



# EXPERIMENTÁLNE VERIFIKAČNÉ MERANIA ZAMERANÉ NA POSÚDENIE PRESNOSTI 3D DOKUMENTÁCIE TRASOLOGICKÝCH STÔP

## EXPERIMENTAL VERIFICATION MEASUREMENTS AIMED AT ASSESSING THE ACCURACY OF THE 3D DOCUMENTATION OF FOOTWEAR TRACES

VERONIKA ADAMOVÁ, EDUARD KOLLA, LUKÁŠ SZABO

**ABSTRACT:** *The submitted article presents a partial objective of the ongoing research entitled “Investigation of the Potential of 3D Technologies in Securing and Extracting 3D Footwear Impression Traces.” This objective, also addressed within a diploma thesis, consisted of a series of experimental measurements focused on acquiring 3D models of footwear impressions created with a reference substitute shoe sole, in order to maintain repeatable conditions. The article further proposes a procedure for analysing the collected data using available software tools and for evaluating the accuracy of the applied 3D methods for documenting volumetric footwear impressions. Particular attention is devoted to the application of photogrammetry in documenting these impressions and to the subsequent extraction of their volumetric parameters along the x, y, and z axes. Such data can be especially useful for more complex biomechanical assessments, for example, when estimating physical parameters such as the perpetrator’s body weight.*

**KEYWORDS:** *Crime, footwear impressions, forensic, investigation, photogrammetry, traces, 3D imaging.*

### ÚVOD

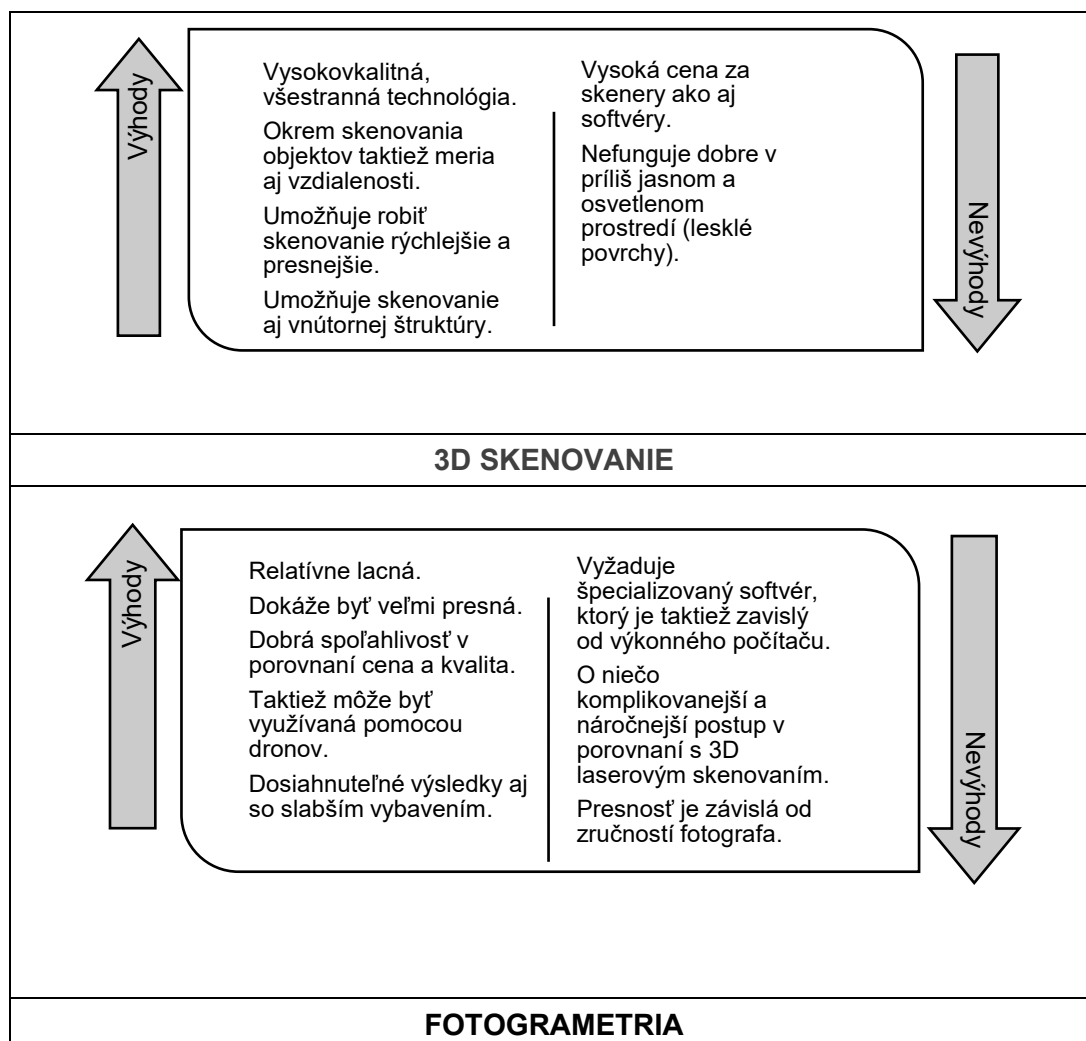
Trasologické stopy obuvi predstavujú jeden z najvýznamnejších druhov kriminalisticky relevantných stôp, ktoré umožňujú skupinovú, a v optimálnych prípadoch aj individuálnu identifikáciu. V domácej kriminalistickej praxi sa tieto stopy štandardne zaisťujú tradičnými metódami. Narastá však dôraz na zavádzanie technológií 3D dokumentácie, ako sú 3D laserové skenovanie, fotogrametria a 3D tlač. Tieto techniky majú potenciál významne zvýšiť presnosť dokumentácie a umožniť detailnú analýzu objemových parametrov stôp v osiach x, y a z. Predkladaný článok predstavuje časť aktuálne prebiehajúceho výskumu, ktorý reaguje na identifikovanú absenciu komplexnej a systematickej verifikácie presnosti týchto postupov. Ďalej sa sústreďuje na zvýšenie ich vedeckej spoľahlivosti a praktickej využiteľnosti v kriminalistickej expertíznej činnosti. Primárnym vedeckým cieľom výskumu je preskúmanie presnosti a relevancie 3D dokumentácie trasologických stôp. Sekundárnym vedeckým cieľom je hodnotenie mechanických vlastností vybraných druhov podložia, v ktorých sa trasologické stopy vyskytujú. Dôraz sa kladie na reálne podmienky páchania trestnej činnosti. Výsledkom má byť využitie získaných údajov na biomechanické vyťažovanie parametrov objemových stôp. Napĺňanie týchto cieľov predpokladá realizáciu viacerých čiastkových úloh, ako sú napr.:

