

TDK dolgozat

Sárbogárdi kőbánya mérnökgeológiai vizsgálatainak térinformatikai támogatása

Készítette: Bánhidi Dávid

Konzulensek: Rehány Nikolett

Dr. Lovas Tamás

Somogyi József Árpád

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Építőmérnöki Kar, Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

2017

Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni konzulenseimnek, Rehány Nikolettnek, Dr. Lovas Tamásnak és Somogyi József Árpádnak a sok segítséget és a lehetőséget a közös munkára. Idejüket és energiájukat nem sajnálva segítettek és támogattak még e viszontagságos külföldi tanulmányokkal tarkított időszakban is.

Szintén szeretném megköszönni Dr. Török Ákosnak, valamint a Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszéknek a lehetőséget, hogy felkértek minket munkájuk támogatására.

Hallgatói nyilatkozat

Kijelentem, hogy ezt a TDK dolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző, cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulensek neve) a BME nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig általam a dolgozat feltöltésekor beállított jogosultságokkal (publikus vagy titkos) egyezve közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik.

Budapest, 2017. október 27.

.....
Bánhidi Dávid

Abstract

Supporting the engineering geology analysis of Sárbogárd mine

Our aim is to support the work of the Department of Engineering Geology and Geotechnics (BUTE) in the Sárbogárd open field mine by cutting edge data acquisition technics.

During the conventional geology examination, we laser scanned and UAV photographed the previously selected and marked rock wall segment.

After pre-processing the raw data, the primary task was to identify the marked, characteristic planes. Besides the surface geometry of the cliff, the position and orientation of the cracks have been derived. To achieve high accuracy results and avoid distortion, we obtained orthogonal images from point cloud. Furthermore, we investigated the potential of determining the wetness of the rock surfaces on the investigated planes using the intensity data from the scanner.

keywords: UAV, laser scanning, rock face plane, point cloud, intensity, engineering geology, wetness index, crack detection

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	6
2. Mérés célja.....	7
3. Sárbogárdi bánya	8
4. Mérési módszerek, eszközök	10
4.1. Földi lézerszkennelés - TLS	10
4.2. Felvételek készítése UAV-ről	11
4.3. Hagyományos mérnökgeológiai vizsgálatok.....	12
5. Mérések feldolgozása	13
5.1. TLS feldolgozása.....	13
5.2. Drónképek feldolgozása	15
5.3. Kiegészítő laborvizsgálat	16
6. Mérések elemzése	18
6.1. Falsíkok előkészítése	18
6.2. Ortonézetek előállítása	20
6.3. Intenzitásértékek elemzése	21
6.4. Dőlésszögek és dőlésirányok meghatározása.....	23
6.5. Repedések automatikus keresése.....	24
7. Eredmények értékelése	26
8. Összefoglalás	27
9. Irodalomjegyzék	28

1. Bevezetés

A kutatás célja a Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék munkatársai által a sárbogárdi külszíni fejtésű bányában végzett vizsgálatok térinformatikai támogatása.

A helyszíni mérés során a hagyományos mérnökgeológiai vizsgálatok mellett földi lézerszkenneléssel (TLS - Terrestrial Laser Scanning) és UAV (Unmanned Aerial Vehicle - pilóta nélküli repülőgép) felvételek készítésével mértük fel a vizsgált falszakaszt.

A mérések feldolgozása után a mérnökgeológusok által megjelölt falsíkokat vizsgáltuk: a geometria megjelenítésén túl a repedések helyének és irányának meghatározása is feladat volt. Ezek támogatására a pontfelhőből levezetett geometriai jellemzőket és ortonézeteket használtuk alapként. Emellett a szkennelésből származó intenzitásértékek elemzésével megvizsgáltam a falfelületek nedvességelemzésének lehetőségeit.

2. Mérés célja

Munkánk célja sziklafalak mérnökgeológiai vizsgálatának térinformatikai támogatása. A BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszékén korábban folyt már ilyen célú kutatás, a siroki vár alatti sziklafal állékonyságának vizsgálatához kapcsolódóan elemezték a pontfelhő alapú adatnyerési eljárások alkalmazhatóságát. [1]

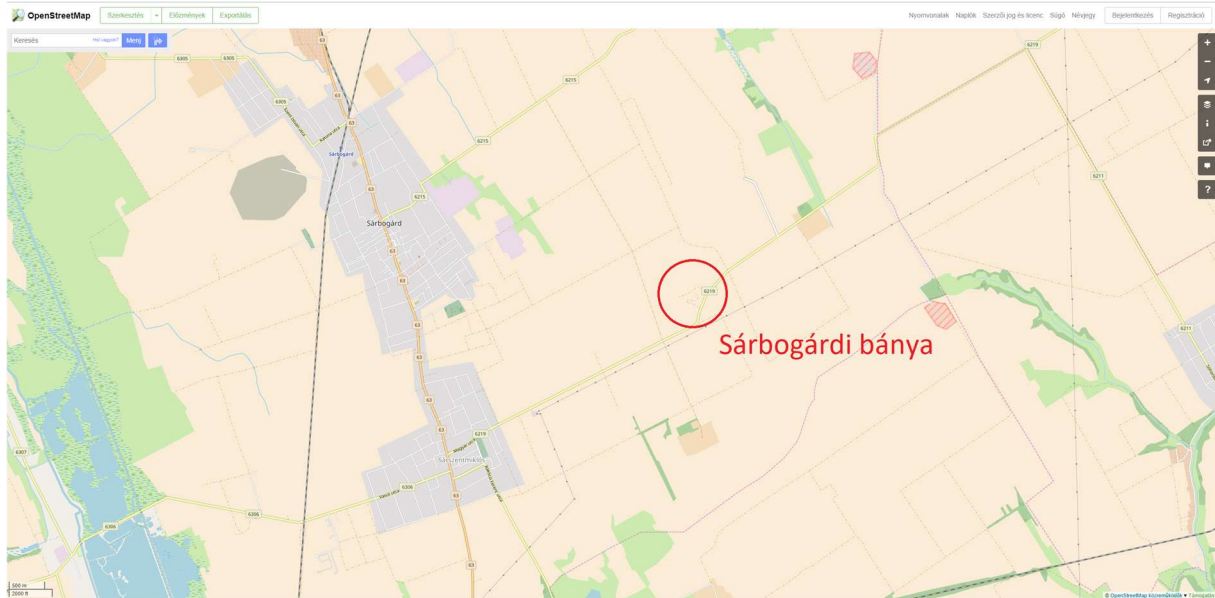
A BME Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszékén a sárbogárdi kőbánya sziklafalát vizsgálják, geometriájának felmérésére a Fotogrammetria és Térinformatika Tanszékét kérték fel. A geológiai vizsgálatok az alábbi területeket célozzák meg:

1. Felszínmorfológia leírása
2. Bányafal geometriai tagolhatósága
3. Sík felületek azonosítása (falsíkok, repedések, törések)
4. Sík felületek irányának; azimutjának és függőlegestől való eltérésének meghatározása
5. Sík felületek érdességének meghatározása
6. Közel sík felületek síkkal való közelíthetőségének vizsgálata
7. Sík felület területének számítása
8. Síkok irányok szerinti csoportosítása
9. Egyes sík felületekkel határolt tömbök térfogatának számítása
10. Kibillenő, kiboruló tömbök azonosítása
11. Morfológiai változások pl. repedésmegnyílás nyomon követése
12. Nedves és száraz falszakaszok azonosítása

Vizsgálataink során a sík felületek azonosításával, sík felületek irányának meghatározásával, közel sík felületek síkkal való közelítésével és nedves, valamint száraz falszakaszok vizsgálatával foglalkoztunk.

3. Sárbogárdi bánya

A közép-dunántúli Sárbogárd városától keletre, a 6219-es út mellett található a külszíni fejtésű bánya (1. és 2. ábra), ahol riolittufa kitermelése folyik. [2]



1. ábra: Sárbogárdi bánya elhelyezkedése (OSM kivágat)



2. ábra: A bánya látképe madártávlatból (drónról készült felvétel)

A bánya kb. 250 m x 150 m kiterjedésű, jelen vizsgálat a dél-délkeleti sziklás falszakaszára terjed ki (3. ábra). Ezen a szakaszon jelöltek ki a geológus szakemberek 24 jellegzetes és egybefüggőnek tekinthető falsíkot. Minden mérésünket úgy készítettük elő és hajtottuk végre, hogy később ezen kijelölt falszakaszok vizsgálata a leghatékonyabban legyen elvégezhető. Ennek megfelelően a lézerszkenner álláspontjait úgy határoztuk meg, hogy a megjelölt falsíkokra biztosított legyen az

3. Sárbogárdi bánya
optimális rálátás. Az UAV-ről készített képek rögzítését szintén a vizsgálati hely és a modellezés geometriai követelményei szerint kellett elvégezni. A geodézia koordináta-rendszerbe való illesztés biztosítása érdekében földről és levegőből is jól azonosítható GNSS illesztőpontokkal fedtük le a területet.



3. ábra: A vizsgált falszakasz

4. Mérési módszerek, eszközök

Vizsgálataink során napjainkban hagyományosnak számító, egy jól felszerelt geodéziai cég műszerparkjában és megoldásai között megtalálható (vagy abba könnyen beilleszthető) eszközöket és módszereket alkalmaztunk. Nem kívántunk újfajta, a megszokottól eltérő mérési módszert alkalmazni, helyette mindenki által könnyen reprodukálható, szakmai körökben ismert, nem felső kategóriájú eszközökkel.

