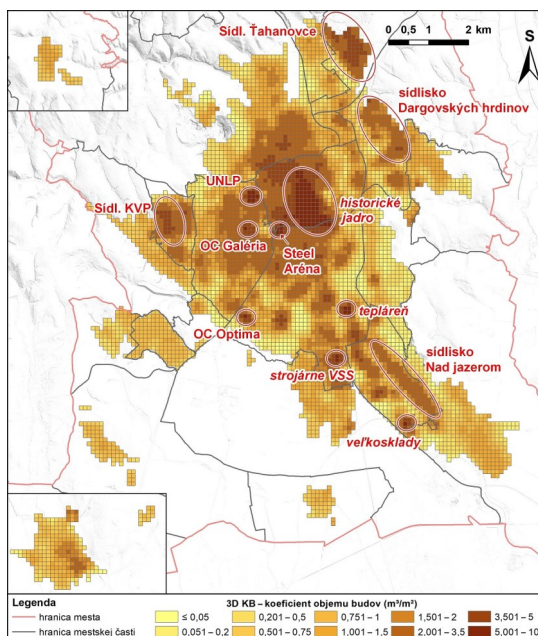
Koeficient objemu vegetácie na obyvateľa 3D KV_{Ob} (m³/ob.)

Analogicky, ako v prípade dvojrozmerného koeficientu vegetácie na obyvateľa KV_{Ob}, aj v tomto prípade sme uvažovali len ZSJ s aspoň 50 obyvateľmi. Priemerná hodnota daného ukazovateľa pre celý intravilán mesta je rovná 136 m³/ob. Najvyššie hodnoty 3D KV_{Ob} majú vo všeobecnosti riedko obývané lokality, najnižšie hodnoty 3D KV_{Ob} sú charakteristické pre lokality prevažne s hustou obytňou zástavbou (obr. 14).

Koeficient objemu budov 3D KB (m³/m²)

Podobne, ako v prípade dvojrozmerných ukazovateľov, uvažujeme popri objeme vegetácie aj objem budov. Oproti vegetácii je však v prípade budov tretí rozmer, teda ich výška omnoho výraznejšia, čo má zásadný vplyv na celkový charakter prostredia. V intraviláne mesta (vynímajúc oceliarne a letisko) sme identifikovali budovy s celkovým objemom 80,38 miliónov m³.

Priemerná hodnota koeficientu objemu budov 3D KB za celý intravilán je 1,43 m³/m². Najvyššie hodnoty ukazovateľa dosahujú lokality v historickom jadre mesta, ale vysoké hodnoty majú aj lokality v širšom centre a panelové sídliská. Nízke hodnoty sú charakteristické pre plochy bez špecifického využitia so sukcesnou vegetáciou, záhradkárske oblasti či plochy so špeciálnym využitím (Verejný cintorín a botanická záhrada) – obr. 15.

Obr. 14. Koeficient objemu vegetácie na obyvateľa $3D KV_{Ob}$ v jednotlivých ZSJObr. 15. Koeficient objemu budov $3D KB$ (po aplikovaní fokálnych štatistik v okne 3×3 bunky)

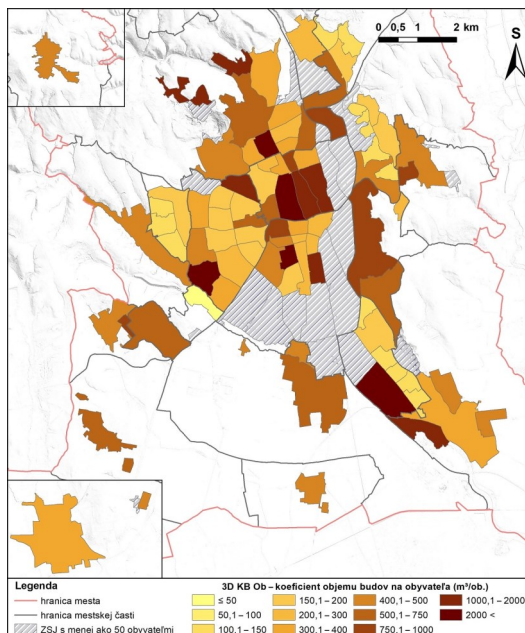
Vyznačené sú oblasti s najväčším objemom budov na jednotku plochy.

Pre bunky rastra nadobúda ukazovateľ $3D\ KB$ hodnoty od 0 po $20\text{ m}^3/\text{m}^2$, ale len desať buniek nadobúda hodnoty $3D\ KB$ vyššie ako $10\text{ m}^3/\text{m}^2$. Ide o bunky pokrývajúce budovu Univerzitnej nemocnice L. Pasteura (UNLP) na Triede SNP 1, budovu teplárne, Steel Arénu, obchodné centrum Galéria (MČ Západ), veľkosklad hutníckeho materiálu v Priemyselnom obvode – juh (MČ Nad jazerom) a súbor kompaktnej zástavby v historickom jadre mesta. Je však potrebné mať na pamäti, že jednotlivé bunky rastra sú umiestnené v pravidelnej štvorcovej sieti a nerešpektujú hranice jednotlivých budov a ani nevyjadrujú priamo ich objem. Sú však dobrým indikátorom lokalít s koncentráciou veľkoobjemových budov, najmä, ak sa aplikuje nástroj fokálnych štatistík (obr. 15).