- Navrhnutie a zhotovenie parametrického substitučného 3D modelu podrážky obuvi (referenčnej podrážky).
- Konštrukcia zariadenia na tvorbu referenčných trasologických stôp pomocou referenčnej podrážky za účelom overovania presnosti 3D dokumentácie.
- Experimentálne vytváranie a 3D dokumentovanie týchto referenčných stôp.
- Analýza získaných dát prostredníctvom matematicko-štatistických metód s cieľom posúdiť presnosť aplikovaných 3D dokumentačných postupov.
- Skúmanie možností praktickej a užívateľsky efektívnej aplikácie 3D technológií v kriminalisticko-technickej a expertíznej praxi.
- Doplnenie zariadenia o tzv. „impaktor“ – vhodnú nárazovú plochu pre zisťovanie mechanických vlastností podložia.
- Experimentálne určovanie tuhosti testovaných podložných materiálov.
- Vyhodnotenie možností využitia získaných priestorových parametrov v osiach x, y a z na potreby kriminalistickej identifikácie a expertíz a ďalšie.

V preloženom článku bude pozornosť zameraná na preskúmanie, do akej miery sú metódy 3D snímkovania presné pri zaisťovaní objemových trasologických stôp. Taktiež, či sú aplikovateľné do kriminalistickej a forenznej praxe. Ďalej budú načrtnuté možnosti vyťažovania objemových vlastností 3D stopy obuvi pre účely bližšej identifikácie osoby, ktorá na mieste činu stopu zanechala. Výsledky uvedené v tomto článku súčasne vychádzajú z diplomovej práce riešenej na tému „Experimentálne verifikačné merania zamerané na posúdenie presnosti 3D dokumentácie trasologických stôp“ (Kadnár, 2025).

## 1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Fotogrametria a 3D skenovanie prešli významným technologickým vývojom, vďaka ktorému, dnes, umožňujú rýchlejšie, presnejšie a spoľahlivejšie forenzne skúmania či dokumentáciu miest činu. Tieto metódy za pár minút zachytia milióny dátových bodov, čím šetria čas a vytvárajú detailný 360° obraz miesta činu. To umožňuje znížiť riziko chýb a zvyšuje efektívnosť. Napríklad, vo forenznej patológii, antropológii a odontológii 3D skenery pomáhajú preskúmať kostrové pozostatky a určiť čas smrti, príčinu úmrtia, charakter zranení či identitu obetí. Výhodou je taktiež ich archivácia. 3D modely dôkazov možno uložiť k spisu a využiť v trestnom konaní na znalecké posudky či vizualizáciu demonštratívneho zobrazenia priebehu relevantného deja, napr. dopravnej nehody. Toto všetko umožňuje lepšie pochopenie prípadu aj osobám, ktoré sa vyšetrovania nezúčastnili, respektíve neboli priamo prítomné pri obhliadke miesta činu (Gregor a kol., 2016, McMillion, 2025).



Obrázok 1 Výhody a nevýhody techník 3D skenovania a fotogrametrie (Kadnár 2025)

V kontexte trasologických stôp (Straus, 2017, Kozár, 2020, Rak, 2008, Porada a kol., 2019 a ďalší) a ich spôsobe zaistovania, najmä stôp obuvi, je možné stále hovoriť o zaistovaní sadrovým odlievaním. Takýto prístup môže stopu čiastočne poškodiť a jeho aplikácia je čiastočne obmedzená vlastnosťami podložia. V prípade stôp v snehu alebo piesku je odlievanie ešte náročnejšie. Metódy 3D snímkovania umožňujú výrazne rýchlejšie, bezkontaktné a nedeštruktívne zaistenie stôp, pričom zachovávajú pôvodnú morfológiu. Pri 3D skenovaní nezáleží na type podložia, postup je rovnaký a s minimálnymi odchýlkami umožňuje vo vhodnom softvéri vytvoriť detailný 3D model vhodný na expertízne skúmanie a analýzu a prakticky aj na prípadnú 3D tlač (Kriminalistickí technici, 2025, Kadnár, 2025, Adamová, 2022). Súhrn výhod a nevýhod uvedených metód dokumentácie sú uvedené na Obrázku 1.

Výskumy z posledných rokov potvrdzujú rastúci význam 3D dokumentácie (nie len trasologických stôp obuvi) a poukazujú na jej praktické výhody oproti tradičným metódam.