4.1. Földi lézerszkennelés - TLS

Első számú általunk alkalmazott mérési módszer a földi lézerszkennelés, röviden TLS. A mérés során a földfelszínhez közel, egy jellemzően háromlábú állványra (alkalmazható egyéb fix rögzítési megoldás is) helyezzük el a szkennert, amely rövid paraméterezési lépések után vízszintes és függőleges tengelyei körül forogva igen nagy részletességgel, a kibocsájtott, majd a felületekről visszaérkező lézerjelek segítségével letapogatja a környezetét. Az alkalmazott megoldáshoz hasonló térszkennerek vízszintesen teljes 360 fokos szögben képesek mérni, függőlegesen a műszerállvány és az eszköz burkolatának kialakítása miatt a műszer alatti terület egy része nem mérhető fel egy álláspontból.

Egyetlen ilyen mérés természetesen nem mindig elegendő, ahogy egy hagyományos geodéziai felmérés során a mérőállomásunkat időről-időre új pozícióban állítjuk fel, így járunk lézerszkennelés során is. A kitakart elemek okozta hézagok csökkentése, a megfelelő pontsűrűsége való törekvés, és a jó geometria megtartása mellett igyekszünk megválasztani álláspontjainkat. A különböző álláspontokon nyert pontfelhők utólagos összeillesztését sok esetben a helyszínen gondosan elhelyezett mérési jelek, kötőpontok (esetünkben ismert méretű és magas reflektivitású gömbök) biztosítják (lásd 4. ábra).

Az általunk használt szkennert: Faro Focus 3D 120 S (lásd 4. ábra). Az eszköz maximális hatótávolsága 120 méter, maximális felbontása 1,5 mm/10 m, távmérési középhibája 2 mm, maximális mérési sebessége 976 000 pont/másodperc. Árárt tekintve a belépő kategóriába tartozik, ezen túlmenően egyszerű felépítése és használhatósága és az elérhető nagy pontosság tette népszerű alternatívává az a felméréssel foglalkozó szakemberek körében. [3]



4. ábra: Balra a Faro szkennert, jobbra egy kapcsolópontként használható gömb

A bányában végzett mérés során végig azonos felbontást alkalmaztunk, a pontfelhő színezéséhez pedig minden álláspontban a szkener által készített fényképeket használtuk fel. Összesen 15 álláspontra volt szükség a falszakasz felméréséhez, ezt 2 óra alatt hajtottuk végre.

4.2. Felvételek készítése UAV-ről

Második mérési módszerünk a pilóta nélküli repülőgépekről, más néven UAV-kről készített felvételek fotogrammetriai feldolgozása volt. Napjainkban igen széles körben alkalmaznak UAV-eket: az egyszerű hobbi reptetőktől kezdve az agrárgazdaság, vadállomány és erdővédő szerveken át a napelembányászok üzemeltetői, a katasztrófavédelmi szervek, valamint a film- és egyéb szórakoztatóiparban is előszeretettel használják ezeket az eszközöket. Természetesen az eltérő célokra és anyagi keretre való tekintettel léteznek egyszerű, kisméretű, kevés szenzorral szerelt, kompakt és repülésre kész UAV-k, de lehetőségünk van a méret (és egyben a rotorok számának) növelésével több és jobb minőségű szenzort felszerelni, hosszabb repülőutat biztosítani, nagyobb stabilitást és biztosabb manőverezhetőséget nyújtani, a komplexebb hardveres és szoftveres megoldások révén pedig személyre szabott, akár általunk készített felépítményeket is készíthetünk. [4] [5]

Léteznek 4, 6, 8 rotort alkalmazó kopterek, de nagy kiterjedésű sík területek felmérésére a merev szárnyú megoldások is népszerűek. A drónok legáltalánosabb a felmérést szolgáló szenzora a fényképezőgép. Olcsóbb kis gépek esetén előre szerelt kamerákról beszélhetünk, míg a nagyobb gépek esetében jellemző a modularitás, és a méretekből következően utóbbiak már akár egy teljes értékű kézi kamerát is képesek hordozni. Számos kutatás foglalkozik különböző más jellegű szenzor alkalmazhatóságának vizsgálatával: a látható tartományon kívül is rögzíteni képes kamerák, hőkamerák, LiDAR, radar- és lézerszenzorok, éjjellátó eszközök, és különféle kommunikációt segítő adó-vevő rendszerek. [6] [7]

Ahogy a lézerszkener esetében is egy egyszerűbb eszközt kívántunk alkalmazni, úgy a drónnál is egy népszerű, könnyen és olcsón beszerezhető példányt használtunk, amely egy DJI Phantom 4 Pro volt (5. ábra). A DJI a nemzetközi hobbi és félprofi drónpiac vezető szereplője, a Phantom sorozat pedig kifejezetten a belépő szintű, de már nem hobbi felhasználású kisgépek közé tartozik. A 4-es Pro modellje egy kb. 1400 grammos eszköz, kompakt méretének köszönhetően gyors és fordulékony, a kamera pedig 4K (4096x2160 pixel) felbontású videófelvételt és 20 megapixeles (5472x3648 pixel) fényképeket is képes készíteni. Helymeghatározáshoz GPS és Glonass műholdak jeleit is képes fogni, irányítása több kilométeres távolságból is lehetséges, a maximális repülési ideje 30 perc. [8]



5. ábra: Balra a Phantom 4 Pro és kontrollere, jobbra egy vele készített, nagy felbontású felvétel

4. Mérési módszerek, eszközök

A repüléssel történő felmérés három szakaszban készült; először átnézeti képek készültek el a bánya teljes területéről, majd a falszakasz két darabra osztva, egy-egy további repülés során került felmérésre. Összesen 420 darab kép állt elő, ebből 375 kép közvetlen közélről a falszakaszcól, a többi átnézeti kép. A mérés szereléssel és akkumulátorcserékkel együtt kb. 1 órát vett igénybe.

Ahhoz, hogy a különböző forrásból származó adatokat akár közös hálózatba (pl. összehasonlítás céljából), vagy EOVS rendszerbe transzformáljuk, szükségünk van további kapcsoló- és illesztőpontokra. Ennek megfelelően a méréseket megelőzően kb. 1m x 1m-es piros-fehér jeleket (falsík esetében piros felfestést) helyeztünk el a területen, amelyek később a pontfelhőn is könnyen azonosíthatóak. Ezek helyét hálózati RTK szolgáltatással kiegészített GNSS mérési módszer segítségével határoztuk meg, így a pontok EOVS koordinátáit is meghatároztuk (lásd 6. ábra).



6. ábra: Balra egy földön elhelyezett kapcsolópont, jobbra egy hasonló pont bemérése történik

4.3. Hagyományos mérnökgeológiai vizsgálatok

Természetesen a Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék munkatársai is jelen voltak a mérések során, szórófestékekkel jelölték ki a vizsgálandó síkokat. Ezután a síkok dőlésirányának és dőlésszögének meghatározását geológus kompasszal és egy telefonos alkalmazás segítségével végezték. Utóbbi a telefon beépített 9 szabadságfokú szenzora (3 dőlés, 3 gyorsulás és 3 mágneses erősség) közül a 3 tengely mentén történő elfordulásadatokból határozta meg a telefon síkjának, és ezáltal a falsíknak az elhelyezkedését. Emellett fényképezőgéppel fotódokumentáció is készült a síkokról.

5. Mérések feldolgozása

A helyszínen végzett mérések a lézerszkennerek esetében egyszerű adatletöltéssel, a UAV (valamint a GNSS vevő) esetében a mérést végző kollégáktól származtak a nyers adatok. Ezután megkezdődött azok feldolgozása, a szükséges modellek előállítása.

Ez a szkennerek esetében az egyes álláspontok egymáshoz illesztését, majd az így kapott pontfelhő színezését, georeferálását, végezetül az újramintavételezését jelentette. A drónnal történő repülés közben készített képek egyenként történő ellenőrzése után automatikus képjavítási eljárást alkalmazunk, majd egy erre optimalizált szoftver segítségével a képekből 3D-s modell és pontfelhő készült. Utóbbit szűrések és újramintavételezések után tekintjük használhatónak.

5.1. TLS feldolgozása

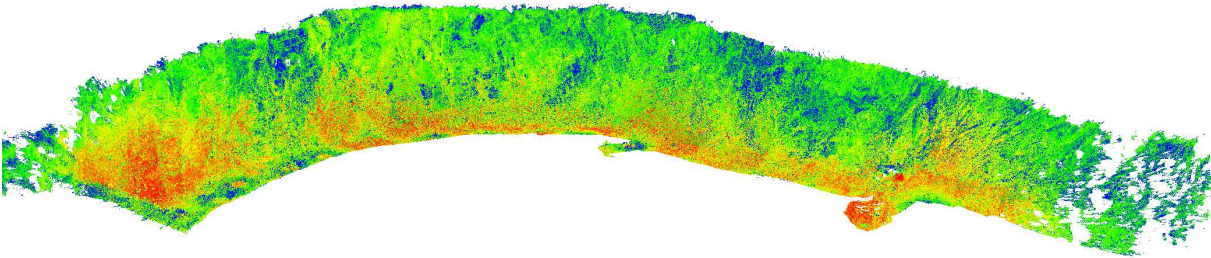
A Faro szkennerek memóriakártyájáról lemásolva az adatokat, azt a Faro Scene programba importáltuk. A helyszínen, a mérések előtt elhelyezett Faro gömböket is használtunk kapcsoló objektumként. Ehhez a felhasználónak a pontfelhő gömböt tartalmazó részét kell megmutatni, majd ezután azt egy azonosítóval ellátni, ez biztosítja az egyes álláspontok közötti kapcsolatot. Az egységes pontfelhő előállítása után a pontok színezése következett, amelyet a szkennerek által a helyszínen készített panorámaképek alapján végzett el a szoftver (7. ábra).