Koeficient objemu budov na obyvateľa $3D\ KB_{Ob}$ ($\text{m}^3/\text{ob.}$)

Priemerná hodnota koeficientu objemu budov na obyvateľa $3D\ KB_{Ob}$ pre celé záujmové územie je $352,5\text{ m}^3/\text{ob.}$ Vysoké hodnoty sú, podobne ako v prípade dvojrozmerného ukazovateľa, charakteristické skôr pre riedko obývané oblasti, resp. ide o oblasti, ktoré majú primárne iný než obytný charakter. Vysoké hodnoty vykazujú aj oblasti s prevažne nízkopodlažnou obytnou zástavbou.

Podobne, ako v prípade dvojrozmerného ukazovateľa (koeficientu zastavanosti budovami na obyvateľa KB_{Ob}), môžeme konštatovať, že vyššie hodnoty ukazovateľa (nad $400\text{ m}^3/\text{ob.}$) sú príznačné skôr pre mestské časti rurálneho typu, kým nižšie hodnoty (menej ako $300\text{ m}^3/\text{ob.}$) sú typické pre husto zaľudnené panelové sídliská. Špecifickým prípadom je historické jadro mesta, kde $3D\ KB_{Ob}$ dosahuje vysoké hodnoty, čo je však zapríčinené mimoriadne hustou zástavbou historických budov. Hodnoty $3D\ KB_{Ob}$ prezentujeme na obr. 16.

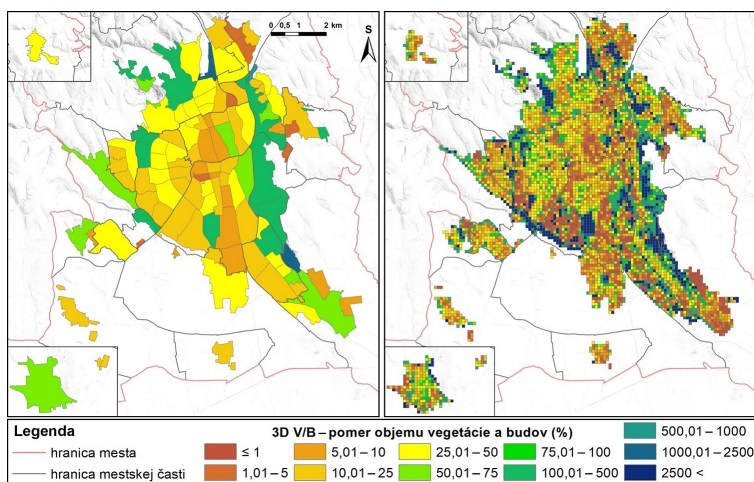


Obr. 16. Koeficient objemu budov na obyvateľa $3D\ KB_{Ob}$ v jednotlivých ZSJ

Vzájomný pomer objemu vegetácie a budov 3D V/B (%)

Pomer objemu vegetácie k objemu budov vykazuje pre intravilán mesta 38,7 %. Kým samotný pomer pôdorysných plôch vegetácie a budov V/B bol v prospech budov len nevýrazný, v prípade objemu budov je takmer 2,5-násobný, čím sa potvrdzuje význam uvažovania tretieho rozmeru vegetácie, ktorý sa cez KV nedá plnohodnotne vyjadriť.

Najvyššie hodnoty ukazovateľa dosahujú najmä záhradkárske lokality, oblasti so sukcesnou vegetáciou či oblasti so špecifickým využitím (Verejný cintorín a botanická záhrada), čo však sú lokality s minimom obyvateľov. Veľmi nízke hodnoty $3D V/B$ vykazujú najmä lokality v centre mesta, novopostavené obytné súbory, priemyselné areály, ale aj niektoré panelové sídliská. Priestorovú diferenciáciu ukazovateľa $3D V/B$ na úrovni ZSJ aj buniek rastra prezentujeme na obr. 17. Kým v prípade 2D ukazovateľa V/B vykazovali panelové sídliská hodnoty okolo priemeru, v prípade $3D V/B$ je jednoznačne vidieť výraznejšiu prevahu objemu budov nad objemom vegetácie (podpriemerné hodnoty $3D V/B$), čo je spôsobené práve veľkou výškou panelových bytoviek.