- V oblasti dokumentácie dopravných nehôd spoločnosť 3DSurvey uskutočnila experiment, pri ktorom bol použitý dron DJI Phantom 4 PRO na fotogrametrické snímkovanie plochy s rozmermi 50 × 50 m. V priebehu 15 minút bolo vyhotovených 120 snímok, z ktorých vznikol 3D model s reálnymi mierami. Následné spracovanie dát trvalo tri hodiny a prinieslo úsporu až 79 % obstarávacích nákladov v porovnaní s tradičnými metódami (Photogrammetry as a tool..., 2025)
- Žuralis, Levulyte a Skolovskij sa vo svojom výskume zamerali na dokumentáciu stôp pneumatík a ich odklonu, ktoré zohrávajú kľúčovú úlohu pri určovaní trajektórie pohybu vozidla a vypracovaní znaleckých posudkov. Výsledky potvrdili, že aj malé odchýlky v dokumentácii môžu výrazne ovplyvniť závery expertíz (Žuralis a kol., 2025).
- Tóth a kol. využili fotogrametriu ako nástroj pre dištančné vzdelávanie študentov foreznej patológie počas pandémie COVID-19. Proces snímania trval 3–4 minúty a nebolo potrebné prerušovať pitvu. Výsledné 3D modely vznikli aj pomocou bežného smartfónu, čo potvrdilo dostupnosť tejto metódy. Dotazník potvrdil vysokú spokojnosť, pričom 100 % študentov odporúčalo využitie fotogrametrie ako doplnok tradičného vzdelávania (Tóth, 2021).
- Massini a kol. vytvorili 3D vizualizácie umelo vytvorených poranení, ktoré následne hodnotili forezní patológovia. Výskum ukázal, že fotogrametria má vysokú variabilitu a je vhodná ako doplnková metóda dokumentácie (Massini a kol., 2021).
- Bašić, Perković a Marenić porovnávali klasické a moderné 3D metódy zaistovania identifikačných znakov trasologických stôp. Zistili, že tradičné metódy sú lacnejšie a rýchlejšie, zatiaľ čo 3D technológie sú menej deštruktívne, umožňujú opakované analýzy a detailnejšie spracovanie, hoci modelovanie v 3D tlačiarňach trvalo približne 30 hodín. Kvalita výsledku závisela od kvality použitých zariadení (Bašić a kol., 2021).
- Larsen a Bennett hodnotili spoľahlivosť fotogrametrie pri zaistovaní stôp obuvi. Ich experimenty potvrdili, že rozdiely medzi 3D modelmi a originálmi sú minimálne. Fotogrametria sa ukázala ako rýchlejšia než sadrové odlievanie a bola úspešne realizovaná pomocou profesionálneho fotoaparátu aj smartfónu. Čím viac záberov z rôznych uhlov sa vytvorilo, tým kvalitnejší bol výsledok (Larsen a kol., 2020).
- Montgomerie, Raneri a Maynard testovali presnosť 3D skenovania pomocou Artec Spider pri dokumentácii najčastejších typov obuvi na miestach činu. Výsledné 3D modely vykazovali odchýlku len v desatinách milimetra (Montgomerie a kol., 2020).
- Crabbe a kol. prezentovali mobilný prototyp 3D skenera s vysokým rozlíšením, ktorý na mieste činu okamžite generoval 3D modely a umožňoval kontrolu kvality ešte pred odchodom z miesta. Systém dopĺňal softvér R3 Forensic na vyhodnocovanie markantov stôp pre skupinovú alebo individuálnu identifikáciu (Crabbe a kol., 2015).
- Thoma, Häring a Leismann analyzovali štatistiky z regiónu Zeeland, kde až 22,91 % zaistených stôp tvorili trasologické stopy. Ich porovnanie tradičných a moderných metód zaistovania ukázalo, že 3D skenovanie je rýchlejšie, nedeštruktívne a používateľsky jednoduchšie (Crabbe a kol., 2014).

Z uvedených výskumov je zrejmé, že 3D technológie predstavujú významný prínos pri dokumentácii trasologických stôp, a to najmä v presnosti, rýchlosti a možnosti opakovaného vyhodnocovania, čím dopĺňajú a v niektorých aspektoch prekonávajú klasické postupy. Cieľom predloženého článku je publikovanie čiastkových výstupov dosiahnutých v rámci riešených projektov. Pozornosť je zameraná na aplikáciu vybranej 3D snímkovacej techniky, v tomto prípade na fotogrametrickú dokumentáciu

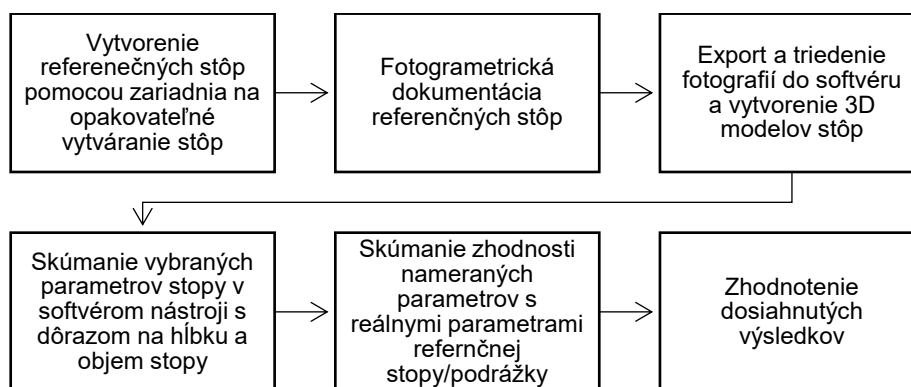
trasologickej stopy. Pre potreby experimentu bola vytvorená referenčná stopa do pieskového podložia pomocou zariadenia na opakovateľné vytváranie stôp. Stopa bola následne zadokumentovaná prostredníctvom série fotografií. Fotografie slúžili ako podklad pre spracovanie modelu stopy, ktorý bol ďalej predmetom skúmania. Skúmanie objemovej trasologickej stopy bolo v tomto štádiu obmedzené len na skúmanie vybraných parametrov, prioritne na skúmanie hĺbkového parametra stopy. Dôvodom tohto skúmania je predpoklad, že objem stopy, a teda hĺbka v akej je stopa vo vybranom podloží vytvorená, budú predurčovať parameter páchatel'a, ktorý stopu na mieste činu zanechal. Konkrétne jeho telesnú hmotnosť. Postup realizácie experimentu a použité pomôcky budú popísané v nasledujúcej kapitole.

## 2. POUŽITÉ POMÔCKY A METODIKA PRÁCE

Na dosiahnutie stanoveného cieľa, ktorým bolo **experimentálne verifikačné meranie zamerané na:**

- aplikáciu 3D dokumentácie objemovej stopy obuvi pomocou fotogrametrie a
- skúmanie vybraného parametra stopy (hĺbky) pomocou využitia softvérových nástrojov,

bolo nevyhnutné spracovať návrh experimentu (Obrázok 2) a zabezpečiť materiálne a softvérové pomôcky a vybavenie (podkap. 2.1). Podmienky realizácie experimentu sú bližšie rozpracované v podkap. 2.2.



Obrázok 2 Plánované základné kroky experimentu s ohľadom na vytýčený cieľ

### 2.1 Materiálne a softvérové zabezpečenie

V rámci materiálového zabezpečenia bolo potrebné pripraviť nasledujúce technické vybavenie a pomôcky. Na snímanie/ fotogrametrickú dokumentáciu stôp bol použitý digitálny fotoaparát **Sony Alpha 7 IV ILCE – 7 M4K** s 33 Mpx full – frame obrazovým snímačom a s **objektívom FE 28–70 mm f/3.5–5.6 OSS**, ktorý zabezpečil detailné a farebne verné zábery pre tvorbu 3D modelov. Ohnisková vzdialenosť fotoaparátu je 28-70mm. Objektív disponuje automatickým zaostrovaním pomocou motorčeku AF. Objektív je kompaktný s hmotnosťou 295 g.