A GNSS technikával bemért pontok segítségével az eltolási és forgatási paraméterek kiszámíthatók. A paraméterek kiszámítása Matlab környezetben írt program segítségével történt.



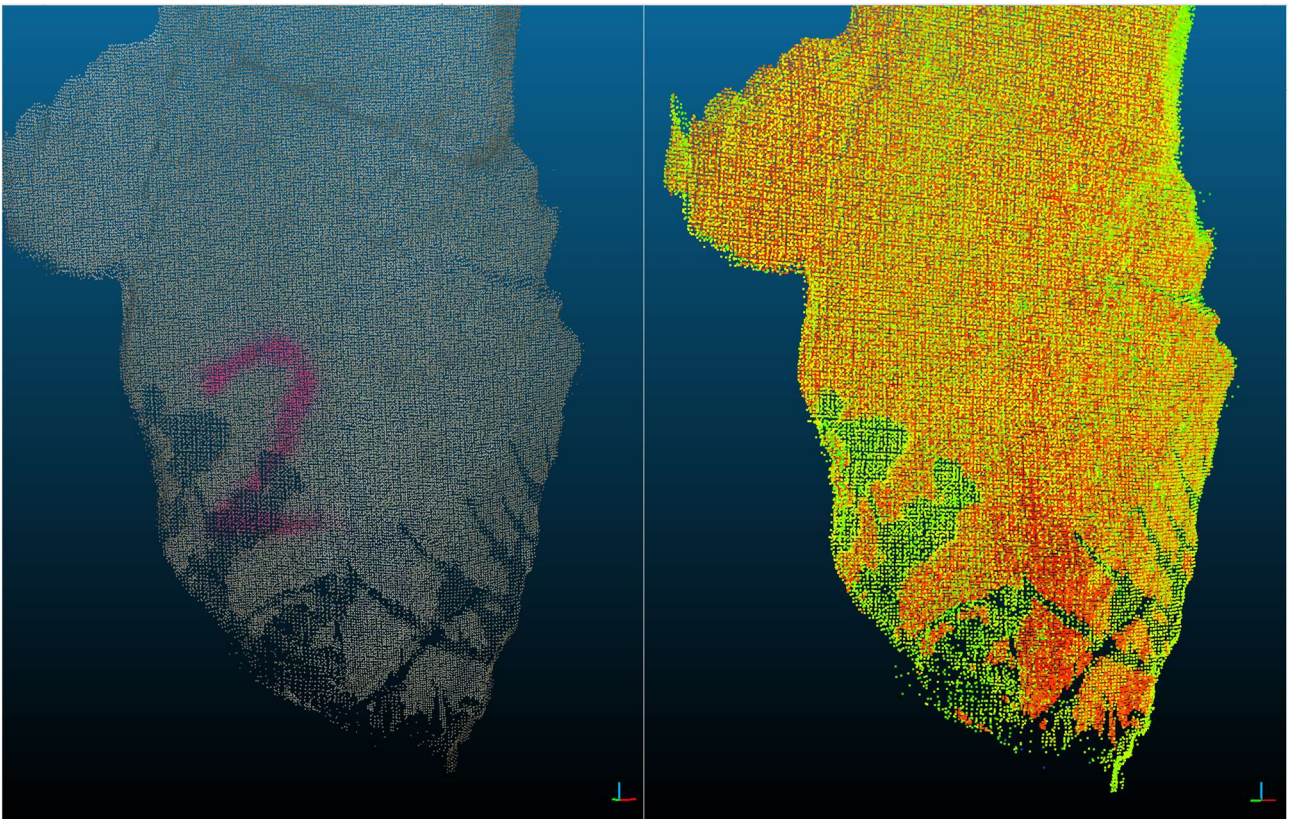
7. ábra: Színezett pontfelhő

Ezután a teljes pontfelhőt EOVS koordináta-rendszerbe transzformáltuk a Faro Scene program segítségével. A különböző formátumba történő exportálás a nyílt forráskódú, ingyenes CloudCompare szoftver használatával történt. Az így kapott pontfelhő a vizsgált falszakasz teljes egészére egységesnek és homogénnek tekinthető, pontsűrűsége elegendő az egyes kis részleteinek vizsgálatához is, színképe megfelelő a falsíkok azonosítására, a felületek vizsgálatára.



8. ábra: Intenzitásértékek megjelenítése

Megjegyzendő ugyanakkor, hogy az egyes állások egymáshoz illesztése során az intenzitásértékek jelentős torzulást szenvednek (8. ábra). Ennek oka, hogy egy adott álláspont összes mért pontjára dinamikusan kerülnek ráillesztésre az intenzitás-skála szélsőértékei. Vagyis minden álláspont tartalmaz legalább egy 0 intenzitású és legalább egy 255 intenzitású pontot, ezen szélsőértékek adják ugyanis az adott mérés skálájának határait. Ugyanakkor egy tetszőlegesen választott másik állás 0 értékű minimum vagy 255 értékű maximum pontja legfeljebb intenzitás-skálán kapott értékében egyezik meg, az adott felületpontról visszaérkező jel tényleges mértéke (amplitúdója) jelentős eltérést mutat. Az intenzitás értéket a felület anyaga és színe mellett a beesési szög és a távolság is jelentősen befolyásolhatja. Ezen hatások látható nyoma az összeillesztett pontfelhő és az egyes állások külön-külön megnyitott intenzitásértékeinek vizsgálatával mutatható ki.



9. ábra: Összeillesztett álláspontok színes és intenzitás nézete

A 9. ábrán az összeillesztett pontfelhő egy darabja látható, itt megfigyelhető, hogy az alján foltokban ritkásabb az adatmennyiség. Ennek oka, hogy azon területek kevesebb álláspontból lettek szkennelve, például mert kitakarta őket egy növény. A konkrét esetben a felület jelentős része két állásból

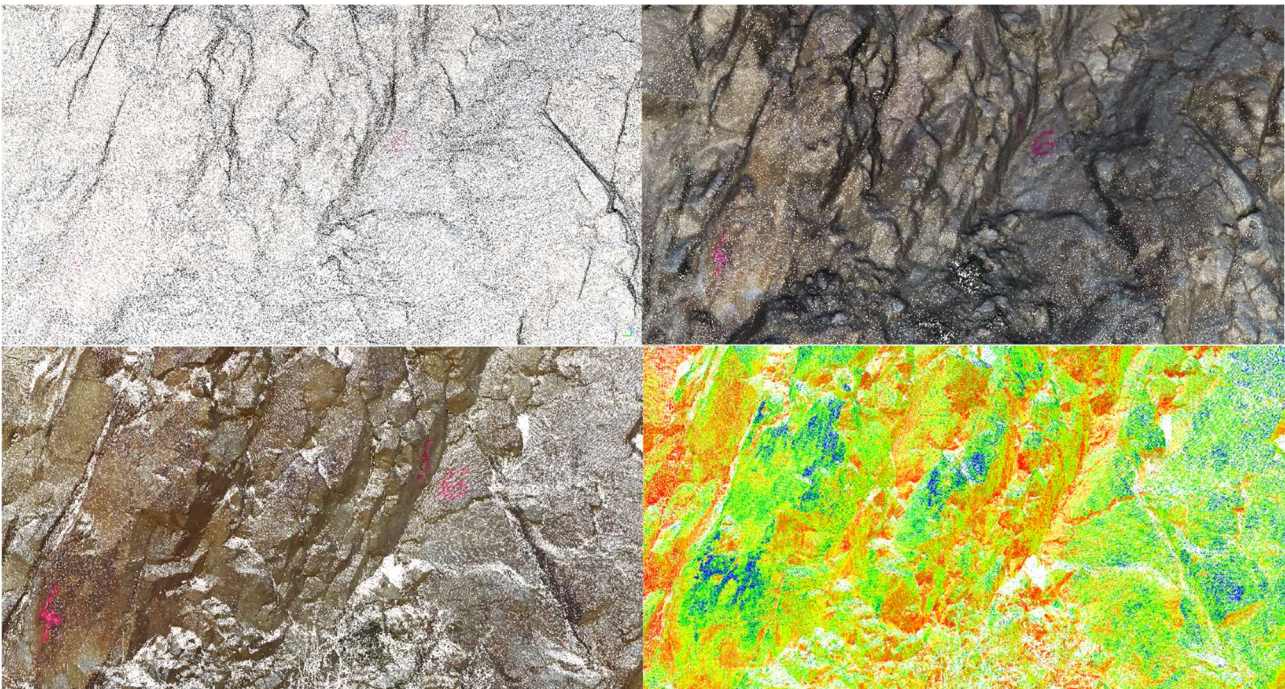
5. Mérések feldolgozása

látszódot megfelelően, de az alsó harmadában található kisebb foltok a növényzet miatt csak egy állásból voltak láthatók. Az intenzitásértékeket látva a ritkásabb foltok hasonló értéket (zöld színt) kaptak, a körülöttük lévő, egyébként azonos fizikai tulajdonságokkal bíró kőzet zavaros színezetű, a zöld-sárga-piros árnyalatok mindegyike megtalálható benne. Ennek oka, hogy az itt elhelyezkedő pontok több állásból lettek származtatva, így hiába azonos a felület, a korábban leírt okok miatt lényegesen eltérő intenzitásértéket kaptak a pontok. Ez nehézséget okoz egy több álláspontból összeillesztett pontfelhő intenzitásértékeinek feldolgozása során.