Obr. 17. Pomer objemu vegetácie a budov $3D V/B$ vyjadrený pre jednotlivé ZSJ (vľavo) a vo forme rastra s rozlíšením bunky 100×100 metrov (vpravo)

DISKUSIA

Letecké laserové skenovanie (ALS) je metóda diaľkového prieskumu zeme (DPZ), ktorá má veľký potenciál pri vyhodnocovaní kvantity a kvality zložitej štruktúry mestskej zelene (MZ). Táto technika umožňuje rýchly a efektívny zber dát s relatívne vysokou úrovňou detailu na veľkom území, a to aj v ťažko prístupných lokalitách alebo na súkromných pozemkoch, kde by bol terénny prieskum problematický. Jednou z najväčších výhod ALS oproti iným metódam DPZ je schopnosť zaznamenávať skutočnú trojrozmernú štruktúru krajiny. Bežne zaužívané prístupy umožňujú skúmať len 2D štruktúru zelene, čo môže byť v prípade miest, kde dominujú najmä ekologicky relatívne málo významné trávniky (Casalegno et al. 2017) nepostačujúce. Ani význam samotných trávnikov však nemožno úplne zanedbať. Ako uvádzajú Amani-Beni et al. (2018), zavlažované trávniky do-

kázu prispievať k zmiernovaniu mestských ostrovov tepla podobne ako malé vodné plochy, stále však nie do takej miery ako stromová vegetácia. Výskum Rahmana et al. (2020) zas ukázal, že trávniky majú pri zmiernovaní mestských ostrovov tepla stromovou vegetáciou synergický efekt, pretože stromy rastúce na trávnom povrchu vykazujú desaťnásobne väčšiu transpiráciu než stromy rastúce vo výrezoch z chodníka. Aj tieto výskumy potvrdzujú potrebu skúmať štruktúru zelene v celom jej vertikálnom profile, vďaka čomu môžeme získať omnoho podrobnejšie informácie o MZ, ktoré sú relevantné aj z ekologického hľadiska.

Spracovanie lidarových dát (mračna bodov) je však časovo náročné a vyžaduje si nielen výkonný hardvér, ale aj zapojenie kvalifikovaných osôb. Aj v našom prípade bolo nevyhnutné na dosiahnutie čo najvyššej kvality výstupných dát najprv empiricky otestovať rôzne nastavenia parametrov pri práci v softvéri LAStools. Samotný softvér má tiež viaceré obmedzenia, najmä v prípade klasifikácie bodov, pri ktorej rozlišuje len dve triedy – budovy a vegetáciu. V prípade budov pritom nedokáže klasifikovať bočné steny a v prípade vegetácie nedokáže rozlišovať rôzne triedy vegetácie (nízka, stredná a vysoká). Vo výslednej klasifikácii často bývajú ako budovy alebo vegetácia nesprávne klasifikované aj iné objekty, ktoré nemožno zaradiť ani do jednej z týchto tried. Vysoké nepresnosti vznikajú aj pri klasifikácii bodov vo výške do dvoch metrov, v ktorej sa vyskytujú rôznorodé objekty, napr. osobné vozidlá či drobná infraštruktúra. Aj preto bola na účely tohto príspevku klasifikácia vykonaná až od výšky dvoch metrov nad terénom. Najčastejšie boli ako vegetácia chybné klasifikované žeriavy, rohy budov, priemyselné zariadenia, stožiare, komíny a veže a ako budovy boli často nesprávne klasifikované husté kroviny, železničné vagóny, mosty alebo stromy v tesnej blízkosti chat a rodinných domov.

V mestskom prostredí sme dosiahli celkovú presnosť klasifikácie na úrovni 80 – 90 %, ale v silne industrializovaných lokalitách (s množstvom komínov či dopravníkov) len na úrovni asi 70 %. Najmä klasifikácia vegetácie v priemyselných areáloch vykazovala vysokú chybovosť, a preto v silne industrializovaných lokalitách neodporúčame tento nástroj používať na klasifikáciu dát a následné hodnotenie štruktúry krajiny pokrývky. Možným riešením by bola dodatočná manuálna klasifikácia, prípadne individuálne nastavenie parametrov klasifikácie pre jednotlivé časti územia v závislosti od hustoty vstupných dát, na čo ale pri našom výskume nebol priestor.

Ako problematické pri výpočte objemu budov z ich digitálneho modelu výšok (DBH) vnímame budovy rozširujúce sa do výšky (napr. vodojemy), keďže v ich prípade sa za objem budovy považuje aj prázdny priestor pod nimi. Analogicky to platí aj v prípade rôznych otvorených prístreškov, nástupísk a podobne, ktoré sú kryté len z vrchnej strany. Vplyv prítomnosti takýchto konštrukcií na celkový objem budov v uvažovaných priestorových jednotkách je však podľa nášho prehľadu takmer zanedbateľný a uvedenú metódu výpočtu objemu budov považujeme za veľmi efektívnu.