Obrázok 3 Zľava doprava: Sony Alpha 7 IV ILCE – 7 M4K, objektív FE 28–70 mm, pamäťová karta zn. Samsung 128 GB Pro Ultimate, filter UV SMC L395 55mm (Kadnár, 2025)

Ďalej boli použité: **pamäťová karta zn. Samsung 128 GB Pro Ultimate** spolu s SD adaptérom pre micro SD karty a **filter UV SMC L395 55mm**, ktorý slúži na redukciu zbytočných odrazov a zamedzuje priepustnosť UV svetla pod 395 nm (Kadnár, 2025). Fotoaparát spolu s príslušenstvom je zobrazený na Obrázku 3.

Na zabezpečenie stabilných a konštantných svetelných podmienok počas celej doby dokumentácie boli použité **2 svetlomety s LED svetlami zn. Godox Litemons LA200D**. Na meranie úrovne intenzity osvetlenia bol použitý **luxmeter zn. Voltcraft LX-1108**. Na experimentálne overenie presnosti 3D dokumentácie bolo využité zariadenie, ktoré umožňuje reprodukovateľne vytvárať referenčné trasologické stopy v podloží. Pozostáva z konštrukcie, piestu so senzorom sily napojeným na silomer, nádoby s pieskom, dosky so stopou a diaľkového ovládania. Princíp činnosti spočíva v kontrolovanom spúšťaní piestu s modelom podrážky do podložia, pričom po dosiahnutí stanovenej sily sa piest automaticky zastaví a následne zdvihne späť. Tento postup zaručuje presné a opakovateľné vytvorenie stopy pre účely verifikácie. Vzhľadom na prebiehajúci výskum tohto zariadenia, nebudú uvádzané bližšie informácie. **Referenčná podrážka obuvi** na vytváranie trasologických stôp bola vyrobená pomocou 3D tlačne. Podrážka bola vytvorená z materiálu **TPU 95A od zn. SUNLU**. Zjednodušený model obuvi predstavuje topánky zn. **Nike Air Force 1**. Ide o jednu z najznámejších typov obuvi (tenisiek). Veľkosť referenčnej podrážky je **40 EU**, čo predstavuje **dĺžku obuvi 27 cm**, **šírku podrážky je 9,6 cm** a **hĺbka podrážky je 1,5 cm**. 3D model podrážky je umiestnený zospodu drevenej dosky, medzi ním a doskou je **3 cm vrstva podstavy, ktorá je z materiálu PLA**. Bližšie informácie o vytváraní referenčnej podrážky obuvi je uvedené v diplomovej práci (Žiak, 2025). Pri experimente boli ďalej použité: **kriminalistické pravítko a vlicovacie terčiky**, ktoré slúžia ako záchytné body pre softvér Agisoft Metashape. Vďaka nim softvér dokáže lepšie zmerať vzdialenosti medzi jednotlivými bodmi. Pri experimente boli tieto terče umiestnené do tvaru trojuholníka (Kadnár, 2025). Uvedené pomôcky sú zobrazené na Obrázku 4.



Obrázok 4 Zľava doprava: Svetlomet s LED svetlami zn. Godox Litemons LA200D, luxmeter zn. Voltcraft LX-1108, referenčná podrážka obuvi, kriminalistické pravítko a vlicovací terč (Kadnár, 2025)

Fotografie boli spracované v softvéri **Agisoft Metashape** Professional. Ide o nástroj určený na fotogrametrické spracovanie digitálnych snímok a generovanie 3D modelov. Uplatňuje sa v oblastiach, ako sú medicína, biológia, archeológia či forenzné vedy. V tejto diplomovej práci bola použitá verzia Professional, ktorá oproti základnej verzii poskytuje rozšírené funkcie vrátane možnosti určenia mierky modelu pomocou referenčných terčov (targetov). Experiment prebiehal s 30-dňovou skúšobnou licenciou tohto softvéru. Všetky fotografie a vyhodnocovacia práca bola vykonávaná prostredníctvom **počítača iMac**. Pre potreby následného porovnávania modelov a preskúmania presnosti a hĺbky modelov bol použitý voľne dostupný program „**CloudCompare**“ (Kadnár, 2025).

## 2.2 Metodický postup

Experimentálna dokumentácia trasologických stôp sa uskutočnila **25. 4. 2025 v čase od 10:30 do 18:00 hod.** v priestoroch Fakulty bezpečnostného inžinierstva Žilinskej univerzity v Žiline. V miestnosti bola

**priemerná teplota 23 °C a vlhkosť vzduchu cca 44,5 %**. Podložie, do ktorého bola stopa výtvarná bol **piesok**, ktorý pochádzal z lomu **Polanka nad Odrou, jeho vlhkosť bola 0,387 %** a bol uložený v **plastovej nádobe s rozmermi 56 × 39 × 20 cm**, zhutnený do výšky približne 20 cm. Počas experimentu sa menili **tri rôzne indexy uľahnutosti a tri rôzne hmotnosti piesku**, pre každý variant bola vytvorená a dokumentovaná samostatná trasologická stopa (Kadnár, 2025). Viac o podmienkach podložia, do ktorého bola stopa vytváraná je uvedené v diplomovej práci (Ondrejčíková, 2025). Na začiatku sa vyskytli určité technické obmedzenia kvôli výške piestu a obmedzenému priestoru, čo zapríčinilo, že nebolo možné fotiť priamo nad stopou so statívom a nebolo možné plnohodnotne fotodokumentovať zo všetkých strán (Kadnár, 2025).