Ezen skálaeltérések kiküszöbölésére az intenzitásértékek vizsgálata során, azokat kizárólag egy álláspontból mért pontfelhő elemzésével lehet elvégezni. Továbbá az így kapott vagy ebből levezetett értékek csak relatív mutatók, relativitásukat is csak az azonos állásból levezetett értékek egymáshoz hasonlításához lehet használni. Két álláspontból végzett mérés intenzitásának összehasonlítása csak azok intenzitás-skálájának összehangolása esetén lenne lehetséges.

5.2. Drónképek feldolgozása

A UAV-vel készített mérést, azaz a repülés közben készített nyers képeket Agisoft Photoscan szoftver segítségével dolgoztuk fel. A felvételek képpont alapú térrekonstrukciós folyamata 3 fő lépésből áll: a jellemző képpontok azonosítás és társítása; a képhelyzetek és a kapcsoló pontok térbeli helyének meghatározása; pontfelhő besűrítése.



10. ábra: Pontfelhők: felső sor UAV [eredeti és növelt pontméréssel], alsó sor TLS [RGB és intenzitás értékek]

A kapott pontfelhő vizsgálatakor (10. ábra) láthatjuk, hogy annak pontsűrűsége elmarad a földi lézerszkennelésétől. A bal felső kép eredeti, a jobb felső megnövelt pontméréssel készült, hogy jobban kivehető legyen a vizsgált terület. Azonban a pont méretének növelése csak a láthatóságot javítja, a jellemző pontosság és a pontsűrűség továbbra is változatlan marad. A pontok közötti nagyobb távolság mellett a drónnal történő fényképezés módszerének hátránya, hogy nincsenek intenzitásértékeink sem, a pontok csak RGB színadatokkal rendelkeznek. Ennek megfelelően a továbbiakban ezzel a méréssel nem dolgoztunk tovább.

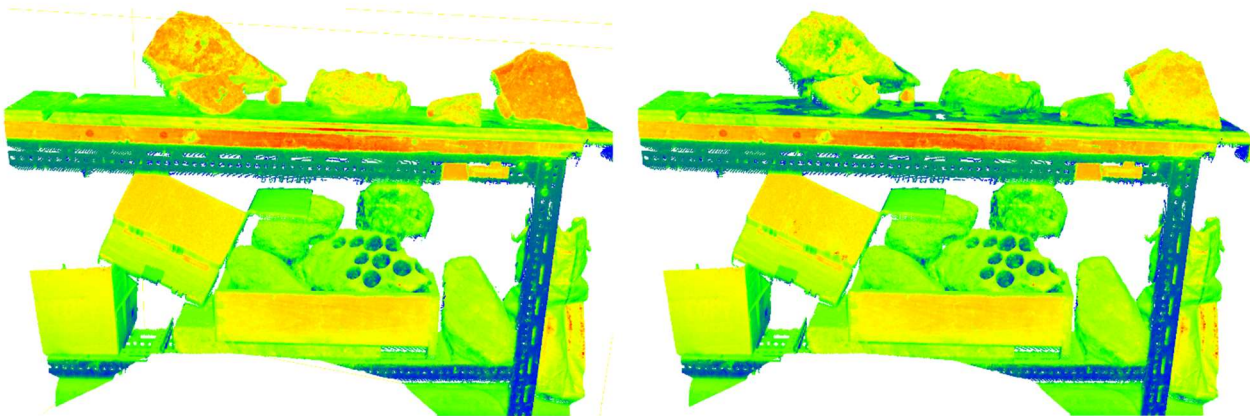
5.3. Kiegészítő laborvizsgálat

A felületek nedvességének és ezzel kapcsolatba hozhatóan a kőzetek nedvességtartalmának vizsgálatához további laboratóriumi körülmények között végeztünk méréseket, mesterségesen módosított tulajdonságú kőzetekre. A méréshez helyszínt és alapanyagot a Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék biztosított, a mérés elrendezéséről az alábbi képek adnak tájékoztatást (11. ábra).



11. ábra: Laborvizsgálat

A vizsgálattal előzetes sejtésünket kívántuk igazolni, mely szerint tetszőleges kőzet és annak felszínére jellemző nedvességtartalom vizsgálható lézerszkennel segítségével, ugyanis a nedves felületről és ennek következtében a magasabb víztartalommal rendelkező kőzetről kisebb intenzitással érkezik vissza a lézer. A képen látható, a bányából mintavételezett kőveket először száraz, majd közvetlenül nedvesítés utáni állapotban, végül pár perccel később harmadik alkalommal is megmértük a helyszínen is használt Faro műszerrel ugyanabból az álláspontból, változatlan környezetben (12. ábra).



12. ábra: Szkennelt kővek, balra a száraz, jobbra a nedvesített

Látható, hogy az asztalon elhelyezett minták felületén az intenzitásértékek az első méréskor a vörös és sárga tartományban vannak, tehát nagy intenzitású jel érkezik vissza róluk, míg a második méréskor már lényegesen alacsonyabb a jel erősség, zöldes-sárgás képet látunk, néhol kéket, jellemzően az asztal felső munkalapja is kék, vagyis vízzel borított (12 és 13. ábra).

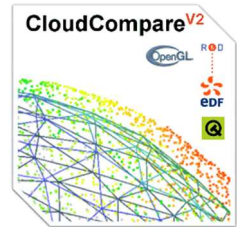


13. ábra: Nedvesített kőzetek, az asztalon pedig jelentős mennyiségű víz

6. Mérések elemzése

A nyers mérések feldolgozása után megkezdtük azok elemzését. Ehhez elsőként néhány előkészítő lépést végeztünk, majd az egyes vizsgálatokat külön-külön végeztük el. A teljes falszakasz összesen 24 darab kijelölt síkot tartalmazott, azonban ezek közül az 1-10 síkok bizonyultak megfelelően nagy méretűnek a komplex vizsgálatokhoz, majd ezen tíz darabból végül a 2-es, 3-as, 4-es, 5-ös, 6-os és 8-as számúakkal foglalkoztunk részletesebben.

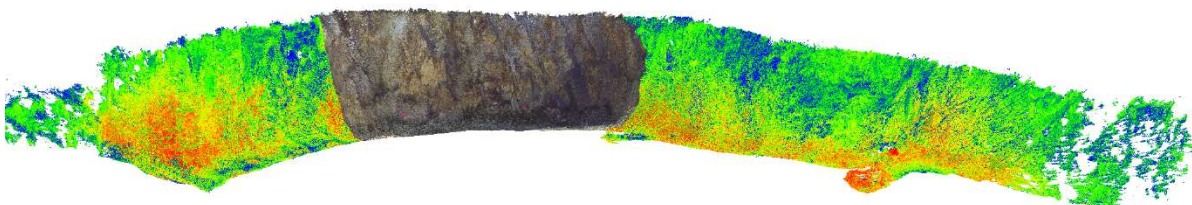
Az elemzés során jellemzően CloudCompare-t használtunk, mely egy nyílt forráskódú, GNU General Public License második változata (GPLv2) szerint terjeszthető szoftver. Eredetileg Daniel Girardeau-Montaut PhD munkájaként [9] készült el, majd később fejlődött tovább a program. 2016 óta érhető el az 2.8.1-es utolsó, stabil változat. A programot az egyszerű használhatósága mellett a sok funkciója, erős felhasználói bázisa, az elérhető útmutatók sokasága és természetesen ingyenes mivolta teszi vonzóvá a térinformatikusok számára. [10]



A második használt szoftver a Geomagic Design X, amely egy professzionális reverse engineering szoftver, amely a CAD alapú mérnöki programokat ötvözi a 3D adatgyűjtés feldolgozásával. Az 1997-ben alapított Geomagic Inc. fejleszti, amely egy észak-karolinai cég. Szoftverek mellett saját szkennereket is fejlesztenek. Jelentős szerepet kap az autóipar, a tudomány, a művészet, a szórakoztatóipar valamint a játékipar területén is. [11] [12]

6.1. Falsíkok előkészítése

Az 5.1 és 5.2 fejezetekben megismerhettük, hogyan lett a nyers terepi mérésekből bárki számára könnyen megnyitható és elemezhető pontfelhő, mint munkaközi termék. A lézerszkennelésből származó pontfelhő több mint 184 millió pontot tartalmaz, .ply fájlként tárolva a mérete 3,25 GB. A megnyitása saját, erősnek mondható számítógépen (i5-4690K 4,6 GHz, 16 GB 1866MHz RAM, Nvidia GeForce GTX 980Ti GPU, WD Black HDD) habár lehetséges, és a vele való munka nem lehetetlen, közel sem kényelmes és sokszor zavaró a meg-megakadó betöltés miatt. Ennek kiküszöbölésére egy egyszerű megoldást választottam, a teljes pontfelhőt megfelelően kis darabokra, esetemben 3 részre osztottam (14. ábra). A vágási felületek esetében érdemes figyelni arra, hogy nehogyan véletlenül egy vizsgálni kívánt falsíkot vágjunk ketté. A kapott 3 fájl egyesével történő megnyitása után kényelmesebben és hatékonyabban tudtam dolgozni.