V odbornej komunite je viac diskutovaná problematika výpočtu objemu vegetácie. Napriek tomu, že existuje viacero metodických postupov pre výpočet (Fernández-Sarría et al. 2013, Zhu et al. 2021 a Zhou et al. 2022), nemožno s určitosťou povedať, ktorý z nich je najpresnejší aj vzhľadom na problematickú definíciu samotného objemu vegetácie či koruny stromu vyplývajúcu z jej nepravidelného tvaru. My sme pri výpočte objemu použili CHM odvodený pit-free algoritmom (Khosravipour et al. 2014), ktorý, na rozdiel od štandardnej metódy tvorby CHM

z bodov prvého odrazu, eliminuje vznik nežiaducich lokálnych miním (lievikov) na povrchu CHM. Pit-free algoritmom tak možno získať kvalitný model aj v oblastiach s nižšou hustotou dát. Nevýhodou výpočtu objemu vegetácie z CHM je fakt, že ako objem vegetácie sa považuje aj prázdny priestor pod korunami stromov, ktorý celkový objem výrazne nadhodnocuje. Preto je nevyhnutné stanoviť približnú výšku základne korún stromov a objem počítať až od nej vyššie, čo je ale vzhľadom na rôznorodý charakter mestskej zelene netriviálna úloha. Hoci sme túto výšku v našej štúdii stanovili na 5 metrov, v prípade vysokých stromov to môže byť príliš nízka hodnota a objem ich korún môže nadhodnocovať. Naopak, v prípade nižších stromov môže byť táto hodnota nastavená príliš vysoko a objem podhodnocovať. Je však potrebné si uvedomiť, že body reprezentujúce vegetáciu v menšej výške ako 5 metrov z veľkej časti pravdepodobne reprezentujú aj sukcesnú vegetáciu na periférii mesta, ktorá nemá taký veľký ekologický a sociálny význam ako upravené parkové plochy v centre mesta s vysokou stromovou vegetáciou.

Čoraz viac sa preto pri výpočte objemu vegetácie na väčších územiach používa metóda voxelov, ktorá dokáže lepšie zohľadniť štruktúru vegetácie, ale je veľmi citlivá na nastavenie vhodnej veľkosti hrany voxela (Zięba-Kulawik et al. 2021, Zhang et al. 2022 a Zhou et al. 2022). Presnejšie výsledky by tiež bolo možné dosiahnuť individuálnym prístupom (segmentáciou jednotlivých drevín), prípadne využitím doplnkových metód terénneho prieskumu, na čo však v tomto príspevku nebol priestor.

Hodnotenie priestorovej štruktúry MZ z lidarových dát a interpretácia výsledkov formou 3D ukazovateľov, ktoré doposiaľ neboli pre mestá na území Slovenska použité, sú hlavným prínosom nášho príspevku. Vzhľadom na chýbajúce štandardy, normatívy a nedostatok literatúry sme však hodnoty 3D ukazovateľov nemohli porovnať s ostatnými lokalitami na Slovensku, prípadne v zahraničí, a zhodnotiť, či je v meste dostatočný objem zelene. Preto sme prezentovali výsledky aj formou bežne používaných 2D ukazovateľov. Ak by sme uvažovali staršie normatívy zelene v sídlach (Supuka 1987), podľa ktorých by na jedného obyvateľa malo pripadať aspoň 50 až 75 m² plôch MZ (ukazovateľ KV_{ob}), mesto ako celok s hodnotou 37 m²/ob. by túto podmienku nespĺňalo. Normatívu by vyhovelo 12 mestských častí a zo základných sídelných jednotiek s aspoň 500 obyvateľmi by vyhovelo len 19 ZSJ a ďalších 60 by nevyhovelo. Pripomíname však, že v našom príspevku sme uvažovali len plochy vegetácie s výškou aspoň 2 metre bez trávnatých porastov a krovin, ktoré sú v normatívach zahrnuté tiež. Už teraz však môžeme identifikovať lokality v meste, ktoré sa vyznačujú výrazne horšími 3D ukazovateľmi kvantity zelene v porovnaní s ostatnými časťami mesta. Vyhodnocovanie trojrozmiernej štruktúry zelene a stanovenie objemových normatívov preto považujeme za výzvu, ktorou by sa mali začať authority seriózne zaoberať v súvislosti s klimatickou krízou.

Uvedomujeme si však, že formálne, technologicky aj finančne náročná príprava leteckých misií a následné komplikované spracovanie dát stále bránia plnému uplatneniu ALS na účely pravidelného monitoringu MZ, kvôli čomu v praxi stále dominuje 2D prístup a svoje opodstatnenie si stále nachádzajú aj metódy terénneho prieskumu. Druhý cyklus leteckého laserového skenovania Slovenska s vyššou kvalitou dát a s už povinnou klasifikáciou mračna bodov do desiatich tried či využívanie metód hlbokého strojového učenia umožňujúce efektívnejšie spracovanie dát však už možno v dohľadnom čase povedú k zmene paradigmy vo výskume a manažmente MZ.