**Meranie 1:** pri stope bola nameraná intenzita osvetlenia **2595 luxov**. Použité nastavenia fotoaparátu boli: manuálny režim, ISO 100, clona F6,3 a expozičný čas 1/40 s. V prvej fáze bolo v nádobe **68,28 kg** piesku s **indexom uľahnutosti 0,15**. Počas experimentu vzniklo 10 referenčných stôp (10 pokusov), pričom na dokumentáciu bola vybraná až posledná, aby sa minimalizovalo riziko jej poškodenia. Stopa č. 1 bola vytvorená pri sile **742,5 N** a zadokumentovaná kolmo na jej os s kriminalistickým pravítkom. Následne bola stopa nafotená z rôznych uhlov a vzdialeností (Obrázok 5), celkovo vzniklo **110 fotografií**, ktoré boli hneď zálohované na USB kľúč, aby sa predišlo strate dát. **Meranie 2:** po ukončení prvej fázy experimentu (Meranie 1) bol do nádoby dosypaný piesok a zhutnený na **index uľahnutosti 0,65**. Celková hmotnosť piesku tak dosiahla **75,49 kg**, pričom výška vrstvy ostala 20 cm. Pri druhom meraní dosiahla priemerná sila poslednej stopy hodnotu **750 N**. Nameraná intenzita osvetlenia pri stope bola **2888 luxov**. Nastavenia fotoaparátu zostali nezmenené. Dokumentácia prebiehala rovnakým postupom (Obrázok 5) a celkovo vzniklo **98 fotografií**. **Meranie 3:** prebiehalo rovnakým spôsobom ako predchádzajúce. Po ukončení druhej fázy bol do nádoby opäť dosypaný piesok a zhutnený na **index uľahnutosti 0,85**, čím jeho celková hmotnosť dosiahla hmotnosť **78,82 kg**. Priemerná sila pri poslednej stope bola **691,25 N** a nameraná intenzita osvetlenia **2899 luxov**. Nastavenia fotoaparátu zostali nezmenené. Po vytvorení stopy bola stopa zdokumentovaná (Obrázok 5), pričom vzniklo **95 fotografií** (Kadnár, 2025)



Obrázok 5 Dokumentácia priebehu fotenia a príklad stopy vytvorenej vo vybranom podloží (Kadnár, 2025)

Po ukončení dokumentácie boli do softvéru Agisoft Metashape nahraté len ostré fotografie, pretože rozmazané zábery by mohli spomaliť spracovanie alebo znížiť kvalitu výsledných 3D modelov stôp. Pre každú stopu bol vytvorený samostatný súbor („chunk“) obsahujúci **80–90 fotografií**.

#### **Pracovné kroky:**

- Najskôr boli vyhledané a označené terčičky („targety“), ktoré slúžia na určenie mierky modelu. Keďže softvér nedokáže automaticky rozpoznať všetky tri terčičky na každej snímke, bolo nutné ich doplniť manuálne. Pre kontrolu presnosti boli navyše pridané dva referenčné body (PR 1 a PR 2) umiestnené na kriminalistickom pravítku vo vzájomnej vzdialenosti 15 cm, aby sa predišlo chybe v mierke (Obrázok 6).
- V ďalšom kroku bolo spustené zarovnanie fotografií („Align photos“) s nastavením presnosti na „high“, limitom kľúčových bodov 40 000 a tie point limit 4000. Po vytvorení mračna bodov bola

použitá funkcia Cube, ktorou sa zúžil výpočtový priestor len na oblasť stopy, čím sa odľahčil procesor a urýchlil ďalší postup (Obrázok 6).

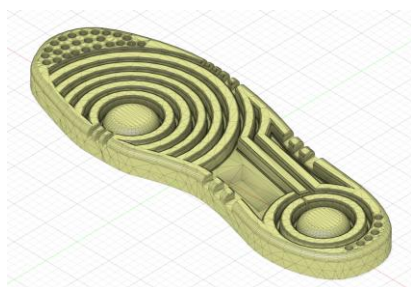
- Následne bolo vygenerované husté mračno bodov („Build point cloud“) s kvalitou „medium“, aby sa dosiahla rovnováha medzi detailnosťou a časom spracovania (Obrázok 6).
- Potom bol vytvorený samotný 3D model („Build model“) taktiež na strednej kvalite, pretože vyššie nastavenia by vyžadovali niekoľko desiatok hodín výpočtového času (základný model na Obrázku 6 stred). V poslednom kroku bola pridaná textúra a detaily („Build texture“), čím vznikol finálny 3D model viditeľný na Obrázok 6 (Kadnár, 2025).



Obrázok 6 Výsledné 3D modely zobrazené v programe Agisoft Metashape (Kadnár, 2025)

### 3. VÝSLEDKY EXPERIMENTU

Pre potreby experimentálneho skúmania, vyťažovania a overovania presnosti 3D modelov stôp obuvi bol vytvorený 3D model referenčnej podrážky v softvéri Autodesk Fusion (Obrázok 7). Tento model slúžil ako substitučná podrážka obuvi pre účely vedeckého skúmania. Hodnotenú boli tieto kľúčové parametre: dĺžka stopy, šírka stopy, hĺbka stopy a rozmery vybraných charakteristických markantov (Kadnár, 2025).



**Dĺžka stopy:**

27,0 cm

**Šírka stopy:**

9,6 cm

**Priemer malého kruhu:**

1,0 cm

**Priemer veľkého kruhu:**

3,7 cm

**Veľkosť rýh:**

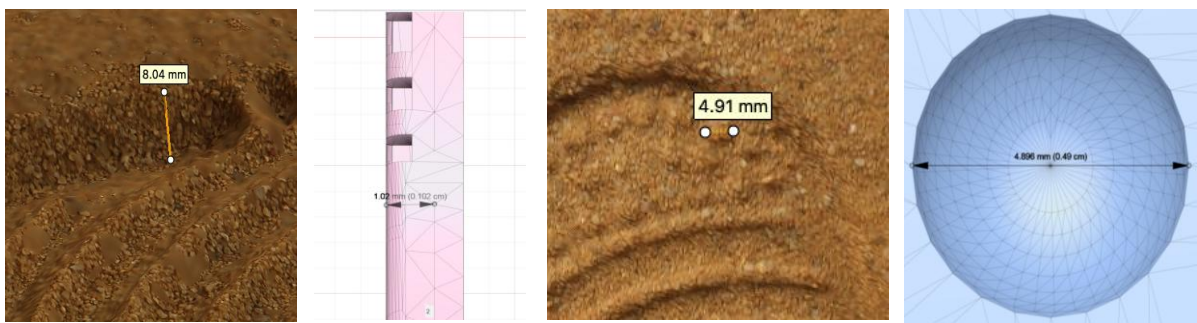
5,5 cm

Obrázok 7 3D model substitučnej podrážky obuvi pre vedecko-výskumné účely (Kadnár, 2025)