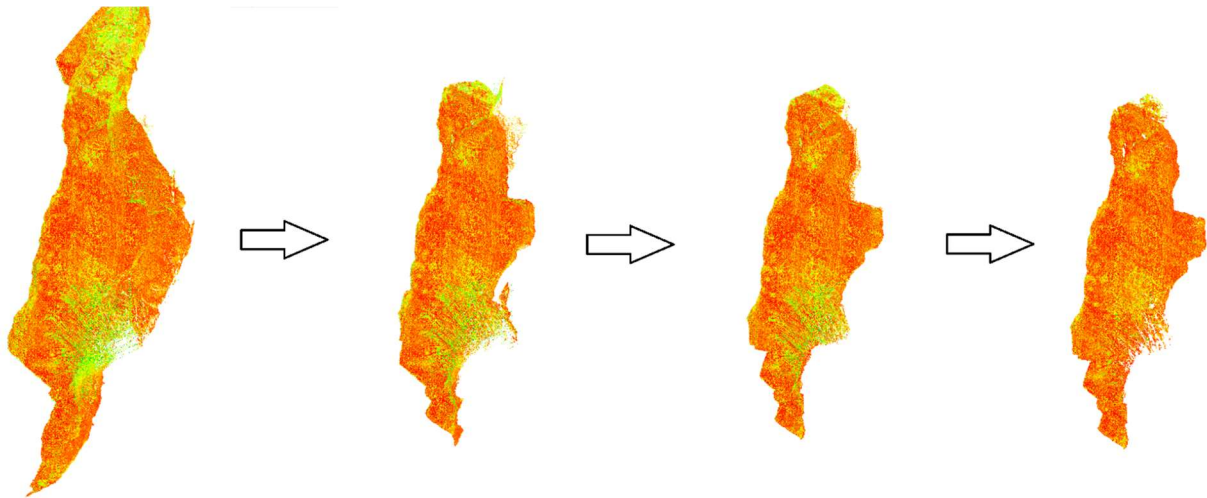


14. ábra: Darabolt pontfelhő a könnyebb feldolgozáshoz

Vizsgálataink nem a falszakasz teljes egészére koncentrálnak, hanem annak csak kis részegységeire, azokra a síkokra, amelyeket előzetesen a mérnökgeológus szakemberek kijelöltek. Így ezeket célszerű egyesével kivágni a pontfelhőből.

Miután nagyjából kivágtam az adott síkot és annak környezetét, fokozatos lépésekben közelítettem a megfelelő végeredmény felé (lásd 15. ábra). A kívánt pontfelhő csakis az adott sík felületének pontjait tartalmazza, ennek megfelelően az élék mentén gondosan körbe kell vágni, valamint a méréskor keletkezett zaj (pontatlan, a felület közelében leképződő pont) szűrését is el kell végezni. Eredményként olyan adatállományt kaptam, amely reprezentatív mintája a helyszínen megtalálható faldarabnak, a rajta elvégzett vizsgálatok eredménye alapján következtetéseket vonhattam le az eredeti kőzet alakjára vonatkozóan.

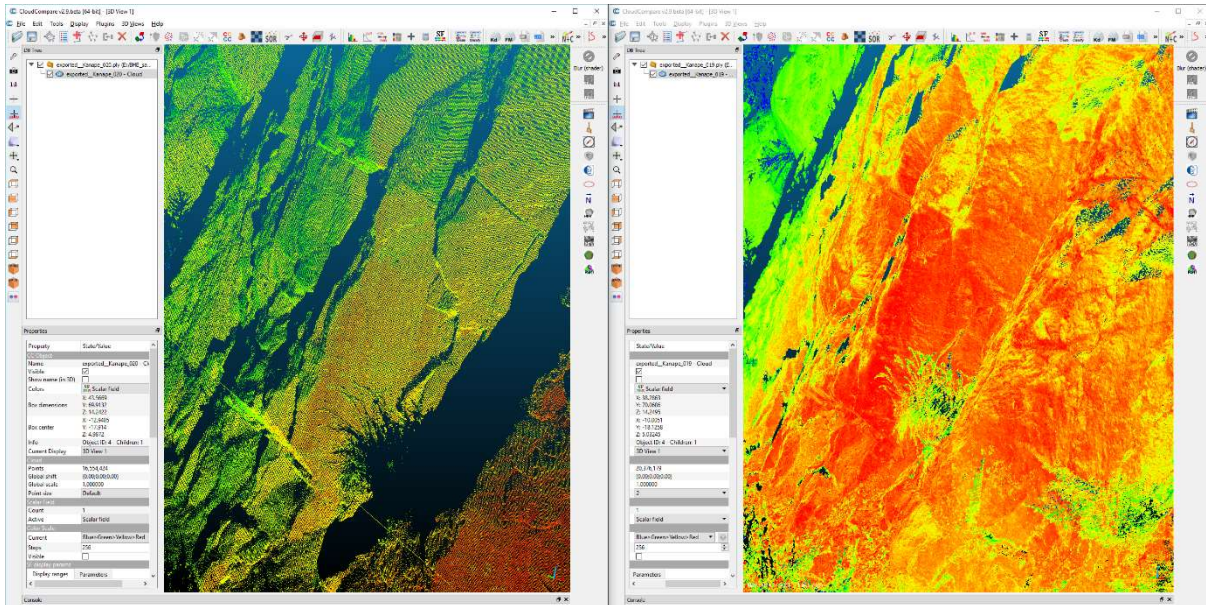
Mind a korábban említett 3 részre daraboláshoz, mind a fenti vágáshoz és tisztításhoz a CloudCompare szoftvert használtam.



15. ábra: Fokozatos lépésekben készül el a végső adatállomány

Ezt a lépést minden általunk kiválasztott síkra elvégeztem, a további vizsgálatok ezen pontfelhőn lettek végrehajtva.

További extra előkészítést igényelt az intenzitásértékek vizsgálata, éppen a 5.3 fejezetben leírtak miatt. Ahhoz, hogy megfelelő kapcsolatot kereshessünk az intenzitásértékek és a falfelületek nedvességtartalma között, a síkokat egyetlen álláspontból végzett szkennelés pontfelhőjéből kellett kivágni. Ehhez a korábban említett síkokhoz egyenként kiválasztottam a legmegfelelőbb álláspontokat (16. ábra), majd a korábban ismertetett vágási és szűrési módszerrel elkészítettem az adatállományt. Az így kapott pontfelhők jellemzően kisebb pontsűrűséggel rendelkeznek, ugyanakkor az egyes pontok intenzitásértéke összhangban van a többivel, nem úgy, mint az összes álláspontot tartalmazó pontfelhő esetében.



16. ábra: Ugyanaz a falsík két különböző álláspontról szkennelve, az eltérő pontsűrűség mellett az intenzitásértékek jelentős eltérése is megfigyelhető