Za dôležité považujeme spomenúť aj potrebu vlastného vymedzenia záujmového územia, keďže oficiálne vymedzené územie intravilánu je už neaktuálne a nerešpektuje dynamické zmeny v štruktúre mesta, najmä v súvislosti s rozrastaním sa obytných zón. Vlastné vymedzenie záujmového územia malo vplyv aj na absolútne hodnoty plôch a objemov vegetácie a budov, ako aj na hodnoty ich relatívnych ukazovateľov. Aby sa zabezpečila možnosť vyhodnocovania zmien trojrozmernej štruktúry vegetácie a budov v meste v prípadných ďalších misiách ALS a aby sa predišlo prípadným nezrovnalostiam, bolo by vhodné aktualizovať oficiálnu hranicu intravilánu a vektorovú vrstvu poskytnúť verejnosti. Ideálne by bolo tiež interpretovať výsledky vo vzťahu k počtu obyvateľov pre jednotlivé adresné body v rastrovej reprezentácii a nielen pre ZSJ. Najmä v redšie zaľudnených lokalitách by však mohol nastať problém s anonymizovaním dát, ktorú by bolo potrebné ošetriť.

ZÁVER

V predkladanom príspevku demonštrujeme využitie dát z leteckého laserového skenovania (ALS) dostupných pre územie Slovenska na analýzu 3D štruktúry stromovej mestskej zelene (MZ) v intraviláne Košíc. Z klasifikovaného mračna bodov bol odvodený model výšky vegetačnej pokrývky (CHM) a z neho vypočítaný objem vegetácie. Celkový objem vegetácie v záujmovom území je 31,12 miliónov m³, priemerný koeficient objemu vegetácie 0,56 m³/m² a koeficient objemu vegetácie na obyvateľa 136,5 m³/ob.

Výsledky interpretované ako 2D a 3D ukazovatele MZ sme spôsobom kartogramu vyjadrili pre jednotlivé základné sídelné jednotky (ZSJ) a bunky rastra s rozlíšením 100 × 100 metrov. Identifikovali sme viaceré lokality s malým objemom zelene, konkrétne historické jadro mesta, širšie centrum, panelové sídliská, ale aj novopostavené obytné súbory. Na druhej strane, popri upravených parkových plochách, Borovicovom háji či plochách špeciálnej zelene (Verejný cintorín a botanická záhrada), majú význam aj plochy sukcesnej vegetácie, ktoré však ostávajú zanedbané. Dosiahnuté výsledky môžu byť po drobných úpravách a prípadnom prevedení do podoby on-line máp využité aj miestnou samosprávou na účely efektívnejšieho manažmentu zelene v meste Košice.

Napriek novým možnostiam a výhodám leteckých lidarových dát v komplexnej analýze 3D štruktúry zelene zatiaľ stále dominujú 2D prístupy, najmä pre náročnosť zberu a spracovania lidarových dát. Budúci výskum môže stavať na využití sofistikovaných metód umelej inteligencie na presnejšiu a časovo efektívnejšiu klasifikáciu zelene podľa jednotlivých jej typov. Predpokladom bude laserové skenovanie s vysokou hustotou na detailnejšie zachytenie 3D štruktúry zelene, ktoré sa bežne dosahuje pozemným skenovaním alebo skenovanie z nízkych výšok pomocou bezpilotných lietajúcich systémov. Lidarové dáta sa tak stanú štandardom pre 3D analýzu štruktúry MZ a podobne, ako dnes existujú normatívy na plochy zelene v sídlach, stanovia sa aj na jej objem. Prezentované postupy tak umožňujú kvantifikáciu kvality životného prostredia v mestskej krajine na základe nových 3D lidarových dát voľne dostupných pre celé Slovensko. Dosiahnuté výsledky sú inovatívne pre využitie samosprávou a odbornou verejnosťou v rámci efektívneho riadenia a plánovania mestskej zelene v Košiciach, pretože v súčasnosti pri svojich územnoplánovacích procesoch vychádza mesto ešte stále len z plošného hodnotenia zelene (Dobrucká 2015). Výsledky tiež metodicky prispievajú do konceptu digitalizácie v územnom plánovaní, ktorá je jedným z hlavných cieľov novozriadeného Úradu pre územné plánovanie a výstavbu SR (ÚÚPVS SR 2024).

Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci projektu VEGA č. 1/0780/24 Kombinácia lidarových a hyperspektrálnych dát s metódami strojového učenia pre zlepšenie klasifikácie krajiny pokrývky.