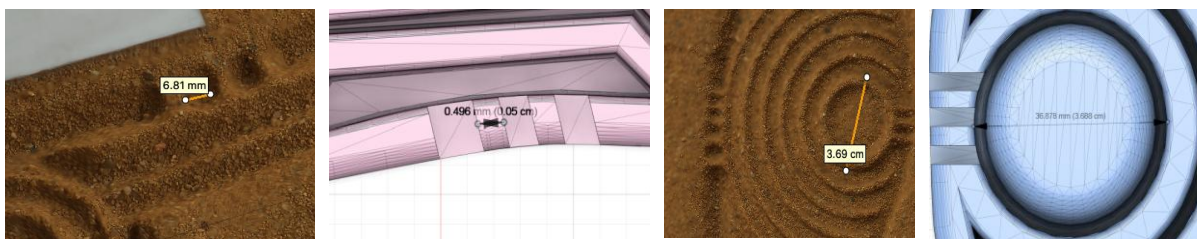
Rozmery (vybrané parametre) referenčného modelu podrážky sú uvedené na Obrázku 8. Údaje špecifických markantov sú zapísané v centimetroch. Experimentálne stopy vznikli pri rôznych úrovniach zaťaženia a v podlahách s rozdielnou mierou zhutnenia. Hĺbka stôp bola zisťovaná manuálnym meraním, čo umožnilo priamo porovnať hodnoty získané fotogrametriou s reálnym meraním. Všetky výsledky boli zaokrúhľované na jedno desiatinné miesto. V prvej fáze porovnania sa hodnotili základné rozmery stopy – dĺžka, šírka a hĺbka, pričom výsledky sú zobrazené na Obrázok 8 až Obrázok 10.



Obrázok 8 Komparácia dĺžky (vľavo) a šírky (vpravo) 3D modelu stopy s 3D substitučnou podrážkou (Kadnár, 2025)



Obrázok 9 Komparácia hĺbky (vľavo) a priemeru guľčiek (vpravo) 3D modelu stopy s 3D substitučnou podrážkou (Kadnár, 2025)

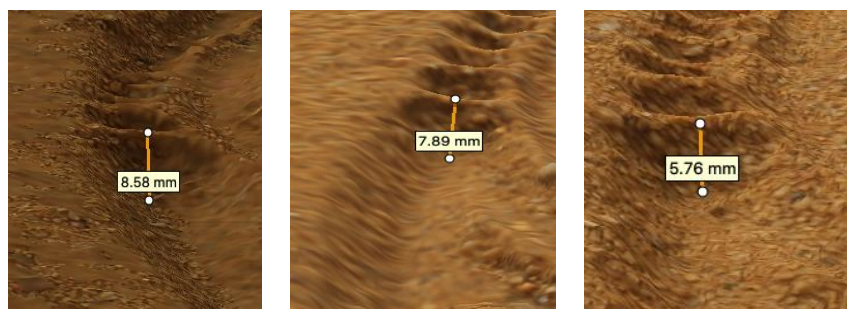


Obrázok 10 Komparácia rýh (vľavo) a priemeru veľkých kruhov (vpravo) 3D modelu stopy s 3D substitučnou podrážkou (Kadnár, 2025)

Z výsledkov vyplýva, že odchýlka medzi fotogrametrickými modelmi a referenčnou stopou sa pohybovala maximálne do 2 mm. Je však potrebné zohľadniť, že pri otláčení podrážky do piesku prirodzene dochádza k miernemu rozšíreniu stopy v dôsledku deformácie podložia (Kadnár, 2025).

### 3.1 Porovnanie hĺbok 3D modelov – manuálne meranie

V predchádzajúcej časti boli porovnávané základné rozmery stopy č. 1 s parametrami 3D modelu substitučnej podrážky. V tejto časti je pozornosť zameraná najmä na **hĺbku stopy** (bližšie zdôvodnenie v kap. 1). Tá je stanovená dvoma metódami: manuálnym meraním pomocou kriminalistického pravítka a digitálnou analýzou 3D modelu stopy. Na **Obrázok 11 (vľavo)** je zaznamenaná maximálna **hĺbka stopy č. 1 8,5 mm**, pričom stopa vznikla pôsobením **sily 742,5 N**. **Ručné meranie v tom istom mieste určilo priemernú hĺbku na úrovni 8 mm**. Na **Obrázok 11 (stred)** je znázornená **stopa č. 2**, vytvorená pôsobením **sily 750 N**. **Priemerná nameraná hĺbka tejto stopy č. 2 dosiahla 7 mm**. Na **Obrázok 11 (napravo)** je zobrazená **stopa č. 3**, vytvorená pri **sile 691,25 N**. Ručné meranie preukázalo hĺbku približne 4 mm, zatiaľ čo 3D model vykázal hĺbku 5,76 mm (Kadnár, 2025).



Obrázok 11 Zľava doprava: hĺbka stopy č. 1 zmeraná v 3D modeli stopy, hĺbka stopy č. 2 zmeraná v 3D modeli stopy, hĺbka stopy č. 3 zmeraná v 3D modeli stopy (Kadnár, 2025)

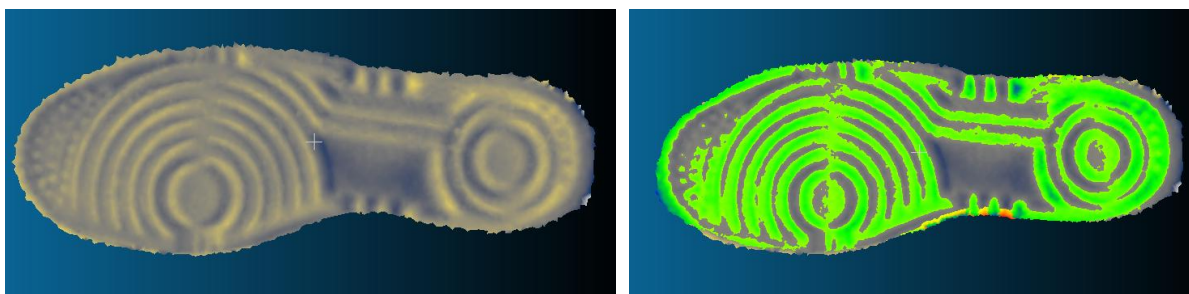
V nasledujúcej tabuľke (Tabuľka 1) je uvedený sumár meraní 1. až 3. s uvedením hĺbky nameranej pri manuálnom meraní hĺbky stopy v piesku a hĺbky nameranej v 3D modeli stop v programe Agisoft Metashape. Rozdiely (odchýlky) v nameranom parametri je uvedený v poslednom stĺpci Tabuľky 1.