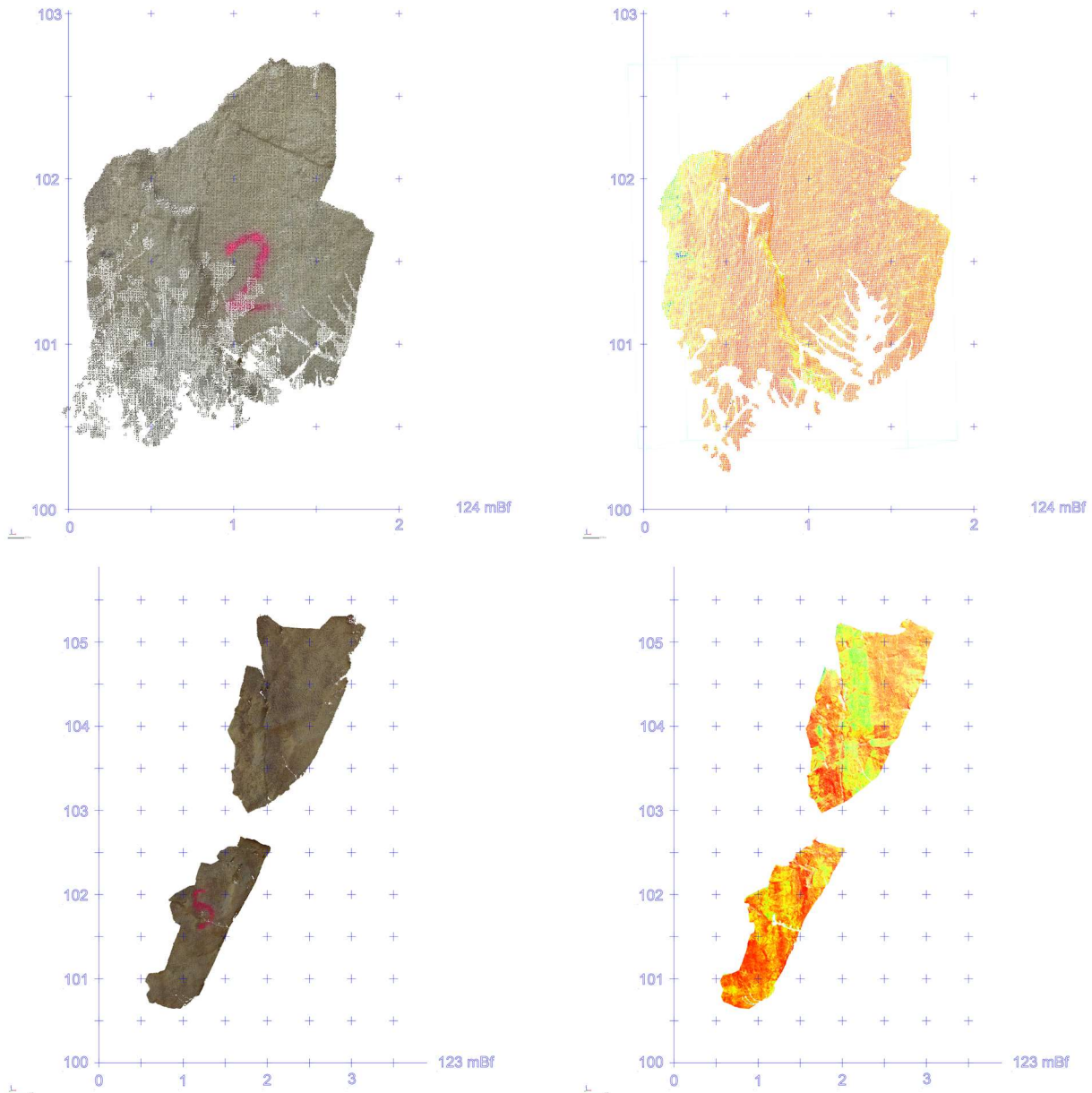
6.2. Ortonézetek előállítása

Ezek olyan speciális nézetei a pontfelhőnek, amelyek egyfajta térképnek tekinthetők, egyedi koordinátatengelyekkel. Információtartalma lényegesen nagyobb, mint egy helyszíni kézi rajz vagy vázlaté, geometriai pontossága pedig nagyobb, mint egy fényképfelvételé.

Ezeket a nézeteket Geomagic Design X szoftver segítségével készítettem, az alábbi lépéseket ismételve:

1. Elsőként importáltam a korábban előkészített adatállományok egyikét
2. Ezután síkot illesztettem a pontfelhőre a szoftver saját, beépített funkciójával
3. Majd készítettem egy második síkot, mely térben kicsivel a pontfelhő alatt helyezkedik el, vízszintes és fél méterre kerek Balti feletti magasságban található
4. Az így kapott két sík metszévonalát, mint vektort is elkészítettem
5. Elforgattam a nézetünket a fal síkjára (illesztett, elsőként létrehozott síkra) merőlegesen
6. Az így létrehozott elrendezésben megrajzoltam a pontfelhő köré a keretet:
 - 6.1. Vízszintes tengelyt vettem fel a két sík metszetének vonalában, így ismert magasságban rögzítettem azt. Ezt felirattal jelzem, pl. 124 mBf.
 - 6.2. Erre merőlegesen vettem fel a függőleges tengelyt, amely valójában nem párhuzamos az eredeti pontfelhő koordináta-rendszerének Z tengelyével, ez a függőleges tengely éppen a pontfelhőre illesztett sík síkjában fekszik.
7. A létrehozott egyedi koordináta-rendszert szükséges mértékben 0,5 vagy 1 méteres osztásközzel egészítettem ki, majd örkeresztekből rácshálót készítettem a pontfelhő egész felületére a könnyebb leolvasás érdekében.
8. Az így kapott munkát képként exportáltam

A fenti lépést minden falsíkon egyesével el kell végezni, mind egyedi koordináta-rendszert kap. Azonos síkhoz tartozó teljes pontfelhőből készült kivághathoz és az intenzitásvizsgálathoz készített egy álláspontról készült kivághathoz használható ugyanaz a keret, amennyiben a két pontfelhő azonos koordináta-rendszerben van.



17. ábra: Ortonézetek RGB színek és intenzitás értékek használatával

Ezek a nézetek könnyen használhatók irodai feldolgozás, ismételt terepi bejárás és vizsgálat során szemléltető ábraként, mérésre és azonosításra szolgáló térképi alapként vagy monitoring feladatokhoz, mint összehasonlítási alap (17. ábra). Az ortonézetek szolgálhatnak egyéb objektumok, területek (pl. repedések, törések és csúszások) megjelölésére, vektorizálására.

6.3. Intenzitásértékek elemzése

Ha a speciálisan erre a vizsgálatra előkészített kivágatokat CloudCompare-ben megnyitjuk, majd megjelenítjük az intenzitásértékeket, akkor az itt látható adatok alapján megállapításokat tehetünk a falsík felszínének nedvességtartalmával kapcsolatban. Érdekes az intenzitásértékeket a valódi színekkel párhuzamosan vizsgálni; általánosságban elmondható, hogy a jellemzően sötét részek jellemzően nedves felületet jelentenek (lásd 18. ábra).

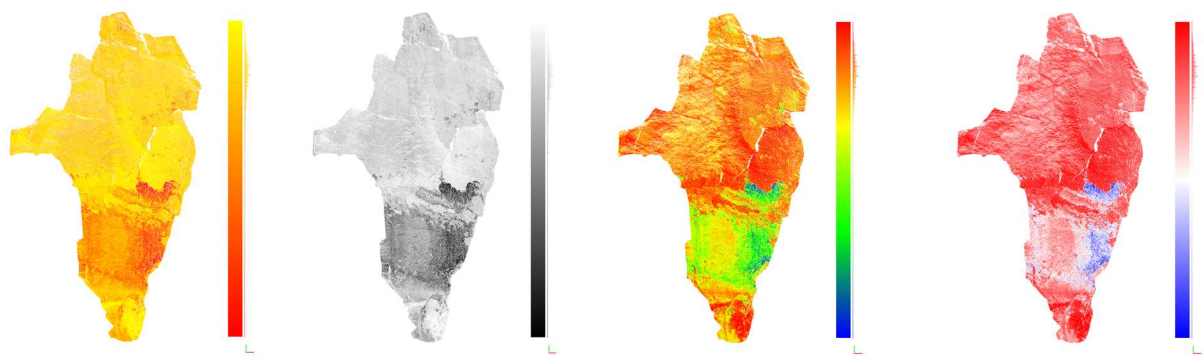


18. ábra: A 3-as és 8-as számú síkok valódi színes és intenzitásérték alapú képe

Látható az ábrán, hogy a 3-as számú sík színezett pontfelhő kivágata közel azonos árnyalatú, ebből arra következtethetünk, hogy felületén azonos mértékű a víztartalom, amely valószínűleg alacsony. Ezt a megállapítást erősíti az intenzitásérték ábrája, mely homogén vörös színben látható, tehát ténylegesen közel azonos a felszín menti víztartalom, ráadásul a környező felületekhez képest (melybe a növényzet és földfelszín is beleszámít, ugyan nem látható a kivágaton) alacsony a nedvességtartalma.

Ezzel szemben a 8-as számú síkon egyértelmű sötét foltot fedezhetünk fel az alsó részen. Felette, hasonlóan a 3-as síkhoz, világos részeket látunk. Gondolhatjuk tehát, hogy alul magasabb a víztartalom, mint a felső részen, amelyet az intenzitáskép megerősít, ténylegesen eltérés tapasztalható a két rész között.

A megjelenítésnél többféle színskála opció közül választhatunk, amelyek nem befolyásolják az intenzitásértékeket, de lehetséges, hogy az új nézőpont eddig rejtve maradt információk felismerésre vezethet. Attól függően, hogy milyen céllal vizsgáljuk a nedvességtartalmat, egyik vagy másik megjelenítés jobb vagy kevésbé jobb, kiemel vagy elrejt bizonyos részleteket (lásd 19. ábra).



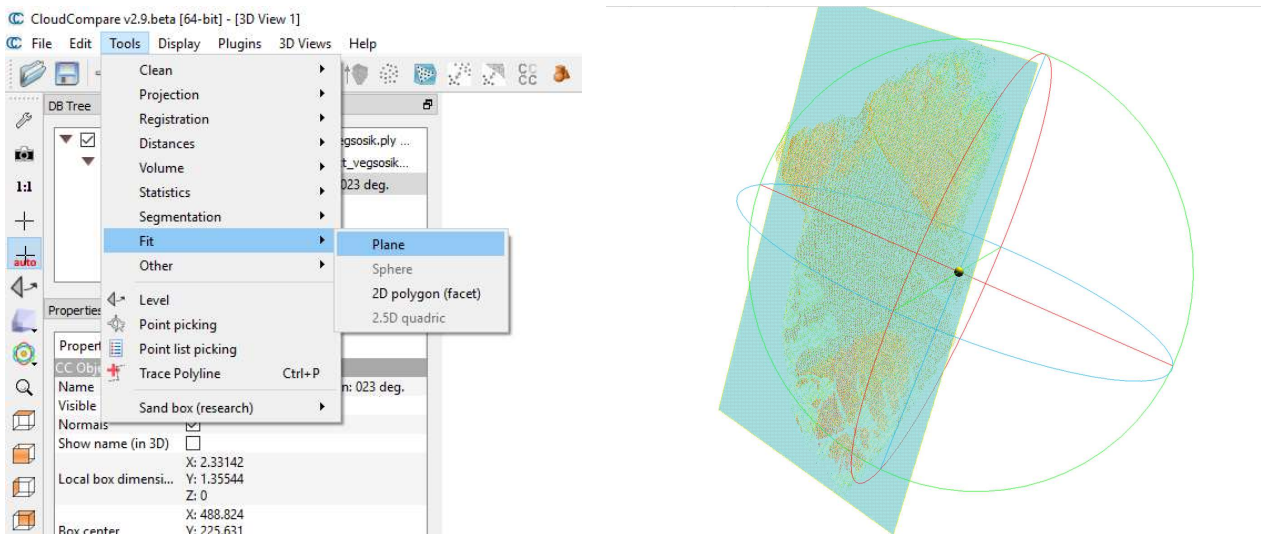
19. ábra: Többféle megjelenítés eltérő színskálák használatával