LITERATÚRA

- AMANI-BENI, M., ZHANG, B., XIE, G.-D., XU, J. (2018). Impact of urban park's tree, grass and waterbody on microclimate in hot summer days: A case study of Olympic Park in Beijing, China. *Urban Forestry & Urban Greening*, 32, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2018.03.016>
- ASPRS (2019). *LAS Specification 1.4 – R15*. Bethesda, Maryland (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing).
- AURAMBOU, J.-P., SCHIAVINA, M., MELCHIORRI, M., FIORETTI, CH., GUZZO, F., VANDECASTEELE, I., PROIETTI, P., KAVALOV, B., PANELLA, F., KOUKOUFIKIS, G. (2021). *Shrinking cities*. Brusel (Európska únia).
- CASALEGNO, S., ANDERSON, K., COX, D. T. C., HANCOCK, S., GASTON, K. J. (2017). Ecological connectivity in the three-dimensional urban green volume using waveform airborne lidar. *Scientific Reports*, 7, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep45571>
- CSACHOVÁ, S., VIŠŇOVSKÝ, M. (2013). Typizácia mestských častí mesta Košice pre potreby reformy administratívneho členenia – zhodnotenie stavu a diskusii. *Acta Geographica Universitatis Comenianae*, 57, 165-193.
- DOBROVOLNÝ, P., KRAHULA, L. (2015). The spatial variability of air temperature and nocturnal urban heat island intensity in the city of Brno, Czech Republic. *Moravian Geographical Reports*, 23(3), 8-16. DOI: <https://doi.org/10.1515/mgr-2015-0013>
- DOBRUCKÁ, A. (2013). *Urbanistická štúdia Mestská zeleň Košice 2013 Časť 1: Analýzy a hodnotenie*. Nitra (Ateliér Dobrucká).
- DOBRUCKÁ, A. (2015). *Informačný systém o zeleni Košice*, [Online], Dostupné na: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> [cit.: 04-10-2024].
- EÚ (2022). *Program Copernicus: Satelitné snímky Sentinel-2B zo dňa 19.8.2022*, [Online], Dostupné na: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>. [cit.: 19-06-2023].
- FAM, D., MOSLEY, E., LOPES, A., MATHIESON, L., MORISON, J., CONNELLAN, G. (2008). *Irrigation of urban green spaces: A review of the environmental, social and economic benefits*. Darling Heights (Cooperative Research Centre for Irrigation Futures).
- FERNANDÉZ-SARRÍA, A., MARTÍNEZ, L., VELÁZQUEZ-MARTÍ, B., SAJDAK, M., ESTORNELL, J., RECIO, J. A. (2013). Different methodologies for calculating crown volumes of *Platanus hispanica* trees using terrestrial laser scanner and a comparison with classical dendrometric measurements. *Computers and Electronics in Agriculture*, 90, 176-185. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.09.017>
- FREY, J., KOVACH, K., STEMMLER, S., KOCH, B. (2018). UAV Photogrammetry of forests as a vulnerable process. A sensitivity analysis for a structure from motion RGB-image pipeline. *Remote Sensing*, 10, 912-923. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs10060912>
- GALLAY, I., OLAH, B., MURTIŇOVÁ, V., GALLAYOVÁ, Z. (2023). Quantification of the cooling effect and cooling distance of urban green spaces based on their vegetation structure and size as a basis for management tools for mitigating urban climate. *Sustainability*, 15, 3705. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15043705>
- GKÚ (2023). *Parametre pre lokality zberu údajov LLS – 1. cyklus*. Bratislava (Geodetický a kartografický ústav).
- GKÚ (2024). *Letecké laserové skenovanie*, [Online]. Dostupné na: <https://www.geoportal.sk/sk/zbis/lls/> [cit.: 04-10-2024].
- HAALAND, C., BOSCH, C. K. (2015). Challenges and strategies for urban green-space planning in cities undergoing densification: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 760-771. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.07.009>