Meranie	Index uľahnutosti piesku	Sila (N)	Manuálne meranie hĺbky stopy v piesku (mm)	Softvérové meranie hĺbky 3D modelu stopy (mm)	Rozdiel (mm)
1.	0,15	742,50	8,00	8,58	0,58
2.	0,65	750,00	7,00	7,89	0,89
3.	0,85	691,25	4,00	5,76	1,76

Tabuľka 1 Prehľad výsledkov merania

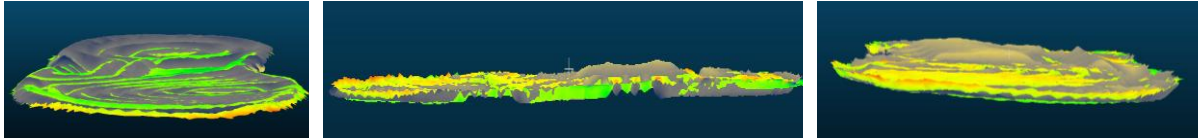
### 3.2 Porovnanie hĺbok 3D modelov – pomocou softvéru

V rámci tejto podkapitoly bola pozornosť zameraná na komparáciu hĺbok 3D modelov stôp (boli vybrané stopy vzniknuté pri meraní 2 a 3). Na porovnanie hĺbok stôp z meraní č. 2 a 3 boli modely najprv orezané v softvéri Agisoft Metashape a následne importované do softvéru CloudCompare. Vzhľadom k tomu, že program CloudCompare umožňuje porovnávať vždy dva modely súčasne, bol zvolený nasledujúci postup: v prvom kroku boli oba modely zarovnané do jednej línie pomocou funkcie „Align by two clouds“. Na tento účel boli na oboch modeloch vybrané zarovnávací body, ktoré určili spôsob zarovnania. Už v tomto kroku sa ukázali prvotné rozdiely v hĺbkach. V ďalšom kroku bola použitá funkcia „Finely registers already aligned entities“, ktorá zobrazila základné farebné rozdiely medzi stopami. Na záver bola aplikovaná funkcia „Compute cloud/mesh distance“, ktorá vypočítala presné rozdiely hĺbok medzi oboma modelmi (Kadnár, 2025). Na Obrázku 12 sú zobrazené rozdiely v hĺbkach medzi stopami č. 2 a 3. formou farebného prekrytia.



Obrázok 12 Komparácia hĺbky stopy č. 2 a stopy č. 3 (Kadnár, 2025)

Vysvetlenie Obrázka 12 – stopa č. 2, vytvorená väčšou silou 750 N, je znázornená v šedej farbe a má väčšiu hĺbku než stopa č. 3, ktorá vznikla pôsobením sily 691,25 N. Pestrofarebná vizualizácia stopy č. 3 ukazuje odchýlky voči hlbšej stope č. 2 – zelené plochy predstavujú miesta, kde je povrch stopy plytší. Detailnejší pohľad na tieto rozdiely prináša Obrázok 13 (Kadnár, 2025).



Obrázok 13 Pohľady na stopy zospodu (vľavo), z boku (stred) a zhora (vpravo) (Kadnár, 2025)

Obrázok 13 ukazuje, že stopa č. 2 má v oblasti klenby nahromadenú vyššiu vrstvu piesku ako stopa č. 3. V týchto miestach bol taktiež umiestnený piest zariadenia, čo mohlo mať za následok pôsobenia väčšej sily na jedno miesto. Rozdiely je možné vidieť taktiež na Obrázku 13 (vpravo).

## ZÁVER

Cieľom predloženého článku, ktorý vychádza z výsledkov diplomovej práce (Kadnár, 2025) bolo overiť využitie 3D snímkovacej metódy (fotogrametrie) pri dokumentácii trasologických stôp a zhodnotiť jej presnosť. V teoretickej časti boli spracované poznatky z oblasti kriminalistiky a štúdie zo zahraničia, kde sa táto metóda už častejšie využíva. Praktická časť zahŕňala prípravu materiálu, realizáciu experimentu, vytvorenie 3D modelov a ich porovnanie s referenčnou stopou. Výsledky ukázali, že rozdiely medzi modelmi boli väčšinou do 2 mm, čo potvrdzuje relatívne vysokú presnosť fotogrametrie aj napriek technologickým a priestorovým obmedzeniam. K drobným odchýlkam prispeli faktory ako kvalita fotografií, obmedzené uhly snímania a výkon počítača, a taktiež aj schopnosti obsluhujúceho. Fotogrametria má významný potenciál pre kriminalistickú prax najmä vďaka bezkontaktnosti a možnosti presnej 3D dokumentácie. V súčasnosti by bolo vhodné ju využívať ako doplnkovú metódu k tradičným postupom, najmä pri menej závažných prípadoch. Porovnanie oboch metód v praxi by mohlo ukázať, ktorá je rýchlejšia, presnejšia a ekonomickejšia. Ak by sa v budúcnosti presnosť fotogrametrie potvrdila aj v reálnych podmienkach, mohla by sa stať plnohodnotnou súčasťou kriminalistickej dokumentácie a následne aj expertízneho skúmania.

## POĎAKOVANIE

*Tento príspevok bol vypracovaný v rámci projektu:*

- VEGA: 1/0775/24: Zvýšenie presnosti 3D dokumentácie trasologických stôp pre účely kriminalisticko-technickej a expertíznej činnosti.
- Grantového systému UNIZA č. 20451: Skúmanie potenciálu 3D technológií pri zaisťovaní a vyťažovaní trasologických stôp.
- Financované EÚ NextGenerationEU prostredníctvom Plánu obnovy a odolnosti SR v rámci projektu č. 09I03-03-V05-00002.