Az egyes skálák a vörös színt eltérő szélsőértékként kezelik, így például az első sárga-vörös skála a figyelmet inkább a nedves felületre helyezi, ahogy az ezt követő szürke árnyalatos ábrázolás is ezt teszi, de kissé finomabb módon. Ezzel szemben a kék-zöld-sárga-vörös a hangsúlyt éppen a szárazabb felületekre helyezi, ugyanakkor árnyalja a skála középső és alsó részeit. A kék-fehér-vörös hasonlóképpen a száraz részeket hangsúlyozza, de éles határt húz a skála közepénél. Természetesen minden megjelenítés szabadon és részletesen paraméterezhető.

Ismételten megjegyzendő, hogy az így kapott, vagy ezen értékekből levezetett víztartalmi mutatók csak relatív adatok, viszonylagosságukat is csak az azonos állásból levezetett értékek egymáshoz hasonlításához lehet használni. Tehát közvetlen módon víztartalmat számítani ezen intenzitásértékekből nem lehet! Ugyanakkor a helyszínen végzett referáló mérésekkel az intenzitásértékek kalibrálhatók lehetnének, így lehetséges lenne tetszőleges pontra abszolút értékű víztartalom számítása.

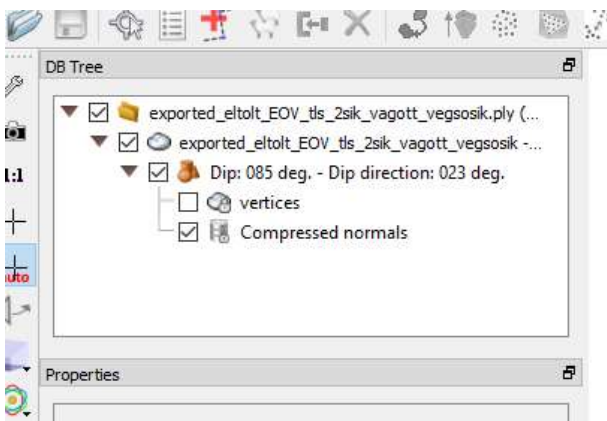
6.4. Dőlésszögek és dőlésirányok meghatározása

A 4.3 bekezdésben ismertetett geológiai vizsgálathoz hasonlóan mi is elvégezhetünk. A korábban vizsgált síkokról készített kivágatokat egyszerűen megnyitjuk CloudCompare-ben, majd a Tools – Fit – Plane parancs segítségével kiegyenlítő síkot illesztünk rájuk (20. ábra).



20. ábra: Sík illesztése pontfelhőre

A szoftver által számított sík adatai ezután a bal szélső panelen leolvashatók (21. ábra). A dőlésszög és a dőlés iránya fok mértékegységben kerül megadásra, így összevethető a geológus szakemberektől korábban megkapott mérésekkel. Az alábbi táblázatban a GMT jelöli a Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszék mérésének eredményeit, az FMT pedig a Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék, vagyis az általunk végzett vizsgálatok eredményeit. Az Irány (irányultság) határozza meg a falsík helyzetét a térben, vagyis a vízszintes szöveget, a Szög pedig a vízszintessel bezárt magassági szöveget.



21. ábra: Illesztett sík adatai

sík sorszám	GMT		FMT	
	Irány	Szög	Irány	Szög
2	61	88	23	85
3	123	89,6	2	87
4	322	87,6	276	86
5	36	74	30	78
6	331	59	300	58
8	317	87	298	89
9	259	71	229	66

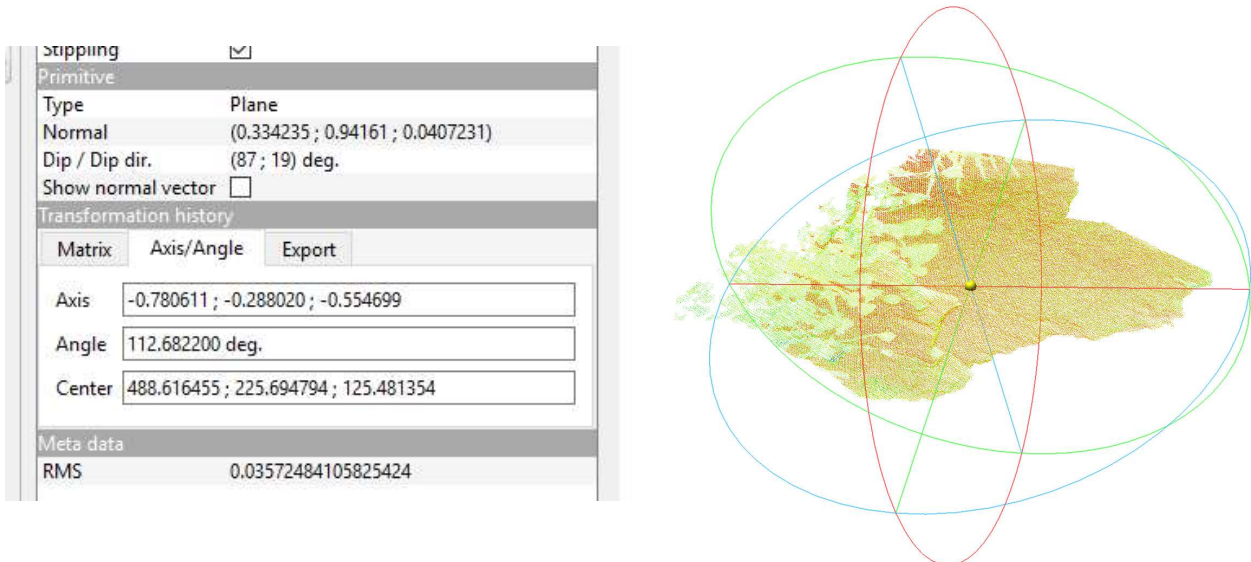
1. táblázat: Síkok dőlésirányai és dőlésszögei

A kétféle módszerrel történő meghatározás között a dőlésszögérték tekintetében egészen kicsi (átlag: 2,7 fok, valamint szórás: 1,4 fok) eltérések vannak. A telefon apró méreténél fogva csak kis felületen modellezi a vizsgált fal tulajdonságait, épp ott, ahol hozzáértették a falhoz. A mi módszerünk a teljes falfelület egészét figyelembe veszi annak minden hibájával és egyenetlenségével együtt.

A dőlésirány értékek esetében elég nagy (átlag: 42 fok, szórás: 37 fok) eltérések vannak, ennek kiderítésére részletesebben meg kellene ismerni a telefonos mérés körülményeit és a szoftver működését. Feltehetőleg, a CloudCompare és a mobil applikáció eltérő koordináta-rendszert használ.

6.5. Repedések automatikus keresése

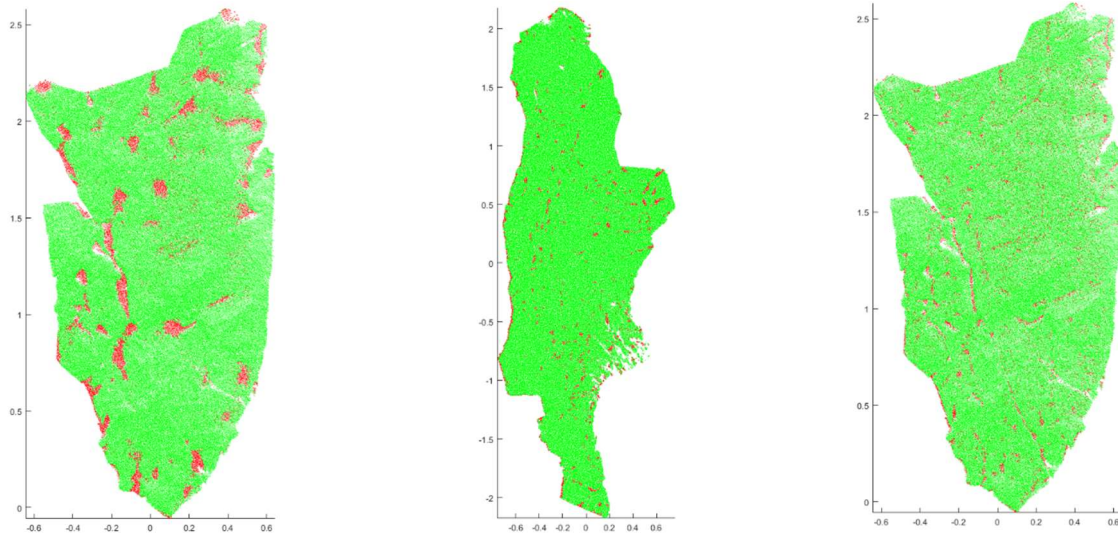
A repedések automatikus detektálására kipróbáltuk a tanszék által, eredetileg kis tárgyak felületén lévő, részletgazdag, vésett minta megtalálására fejlesztett mélypontkereső algoritmust is. [13] Ehhez elsőként a kivágatokat el kellett forgatnunk úgy, hogy közel vízszintesen fekdjjenek, normálisuk a Z tengellyel párhuzamos és annak pozitív irányába mutasson.