- HOFIERKA, J., GALLAY, M., ONAČILLOVÁ, K., HOFIERKA, J. Jr (2020). Physically-based land surface temperature modelling in urban areas using a 3-D city model and multispectral satellite data. *Urban Climate*, 31, 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100566>
- CHEN, J., ZHOU, CH., LI, F. (2020). Quantifying the green view indicator for assessing urban greening quality: An analysis based on Internet-crawling street view data. *Ecological Indicators*, 113, 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106192>
- IGLHAUT, J., CABO, C., PULITI, S., PIERMATTEI, L., O'CONNOR, J., ROSETTE, J. (2018). Structure from motion photogrammetry in forestry: A review. *Current Forestry Reports*, 5, 155-168. DOI: [10.1007/s40725-019-00094-3](https://doi.org/10.1007/s40725-019-00094-3)
- ISENBURG, M. (2018). *Complete LiDAR processing pipeline: from raw flightlines to final products*, [Online]. Dostupné na: <https://rapidlasso.de/2018/07/19/complete-lidar-processing-pipeline-from-raw-flightlines-to-final-products/> [cit: 06-19-2023].
- KABISCH, N., HAASE, D. (2013). Green spaces of European cities revisited for 1990 – 2006. *Landscape and Urban Planning*, 110, 113-122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2012.10.017>
- KHOSRAVIPOUR, A., SKIDMORE, A. K., ISENBURG, M., WANG, T., HUSSIN, Y. A. (2014). Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80, 863-872. DOI: [10.14358/PERS.80.9.863](https://doi.org/10.14358/PERS.80.9.863)
- KOPECKÁ, M., SZATMÁRI, D., ROSINA, K. (2017). Analysis of urban green spaces based on Sentinel-2A: Case studies from Slovakia. *Land*, 6, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/land6020025>
- KUSENDOVÁ, D., ĎURČEK, P. (2019). Tvorba populačného rastra mesta Bratislavy priestorovou dezagregáciou. *Demografie*, 61, 222-230.
- LI, X., ZHANG, CH., LI, W., RICARD, R., MENG, Q., ZHANG, W. (2015). Assessing street-level urban greenery using Google Street View and a modified green view index. *Urban Forestry & Urban Greening*, 14, 675-685. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.06.006>
- MARANDO, F., HERIS, M. P., ZULIAN, G., UDÍAS, A., MENTASCHI, L., CHRYSOULAKIS, N., PARASTATIDIS, D., MAES, J. (2022). Urban heat island mitigation by green infrastructure in European Functional Urban Areas. *Sustainable Cities and Society*, 77, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103564>
- OSN (2019). *World urbanization prospects 2018: Highlights*. New York (United Nations Department of Economic and Social Affairs).
- RAHMAN, M. A., STRATOPOULOS, L. M. F., MOSER-REISCHL, A., ZÖLCH, T., HÄBERLE, K.-H., RÖTZER, T., PRETZSCH, H., PAULEIT, S. (2020). Traits of trees for cooling urban heat islands: A meta-analysis. *Building and Environment*, 170, 1-14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106606>
- RAPIDLASSO (2022). *LAStools README files*. Gliching (rapidlasso).
- REHÁČKOVÁ, T., PAUDITŠOVÁ, E. (2006). *Vegetácia v urbánnom prostredí*. Bratislava (Cicero).
- SHAHTAHMASSEBI, A. R., LI, CH., FAN, Y., WU, Y., LIN, Y., GAN, M., WANG, K., MALIK, A., BLACKBURN, G. A. (2021). Remote sensing of urban green spaces: A review. *Urban Forestry & Urban Greening*, 57, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2020.126946>
- SHASHUA-BAR, L., RAHMAN, M. A., MOSER-REISCHL, A., PEETERS, A., FRANCESCHI, E., PRETZSCH, H., RÖTZER, T., PAULEIT, S., WINTERS, G., GRONER, E., COHEN, S. (2023). Do urban tree hydraulics limit their transpirational cooling? A comparison between temperate and hot arid climates. *Urban Climate*, 49, 101554. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2023.101554>
- SCHMITT, M., BRÜCK, A., SCHÖNBERGER, J., STILLA, U. (2013). Potential of airborne Single-Pass millimeterwave InSAR data for individual tree recognition. In Seyfert, E., ed. 33. *Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF*. München (Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation), pp. 427-436.

- SMREČEK, R. (2013). Inventarizácia mestskej zelene z dát leteckého laserového skenovania. In Inspektor, T., Horák, J., Růžička, J., eds. *Zborník z konferencie GIS Ostrava 21. -23.1.2013*. Ostrava (VŠB, Technická univerzita Ostrava), pp. 1-6.
- STANKOVÁ, H., MATULA, D. (2017). Analýza štruktúry mestskej zelene a jej zmien v centre Bratislavy. *Geografický časopis*, 69, 145-165.
- SUPUKA, J. (1987). *Normatívy zelene a oceňovanie stromov v sídlach*. Bratislava (VEDA).
- ŠÚSR (2020). *Register priestorových jednotiek*. Bratislava (Štatistický úrad Slovenskej republiky).
- ŠÚSR (2021). *Sčítanie obyvateľov, domov a bytov*. Bratislava (Štatistický úrad Slovenskej republiky).
- ÚGKK SR, GKÚ (2022). *Klasifikované mračno bodov LOT35 Košice [dáta na vyžiadanie]*. Bratislava (Úrad geodézie, kartografie a katastra Slovenskej republiky, Geodetický a kartografický ústav).
- ÚÚPVS (2024). *Digitalizácia*. [Online]. Dostupné na: <https://stavebnnyurad.gov.sk/digitalizacia> [cit: 04-10-2024].
- VITKOVA, E. (2014). *Princíp regulácie hustoty ako cesta k udržateľnému rozvoju miest. Pripadová štúdia – územné plány vybraných sídel na Slovensku*. Bratislava (Slovenská technická univerzita, Fakulta architektúry).
- ZIEBA-KULAWIK, K., SKOCZYLAS, K., WĘŻYK, P., TELLER, J., MUSTAFA, A., OMRANI, H. (2021). Monitoring of urban forests using 3D spatial indices based on LiDAR point clouds and voxel approach. *Urban Forestry & Urban Greening*, 65, 1-21. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127324>
- ZHANG, W., HE, Z., LI, X. (2022). Voxel-based urban vegetation volume analysis with LiDAR point cloud. *Proceedings of the Fábos Conference on Landscape and Greenway Planning*, 7, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.7275/t8fk-8w94>
- ZHOU, L., LI, X., ZHANG, B., XUAN, J., GONG, Y., TAN, CH., HUANG, H., DU, H. (2022). Estimating 3D green volume and aboveground biomass of urban forest trees by UAV-Lidar. *Remote Sensing*, 14, 1-17. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs14205211>
- ZHU, Z., KLEIN, CH., NÖLKE, N. (2021). Assessing tree crown volume a review. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 94, 18-35. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpaa037>