*Podakovanie patrí Ing. Matejovi Kadnárovi, autorovi diplomovej práce: „ Experimentálne verifikačné merania zamerané na posúdenie presnosti 3D dokumentácie trasologických stôp“, z ktorej vychádza predložený článok.*

## LITERATÚRA

Adamová, V., a kol. (2022). Dokumentácia trojrozmerných trasologických stôp pomocou aplikácie fotogrametrie blízkeho dosahu. *Krízový manažment*, 1/2022, 5-15. DOI 10.26552/krm.C.2022.1.

Bašić, A: - Perković, T. – Marendić, S. Application of 3D technologies in footwear trace evidence collection and identification. 2021. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/363862920\\_Application\\_of\\_3d\\_technologies\\_in\\_footwear\\_trace\\_evidence\\_collection\\_and\\_identification](https://www.researchgate.net/publication/363862920_Application_of_3d_technologies_in_footwear_trace_evidence_collection_and_identification)

Crabbe, S. a kol. Results from 3D – forensics – mobile high – resolution 3D- scanner and 3D data analysis for forensic evidence. 2015. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/302958551\\_Results\\_from\\_3D-Forensics\\_-\\_Mobile\\_high-resolution\\_3D-Scanner\\_and\\_3D\\_data\\_analysis\\_for\\_forensic\\_evidence](https://www.researchgate.net/publication/302958551_Results_from_3D-Forensics_-_Mobile_high-resolution_3D-Scanner_and_3D_data_analysis_for_forensic_evidence)

Crabbe, S. a kol. 3D forensics – mobile high – resolution 3D- scanner and 3D data analysis for forensic evidence. 2014. [online]. [cit. 2025-02-07]. 215 s. ISBN 978-3-8396-0778-7. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/302958860\\_3D-Forensics\\_-\\_Mobile\\_high-resolution\\_3D-Scanner\\_and\\_3D\\_data\\_analysis\\_for\\_forensic\\_evidence](https://www.researchgate.net/publication/302958860_3D-Forensics_-_Mobile_high-resolution_3D-Scanner_and_3D_data_analysis_for_forensic_evidence)

- Gregor, M. a kol. 2016. 3D laserové skenovanie veľkých objektov. vyd. Žilina: Printio s.r.o. 2016. 310 s. ISBN 978-80 971684-9-0
- Kadnár, M. (2025). Experimentálne verifikačné merania zamerané na posúdenie presnosti 3d dokumentácie trasologických stôp. Diplomová práca. Žilinská univerzita v Žiline.
- Kozár, M. (2020). Základy kriminalistiky pre školy a prax. Ružomberok: Epos.
- Kriminalistický technici. (2025). Prezídia Policajného zboru Slovenskej Republiky. Osobná komunikácia [2025-02-01].
- Larsen, H. J. – Bennett, M. R. Empirical evaluation of the reliability of photogrammetry software in the recovery of three – dimensional footwear impressions. 2020. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/341391368\\_Empirical\\_Evaluation\\_of\\_the\\_Reliability\\_of\\_Photogrammetry\\_Software\\_in\\_the\\_Recovery\\_of\\_Three-Dimensional\\_Footwear\\_Impressions](https://www.researchgate.net/publication/341391368_Empirical_Evaluation_of_the_Reliability_of_Photogrammetry_Software_in_the_Recovery_of_Three-Dimensional_Footwear_Impressions).
- Massini, F. a kol. Comparison of superficial wound documentation using 2D forensic photography, 3D photogrammetry, Botscan and VR real-life examination. 2021. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8413216/>.
- McMillion, M. 3D documentation of footwear impressions at crime scenes in minutes, no contact needed. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: <https://www.artec3d.com/cases/3d-scanning-footwear-impressions-for-forensics>
- Montgomerie, C. – Reneri, D. – Maynard, P. Validation study of three – dimensional of footwear impressions. 2020. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/342685639\\_Validation\\_study\\_of\\_three-dimensional\\_scanning\\_of\\_footwear\\_impressions](https://www.researchgate.net/publication/342685639_Validation_study_of_three-dimensional_scanning_of_footwear_impressions).
- Ondrejčíková, T. (2025). Obsah a význam informácií získaných z trasologických stôp pre identifikačné účely. kumné problémy kriminalistického skúmania.
- Photogrammetry as a tool for forensic documentation. 2020. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: <https://3dsurvey.si/photogrammetry-as-a-tool-for-forensic-documentation/>
- Porada, V. a kol. (2019). Kriminalistika: technické, forenzní a kybernetické aspekty. Plzeň: vydavatelství a nakladatelství Aleš Čeněk, s.r.o.
- Rak, R., Vašek, M., & Zdeněk, Ř. (2008). Biometrie a identita člověka ve forenzních a komerčních aplikacích. Praha: Grada publishing
- Tóth, D. a kol. Application of photogrammetry in forensic pathology education of medical students in response to COVID-149. 2021. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC8251483/>.
- Straus, J., & Porada, V. (2017). Teorie forenzní biomechaniky. 1. vydání. Praha: VŠFS.
- Žiak, J. (2025). Aplikácia 3D tlače na vybrané praktické a výskumné problémy kriminalistického skúmania. Diplomová práca. Žilinská univerzita v Žiline.
- Žuraulis, V. – Levulyté, L. – Sokolovskij, E. Vehicle speed prediction from yaw marks using photogrammetry of image of traffic accident scene. 2016. [online]. [cit. 2025-02-07]. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816000461>.

---

### **Veronika Adamová, Ing. PhD.**

Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, Univerzitná 8215/1, Žilina, 010 26

e-mail: [veronika.adamova@uniza.sk](mailto:veronika.adamova@uniza.sk)

### **Eduard Kolla, doc. Ing., PhD.**

Žilinská univerzita v Žiline, Ústav znaleckého výskumu a vzdelávania, Univerzitná 8215/1, Žilina, 010 26

e-mail: [kolla@uniza.sk](mailto:kolla@uniza.sk)

### **Lukáš Szabo, Ing.**

Žilinská univerzita v Žiline, Fakulta bezpečnostného inžinierstva, Katedra bezpečnostného manažmentu, Univerzitná 8215/1, Žilina, 010 26

e-mail: [lukas.szabo666@gmail.com](mailto:lukas.szabo666@gmail.com)

---