22. ábra: Balra az illesztett sík paraméterei (ezekkel ellentétesen forgatunk), jobbra egy már elforgatott sík (kék szín jelöli a Z tengelyt)

Ennek eredményeként kapjuk a fenti ábrán látható helyzetet, amely már alávethető a keresőalgoritmusnak; a falsík ezen helyzetében éppen a földfelszín domborzatának egy darabjaként viselkedik, Z értéke a felszínközeli pont magassága lesz, X és Y értékei pedig a vízszintes helyzete.

Sajnos a próbálkozásaink nem jártak sikerrel, több síkon is próbálkoztunk a keresőalgoritmussal, eltérő paraméterezéssel, de egyik eredmény sem volt megfelelő. Felmerült ötletként, hogy az egyes eredmények különbségének vagy összegének képzésével talán megkapjuk a repedések képét, de ez sem hozott eredményt. Néhány szemléltető kép a sikertelen keresés eredményéről:



23. ábra: Repedéskeresés eredménye

Lehetséges, hogy a keresőalgorithmus további finom paraméterezésével vagy másik szoftver használatával lehetséges lenne a repedések megtalálása. Ugyanakkor megjegyzendő tény, hogy több méter magas falsíkokról beszélünk, melyeket szinte a legalsó pontjukról szkenneltünk. Ennek következményeként a repedések sokszor inkább szabálytalan lyukként vagy hirtelen szakadékként jelennek meg a pontfelhőben, nem pedig völgyszerű mélyedésben rajzolódnak ki, mint amelyek keresésére ezen algoritmust fejlesztették.

7. Eredmények értékelése

Az elkészült ortonézetek munkám legfontosabb és leghasznosabb eredményei, pontos és információdús térképi állományok, amelyek nyomtatott formában vagy digitális állományokként is tovább elemezhetők, ezzel megannyi további információ és következtetés kinyerését teszik lehetővé. Az intenzitásértékek vizsgálatával egyszerűen és gyorsan kereshetjük meg a fal lokális és globális nedvességtartalmi egyenetlenségeit, pontosíthatjuk a helyszínen szemrevételezéssel tett becsléseinket speciális vizsgálatok nélkül. A dőlésirányok és dőlésszögek meghatározása a hagyományos, diszkrét pontokban történő vizsgálati módszerekkel szemben pontosabb eredményt ad, valamint lehetőséget biztosít utólag a felmért felület bármely részének elemzésére.

A sikertelen automatizált repedéskeresési kísérletünk további kutatómunkának adhat megfelelő alapot. Akár a használt algoritmus továbbfejlesztése, akár más fejlesztők megoldásainak kipróbálása (pl. SagaGIS) is opció lehet, nem mellesleg az ortonézetek használatával manuálisan is lehetséges a repedések digitalizálása.

Továbbá az elvégzett mérésből részletes modellt kaptunk a sziklafal geometriájáról, amely akár meglévő térképekkel való összevetés után egy javított állomány előállítására használható. A nagy felbontású pontfelhőn vizsgálhatunk tagoltságokat és azok elhelyezkedését, elvégezhető a közzettest osztályozása. A 3D modellen azonosíthatók főbb törésrendszerek, illetve hasadékok. A modellben felvehetők illetve bemérhetők a térképezést megelőzően telepített monitoring pontok, például beépített fix szegek vagy csavarok. Ezek segítségével nem csak a térképek javíthatók, hanem későbbi újramérések alkalmával pontos mozgás- és deformációvizsgálatok is végezhetők. [14]

Végezetül, a mérnökgeológiától kissé elrugaszkodva, méréseinket AR (Augmented Reality) és VR (Virtual Reality) megjelenítés használatával az üzemeltetők és dolgozók számára akár többletinformáció átadására prezentálhatjuk. A 3D modell más szakmák számára is hasznos lehet, például új munkagépek vagy szállítószalagok tervezéséhez vagy robbantások előkészítéséhez.

8. Összefoglalás

Kutatásom célja, hogy tapasztalatot szerezzek, a földmérő-térinformatikusok által alkalmazott adatgyűjtési módszerek segítségével milyen szinten lehetséges támogatni egy mérnökgeológiai vizsgálatot. Ennek kiderítésére a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Geotechnika és Mérnökgeológia Tanszéke által a sárbogárdi külszíni fejtésű bányában végzett vizsgálatokon vettem részt.

A geológiai vizsgálatok szempontjából érdekes falszakaszt földi lézerszkenneléssel és UAV fotogrammetriai technikával is felmértük, a mérés során az illesztőpontokat GNSS-szel határoztuk meg. A mérések elemzése során CloudCompare és Geomagic Design X szoftvert használtam. A falsíkok előkészítésekor azokat kivágtam a teljes pontfelhőből, majd ezután kezdődhettek a különböző vizsgálatok. Elsőként ortonézeteket készítettem, melyek az egyszerű pontfelhőből egy rá illesztett sík segítségével egyedi koordináta-rendszert megvalósítva képeznek hasznos térképi adatot. Majd az intenzitásértékekkel foglalkoztam, melyek segítségével összehasonlító elemzéseket végeztem a falsíkok nedvességtartalmával kapcsolatban. Itt rámutattam, hogy ezen nedvességtartalmi megállapítások csak további helyszíni referáló mérésekkel együtt adnának abszolút értékű adatokat. Ezután a falsíkok dőlésszögének és dőlésirányának, mint jellemző geometriai adatainak, pontfelhő alapú megállapítását végeztem el, valamint összevettem a mérnökgeológus kollégák által végzett mérések eredményével. Végezetül kísérletet tettem a repedések automatikus felismerésére a Fotogrammetria és Térinformatika Tanszéken korábban eltérő célra fejlesztett algoritmussal, melynek sikertelenségéről és a lehetséges további próbálkozásokról is beszámoltam.

Kutatásom eredményeképpen elmondható, hogy hagyományos és nem kifejezetten felső kategóriás fotogrammetriai adatgyűjtő eszközökkel, valamint az iparban gyakran alkalmazott szoftverek segítségével könnyen javítható egy mérnökgeológiai vizsgálat hatékonysága. Hiszen a falfelületet nem diszkrét pontokkal közelítjük, hanem annak teljes felületéről részletes és nagy elemszámú mintát veszünk.

9. Irodalomjegyzék

- [1] A. Török *et al.*, “A Siroki vár sziklafalainak állékonyság vizsgálata: a térinformatika és mérnökgeológia együttes alkalmazása Cliff Stability Analyses at Sirok Castle : Geoinformatics and Engineering Geology,” vol. 16, no. 2015, pp. 353–366.
- [2] “Sárbogárd - Wikipedia.” [Online]. Available: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Sárbogárd>. [Accessed: 23-Oct-2017].
- [3] FARO, “FARO Focus3D Features, Benefits & Technical Specifications,” 2013.
- [4] H. Moon, C. Kim, and W. Lee, “A UAV based 3-D positioning framework for detecting locations of buried persons in collapsed disaster area,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 41, no. July, pp. 121–124, 2016.
- [5] E. Levin, A. Zarnowski, J. L. McCarty, J. Bialas, A. Banaszek, and S. Banaszek, “Feasibility study of inexpensive thermal sensors and small UAS deployment for living human detection in rescue missions application scenarios,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. - ISPRS Arch.*, vol. 41, no. July, pp. 99–103, 2016.
- [6] I. Labadie, “Microelectronics and Packaging for Uav Payloads,” *IMAPS - SoCal 2015*, pp. 14–16, 2015.
- [7] P. C. Miller, “UAV Sensor Sensibility,” 2016. [Online]. Available: <http://www.uasmagazine.com/articles/1457/uav-sensor-sensibility>. [Accessed: 25-Oct-2017].
- [8] DJI, “Phantom 4 PRO - User Manual V1.4,” 2017.
- [9] D. Girardeau-Montaut, M. Roux, R. Marc, and G. Thibault, “Change detection on points cloud data acquired with a ground laser scanner,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, vol. 36, no. 3, p. W19, 2005.
- [10] “CloudComplare Official Webpage.” [Online]. Available: <http://www.danielgm.net/cc/>. [Accessed: 24-Oct-2017].
- [11] “Geomagic Design X.” [Online]. Available: <https://www.artec3d.com/3d-software/geomagic-design-x>. [Accessed: 24-Oct-2017].
- [12] “Geomagic Official Webpage.” [Online]. Available: <http://www.geomagic.com/en/>. [Accessed: 23-Oct-2017].
- [13] N. Rehány, A. Barsi, and T. Lovas, “Capturing fine details involving low-cost sensors - a comparative study,” *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.*, p. 8, 2017. (közlésre elfogadva)
- [14] N. Lódy Éva, N. Rehány, T. Lovas, and P. Görög, “Barlangfelmérés lézerszkennelvel és az eredmények mérnökgeológiai felhasználhatósága,” pp. 133–148, 2015.