Nikola Svetozarov, Michal Gállay

COMPARISON OF 2D AND 3D APPROACH FOR ASSESSING THE AMOUNT OF TREE VEGETATION IN THE CITY OF KOŠICE USING AIRBORNE LASER SCANNING DATA

Most municipalities, not only in Slovakia but also in Europe, rely only on area-based (2D) urban vegetation (UV) assessment for urban planning. This is also the case of the post-socialist city of Košice, the second largest city in Slovakia. In this paper, we present a new method of UV analysis in the Košice city using airborne laser scanning (ALS) point cloud data, which also allows us to evaluate the vertical structure and volume of the UV. ALS data provided by the Geodetic and Cartographic Institute (GKÚ) for research purposes are now available for the whole territory of Slovakia.

Using the LAsTools software, we classified the point cloud into vegetation and buildings and derived a digital terrain model (DTM), a digital surface model (DSM) and a canopy height model (CHM) using a pit-free algorithm (Fig. 4). We used the CHM to calculate building volume and vegetation volume (Fig. 6). In our paper, we present the results for two types of spatial units – basic settlement units (BSU, Slovak: ZSJ) and a square grid (raster) with a cell size of 100 × 100 meters. For these spatial units, we computed area (2D) indices (Figs. 8-12) and spatial (3D) indices (Figs. 13-17), which represent the added

value of our paper and highlight the need to consider the third dimension when researching the quality of urban environments and UV. We have defined the following 3D indices:

$3D\ KV$ (m^3/m^2) – the ratio of the volume of vegetation per unit area,

$3D\ KV_{Ob}$ (m^3 per capita) – the ratio of the volume of vegetation per capita,

$3D\ KB$ (m^3/m^2) – the ratio of the volume of buildings per unit area,

$3D\ KB_{Ob}$ (m^3 per capita) – the ratio of the volume of buildings per capita,

$3D\ V/B$ (%) – the ratio of the volume of vegetation to the volume of buildings.

The total volume of vegetation in the city is 31.12 million m^3 , the average coefficient of the volume of vegetation in the city is $0.56\ m^3/m^2$ and coefficient of the volume of vegetation per capita is $136.5\ m^3$ respectively.

Based on our findings, we conclude that UV is unevenly distributed in the city of Košice. The areas with the largest volume of vegetation in the city of Košice are parks (Municipal Park (Slovak: Mestský park), Park na Aničke, Komenského, Barca), the Pine Grove (Slovak: Borovicový háj) and areas of special greenery (Public Cemetery and Botanical Garden). Also, areas with successional vegetation show high volume values, but are neglected and little used by the public. The historic core of the town and the wider centre, some of the prefabricated housing estates (especially Ťahanovce housing estate), are particularly affected by the lack of vegetation.

Despite the new opportunities and advantages of ALS in the comprehensive analysis of the 3D structure of vegetation, 2D approaches still dominate, mainly due to the complexity of collecting and processing lidar data. Future research could build on the use of sophisticated artificial intelligence methods for more accurate classification of vegetation by its types. This will require dense lidar scanning for a more detailed capture of the 3D vegetation structure, which is already achieved today through ground scanning or scanning from low altitudes using unmanned aerial systems. ALS data will thus become the standard for 3D analysis of urban greenery structure, and, just as there are currently standards for the area of green spaces in settlements, standards for their volume will also be established. The presented procedures allow for the quantification of environmental quality in urban landscapes based on new 3D lidar data freely available for the entire Slovakia. They are also suitable for the automation of digitalization in spatial planning, which is one of the main goals of the newly established Office for Spatial Planning and Construction of the Slovak Republic (ÚUPVŠR 2024).



Article first received: April 2024

Article accepted: June 2024

